



الفيزياء / ٢ /





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الفيزياء / ٢ /

الدكتور
بسام المغربي
أستاذ في قسم العلوم الأساسية

الدكتور
عماد أسعد
مدرس في قسم العلوم الأساسية

الدكتور
محمد حمود
مدرس في قسم العلوم الأساسية

جامعة دمشق



١٧	الباب الأول : القيزياء الخفيفة
١٩	الفصل الأول : النسبية
٢٢	١-١ نسبية نيوتن
٢٢	١-٢ تجربة مايكلسون ومورلي
٢٦	١-٣ مسلمتا أينشتاين
٢٦	١-٤ تحويل لورنتز
٣٥	١-٥ ظاهرة دوبلر
٣٧	١-٦ تحويل السرعة
٣٩	١-٧ الاندفاع النسبي
٤١	١-٨ الطاقة النسبية
٤٥	١-٩ النسبية العامة
٥١	تمارين مسائل
٥٧	الفصل الثاني : التكميم
٦٠	٢-١ مصدر ثابت التكميم (إشعاع الجسم الأسود)
٦٢	٢-٢ المفعول الكهروضوئي
٦٨	٢-٣ الأشعة السينية
٧٠	٢-٤ تبعثر كومبتون
٧٢	٢-٥ تكميم طاقات الذرة (نموذج بور)
٧٨	٢-٦ مسلمة دوبروي
٨٢	٢-٧ رزم الأمواج
٨٤	٢-٨ علاقات هايزنبرغ في الارتباب

٨٦	٢-٩ معادلة شرودينغر
٨٨	٢-١٠ أسلوب حل المسائل الفيزيائية
٩٠	٢-١١ تطبيقات
٩٨	٢-١٢ الأعداد الكمومية
١٠٣	تمارين مسائل
١٠٩	الفصل الثالث : الفيزياء النووية والنشاط الإشعاعي
١١١	٣-١ بنية النواة
١١٢	٣-٢ القوة النووية الشديدة واستقرار النواة
١١٤	٣-٣ طاقة الارتباط النووي
١١٧	٣-٤ النشاط الإشعاعي
١٢٤	٣-٥ الترتينو
١٢٥	٣-٦ قانون التفكك الإشعاعي
١٢٨	٣-٧ التاريخ بالنشاط الإشعاعي
١٣٠	٣-٨ سلاسل التفكك الإشعاعي
١٣١	٣-٩ كواشف الإشعاع
١٣٥	٣-١٠ التأثير البيولوجي للأشعة المؤينة
١٤١	٣-١١ التفاعلات النووية
١٤٣	٣-١٢ الانشطار النووي
١٤٦	٣-١٣ المفاعلات النووية
١٥٠	٣-١٤ الاندماج النووي
١٥٥	تمارين ومسائل
١٦١	<u>الباب الثاني : الكهرباء الساكنة</u>

١٦٣	الفصل الأول: الشحنات الكهربائية و القوى الكهربائية
١٦٥	1 - 1 الشحنة الكهربائية
١٦٨	1 - 2 التركيب الذري للمادة
١٦٩	1 - 3 النواقل و العوازل
١٧٠	1 - 4 طرق التكهرب أو الشحن
١٧١	1 - 5 تجارب فارادي في الكهرباء الساكنة
١٧١	1 - 6 قانون كولون
١٧٩	تمارين ومسائل
١٨١	الفصل الثاني: الحقل الكهربائي
١٨٣	2 - 1 تعريف الحقل الكهربائي
١٨٥	2 - 2 حساب شدة الحقل الكهربائي
١٨٧	2 - 3 تطبيقات على حساب شدة الحقل الكهربائي
١٩٦	2 - 4 خطوط الحقل الكهربائي
١٩٨	2 - 5 ثنائي الأقطاب الكهربائي
٢٠٣	تمارين ومسائل
٢٠٩	الفصل الثالث: قانون غاوس
٢١٣	3 - 1 التدفق الكهربائي
٢١٥	3 - 2 تعميم التدفق الكهربائي
٢١٥	3 - 3 قانون غوص
٢١٩	3 - 4 تطبيقات على قانون غوص
٢٢٩	تمارين ومسائل
٢٣١	الفصل الرابع: الكمون الكهربائي

٢٣٣	4 - 1 الطاقة الكهربائية الكامنة في حقل كهربائي منتظم
٢٣٤	4 - 2 الطاقة الكهربائية الكامنة لشحنتين نقطيتين
٢٣٧	4 - 3 الطاقة الكهربائية الكامنة لعدة شحنات نقطية
٢٣٧	4 - 4 الكمون الكهربائي
٢٣٩	4 - 5 فرق الكمون
٢٤٥	4 - 6 تطبيقات على حساب الكمون الكهربائي
٢٤٨	4 - 7 سطوح تساوي الكمون
٢٥٠	4 - 8 تدرج الكمون
٢٥١	4 - 9 تطبيقات على إيجاد الحقل من الكمون
٢٥٣	تمارين ومسائل
٢٥٩	الفصل الخامس: السعة والعسواز
٢٦١	5 - 1 السعة الكهربائية لناقل
٢٦٢	5 - 2 السعة والمكثفات
٢٦٤	5 - 3 حساب سعة المكثفات في الخلاء
٢٦٩	5 - 4 وصل المكثفات
٢٧٢	5 - 5 السعة المكافئة
٢٧٤	5 - 6 الطاقة المخزنة في المكثفات
٢٧٥	5 - 7 طاقة الحقل الكهربائي
٢٧٩	5 - 8 العوازل
٢٨٩	تمارين ومسائل

٢٩٩	الباب الثالث : أنصاف النواقل والليزر وتطبيقاته
٣٠١	الفصل الأول : أنصاف النواقل
٣٠٤	1-1 - المعادن والعوازل وأنصاف النواقل
٣٠٦	2 - 1 البنية البلورية والترايط في أنصاف النواقل
٣٠٧	3 - 1 البنية المبسطة لعصابات الطاقة
٣١٠	4 - 1 الانتقالات المباشرة وغير المباشرة في أنصاف النواقل
٣١٢	5 - 1 تركيز حوامل الشحنات في نصف الناقل الذاتي
٣١٥	6 - 1 أنصاف النواقل المشوبة
٣٢٠	7 - 1 سوية فرمي في أنصاف النواقل المشوبة
٣٢١	8 - 1 زمن حياة الحامل في أنصاف النواقل
٣٢١	9 - 1 الوصلة $P - n$
٣٢٨	10 - 1 ديود زينر
٣٣١	11 - 1 الثنائي أو الديود النفقي
٣٣٥	12 - 1 الخلية الشمسية
٣٣٩	ثانياً : الليزر وتطبيقاته
٣٤١	مقدمه
٣٤٣	الفصل الأول : طبيعة أشعة الليزر وخصائصها
٣٤٥	I - 1 - ما هو الليزر؟
٣٤٥	I - 2 - اكتشاف أشعة الليزر
٣٤٧	I - 3 - خصائص شعاع الليزر
٣٤٩	I - 4 - المكونات الأساسية لجهاز الليزر

٣٥٠	I-5- نظرية توليد أشعة الليزر
٣٥٧	I-6- تعداد الذرات في حالة التوازن الحراري
٣٥٨	I-7- معاملات اينشتاين
٣٦٤	I-8- عرض الخط الطيفي
٣٧١	I-9- امتصاص الاشعاع الكهرومغناطيسي
٣٧٢	I-10- معامل الريح الأصغري
٣٧٩	I-11- التقلية العكسية الضوئية
٣٨٦	I-12- أنماط الليزر
٣٩٣	الفصل الثاني: الليزر وتطبيقاتها أنظمة
٣٩٥	١. ليزر المواد الصلبة
٣٩٥	٢. ليزر أنصاف النواقل
٣٩٧	٣. الليزر الغازي
٣٩٩	٤. ليزر "الأكترامر"
٤٠١	<u>الوقاية من أشعة الليزر</u>
٤٠٢	تطبيقات الليزر
٤٠٢	أولاً: في مجال الطب

٤٠٧	١. المجهر الضوئي
٤٠٨	٢. المنظار الضوئي ذو الألياف البصرية.
٤٠٨	٣. الجراحة العامة
٤١٠	٤. علاج العيون
٤١١	٥. علاج الجلد
٤١١	٦. علاج الأسنان
٤١٩	٧. علاج الجهاز الهضمي
٤٢٠	ثانياً: في مجال الاتصالات
٤٢٤	٢-١ مكونات الليف البصري
٤٢٦	٣-١ - كيف تعمل الألياف البصرية وكيف توصل الضوء
٤٢٩	<u>مميزات الألياف البصرية</u>
٤٣٥	ثالثاً: الأقراص البصرية
٤٣٧	رابعاً: الطباعة
٤٣٨	خامساً: الهولوجرافي
٤٤٠	سادساً: فحص السلوح
٤٤١	سابعاً: تشغيل المواد

٤٤٤	ثامناً: في أعمال المساحة والخرائط
٤٤٥	تاسعاً: في مجال البيئة
٤٤٦	عاشراً: في مجال الفضاء
٤٤٧	حادي عشر: قياس سرعة الرياح
٤٤٨	ثاني عشر: الاستخدامات العسكرية لليزر
٤٥٠	اتجاهات التطور المستقبلية لتقنيات وتطبيقات الليزر
٤٦٧	-المراجع العلمية-

مقدمة

يعد علم الفيزياء ، كما ذكرنا في مقدمة كتاب الفيزياء (١) أحد فروع العلوم الأساسية الذي تبنى عليه كافة العلوم الأخرى ، كالعلوم الطبية والهندسية والإلكترونية وغيرها ، وقد ساهم علم الفيزياء في تفسير كثير من الظواهر التي صادفت الإنسان منذ خلقه حتى يومنا الحاضر ، وقد أعد كتاب الفيزياء (٢) ليتمم كتاب الفيزياء (١) ويكون كتاباً جامعياً في الفيزياء العامة لطلاب السنوات الأولى في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق في الفصل الثاني من العام الدراسي ، وحاولنا من خلال هذا الكتاب ، تلبية حاجات طلابنا الأعزاء من علم الفيزياء ، بما يتناسب مع الإختصاصات الموجودة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة دمشق ، وإبراز المفاهيم الفيزيائية التي تحكم الظواهر الفيزيائية المحيطة بنا والإنطلاق بها إلى النموذج النظري المناسب وإعطاء التطبيقات العملية عليها .

وكانت الأهداف الأساسية وراء إنجاز هذا الكتاب هي :

- ١- تقديم مدخل متوازن لبعض الظواهر والمبادئ المهمة في الفيزياء العامة بطريقة تعكس جمال مادة الفيزياء وإثارتها من خلال تطبيقاتها العملية والتي ترتبط بحياتنا اليومية ، وكذلك تقديم الأساس الصلب الذي يساعد الطالب في متابعة دراسته .
- ٢- عرض مقرر الفيزياء بأسلوب منطقي ومترابط يثير اهتمام الطالب ويتمتع بسهولة التناول والمتابعة .
- ٣- مساعدة الطالب في بناء ثقتهم الذاتية في فهم مادة الفيزياء وتحسين مهارتهم في حل المسائل .

٤- تحريض الطلاب وحثهم على الإبداع من خلال إطلاعهم على بعض التطبيقات الفيزيائية وتطورها واستعمالها في حياتنا اليومية والتقنية المعاصرة .

ويتألف هذا الكتاب من ثلاثة أبواب رئيسة ، ففي الباب الأول وهو في الفيزياء الحديثة وقام بتأليفه الأستاذ الدكتور بسام المغربي ، نجد دراسة للنظرية النسبوية الخاصة وتعرضاً بإيجاز للنظرية النسبوية العامة ، نعالج بعدها النظرية الكمومية مسلطتين الضوء على الأفكار الأساسية في تكسيم الطاقة . ثم نتابع دراسة بعض الخواص العامة لنوى الذرات ، وكذلك الإشارة إلى مظاهر النشاط الإشعاعي ، ومعالجة بعض التفاعلات النووية مروراً بتفاعلي الانشطار والاندماج وتفاعل الجسيمات النووية مع المادة . ونتعرف في الباب الثاني وهو في الكهرباء الساكنة وقام بتأليفه الدكتور محمد حمود ، على الحقل الكهربائي فنناقش الخواص العامة للحقول الكهربائية الساكنة وكيفية حساب الحقل ، وندرس سلوك الشحنات النقطية وثنائيات الأقطاب ضمن الحقول الكهربائية ، نتقل بعدها لنظرية غاوص ثم دراسة النواقل والطاقة الكهربائية الساكنة وفكرة الكمون الكهربائي تمهيداً لاستعمالها في تعريف المكثفات وحساب سعاتها والطاقة الكهربائية المخزنة فيها . وفي الباب الثالث وهو في الليزر وقام بتأليفه الدكتور عماد أسعد ، نجد فصلاً عن توليد أشعة الليزر ونظرياتها وخواصها وأجهزتها وبعض من تطبيقاتها بهدف اطلاع الطلاب على هذا العلم بغية الأخذ به ومواكبة تقدمه وتطوره .

تمت مقارنة الفهم الفيزيائي وتحسين مهارة حل المسائل بالاستعمال المكثف والمتكامل للأمثلة موضحين أن الفيزياء ليست علاقات رياضية مجردة وإنما تستعمل الرياضيات من أجل تبويب النتائج والتصورات وترجمتها إلى قوانين وعلاقات تهتم بالجانب الكمي وتوفر إمكان استقراء نتائج أكثر وتفسيرات أعمق .

نتمنى أن نكون قد وفقنا في تقديم هذا الكتاب لطلابنا الأعزاء في السنوات الأولى من كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، كما نرجو أن يجد القارئ المنفعة

العلمية فيه وأن يكون معيناً له في دراسته الجامعية ، آمليين أن نكون قد ساهمنا في إغناء
جامعتنا ومكتبتنا العربية بكتاب علمي جديد .
وأخيراً ، نتوجه بالإمتنان والشكر الجزيل إلى زملائنا الأكابر وطلابنا الأعزاء والقارئین
لهذا الكتاب ، إذا أبدوا لنا ملاحظاتهم وآرائهم حول أي موضوع قصصنا في معالجته أو
أهملنا في عرضه لكي نتلاقى في المستقبل ما يمكن أن نكون قد وقعنا فيه من هفوات .

المؤلفون : د. عماد أسعد د. محمد حمود أ. د. بسام المغربي



الباب الأول
الفيزياء الحديثة
Modern Physics



اعتقد كثير من الفيزيائيين ، مع نهاية القرن التاسع عشر ، أن جميع القوانين المهمة في الفيزياء قد اكتشفت وبقي القليل مما يجب عليهم فعله في إنجاز التفاصيل المتبقية . فقوانين نيوتن قادرة على وصف كل الحركات المعروفة على الأرض والكواكب والأجرام السماوية الأخرى . كما تعطي معادلات ماكسويل في الكهرباء والمغناطيسية وصفاً كاملاً للظواهر الكهرومغناطيسية . وحتى مع بدء ظهور أدلة العالم المجري للجزيئات و الذرات فقد افترض إمكان وصف هذه الظواهر الجديدة بنظريات نيوتن وماكسويل . ومع ذلك فإن اكتشاف النشاط الإشعاعي من قبل بيكريل عام ١٨٩٦ ومقالات بلانك النظرية عام ١٨٩٧ ونظرية أينشتاين عام ١٩٠٥ وعمل كل من رزفورد وميليكان وبور ودوبري وشرودينغر وهايزنبرغ وغيرهم في مطلع القرن العشرين قاد إلى نظريتين جديدتين هما النظرية النسبية و ميكانيك الكم . وقد أحدثت هاتان النظريتان ثورة علمية وأصبحتا أساساً للتقنيات الجديدة التي غيرت وجه الحضارة .

سندرس في هذا الفصل النظرية النسبية ، وهي تتألف من نظريتين مختلفتين هما النسبية الخاصة والنسبية العامة . فالنظرية النسبية الخاصة التي طورها أينشتاين وغيره عام ١٩٠٥ ، تهتم بمقارنة القياسات المنفذة في أطر عطالية مرجعية مختلفة تتحرك بالنسبة لبعضها البعض بسرعة ثابتة . وتطبق النتائج المترتبة على هذه النظرية ، والتي يمكن الوصول إليها باستعمال علاقات رياضية بسيطة ، على حالات كثيرة مختلفة ترد في علوم الفيزياء والهندسة . بينما تهتم النظرية النسبية العامة التي طورها أينشتاين وآخرون عام ١٩١٧ ، بالأطر العطالية المرجعية المتسارعة و بالثقالة . ويتطلب الفهم الكامل للنسبية العامة رياضيات متقدمة مثل التحليل التفاضلي ، كما أن تطبيقات هذه النظرية محصورة تقريباً في التجاذب الكتلي لذلك نجدها مهمة جداً في علم الفلك وبناء على ما تقدم سيكون اهتمامنا منصّباً على النسبية الخاصة وستعرض بإيجاز إلى النسبية العامة في الفقرة الأخيرة من هذا الفصل .

١-١ نسبية نيوتن

لا يحيز قانون نيوتن الأول بين الجسم الساكن والجسم الذي يتحرك بسرعة ثابتة . فإذا لم تؤثر أية قوة خارجية على الجسم فإنه يبقى على حالته الابتدائية — إما ساكناً أو متحركاً بسرعيته الابتدائية نفسها . فإذا نظرت إلى جسم ساكن بالنسبة إليك لا تؤثر عليه أية قوة خارجية . فاستناداً إلى قانون نيوتن الأول سيبقى هذا الجسم ساكناً . أما إذا نظر إلى الجسم نفسه شخصاً يتحرك بالنسبة إليك بسرعة ثابتة (موجود في إطار عطالي مرجعي آخر) فسرى أنك والجسم تتحركان بالنسبة إليه بسرعة ثابتة . فقانون نيوتن الأول يصبح أيضاً بالنسبة إليه . (إذا كان الشخص الآخر متسارعاً بالنسبة إليك فسرى الجسم متسارعاً بالنسبة إليه بدون أن تؤثر عليه أية قوة خارجية . أي أن قانون نيوتن الأول لا ينطبق عليه) . فقانون نيوتن الأول يصبح في الأطر العطالية المرجعية وهي الأطر التي تتحرك بالنسبة لبعضها البعض بسرعة ثابتة . فكرات البليارد تسلك السلوك نفسه في حالة وجودها على اليابسة أو على باخرة تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لليابسة ، ولا يوجد تجربة ميكانيكية ممكنة تستطيع إخبارنا أي من الإطارين ساكن وأيهما متحرك ، أو أنهما متحركان بسرعتين ثابتتين مختلفتين . وتعرف هذه النتيجة بمبدأ نسبية نيوتن ومفادها هو عدم إمكان الكشف عن الحركة المطلقة ، فهل هناك تجربة غير ميكانيكية (كهربائية ، مغناطيسية ، ضوئية ، حرارية ،) . نستطيع من خلالها الكشف عن الحركة المطلقة ؟

١-٢ تجربة مايكلسون ومورلي

نحن نعلم من خلال دراستنا للحركة الموجية ، أن جميع الأمواج الميكانيكية تتطلب وسطاً يؤمن انتشارها ، وترتبط سرعة انتشار مثل هذه الأمواج بخواص الوسط فقط . فسرعة الصوت في الهواء الساكن مثلاً ترتبط بدرجة حرارة الهواء . أي أننا

نستطيع بالفعل الكشف عن (معرفة) الحركة بالنسبة للهواء الساكن فإذا تحركت بالنسبة للهواء الساكن ستشعر بالنسيم . وكان طبيعياً افتراض وجود وسط ما يؤمن انتشار الضوء والأمواج الكهرومغناطيسية . تم اقتراح هذا الوسط في القرن التاسع عشر ودعي بالأثير وأعطى لهذا الوسط خواصاً غير عادية ، إذ يجب أن يكون صلباً جداً فهو يحمل أمواجاً سريعة جداً ، دون أن يؤثر على حركة الكواكب والنجوم التي تخضع إلى قانون التجاذب الكتلي فقط . وبدأ التفكير في إيجاد طريقة لقياس السرعة النسبية للأرض بالنسبة للأثير . فأشار ماكسويل ، من خلال قياسه لسرعة الضوء باستعمال الدوالب المسنن وفقاً لطريقة فيزو ، أن سرعة الأرض بالنسبة للأثير v تظهر من المرتبة الثانية للنسبة v/c واعتبر هذا الأثر صغيراً وغير قابل للقياس . ولقد حدد في هذه القياسات الزمن اللازم لموضعة ضوئية في رحلتي الذهاب والعودة إلى المرآة . يبين الشكل (١-١) منبعاً ضوئياً ومرآة تبعد عنه مسافة L . فإذا افترضنا أن المنبع والمرآة يتحركان بسرعة v خلال الأثير عندها تكون سرعة الضوء عندما يسير نحو المرآة مساوية $C-v$ وسرعة الضوء في رحلة العودة مساوية $C+v$ وفقاً للمفاهيم التقليدية في جمع السرعة ، ويكون الزمن اللازم لرحلتي الذهاب والعودة مساوياً

$$t_1 = \frac{L}{C-v} + \frac{L}{C+v} = 2L \frac{C}{C^2 - v^2} = \frac{2L}{C} \left(1 - \frac{v^2}{C^2}\right)^{-1} \quad (1-1)$$

فإذا كانت السرعة v أصغر بكثير من C نستطيع نشر هذه النتيجة باستعمال

نشر ثنائي الحد أي

$$(1+x)^n = 1 + nx + n(n-1)\frac{x^2}{2} + \dots \approx 1 + nx \quad (2-1)$$

حيث x أصغر بكثير من ١ . ومنه نجد

$$t_1 = \frac{2L}{C} \left(1 + \frac{v^2}{C^2}\right) \quad (3-1)$$



الشكل (١-١) منيع ومرآة يسيران بسرعة v بالنسبة للأثير .

فإذا أخذنا سرعة دوران الأرض حول الشمس كقيمة تقريبية لسرعة الأثير أي

$v = 3 \times 10^4 \text{ m/s}$ فتكون النسبة $\frac{v^2}{c^2} = 10^{-8}$ وهو مقدار صغير فعلاً . ورغم صغر

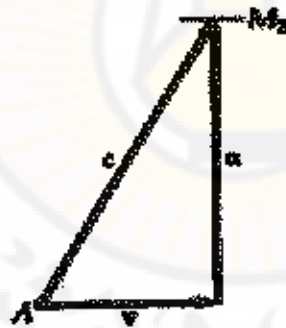
هذا المقدار وعدم إمكان قياسه بطريقة مباشرة إلا أن مايكلسون فكر في طريقة غير

مباشرة للقياس . فاستعمل مقياس التداخل حيث تنقسم الحزمة الضوئية إلى حزمتين تسير

إحدهما في الاتجاه المفترض لحركة الأرض ضمن الأثير لتنعكس على المرآة وتعود خلال

زمن يعطى بالعلاقة (١-٣) . بينما تسير الثانية باتجاه متعاكس مع سرعة الأرض بسرعة

تساوي $u = \sqrt{c^2 - v^2}$ كما هو مبين في الشكل (١-٢)



الشكل (١-٢) حزمة ضوئية تنحني من قاسم الحزمة A نحو المرآة M_2 في مقياس مايكلسون

إن الزمن اللازم لرحلتي الذهاب والعودة في هذه الحالة هو

$$t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \quad (١-٤)$$

حيث استعمل نشر ثنائي الحد . ويكون الفرق بين الزمنين مساوياً

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{v^2 L}{c^2} \quad (5-1)$$

ويكشف عن هذا الفرق بملاحظة تداخل حزمتي الضوء . وبسبب صعوبة تأمين مسارين متساويين في الطول بالدقة المطلوبة ، يشاهد نموذج التداخل الناتج من الحزمتين ثم يدار الجهاز بكامله بمقدار 90° . يؤدي هذا الدوران إلى فارق زمني معطى بالعلاقة (5-1) لكل حزمة ويكون الفرق الكلي مساوياً $2\Delta t$ ويقابل فرقاً في المسير مقداره $2c\Delta t$ أي يجب أن تراوح أهداب التداخل للمشاهدة وفق التوجه الأول بمقدار عدد من الأهداب ΔN يعطى بالعلاقة

$$\Delta N = \frac{2c\Delta t}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2} \quad (6-1)$$

حيث λ هو طول موجة الضوء المستعمل . استعمل مايكلسون في محاولته الأولى عام ١٨٨١ بعداً بين المرآة القاسمة و المرآة العاكسة مقداره $L = 1.2 \text{ m}$ وضوء طول موجته $\lambda = 590 \text{ nm}$ ، فإذا عوضنا هذه القيم في العلاقة (6-1) نجد $\Delta N \approx 0.04$ من الهدب . وبالطبع لم يستطع ملاحظة هذا الانزياح فاعتبر ذلك دليلاً على عدم تحرك الأرض بالنسبة للأثير . وفي عام ١٨٨٧ أعاد العالم مورلي مع مايكلسون هذه التجربة محسناً أداء جهازه ، فزاد المسافة L لتصبح $L = 11 \text{ m}$ متوقعاً انزياحاً للأهداب مقداره 0.4 من الهدب وهو مقدار يزيد ٢٠ إلى ٤٠ مرة على أصغر انزياح يستطيع الجهاز كشفه . ومرة أخرى لم يلاحظ أي انزياح في الأهداب . أعيدت هذه التجربة بعد ذلك مراراً وتكراراً ضمن شروط مختلفة من قبل عدة علماء دون أن يلاحظ أي انزياح .

وفي عام ١٩٠٥ نشر ألبرت أينشتاين مقالاً التحريك الكهربائي للأجسام المتحركة . افترض فيه عدم إمكان الكشف عن الحركة المطلقة ، وهذا يفسر نتيجة تجربة مايكلسون فإذا اعتبرنا كامل الجهاز والأرض في حالة سكون تكون جميع الاتجاهات متكافئة. وبالتالي لا يتوقع أن تراوح الأهداب نتيجة تدوير الجهاز بزاوية مقدارها 90° .

ويجب الإشارة هنا إلى أن أينشتاين لم يضع مسلمتيه لتفسير نتيجة مايكلسون ، فقد برزت نظريته نتيجة دراسة للنظرية الكهرومغناطيسية وخواص الأمواج الكهرومغناطيسية غير العادية كانتشارها في الخلاء .

١-٣ مسلمتا أينشتاين

نستطيع التوصل إلى النظرية النسبية الخاصة انطلاقاً من مسلمتين اقترحهما أينشتاين وهما :

١- لا يمكن الكشف عن الحركة المتجانسة المطلقة .

٢- لا ترتبط سرعة الضوء بحركة المنبع الذي يصدره .

فالمسلمة الأولى تشكل تعميماً لمبدأ نيوتن في النسبية ليشمل جميع أنواع القياسات الفيزيائية وليس الميكانيكية فقط . بينما تصف المسلمة الثانية خاصية عامة لكل الأمواج فسرعة الأمواج الصوتية في الهواء مثلاً لا ترتبط بحركة المنبع الصوتي (فهي ترتبط بدرجة حرارة الهواء فقط) ، كما يقيس جميع الملاحظين القيمة نفسها C لسرعة الضوء . وبرغم المظهر المعقول لكل من هاتين المسلمتين إلا أن استعمالهما معاً يؤدي إلى نتائج مذهشة تماماً إذ تتعارض مع الأفكار المألوفة .

١-٤ تحويل لورنتز

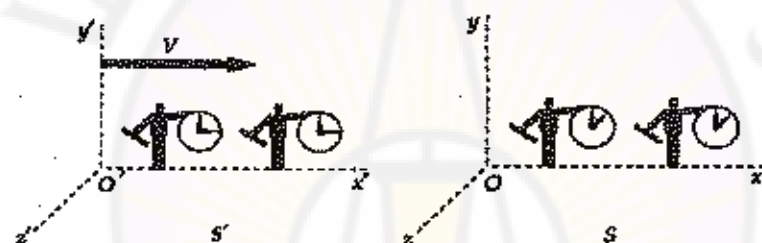
إن لمسلمتي أينشتاين تبعات مهمة على قياس الفترات الزمنية والمسافات وكذلك السرعة النسبية . وسنقارن في هذه الفقرة مواضع وأزمنة الحوادث المقاسة من قبل ملاحظين يتحركون بالنسبة لبعضهما البعض . وسنستعمل جملة الإحداثيات الديكارتية xyz ومبدأ الإحداثيات O وتدعوها بالإطار المرجعي S ، وكذلك جملة الإحداثيات الديكارتية $x'y'z'$ والمبدأ O' وتدعوها بالإطار المرجعي S' ، حيث يتحرك الإطار S' بالنسبة للإطار S بسرعة ثابتة V ، أو أن الإطار S يتحرك بالنسبة للإطار S' بالسرعة $-V$. وسنفترض للتبسيط أن الإطار S' يتحرك وفق الاتجاه الموجب للمحور X بالنسبة

للإطار S . سنفترض وجود عدد من الملاحظين في كل إطار حسب الحاجة وقد جهزوا بأدوات قياس كالساعات والمساطر المتماثلة عند مقارنتها وهي ساكنة ، الشكل (٣-١).
 لننظر الآن إلى العلاقة العامة بين الإحداثيات x, y, z والزمن t للحدث كما تشاهد من قبل ملاحظ موجود في الإطار S ، وبين الإحداثيات x', y', z' والزمن t' للحدث نفسه كما تشاهد في الإطار S' الذي يتحرك بسرعة ثابتة V بالنسبة للإطار S إن العلاقة التقليدية والتي تدعى بتحويل غاليليه تأخذ الصيغة

$$x = x' + vt' , y = y' , z = z' , t = t' \quad (٧-١)$$

ولها التحويل العاكس

$$x' = x - vt , y' = y , z' = z , t' = t \quad (٨-١)$$



الشكل (٣-١) إطارين مرجعيين S و S' الذي يتحرك بسرعة V بالنسبة للإطار S . يوجد في كل إطار عدد من الملاحظين المجهزين بمساطر وساعات متماثلة عند مقارنتها وهي ساكنة .

لا تتناقض نتائج تحويل غاليليه مع الواقع التجريبي طالما بقيت السرعة V صغيرة جداً بالمقارنة مع C . ونقود إلى قانون جمع السرعة المألوف . فإذا كان للجسم سرعة

مقدارها $u_x = \frac{dx}{dt}$ في الإطار S ، تكون سرعته في الإطار S' مساوية

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v \quad (٩-١)$$

فإذا اشتققنا هذه العلاقة مرة أخرى نجد أن تسارع الجسم لا يتغير من إطار إلى آخر

$$a_x = \frac{du_x}{dt} = \frac{du'_x}{dt'} = a'_x$$

وهي نتيجة تتناقض مع مسلمتي أينشتاين في النسبية الخاصة . فإذا سار الضوء وفق اتجاه المحور X بسرعة C فإن العلاقة (٩-١) تؤدي إلى سرعة للضوء مقاسه في الإطار S' تساوي $u'_x = C - v$ عوضاً عن $u'_x = C$ ، وهذا يتناقض مع مسلمة أينشتاين الثانية وكذلك مع النتائج التجريبية . أي يجب تعديل معادلات التحويل التقليدية بشكل لا يتناقض فيه مع مسلمتي أينشتاين ، كما يجب أن ترد إلى المعادلات التقليدية في حالة سرع صغيرة v بالمقارنة مع C . وسوف نورد طريقة بسيطة للحصول على التحويلات النسبية والتي تدعى بتحويل لورنتز . سنفترض أن معادلة الإحداثي x تأخذ الصيغة

$$x = \gamma(x' + vt') \quad (10-1)$$

حيث γ ثابت يرتبط بكل من v و C ولكنه غير مرتبط بالإحداثيات . ولكي ترد هذه العلاقة إلى العلاقة التقليدية يجب على الثابت γ أن يأخذ قيمة الواحد عندما تكون v صغيرة جداً بالمقارنة مع C ويجب أن يأخذ التحويل للمعكوس الصيغة نفسها باستثناء الإشارة ، وفقاً لمسلمة أينشتاين الأولى ، فأي تعديل نجريه في إطار عطالي يجب أن نجريه في الإطار الآخر أي

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (11-1)$$

لنفترض الآن أن نبضة ضوئية صدرت في اللحظة $t=0=t'$ وهي لحظة انطباق مبدئي الإحداثيات في الإطارين S و S' ، فتكون معادلة صدر الموجة في الإطار S من الشكل $x=ct$ ، وفي الإطار S' من الشكل $x'=ct'$. وذلك وفق مسلمة أينشتاين الثانية التي تفترض سرعة واحدة للضوء في الإطارين . بالتعويض في معادلتَي التحويل نجد

$$ct = \gamma(ct' + vt') = \gamma(c + v)t' \quad (12-1)$$

وكذلك

$$ct' = \gamma(ct - vt) = \gamma(c - v)t \quad (13-1)$$

نستطيع حذف t أو t' من المعادلتين وإيجاد الثابت γ فنجد

$$\gamma^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

ومنه

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (14-1)$$

كما نستطيع الحصول على صيغ لكل من X و X' باستعمال الصيغة (10-1) والتحويل العاكس له (11-1) فبتعويض $x = \gamma(x' + vt')$ في الصيغة (11-1) نجد

$$x' = \gamma[\gamma(x' + vt') - vt] \quad (15-1)$$

والتي يمكن حلها للحصول على t ثم X' و t' يعطى التحويل النسبي بكامله بالعلاقات

$$x = \gamma(x' + vt') , \quad y = y' , \quad z = z' \quad (16-1)$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{vx'}{c^2}\right) \quad (17-1)$$

كما يعطى التحويل العاكس له بالعلاقات

$$x' = \gamma(x - vt) , \quad y' = y , \quad z' = z \quad (18-1)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \quad (19-1)$$

تدعى التحويلات الموصوفة بالمعادلات الأربع السابقة بتحويل لورنتز. وهي تربط إحداثيات الموضع والزمن لحدث ما مقاسه في الإطار S بإحداثيات الموضع والزمن للحدث نفسه مقاسه في الإطار S' الذي يتحرك وفق المحور X بسرعة ثابتة V بالنسبة للإطار S . وسننظر الآن إلى بعض تطبيقات تحويل لورنتز.

تعدد الزمن: من أهم النتائج المترتبة على مسلمتي أينشتاين وتحويلات لورنتز هي أن الفترة الزمنية، بين حدثين وقعوا في المكان نفسه في إطار عطالي مرجعي ما، أصغر دوماً

من الفترة الزمنية بين الحدثين نفسيهما و المقاسة في إطار عطالي مرجعي آخر بحيث يقع فيه الحدثان في مكانين مختلفين . لننظر إلى حدثين وقعا في الموضع x_0^* في اللحظتين t_1^* و t_2^* في الإطار S^* . نستطيع إيجاد اللحظتين t_1 و t_2 لحدثين مقاستين في الإطار S فمن المعادلة (١٧-١) نجد

$$t_1 = \gamma \left(t_1^* + \frac{vx_0^*}{c^2} \right) , \quad t_2 = \gamma \left(t_2^* + \frac{vx_0^*}{c^2} \right)$$

ومنه

$$t_2 - t_1 = \gamma(t_2^* - t_1^*)$$

تدعى الفترة الزمنية بين حدثين وقعا في المكان نفسه في إطار عطالي مرجعي، بالزمن الصحيح t_p . وفي الحالة التي تمت دراستها تكون الفترة الصحيحة $\Delta t_p = t_2^* - t_1^*$ وهي المقاسة في الإطار S^* . وتكون الفترة المقاسة في أي إطار مرجعي آخر أكبر دوماً من الزمن الصحيح . ويدعى هذا التمدد بتمدد الزمن وتكتب بالشكل

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p \quad (٢٠-١)$$

مثال ١-١

يقع حدثان في الموضع نفسه x_0^* وفي اللحظتين t_1^* و t_2^* في الإطار S^* ، الذي يسافر بسرعة v بالنسبة للإطار S . ما هي المسافة بين موضعَي الحدثين مقاسة في الإطار S ؟

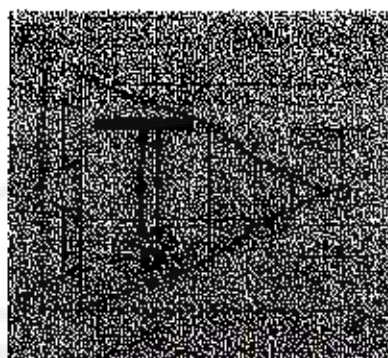
من المعادلة (١٦-١) لدينا $x_2 = \gamma(x_0^* + vt_2^*)$ وكذلك

$x_1 = \gamma(x_0^* + vt_1^*)$ ومنه $x_2 - x_1 = \gamma v(t_2^* - t_1^*) = v(t_2 - t_1)$ وهي المسافة التي تقطعها نقطة من الإطار S^* مثل النقطة x_0^* خلال الفترة الزمنية بين الحدثين و المقاسة في S .

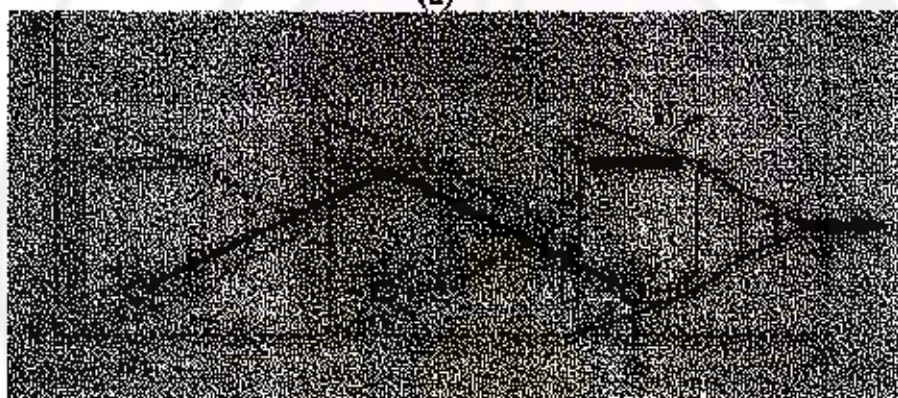
نستطيع فهم التمدد الزمني انطلاقاً من مسلمتي أينشتاين ودون استعمال تحويل لورنتز . فإذا نظرنا إلى ملاحظ ساكن A ضمن سفينة فضائية S^* ، وكان يبعد مسافة D عن المرأة كما في الشكل (١-٤-١) . أطلق ومضة ضوئية نحو المرأة وقاس

الفترة الزمنية $\Delta t'$ بين إطلاق الومضة واستلامها بعد انعكاسها على المرآة . وبما أن الضوء ينتشر بسرعة ثابتة تساوي c فإن هذه الفترة تساوي

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}$$



(a)



(b)

الشكل (١-٤) . (a) الملاحظ A' والمرآة في حالة سكون ضمن السفينة الفضائية S' . (b)

السفينة تتحرك نحو اليمين بسرعة v بالنسبة للأرض S .

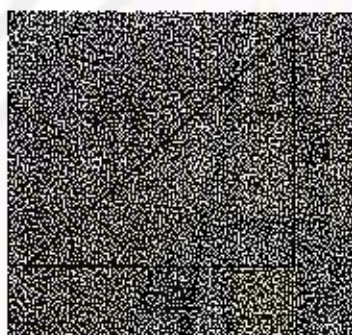
لننظر الآن إلى الحدثين نفسيهما (إطلاق الومضة واستلامها) كما تشاهد من قبل ملاحظ على الأرض S حيث يتحرك الملاحظ A' والمرآة ، بالنسبة إليه ، نحو اليمين بسرعة v . يقع الحدثان في مكانين مختلفين x_1 و x_2 في الإطار S لأن الملاحظ A' تحرك مسافة مقدارها $v\Delta t$ حيث Δt هي الفترة الزمنية بين الحدثين مقاسه في الإطار S . يبين الشكل (١-٤-ب) المسار الذي يسلكه الضوء وهو أطول في الإطار S مما هو

عليه في الإطار S' . ولكن الضوء وفقاً لمسمة أينشتاين الثانية ، ينتشر بالسرعة نفسها في الإطارين S و S' وبما أن الضوء يقطع مسافة أكبر في الإطار S فإنه يستغرق فترة أطول مما يستغرق في الإطار S' ، ونستطيع حساب Δt بدلالة $\Delta t'$.

فيالنظر إلى الشكل (٥-١) نجد :

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2D}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{ومنه} \quad \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t' \quad \text{وباستعمال العلاقة } \Delta t' = \frac{2D}{c} \quad \text{نجد :}$$



الشكل (٥-١) مثلث قائم لحساب الفترة Δt في الإطار S .

مثال ١-٢

ينام رواد الفضاء في سفينة تبعد عن الأرض بسرعة $v=0.6c$ ، مدة ساعة واحدة فما هي هذه الفترة مقاسه من قبل المراقبين في المركز الأرضي ؟

بما أن الرواد ينامون ويستيقظون في المكان نفسه في إطارهم المرجعي (السفينة) تكون فترة نومهم صحيحة . وفي الإطار المرجعي الآخر (الأرض) يقطع الرواد مسافة كبيرة خلال نومهم أي أن النوم والاستيقاظ يقعان في مكانين مختلفين . فتكون الفترة المقابلة على الأرض أكبر بعامل مقداره γ أي

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \times 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.36}} = 1.25 \text{ ساعة}$$

تقلص الطول: ترتبط ظاهرة تقلص الطول بتمدد الزمن ، ويدعى الطول المقاس ضمن الإطار الذي يكون فيه الجسم ساكناً بالطول الصحيح L_p ، ويكون الطول المقاس في إطار عطالي مرجعي يكون الجسم فيه متحركاً أقصر من الطول الصحيح . لننظر إلى قضيب ساكن في الإطار S' بحيث تقع إحدى نهايتيه في الموضع x'_2 والنهية الأخرى في الموضع x'_1 . يكون طول القضيب في هذا الإطار هو الطول الصحيح $L_p = x'_2 - x'_1$ ، يكون القضيب متحركاً نحو اليمين في الإطار S بسرعة v وهي سرعة الإطار S' . ويكون طول القضيب في الإطار S مساوياً $L = x_2 - x_1$ حيث x_2 هو موضع إحدى النهايتين في اللحظة t_2 ، و x_1 هو موضع النهاية الثانية في اللحظة $t_1 = t_2$ مقاسه في الإطار S . وتكون المعادلة (١٨-١) ملائمة لحساب $x_2 - x_1$ أي

$$x'_1 = \gamma(x_1 + vt_1) \quad \text{و} \quad x'_2 = \gamma(x_2 + vt_2) \quad \text{و بما أن } t_2 = t_1 \quad \text{ثم}$$

القياس في اللحظة نفسها)

$$\text{نجد :} \quad x'_2 - x'_1 = \gamma(x_2 - x_1) \quad \text{أو}$$

$$L = \frac{1}{\gamma} L_p \quad (٢١-١)$$

مثال ١-٣

مسطرة قياس طولها الصحيح متر واحد تتحرك وفق اتجاه مواز لطولها بسرعة v بالنسبة إليك . فإذا كان طولها المقاس من قبلك مساوياً 0.914 cm ، فما هي السرعة v ؟

يرتبط الطول المقاس بالطول الصحيح وفق العلاقة (٢١-١) أي $L = \frac{L_p}{\gamma}$ ومنه

$$\gamma = \frac{L_p}{L} = \frac{1}{0.914} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1.094$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0.914$$

$$v = 0.406c$$

وبعد ظهور الميونات على وجه الأرض مثلاً مهماً لظواهر في تمدد الزمن أو تقلص الطول . إذ تنفك الميونات وفق القانون الإحصائي لتفكك الإشعاعي وهو

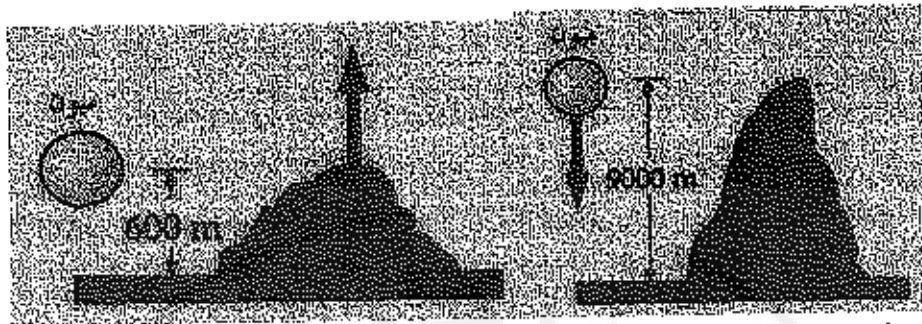
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (٢٣-١)$$

حيث N_0 هو عدد الميونات في اللحظة $t = 0$ ، و $N(t)$ هو العدد في اللحظة t و τ هو متوسط عمر الميون وهو ساكن ويساوي $2\mu s$. تنتج الميونات من تفكك الميزونات π في أعالي الجو الأرضي أي عند مسافات تبعد عدة آلاف الأمتار عن سطح البحر ويصل قليل منها إلى سطح البحر . يقطع الميون الذي يسير بسرعة $0.998c$ مسافة 600 m فقط خلال الزمن $2\mu s$ ولكن عمر الميون مقاساً من قبل ملاحظ على الأرض يزيد بمقدار $(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = 15)$ مرة ، أي أن عمر الميون مقاساً من قبل ملاحظ على الأرض يساوي $30\mu s$ ويقطع مسافة 9000 m خلال هذه الفترة فمن وجهة نظر الميون نفسه فهو يعيش فترة $2\mu s$ وتقلص المسافة التي يقطعها إلى 600 m . ويبين الشكل (١-٦) الإطارين المختلفين .

ومن السهل التمييز بين ما تنبأ به النظريتان التقليدية والنسبية . فإذا افترضنا وجود 10^8 ميون عند ارتفاع 9000 m من سطح البحر خلال فترة زمنية معينة ، فما هو عدد الميونات التي سنجدتها عند سطح البحر خلال الفترة نفسها ؟ بتعويض

$$N_0 = 10^8 \text{ و } t = 15\tau \text{ في العلاقة (٢٣-١) نجد}$$

$$N = 10^8 e^{-15} = 30.6$$



الشكل (٦-١) يكون عمر الميون في الإطار المرتبط بالأرض مساوياً $30\mu s$ ويقطع مسافة 9000 m خلال هذا الزمن (الشكل الأيسر) . بينما يكون عمر الميون في الإطار المرتبط به مساوياً $2\mu s$ ويقطع مسافة 600 m فقط (الشكل الأيمن).

وبذلك نتوقع تفكك جميع المائة مليون ميون باستثناء ٣٠ ميون قبل وصولها إلى الأرض . أما النظرية النسبية فتشير إلى أن الأرض تقطع مسافة 600 m فقط بالنسبة لجسملة الميونات الساكنة وهذا يتطلب زمناً قدره $2\mu s$ ويكون العدد المتوقع عند سطح البحر $= 3.68 \times 10^7 N = 10^8 e^{-1}$

أي أن النظرية النسبية تتنبأ بوجود أكثر من ثلاثين مليون ميون خلال الفترة الزمنية نفسها ولقد أكدت التجارب صحة التنبؤ النسبي .

٥-٦ ظاهرة دوبلر

عندما درسنا ظاهرة دوبلر في الفصل الأول من العام الدراسي وجدنا أن التغير في تواتر الصوت يرتبط بسرعتي الراصد والمنبع ، ويمكن التمييز بين الحالات المختلفة بسبب وجود وسط مرجعي ، وهو الهواء ، تحسب السرعات المختلفة بالنسبة إليه . لذلك لا يكون مستغرباً تمييز حركتي المنبع والراصد بالنسبة للهواء الساكن . ولكن مثل هذا التمييز بين حركتي المنبع والراصد غير ممكن في حالة الضوء أو أي من الأمواج الكهرومغناطيسية الأخرى في الخلاء . لذلك لا تصح الصيغة التي توصلنا إليها والتي تصف ظاهرة دوبلر في الصوت مع الضوء والأمواج الكهرومغناطيسية . ولسوء الحظ نقوم الآن اشتقاق الصيغة الصحيحة لظاهرة دوبلر النسبية والملائمة للضوء .

سننظر إلى حالة منبع ضوئي متجه نحو الراصد بسرعة مقدارها v وسنعمل ضمن إطار الراصد . فإذا افترضنا أن المنبع يصدر عدداً من الأمواج مقداره N . فستقطع الموجة الأولى مسافة $c\Delta t_R$ ، بينما يقطع المنبع مسافة $v\Delta t_R$ خلال الفترة Δt_R المقاسة في إطار الراصد . فيكون طول الموجة مساوياً $\lambda' = \frac{c\Delta t_R - v\Delta t_R}{N}$ ويكون التواتر الذي يسجله الراصد $f' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{c-v} \frac{N}{\Delta t_R} = \frac{1}{1-\frac{v}{c}} \frac{N}{\Delta t_R}$

إن تواتر المنبع يساوي f_0 وهو يصدر $N = f_0 \Delta t_S$ موجة خلال الفترة Δt_S مقاسه في إطار المنبع . وهي الفترة الصحيحة لأن جميع الأمواج صدرت من المكان نفسه في إطار المنبع . ترتبط الفترتان Δt_R و Δt_S وفق علاقة تمدد الزمن (٢٠-١) أي $\Delta t_R = \gamma \Delta t_S$. وعندما يتحرك المنبع والراصد نحو بعضهما نجد

$$f' = \frac{1}{1-\frac{v}{c}} \frac{f_0 \Delta t_S}{\Delta t_R} = \frac{f_0}{1-\frac{v}{c}} \frac{1}{\gamma} \quad \text{أو}$$

$$f' = \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1-\frac{v}{c}} f_0 = \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}} f_0 \quad (٢٤-١) \quad \text{في حالة الاقتراب}$$

$$f' = \frac{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{1+\frac{v}{c}} f_0 = \sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} f_0 \quad (٢٥-١) \quad \text{في حالة الابتعاد}$$

مثال ٥-١

إن أكبر طول موجة للضوء الصادر عن ذرة الهيدروجين في سلسلة بالمر يساوي $\lambda_0 = 656 \text{ nm}$. وعند قياسه في الضوء الوارد من مجرة بعيدة وجد أنه يساوي $\lambda' = 1458 \text{ nm}$. فهل تبتعد هذه المجرة أو تقترب من الأرض ، وما هي سرعتها ؟

$$\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} = \frac{f'}{f_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda'} \quad \text{إذا عوضنا } f' = \frac{c}{\lambda'} \quad f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \text{ في العلاقة (٢٥-١) نجد}$$

نسب هذه العلاقة بوضع $\beta = \frac{v}{c}$ ثم نربع الطرفين ونحل بالنسبة للوسيط β فنجد

$$\frac{1 + \beta}{1 - \beta} = \left(\frac{\lambda'}{\lambda_0} \right)^2 = \left(\frac{1458}{656} \right)^2 = 4.94$$

$$1 + \beta = 4.94 - 4.94\beta \rightarrow \beta = \frac{4.94 - 1}{4.94 + 1} = 0.663 = \frac{v}{c}$$

فالمجرة تبعد عن الأرض بسرعة تساوي $v = 0.663c$ ويدعى الانزياح نحو الطول الموجي الأكبر للضوء الوارد من المجرة المبتعدة بالانزياح نحو الأحمر .

٦-١ تحويل السرعة

نستطيع إيجاد تحويلات السرعة من إطار مرجعي إلى آخر باشتقاق معادلات تحويل لورنتز

. فإذا امتلك جسم ما سرعة تساوي $u'_x = \frac{dx'}{dt'}$ في الإطار S' الذي يتحرك نحو اليمين

بسرعة مقدارها V بالنسبة للإطار S ، فإن سرعته في الإطار S هي $u_x = \frac{dx}{dt}$. بأخذ

تفاضل العلاقتين (١٦-١) و (١٧-١) نجد

$$dx = \gamma(dx' + vdt') , \quad dt = \gamma\left(dt' + \frac{vdx'}{c^2}\right)$$

وتكون السرعة في الإطار S مساوية

$$u_x = \frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(dx' + vdt')}{\gamma\left(dt' + \frac{vdx'}{c^2}\right)} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}} = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}}$$

فإذا امتلك الجسم مركبات للسرعة وفق المحورين X و Y ، فإننا نستطيع استعمال العلاقة

بين dt و dt' نفسها مع العلاقتين $dy = dy'$ و $dz = dz'$ للحصول على

$$u_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{\gamma\left(dt' + \frac{vdx'}{c^2}\right)} = \frac{\frac{dy'}{dt'}}{\gamma\left(1 + \frac{v}{c^2} \frac{dx'}{dt'}\right)} = \frac{u'_y}{\gamma\left(1 + \frac{vu'_x}{c^2}\right)}$$

$$u_x = \frac{u'_x}{\gamma\left(1 + \frac{vu'_x}{c^2}\right)} \quad \text{وكذلك}$$

ويأخذ التحويل النسبي الكامل للسرعة الصغى التالية

$$u_x = \frac{u'_x}{\gamma(1 + \frac{vu'_x}{c^2})} , \quad u_y = \frac{u'_y}{\gamma(1 + \frac{vu'_x}{c^2})} , \quad u_z = \frac{u'_z + v}{1 + \frac{vu'_z}{c^2}} \quad (٢٦-١)$$

كما يأخذ التحويل النسبي المعاكس للسرعة الصغى التالية

$$u'_x = \frac{u_x}{\gamma(1 - \frac{vu_x}{c^2})} , \quad u'_y = \frac{u_y}{\gamma(1 - \frac{vu_x}{c^2})} , \quad u'_z = \frac{u_z - v}{1 - \frac{vu_z}{c^2}} \quad (٢٧-١)$$

وتختلف هذه النتائج عن العلاقات التقليدية لأن المقامات فيها لا تساوي الواحد ، وتؤول إلى العلاقات التقليدية في حالة تحقق المتراجحة $v \ll c$.

مثال ٦-١

تطير طائرة مقاتلة بسرعة 100 m/s بالنسبة لمراقب على الأرض وفق المحور X. وتطير طائرة أخرى بسرعة تساوي 500 m/s بالنسبة للطائرة الأولى ووفق المحور X أيضاً . فما هي سرعة الطائرة الثانية بالنسبة للمراقب على الأرض ؟

تكون سرعة الطائرة الثانية بالنسبة للمراقب على الأرض وفقاً للمفاهيم التقليدية مساوية لمجموع السرعتين أي

$$u_x = u'_x + v = 500 + 1000 = 1500 \text{ m/s}$$

ولحساب السرعة وفق المفاهيم النسبية لا بد من حساب عامل التصحيح النسبي للسرعة وهو الحد

$$\frac{vu'_x}{c^2} = \frac{1000 \times 500}{(3 \times 10^8)^2} \approx 5 \times 10^{-12}$$

جداً وبالتالي تكون النتائج التقليدية في هذه الحالة مساوية للنتائج التقليدية .

مثال ٧-١

أعد المثال السابق في حالة السرعتين $v = 0.8c$ و $u'_x = 0.8c$

يكون عامل التصحيح في هذه الحالة مساوياً 0.64 $\frac{vu'_x}{c^2} = \frac{0.8c \times 0.8c}{c^2} = 0.64$ وتكون

$$u_x = \frac{0.8c + 0.8c}{1 + 0.64} = 0.98c$$

سرعة الطائرة الثانية بالنسبة للمراقب الأرضي مساوية وعلى نتيجة مختلفة تماماً عن نتيجة جمع السرعتين وفق المفاهيم التقليدية وهي $1.6c$.

٧-١ الاندفاع النسبي

يعرف اندفاع الجسيم في الميكانيك التقليدي بأنه جداء كتلة الجسيم بسرعه $p=mu$ ففي حالة جملة معزولة من الجسيمات، غير خاضعة لمحصلة قوة خارجية، يبقى الاندفاع الكلي للجملة ثابتاً .

سنرى في هذه الفقرة من خلال تجربة ذهنية أن الصيغة التقليدية للاندفاع هي صيغة تقريبية ، فهي مقدار غير مصان في الجملة المعزولة . لننظر إلى المراقبين A في الإطار المرجعي S و B في الإطار المرجعي S' ، يملك كل منهما كرة كتلتها m . وهما متماثلتان عند مقارنتهما في حالة السكون . يقذف كل من المراقبين كرتيه بصورة شاقولية بسرعة u_0 بحيث تقطع المسافة L وتصطدم اصطداماً مرئياً بالكرة الأخرى ، ثم تعود . يبين الشكل (٧-١) تصادم الكرتين كما يرى في كل من الإطارين . فوفقاً للميكانيك التقليدي يملك كل من الكرتين اندفاعاً شاقولياً مقداره mu_0 . وبما أن الاندفاعين متساويين ومتعاكسين تكون المركبة الشاقولية للاندفاع الكلي معدومة قبل التصادم . ينعكس اندفاع كل كرة نتيجة للتصادم وتكون المركبة الشاقولية للاندفاع الكلي بعد التصادم معدومة وتصل الكرتان إلى كل من A و B بالسرعة u_0 نفسها .

أما في النظرية النسبية فتكون مركبتا السرعة الشاقوليتين كما تشاهد في كل من الإطارين غير متساويتين . فعند انعكاسهما نتيجة التصادم لا يبقى الاندفاع التقليدي مصاناً . يكون الاندفاع الخطي مصاناً في الميكانيك التقليدي لأن $\gamma = 1$ من أجل $u \ll c$. وسنعرف الاندفاع النسبي p للجسيم بأنه يملك الخاصتين التاليتين

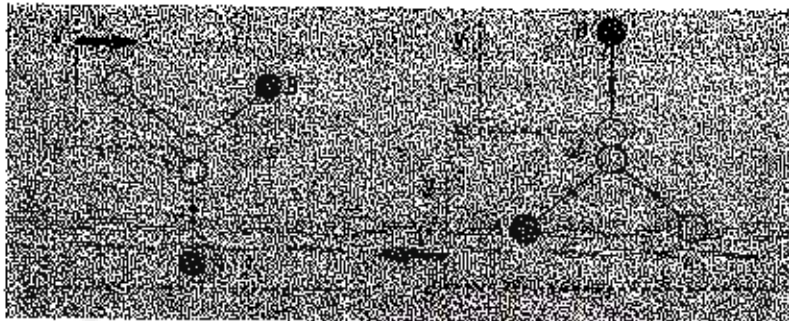
١. يكون الاندفاع p مصاناً في التصادم

٢. عندما تقترب النسبة u/c من الصفر يقترب الاندفاع p من القيمة mu

سنبرهن الآن أن المقدار

$$p = \frac{muc}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (٧٨-١)$$

مصان في التصادم المرن اللين بالشكل (٧-١). وبما أن هذه الصيغة تقترب من القيمة mu عندما تقترب النسبة u/c من الصفر فسنستعملها كتعريف للاندفاع النسبي .



الشكل (٧-١) (a) تصادم مرن بين كرتين متماثلتين مشاهد في الإطار S . إن المركبة الشاقولية لسرعة كرة B تساوي u_0/γ في الإطار S' إذا كانت تساوي u_0 في الإطار S وفقاً للعلاقة (١-٢٦) . (b) في الإطار S' تكون المركبة الشاقولية لاندفاع كرة A مساوية u_0/γ .

سنحسب المركبة y للاندفاع النسبي لكل جسيم في الإطار S ونبرهن أن إن المركبة y للاندفاع النسبي الكلي تساوي الصفر . إن سرعة كرة A في S تساوي u_0 فتكون المركبة y لاندفاعها النسبي مساوية $p_{Ay} = \frac{mu_0}{\sqrt{1-\frac{u_0^2}{c^2}}}$. كما أن لسرعة كرة

B في S مركبتان ، الأولى وفق x وتساوي v والثانية وفق y وتساوي $-u_0/\gamma$ ، ومنه

$$u_B^2 = u_{Bx}^2 + u_{By}^2 = v^2 + (-u_0\sqrt{1-v^2/c^2})^2 = v^2 + u_0^2 - \frac{v^2 u_0^2}{c^2}$$

وباستعمال هذه النتيجة لحساب $\sqrt{1-u_B^2/c^2}$ نجد

$$1 - \frac{u_B^2}{c^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{u_0^2}{c^2} + \frac{u_0^2 v^2}{c^4} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{u_0^2}{c^2}\right)$$

ومنه

$$\sqrt{1 - \frac{u_B^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \sqrt{\left(1 - \frac{u_0^2}{c^2}\right)} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\left(1 - \frac{u_0^2}{c^2}\right)}$$

فتكون المركبة y للاندفاع النسبي لكرة B في الإطار S مساوية

$$p_{By} = \frac{mu_{By}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{-mu_0/\gamma}{(1/\gamma)\sqrt{1 - u_0^2/c^2}} = \frac{-mu_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

وبما أن $p_{By} = -p_{Ay}$ فالمركبة y للاندفاع الكلي للكرتين تساوي الصفر . فإذا عكست سرعة كل من الكرتين بالتصادم فسيبقى الاندفاع الكلي معدوماً وبالتالي يكون الاندفاع مصاناً .

يعد ازدياد كتلة الجسم تفسيراً معقولاً للعلاقة (٢٨-١) . وتدعى الصيغة $m/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ بالكتلة النسبية للجسيم . عندما يكون الجسم ساكناً في أحد الأطر المرجعية تدعى كتلته بالكتلة السكونية ويرمز لها بالرمز m_0 . أي أن الكتلة تزداد من القيمة m_0 في حالة السكون إلى القيمة $m = m_0/\sqrt{1 - u^2/c^2}$ في حالة الحركة بسرعة u . وتكون الكتلة السكونية للجسيم نفسها في جميع الأطر العطالية المرجعية . وباستعمال الرموز السابقة يعطى الاندفاع النسبي بالعلاقة

$$p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad (٢٩-١)$$

٨-١ الطاقة النسبية

سنعرف الطاقة الحركية بأنها العمل المنجز بواسطة قوة خارجية في تسريع الجسم من حالة السكون إلى سرعة معينة . وفي حالة البعد الواحد لدينا

$$K = \int_{u=0}^u \Sigma F ds = \int_0^u \frac{dp}{dt} ds = \int_0^u u dp = \int_0^u u d\left(\frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}\right) \quad (٣٠-١)$$

حيث استعملنا $u = ds/dt$ ، وتركنا للطالب إثبات أن

$$d\left(\frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}\right) = m_0 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-3/2} du$$

فإذا عوضنا هذه الصيغة في التكامل (٣٠-١) نجد

$$\text{أو } K = \int_0^u m_0 \left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)^{-3/2} u du = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - 1 \right)$$

$$K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - m_0 c^2 \quad (31-1)$$

تألف صيغة الطاقة الحركية من حدين ، يرتبط الأول بسرعة الجسم ويكون الثاني ثابتاً يدعى الحد الثاني $m_0 c^2$ بالطاقة السكونية للجسم E_0 . وتعرف الطاقة النسبية E بأنها مجموع الطاقة الحركية والطاقة السكونية

$$E = K + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = m_r c^2 \quad (32-1)$$

نستطيع الحصول على سرعة الجسم بضرب العلاقة (٣١-١) الممثلة للاندفاع النسبي بمربع سرعة الضوء ومقارنة النتيجة مع العلاقة (٣٢-١) الممثلة للطاقة النسبية فنجد

$$\text{ومنه } pc^2 = \frac{m_0 c^2 u}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = Eu$$

$$\frac{u}{c} = \frac{pc}{E} \quad (33-1)$$

مثال ٩-١

يتحرك إلكترون طاقته السكونية 0.511 MeV بسرعة تساوي $u=0.8c$. أوجد طاقته الكلية وطاقته الحركية واندفاعه .

نحسب أولاً عامل التصحيح النسبي $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$ فنجد

$$\frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.64}} = 1.67$$

فتكون الطاقة الكلية مساوية: $E = \gamma m_0 c^2 = 1.67 \times 0.511 = 0.853 \text{ MeV}$

والطاقة الحركية هي الفرق بين الطائتين الكلية و السكونية أي :

$$K = E - m_0c^2 = 0.853 - 0.342 = 0.511 \text{ MeV}$$

وتكون قيمة الاندفاع مساوية

$$p = \gamma m_0 u = \frac{\gamma m_0 c^2 u}{c^2} = 1.67 \times 0.511 \text{ MeV} \times \frac{0.8c}{c^2} = 0.680 \text{ MeV}/c$$

يمكن دمج علاقتي الاندفاع النسبي و الطاقة النسبية وحذف السرعة u فنصل إلى علاقة تربط بين الطاقة والاندفاع هي

$$E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2)^2 \quad (٣٤-١)$$

إذا كانت طاقة الجسيم أكبر بكثير من كتلته السكونية ، يهمل الحد الثاني في الطرف الأيمن من العلاقة (٣٤-١) وتصبح العلاقة من الشكل

$$E \approx pc \quad (٣٥-١)$$

تكون المساواة (٣٥-١) بين طاقة الجسيم واندفاعه محققة عندما تكون الكتلة السكونية لهذا الجسيم معدومة كما في حالتي الفوتون و التريونو . إن النظر إلى الحد $m_0 c^2$ كطاقة سكونية ليس بسبب الملاءمة فقط ، فتحول الطاقة السكونية إلى طاقة حركية مع ما يقابله من خسارة في الكتلة السكونية أمر شائع الحدوث في التفكك بيتا والتفاعلات النووية وخاصة تفاعلي الانشطار والاندماج . ولسوف نورد مثالا على ذلك في هذه الفقرة . لقد اعتبر أينشتاين أن العلاقة (٣٢-١) التي تربط طاقة الجسم بكتلته من أهم نتائج النظرية النسبية الخاصة . فالطاقة و العطالة ، اللتان كانتا فكرتين منفصلتين ، ترتبطان من خلال هذه المعادلة الشهيرة .

ولتوضيح العلاقة بين الكتلة السكونية والطاقة سننظر إلى تصادم غير مرن بين جسيمين . فوفقاً للنظرة التقليدية هناك خسارة في الطاقة الحركية في مثل هذا التصادم ففي إطار الاندفاع الخطي المعلوم يتحرك الجسيمان نحو بعضهما باندفاعين متساويين ومتعاكسين ويكونان في حالة سكون بعد التصادم . أي أن الطاقة الحركية في هذا الإطار تلاشت . بينما يتحرك الجسيمان بعد التصادم بسرعة مركز الكتلة في أي إطار

مرجعي آخر مع بقاء الخسارة نفسها في الطاقة الحركية . فإذا افترضنا أن الطاقة النسبية مصانة تكون الخسارة في الطاقة الحركية مساوية لزيادة الكتلة السكونية لجملة الجسمين . لننظر إلى جسم كتلته السكونية m_{10} يتحرك بسرعة ابتدائية u_1 ويصطدم بجسم كتلته السكونية m_{20} يتحرك بسرعة ابتدائية u_2 . فيلتحم الجسمان ويشكلان جسماً كتلته السكونية M_0 ويتحرك بسرعة نهائية u_f كما في الشكل (٨-١) . سنفترض أن E_1 هي الطاقة الكلية الابتدائية و K_1 هي الطاقة الحركية الابتدائية للجسم الأول ، و E_2 و K_2 هما الطاقة الكلية والطاقة الحركية الابتدائيتين للجسم الثاني . فتكون الطاقة الكلية الابتدائية للجسمين معاً $E_i = E_1 + E_2$ ، والطاقة الحركية الابتدائية لهما

$$K_i = K_1 + K_2 = (E_1 - m_{10}c^2) + (E_2 - m_{20}c^2)$$

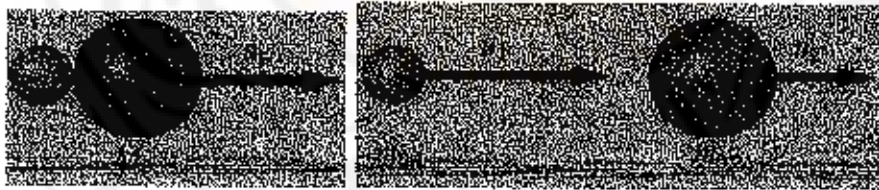
وبعد التصادم يكون للجسم الناتج كتلة سكونية هي M_0 وطاقة كلية E_f وطاقة حركية تساوي $K_f = E_f - M_0c^2$. وتكون الخسارة في الطاقة الحركية للجسمين

$$K_i - K_f = (E_1 + E_2 - m_{10}c^2 - m_{20}c^2) - (E_f - M_0c^2) \quad (٣٦-١)$$

فإذا افترضنا أن الطاقة الكلية مصانة ، يكون $E_f = E_i = E_1 + E_2$ وبالتعويض في العلاقة (٣٦-١) وترتيب العلاقة نجد

$$K_i - K_f = (M_0 - m_{10} - m_{20})c^2 = (\Delta m_0)c^2 \quad (٣٧-١)$$

حيث $M_0 - (m_{10} + m_{20}) = \Delta m_0$ هي الزيادة في الكتلة السكونية لجملة الجسمين .



الشكل (٨-١) تصادم غير مرن بين جسمين

يعبر عن الطاقة عادة في الفيزياء الذرية والنوية بوحدة الإلكترون فولت (eV) أو ميغا إلكترون فولت (MeV) :

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad : \text{ (MeV)}$$

مثال ٩-١

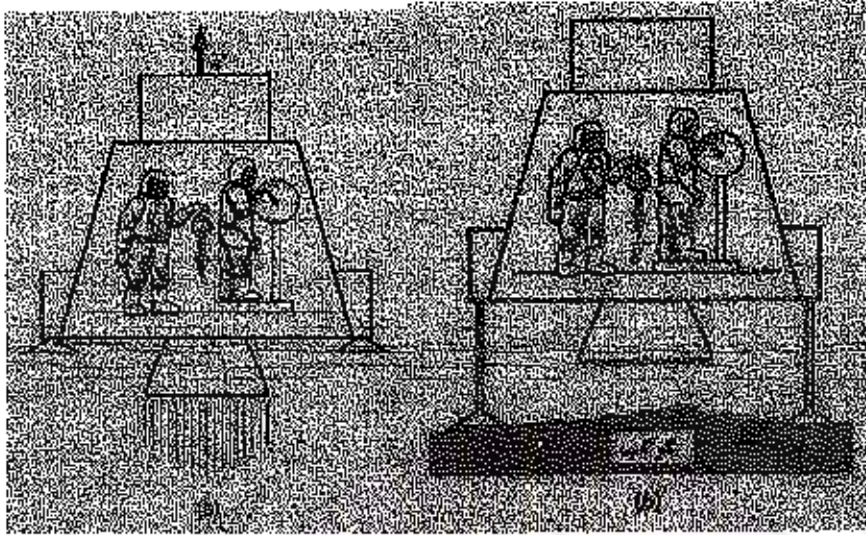
يتألف الديوترون من بروتون ونيوترون مرتبطين ببعضهما . وهي نواة ذرة الديوترون أحد نظائر الهيدروجين والذي يدعى بالهيدروجين الثقيل ويأخذ الرمز ^2H . ما هي الطاقة اللازمة لفصل البروتون عن النيوترون في الديوترون ؟

إن طاقة الديوترون السكونية تساوي 1875.63MeV ، والطاقة السكونية للبروتون تساوي 938.28MeV ، والطاقة السكونية للنيوترون تساوي 939.57MeV فيكون مجموع الطاقة السكونية للبروتون والطاقة السكونية للنيوترون مساوية 1877.85MeV وهي أكبر من طاقة الديوترون السكونية بمقدار 2.22MeV . تدعى الطاقة اللازمة لتفريق النواة إلى مكوناتها بطاقة ارتباط النواة . أي أن طاقة ارتباط الديوترون تساوي 2.22MeV . وهي الطاقة التي يجب أن نضيفها إلى الديوترون لتفريقه إلى بروتون ونيوترون . ويمكن فعل ذلك برجم الديوترون بجسيمات ذات طاقة عالية أو أشعة كهرومغناطيسية طاقتها تساوي 2.22MeV على الأقل .

يوضح هذا المثال خاصية مهمة للذرات والنوى . فأي جسيم مركب مستقر مثل الديوترون والهليوم ، والمكون من جسيمات أخرى ، يملك طاقة سكونية تقل عن مجموع الطاقات السكونية لمكوناته . ويشكل الفرق ما يدعى بطاقة الارتباط لذلك الجسيم .

١-٩ النسبية العامة

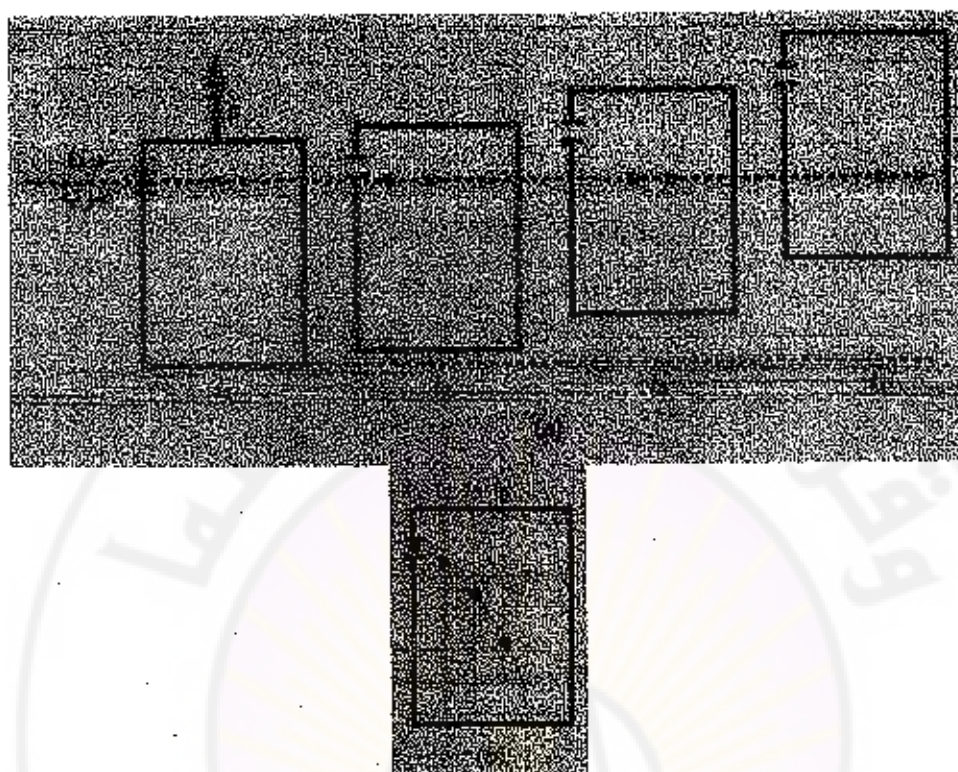
يعرف تعميم النسبية على الأطر المرجعية غير العطالية بالنسبية العامة ، ويوجد عدد ضئيل من الحالات لاختبار صحتها . تنطلق النسبية العامة من مبدأ التكافؤ الذي ينص على أن حقل الثقالة الأرضي المتجانس يكافئ إطاراً مرجعياً متسارعاً بانتظام . ينشأ هذا المبدأ بسبب المظهر المشترك للثقالة والكتلة العطالية . إذ تسقط جميع الأجسام الخاضعة لحقل الثقالة المنتظم بالتسارع نفسه مهما كانت كتلتها ، بسبب تناسب قوة الثقالة (الوزن) مع الكتلة ، وتناسب التسارع عكساً مع الكتلة . لننظر مثلاً إلى غرفة في الفضاء بعيدة عن أية مادة وتوضع إلى تسارع منتظم a كما في الشكل (١-٩-أ)



الشكل (٩-١) لا يمكن تمييز التسارع

فإذا سقط جسم ضمن الغرفة فإنه يسقط نحو أرض الغرفة بتسارع يساوي $g = -a$. وإذا وقف شخص على ميزان ذي نابض فإنه يقرأ وزناً يساوي mg . ولا يوجد تجربة ميكانيكية يمكن تنفيذها ضمن الغرفة تشير إلى حالة الغرفة في الفضاء (متسارعة، أم ساكنة، أو تسير بسرعة ثابتة بوجود حقل الثقالة المنتظم $g = -a$). افترض أينشتاين صحة مبدأ التكافؤ في كل الفيزياء وليس في الميكانيك فقط، فأكد بعدم وجود تجربة من أي نوع نستطيع من خلالها تمييز الحركة المتسارعة بانتظام عن حقل الثقالة. ولسوف نناقش بصورة وصفية بعض نتائج هذه الفرضية. فنناقش أولاً مسألة انحراف الحزمة الضوئية في حقل الثقالة الأرضية نتيجة لمبدأ التكافؤ. وهي مسألة يجب اعتبارها تجريبياً.

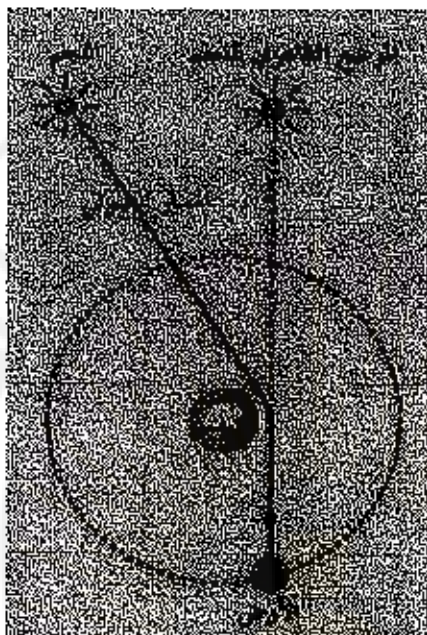
يبين الشكل (١٠-١) حزمة ضوئية تدخل غرفة متسارعة، ويظهر الشكل الأوضاع المتتالية للغرفة في حالة فترات زمنية متساوية. وبسبب التسارع تزداد المسافة التي تقطعها الغرفة في كل فترة عن سابقتها ويكون مسار الحزمة الضوئية كما يشاهد



الشكل (١-١٠) مسار الحزمة الضوئية وقد نظر إليها من إطارين مرجعيين مختلفين . وذلك يشابه كرة قذفت بسرعة ابتدائية أفقية

ضمن الغرفة على شكل قطع مكافئ . ولكن مبدأ التكافؤ لا يسمح بوجود طريقة للتمييز بين غرفة متسارعة وأخرى تسير بسرعة ثابتة ضمن حقل الثقالة المنتظم . ونستنتج أن حزمة الضوء ، مثل جميع الأجسام ذات الكتل ، تتسارع في حقل الثقالة فاقرب سطح الأرض سيسقط الضوء بتسارع يساوي 9.81 m/s^2 . وهو أمر لا يلاحظ بسبب سرعة الضوء الهائلة . فمن أجل مسافة مقدارها 3000 km يستغرق الضوء مدة 0.05 s لاجتيازها و ستسقط الحزمة الضوئية مسافة 0.5 mm . لقد أشار أينشتاين إلى أننا نستطيع ملاحظة انحراف مسار الأشعة الضوئية في حقل الثقالة عندما يمر الوارد من نجم بعيد بالقرب من الشمس كما في الشكل (١-١١) . وبسبب

سقوط الشمس لا نستطيع مشاهدة مثل هذا النجم . ولقد شوهد هذا الانحراف لأول مرة عام ١٩١٩ خلال كسوف الشمس ، وأدت هذه المشاهدة إلى شهرة أينشتاين في ذلك الوقت .



الشكل (١-١١) انحراف الحزمة الضوئية تنبأه جاذب الشمس

والنتيجة الثاني للنسبية العامة هو ازدياد ترنح مدار الكوكب ميركوري. وهي حقيقة معروفة ولم يعرف لها سبب . وبذلك أتى الدليل الثاني على صحة النسبية العامة وما تزال هناك بعض الصعوبات في مقارنة النتائج التحريية مع القيم المحسوبة بسبب وجود عوامل أخرى مثل الاضطرابات التي تسببها الكواكب الأخرى وعدم كروية الشمس وغيرها .

أما التنبؤ الثالث للنسبية العامة فنذكر الثقوب السوداء التي تنبأ بها العالم أوين هابل عام ١٩٣٩ . فاستناداً للنسبية العامة تكون الثقالة الكونية لنجم كثافته المادية كبيرة جداً ، هائلة بحيث لا يخرج أي شيء بما فيها الضوء أو أي أمواج كهرومغناطيسية

أخرى . وبما يميز مثل هذا النجم هو عدم خروج أي معلومات عما يحدث ضمنه إلى خارج النجم . وكما يحدث غالباً في الفيزياء تعطي الحسابات البسيطة غير الصحيحة نتائج صحيحة للعلاقة بين كتلة ونصف قطر الثقب الأسود . ففي ميكانيك نيوتن تحسب سرعة النجاة لجسيم من على سطح نجم أو كوكب بجعل طاقته الحركية $\left(\frac{1}{2}\right)mv^2$ مساوية قيمة الطاقة الكامنة $\frac{-GMm}{r}$ فنحصل على سرعة النجاة

$$v_g = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

نصف القطر الخارج الذي يدعى بنصف قطر شوارزشايلد

$$R_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (37-1)$$

فلكي يصبح جسم له كتلة شمسياً ثقباً أسوداً يجب أن يكون له قطر يساوي 3km وبسبب عدم صدور أي إشعاع من الثقب الأسود نتوقع أن يكون صغير الحجم وصعب الاكتشاف . وأكثر الفرص احتمالاً لكشفه عندما يكون مرافقاً لنجم عادي في جملة ثنائية . عندها نستطيع بقياس انزياح دوبلر للضوء الصادر عن النجم العادي تقدير كتلة المرافق غير المرئي وبالتالي معرفة حجمه ليصلح كثقب أسود . وكمثال أخير على تنبؤات النسبية العامة ما يتعلق بتغير الفترات الزمنية وتغير تواتر الضوء ضمن حقل الثقالة . فإذا كانت Δt_2 هي الفترة الزمنية المقاسة حيث كمنون الثقالة ϕ_1 و Δt_2 هي الفترة الزمنية المقاسة حيث كمنون الثقالة ϕ_2 فتنبأ النسبية العامة بأن الفرق النسبي يساوي تقريباً

$$\frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t} = \frac{1}{c^2} (\phi_2 - \phi_1) \quad (38-1)$$

وبما أن هذا الانزياح صغير جداً فلا فرق إن قسمنا على Δt_1 أو Δt_2 في الطرف الأيسر من المعادلة . أي أن الساعة الموجودة عند كمنون ثقالي منخفض تكون أبطأ من تلك الموجودة عند الكمنون المرتفع . وبما أننا نستطيع النظر إلى الذرة المهتزة كجهاز

توقيت فيكون تواتر الاهتزاز عند الكمون المنخفض (بالقرب من الشمس مثلاً حيث يكون كمون الثقالة سالباً $-GM/r$) أقل من تواتر الاهتزاز للذرة نفسها بجوار الأرض . يدعى هذا الانزياح نحو التواتر المنخفض أي نحو طول الموجة الأكبر بالانزياح الثقالي الأحمر .



تقاربن مسائل

١ - استعمل مايكلسون في إحدى تجاربه مساراً طوله $L = 35.4 \text{ km}$ ما هو الزمن الذي يستغرقه الضوء ليقطع رحلة الذهاب والعودة موازياً لحركة الأرض ؟ وما هو التصحيح الذي يجب إدخاله على القيمة التقليدية مقترضاً أن سرعة الأرض

$$v = 3 \times 10^4 \text{ m/s} \text{ وأن سرعة الضوء } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} ?$$

$$\text{الجواب : } 2.36 \times 10^{-4} \text{ s} , 2.62 \times 10^{-13} \text{ s}$$

٢ - تعبر طائرة بسرعة C بالنسبة للهواء الساكن من النقطة A إلى النقطة B ثم تعود إلى النقطة A . قارن الزمن اللازم لرحلة الذهاب والعودة في حالة هبوب رياح متجهة من A إلى B بسرعة v وكذلك مع حالة رياح عمودية على المسار AB بسرعة v

$$\text{الجواب : } \gamma = \frac{\Delta t_{\text{موي}}}{\Delta t_{\text{معد}}}$$

$$3 - \text{ أنشر كل من } \gamma , \frac{1}{\gamma} , \gamma - 1 \text{ في الحالة } V \ll C$$

٤ - ما هي السرعة التي يجب أن تسير بها مركبة فضائية بالنسبة للأرض كي يختلف قياس فترتها الزمنية عن الأرض بمقدار واحد بالمائة

$$\text{الجواب : } 4.2 \times 10^7 \text{ m/s}$$

٥ - إذا كان متوسط عمر الميون (π) الصحيح مساوياً $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$ وكانت سرعته مقاسه في المختبر مساوية $0.9C$. أوجد متوسط عمره مقاساً في المختبر . ومتوسط المسافة التي يقطعها قبل تفككه . قارن المسافة التي حسبها مع تلك المحسوبة بإهمال التمدد الزمني .

$$\text{الجواب : } 7.02 \text{ m} , 7.02 \text{ m} , 16.1 \text{ m}$$

٦- ما هي المسافة التي يقطعها المحتر محسوبة في الجملة المرتبطة مع الميون في المسألة السابقة ؟ الجواب : 7.02 m

٧- مسطرة قياس طولها وهي ساكنة 1 m ، تسير بسرعة $V = 0.6C$ بالنسبة لمراقب . أوجد طول هذه المسطرة مقاساً من قبل المراقب ، واحسب الزمن الذي تستغرقه المسطرة لكي تمر من أمام المراقب .
الجواب : 0.8 m ، $4.44 \times 10^{-9} \text{ s}$

٨- تطوير طائرة بسرعة $3 \times 10^{-6} C$. ما هي نسبة تقلص طولها الذي نشاهده ؟ وما هو الزمن المقابل لسنة على الأرض مقاسه من قبل راكب في الطائرة ؟
الجواب : -4.5×10^{-12} ، $1.42 \times 10^{-4} \text{ s}$

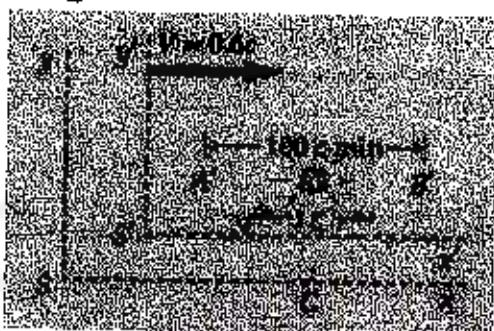
٩- يحدد ملاحظ موجود في الجملة S' مسافة قدرها $L' = 100 \text{ C.min}$ بين النقطتين A' و B' كما في الشكل . ويضع مصباحاً ومضياً في النقطة C' منتصف المسافة بين النقطتين A' و B' ويرتب الأمر بحيث يصدر المصباح ومضة ضوئية فيبدأ الزمن في الساعتين عند A' و B' لحظة وصول الضوء إليهما . تسير الجملة S' نحو اليمين بسرعة قدرها $0.6C$ بالنسبة لملاحظ موجود عند النقطة C في الجملة S الواقعة في منتصف المسافة بين A' و B' لحظة البدء والمطلوب :

أ- أوجد المسافة بين A' و B' مقاسه من قبل ملاحظ موجود في الجملة S . ب) عندما تسير الومضة نحو A' بسرعة C تسير النقطة A' نحو النقطة C بسرعة $0.6C$. أثبت أن الساعة الموجودة عند النقطة C تشير إلى زمن قدره 25 min عندما تصل الومضة إلى A' . ج) أثبت أن الساعة الموجودة عند C تشير إلى زمن قدره 100 min عندما تصل الومضة إلى B' التي تبتعد عن C بسرعة $0.6C$. د- إذا كان الفارق الزمني مقاساً في الجملة S بين لحظتي وصول الومضة الضوئية إلى كل من A' و B' هو

75min ، فما هو الزمن المقابل لهذه الفترة مقاساً في ساعة A' ؟ (قارن القيمة

$$\frac{L_0 V}{C^2}$$

المحسوبة في الطلب (د) مع تلك الناتجة من استعمال العلاقة



الجواب : 60 min ، 60 min ، 100 min ، 25 min ، 58c.min

١٠- يقع حدثان في النقطة X_0 نفسها في الجملة S' في اللحظتين t'_1 ، t'_2 . أثبت مستعملاً تحويلات لورنتز أن الفرق الزمني مقاساً في الجملة S أكبر من الفرق $t'_2 - t'_1$ بمقدار γ .

١١- أوجد علاقة تقلص الطول انطلاقاً من تحويلات لورنتز

١٢- تقترب سفينتان فضائيتان من بعضهما ، فإذا كانت سرعة كل منهما بالنسبة للأرض مساوية $0.92C$ فما هي سرعة إحداهما بالنسبة للأخرى ؟ أعد الحساب من أجل $V=30000m/s$.

الجواب : $0.9965c$ ، $6 \times 10^4 m/s$

١٣- يملك إلكترون كتلته السكونية $0.511 MeV/c^2$ طاقة كلية قدرها $5 MeV$ أوجد الاندفاع الخطي لهذا الإلكترون وكذلك سرعته .

الجواب : $4.97 MeV/c$ ، $0.995c$

١٤- أوجد الطاقة اللازمة لتسريع جسم كتلته m_0 من السكون إلى السرعة النهائية $0.5c$ ، $0.9c$ ، $0.99c$ وذلك بدلالة طاقته السكونية .

الجواب : $0.115m_0c^2$ ، $1.294m_0c^2$ ، $6.09m_0c^2$

١٥- أوجد الاندفاع الخطي لبروتون كتلته السكونية $938\text{MeV}/c^2$ وطاقته الحركية 938MeV ، ما هي سرعته ؟

الجواب : $0.969c$ ، $1624.628\text{MeV}/c$

١٦- ما هي الطاقة اللازمة لرفع أحد نيترونات التريترون ^3H والحصول على الديوترون ^2H ؟ الجواب : -6.257MeV

١٧- إذا كانت الكتلة السكونية للهليوم ^3He مساوية $3.0144u$ فما هي طاقته السكونية ؟ وما هي الطاقة اللازمة لرفع أحد البروتونات منه والحصول على الديوترون ^2H . الجواب : -6.00MeV

١٨- تندمج نواتا ديتريوم ^2H في تفاعل نووي لتشكيل نواة الهليوم ^4He . أحسب الخسارة في الكتلة السكونية والطاقة المنطلقة في هذا التفاعل ، ما هو عدد التفاعلات التي يجب أن تحدث خلال ثانية واحدة لإنتاج استطاعة قدرها وات واحد ؟ الجواب : 2.6×10^{11}

١٩- ما هي المدة التي يجب أن تطيرها طائرة بسرعة 2000km/s حتى يصبح الفرق بين الساعة التي بداخلها والساعة على الأرض ثانية واحدة ؟ الجواب : 18493 سنة

٢٠- أثبت أن العلاقة بين سرعة الجسم u وكتلته m وطاقته الكلية E هي:

$$\frac{u}{c} = \left(1 - \left(\frac{mc^2}{E} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

ثم أوجد سرعة إلكترون طاقته الحركية 10MeV . الجواب : $0.9988c$

٢١- ما هو الخطأ النسبي المرتكب عند استعمال الصيغة التقليدية $\frac{1}{2}m_0v^2$ للطاقة الحركية في حالة إلكترون سرعته $0.9c$ ؟ الجواب : 0.69

٢٢- مسطرة قياس طولها الصحيح L وتصنع زاوية θ مع المحور X في الجملة S . أثبت أن الزاوية مع المحور X' في الجملة S' التي تتحرك وفق اتجاه المحور X بسرعة u تعطى بالعلاقة $\tan \theta' = \gamma \tan \theta$ وأن طول المسطرة في الجملة S' يساوي :

$$L' = L \left(\frac{\cos^2 \theta}{\gamma^2} + \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}}$$

٢٣- سفيتتان فضائيتان طول كل منهما $100m$ في حالة السكون ، تتحركان مقتربتين من بعضهما بسرعتين متساويتين $0.8c$ بالنسبة للأرض . ماهو طول كل منهما مقاساً من قبل ملاحظ على الأرض ؟ وما هي السرعة التي تسير بها كل منهما بالنسبة للأخرى ؟ وما هو طول كل منهما مقاساً من قبل الأخرى ؟

الجواب : $22 m$ ، $0.9756c$ ، $60 m$

٢٤- في تجربة لاختبار التمدد الزمني استعمل ملاحظان ساعتين متماثلتين ، فركب أحدهما الجملة S' التي تتحرك بسرعة $0.6c$ بالنسبة للآخر الموجود في الجملة S ، وبدأ قياس الزمن في اللحظة التي انطبق فيها مبدأ الإحداثيات في الجملتين . واتفقا أن يرسل كل منهما إشارة ضوئية بعد مرور 60 ثانية ثم إشارة ثانية لحظة استلام كل منهما للإشارة الأولى . متى يستلم الملاحظ في الجملة S الإشارة الأولى التي يرسلها الملاحظ في الجملة S' ؟ ومتى يستلم الإشارة الثانية ؟

الجواب : $240 s$ ، $120 s$

٢٥- تدور طاولة أفقية بسرعة زاوية قدرها ω . يوجد ساعة عند مركز الطاولة وساعة أخرى على بعد r من المركز أي أن الساعة الموجودة عند البعد r تسير بسرعة خطية قدرها $v = \omega r$. أثبت أن العلاقة بين الفترة الزمنية التي تقيسها الساعة الموجودة عند المركز Δt_0 والفترة التي تقيسها الساعة الموجودة عند المسافة r هي :

$$r\omega \ll c : \text{حيث } \frac{\Delta t_e - \Delta t_0}{\Delta t_0} = \frac{r^2 \omega^2}{2c^2}$$

٢٦- ينشطر جسيم ساكن كتلته السكونية M_0 إلى جسيمين متماثلين كتلة كل منهما السكونية $0.4M_0$. أوجد الطاقة الكلية لكل منهما ، الاندفاع الخطي ، وسرعة كل منهما .
الجواب : $0.5M_0c^2$ ، $0.3M_0c$ ، $0.6c$

الفصل الثاني

التكميم

Quantization





وجدنا في الفصل الأول أن قوانين نيوتن يجب أن تعدل عندما تطبق على أجسام تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء . كما أوضح العديد من التجارب والأفكار النظرية خلال العشرين سنة الأخيرة من القرن التاسع عشر والثلاثين سنة الأولى من القرن العشرين ، إغيار القوانين التقليدية عند تطبيقها على الجمل المجهرية مثل الجسيمات ضمن الذرة . وهو فشل كبير مماثل لفشل الميكانيك التقليدي عند السرع العالية . ويمكن وصف داخل الذرة باستعمال النظرية الكمومية فقط (وهو ما يدعى بالميكانيك الكمومي أو بالميكانيك الموجي) التي تتطلب تعديلاً لبعض الأفكار الأساسية حول العلاقة بين النظرية الفيزيائية والعالم الفيزيائي .

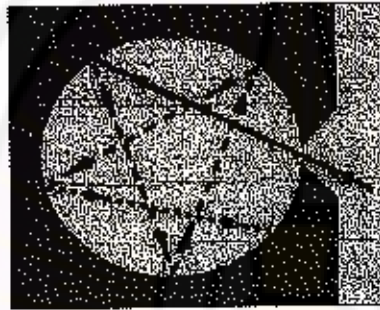
يختلف تطور النظرية الكمومية بشكل كبير عن تطور النظرية النسبية . فالنظرية النسبية الخاصة وضعها بشكل كامل ألبرت أينشتاين عام ١٩٠٥ ، كما وضع النسبية العامة عام ١٩١٦ . بينما تطورت النظرية الكمومية عبر فترة طويلة وساهم في تطويرها عدد كبير من العلماء . فلم تكن الاكتشافات في البدء مرتبطة كما لم تظهر قبل عام ١٩٢٠ أي نظرية منسجمة . وتعد هذه النظرية الكمومية الآن أساساً لفهم العالم المجهرى . فهي ناجحة جداً رغم وجود جدل كبير حول تفسيراتها الفلسفية . وكما هو الحال في النظرية النسبية فإن النظرية الكمومية ترد إلى النظرية التقليدية عندما تطبق على الجمل المجهرية أي على الأجسام المألوفة في حياتنا اليومية .

لم تكن بداية النظرية الكمومية ، رغم غرابة الأمر ، في اكتشاف النشاط الإشعاعي أو الأشعة السينية أو الطوف الذري ، ولكن في الترموديناميك (التحريك الحراري) . فلقد وجد ماكس بلانك في أثناء دراسته لإشعاع الجسم الأسود أنه يستطيع تحقيق التوافق بين النتائج التحريية والحسابات النظرية بافتراض أن تبادل الطاقة (امتصاص و إصدار) لا يتم بشكل مستمر بل على شكل كمات . وكان أينشتاين أول من لاحظ أن تكميم الطاقة ليس أداة رياضية ولكنها صفة عامة للإشعاع . طبق بور بعد ذلك أفكار أينشتاين في تكميم الطاقة ، على طاقة الذرة واقترح نموذجاً ناجحاً للذرة

الهيدروجين أعطى قيماً صحيحة للأطوال الموجية للأشعة الصادرة عن الهيدروجين سننظر
... في هذا الفصل بصورة وصفية إلى منشأ فكرة تكميم الطاقة ثم ننظر إلى بعض خواص
الأمواج الإلكترونية وكيف تقود معادلة شرودينغر إلى تكميم الطاقة .

٢-١ مصدر ثابت التكميم (إشعاع الجسم الأسود)

كان التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود من أكثر الظواهر المحيرة التي درست
مع نهاية القرن التاسع عشر . فالجسم الأسود هو جملة مثالية تستطيع امتصاص جميع
الإشعاعات التي ترد عليها . ويمكن تقريبها بفجوة لها فتحة صغيرة كما في الشكل (٢-١)
(١) .



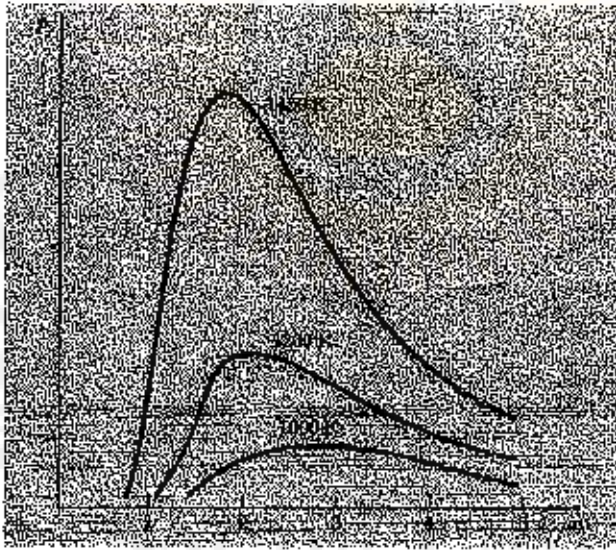
الشكل (٢-١) تقريب الفجوة للجسم الأسود تملك الأشعة الداخلة فرصة ضعيفة في الخروج
وترتبط بميزات الإشعاع في هذه الفجوة بدرجة حرارة جدرانها فقط . ففي الدرجات
العادية ، أقل من 600°C ، لا يكون الإشعاع الصادر عن الجسم الأسود مرئياً بسبب
تركز الطاقة في مجال الأشعة تحت الحمراء للطيف الكهرطيسي . ومع تسخين الجسم
تزداد كمية الطاقة المشعة (وفقاً لقانون ستيفان - بولتزمان في الإشعاع) ويتحرك
تركيز الطاقة نحو الأطوال الموجية القصيرة . وبين الدرجتين 600°C - 700°C تتواجد
كمية كافية من الطاقة ضمن الطيف المرئي فيبدو الجسم أحمر باهت . وعند درجات
حرارة أعلى يصبح أحمر ساطع وحتى أبيض متوهج .

يبين الشكل (٢-٢) الاستطاعة التي يشعها الجسم الأسود كتابع لطول الموجة
من أجل ثلاث درجات حرارة مختلفة . وتعرف هذه المنحنيات بمنحنيات التوزيع الطيفي

. فالمقدار p على الشكل يمثل الاستطاعة المشعة في واحدة الطول الموجي . وهو تابع لطول الموجة λ ولدرجة الحرارة T ، ويدعى تابع التوزيع الطيفي . يملك هذا التابع $p(\lambda, T)$ نهاية عظمى عند الطول الموجي λ_{max} الذي يتناسب عكساً مع درجة الحرارة وفقاً لقانون انزياح فين أي $\lambda_{max} = 2898 \text{ mm.K/T}$. يمكن حساب تابع التوزيع الطيفي $p(\lambda, T)$ من الترموديناميك التقليدي بطريقة مباشرة و المقارنة مع النتائج التجريبية الممثلة بالشكل (٢-١) . وتعرف نتائج الحسابات التقليدية بقانون رايلي-جيز

$$p(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4} \quad (1-1)$$

حيث k هو ثابت بولتزمان . تتوافق هذه النتائج مع مع النتائج التجريبية في مجال الأمواج الطويلة ولا تتوافق أبداً عند الأمواج القصيرة . فعندما تقترب λ من الصفر تشير النتائج التجريبية لاقترب $p(\lambda, T)$ من الصفر بينما تشير القيم المحسوبة إلى اقترابه من اللانهاية لأنه يتناسب مع λ^{-4} . وهكذا فاستناداً إلى الحسابات التقليدية يشع الجسم الأسود كمية لا نهائية من الطاقة مركزة عند طول موجي قصير . ودعيت هذه النتيجة بالمصيبة فوق البنفسجية .



الشكل (٢-٢) التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود من أجل ثلاث درجات حرارة مختلفة

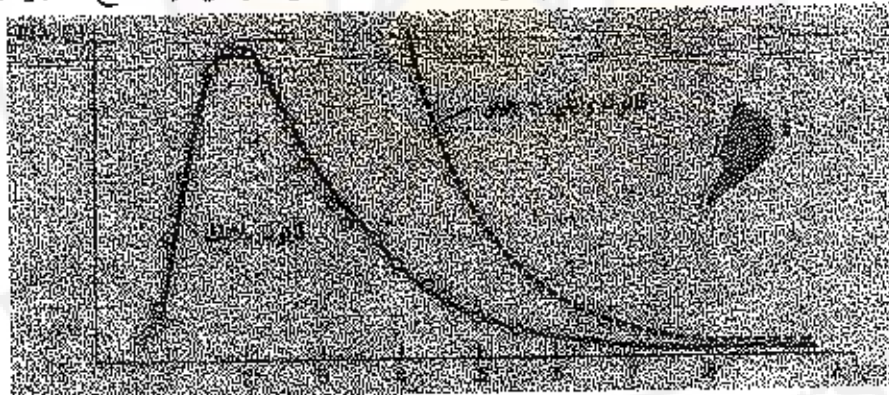
وفي عام ١٩٠٠ أعلن العالم ماكس بلانك أنه استطاع بتعديل غريب في الفيزياء التقليدية أن يصل إلى تابع $p(\lambda, T)$ على وفاق مع المعطيات التجريبية من أجل جميع الأطوال الموجية . ويظهر الشكل (٣-٢) نتائج بلانك مع المعطيات التجريبية وقانون رايلي-جينز . بحث بلانك أولاً عن تابع رياضي يمثل المعطيات التجريبية ، ثم بحث عن طريقة لتعديل الحسابات . فوجد أنه يستطيع الوصول إلى التابع الممثل للنتائج التجريبية إذا افترض أن الطاقة المنصبة من قبل الجسم الأسود أو الصادرة عنه ليست مستمرة بل يتم امتصاصها أو إصدارها على شكل كمات ، ووجد أن مقدار طاقة الكمية الواحدة يتناسب مع تواتر الإشعاع :

$$E = hf \quad (٢-٢)$$

حيث h هو ثابت التناسب ويعرف بثابت بلانك . حدد بلانك قيمة الثابت h بملاحظة تابعه مع المعطيات التجريبية ، وأخذ هذا الثابت الآن القيمة

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s} \quad (٣-٢)$$

لم يستطع بلانك إيجاد تفسير للثابت h ضمن إطار الفيزياء التقليدية . ولم تكن فرضيته لتكميم الطاقة مقبولة إلى أن طبق أينشتاين أفكاراً مماثلة لتفسير المفعول الكهروضوئي واقترح أن التكميم هي خاصية أساسية من خواص الإشعاع الكهروضوئي.

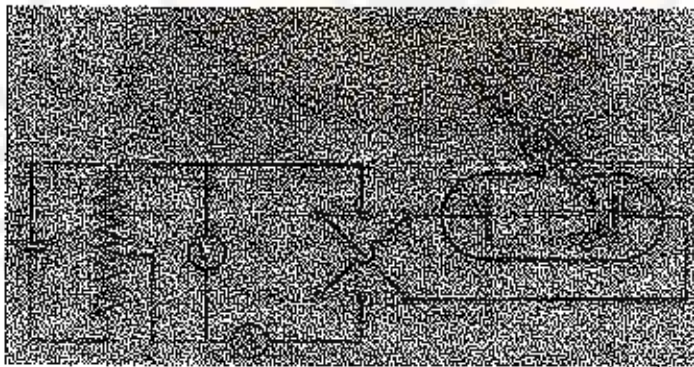


الشكل (٣-٢) التوزيع الطيفي للجسم الأسود كتابع لحدوث الموجة عند الدرجة $T=1600 \text{ K}$

٢-٢ المفعول الكهروضوئي

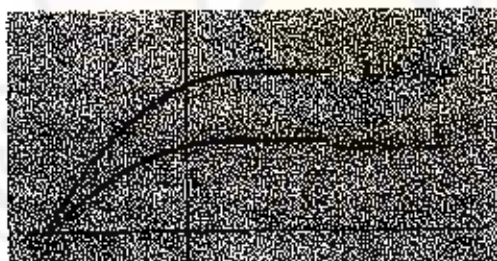
استعمل أينشتاين عام ١٩٠٥ فكرة بلانك حول تكميم الطاقة لتفسير المفعول الكهروضوئي . وبذلك أشار عمل أينشتاين هذا إلى بداية النظرية الكمومية ، ولقد منحه المجتمع العلمي جائزة نوبل في الفيزياء تقديراً له على هذا العمل . نظر بلانك إلى عملية تكميم الطاقة في نظريته حول إشعاع الجسم الأسود كأداة حساب توصله إلى الوفاق مع النتائج التجريبية ، بينما جعل أينشتاين فكرة التكميم خاصة أساسية للطاقة الكهروضوئية . وبعد ثلاث سنوات طبق أينشتاين فكرة تكميم الطاقة على الطاقات الجزيئية لتفسير أحجية أخرى في الفيزياء وهي التناقض بين الحرارة النوعية المحسوبة وفق الفيزياء التقليدية وتلك المقاسة تجريبياً عند درجات حرارة منخفضة . ثم قام ناز بور بعد ذلك باستعمال فكرة تكميم الطاقة على الطاقات الذرية في أول تفسير للطيف الذري .

اكتشف المفعول الكهروضوئي من قبل العالم هرتز عام ١٨٨٧ وثبت دراسته من قبل العالم لينارد عام ١٩٠٠ . يبين الشكل (٢-٤) رسم تخطيطي للجهاز الأساسي . فعندما يرد الضوء على سطح المعدن النظيف للمهبط C ، يصدر المهبط إلكترونات . فإذا وصل بعض هذه الإلكترونات إلى المصعد A ، يمر تيار في الدارة الخارجية . ويمكن زيادة أو تقليل عدد الإلكترونات الصادرة والتي تصل إلى المصعد بجعل المصعد موجياً أو سالباً بالنسبة للمهبط .



الشكل (٢-٤) رسم تخطيطي لجهاز دراسة المفعول الكهروضوئي

لنفترض أن فرق الكمون بين المصعد والمهبط يساوي V . يظهر الشكل (٥-٢) التيار كتابع لفرق الكمون من أجل شدتين مختلفتين للضوء الوارد على المهبط . فعندما يكون المصعد موجبا يجذب الإلكترونات إليه . وعند قيمة عالية لدرجة كافية للكمون V يصل إلى المصعد جميع الإلكترونات الصادرة عن المهبط ، وتكون قيمة التيار عظمى . ولا تؤثر أية زيادة أخرى في فرق الكمون V على التيار . لاحظ لينارد أن قيمة التيار العظمى تتناسب مع شدة الضوء . وعندما يكون V سالبا ، يدفع المصعد الإلكترونات ، وتصل إليه الإلكترونات التي تزيد طاقتها الحركية الابتدائية $\frac{1}{2}mv^2$ عن الطاقة الكهربائية $|eV|$. ويبين الشكل (٥-٢) أن الإلكترونات لتتصل إلى المصعد إذا كانت قيمة V أصغر من القيمة $-V_0$. يدعى المقدار $-V_0$ بكمون الإيقاف ويرتبط بالطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الصادرة عن المهبط بالعلاقة $(\frac{1}{2}mv^2)_{max} = eV_0$ تشير النتائج التجريبية إلى عدم ارتباط V_0 بشدة الضوء الوارد ، وهو أمر غير متوقع . فوفقا للفيزياء التقليدية تزداد الطاقة التي يمتصها الإلكترون بزيادة معدل الطاقة الضوئية الساقطة على المهبط وبالتالي تزداد الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الصادرة . وهذا لا يحدث فعلا .



الشكل (٥-٢) تيار المفعول الكهروضوئي i كتابع لفرق الكمون V من أجل قيمتين لشدة الضوء أوضح أينشتاين عام ١٩٠٥ إمكان تفسير النتائج التجريبية إذا نظرنا إلى الطاقة الضوئية على أنها مكتملة على شكل حبات من الطاقة تدعى بالفوتونات ، عوضاً عن النظر إليها كتوزيع مستمر في الفضاء . تكون طاقة الفوتون الواحد مساوية hf ، حيث f هو تواتر

الضوء و h هو ثابت بلانك . يأخذ الإلكترون الصادر من سطح المعدن المعرض للضوء الطاقة من فوتون واحد . وعند زيادة شدة ضوء ذي تواتر معين يزداد عدد الفوتونات التي تسقط على سطح المعدن خلال واحدة الزمن وبالتالي يزداد عدد الإلكترونات الصادرة من سطح المعدن دون أي تغير في الطاقة التي يمتصها كل إلكترون . فإذا كانت ϕ هي الطاقة اللازمة لرفع الإلكترون من المعدن ، تكون الطاقة الحركية العظمى للإلكترون الصادر مساوية

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = eV_0 = hf - \phi \quad (4-2)$$

يدعى المقدار ϕ بتابع العمل ، ويميز المعدن المستعمل . سيكون لبعض الإلكترونات طاقة حركية تقل عن $hf - \phi$ بسبب ضياع الطاقة نتيجة المرور بالمعدن . تعرف المعادلة (4-2) بمعادلة أينشتاين للمفعول الكهروضوئي . ومنها نرى أن ميل منحنى V_0 كنسبة للتواتر f يساوي h/e .

شكلت معادلة أينشتاين تنبؤاً معزولاً ، ففي الوقت الذي قدمت فيه لم يكن هناك أي دليل على وجود أي تطبيق لثابت بلانك خارج إشعاع الجسم الأسود ، ولم تتوفر أية معطيات تجريبية لكمون الإيقاف V_0 كنسبة للتواتر f . فلقد كان التحقق التجريبي من نظرية أينشتاين صعباً جداً . نفذ ميليكان تجربة دقيقة عام ١٩١٤ ، ونشرها بالتفصيل عام ١٩١٦ أظهر فيها صحة معادلة أينشتاين ، وكان قياس ثابت بلانك على وفاق مع القيمة التي وحدها بلانك . يبين الشكل (٦-٢) تمثيلاً لمعطيات ميليكان .



الشكل (٦-٢) معطيات ميلكان لكمون الإيقاف V_0 كتابع للتردد f للمفعول الكهروضوئي
إذا كان تواتر الفوتونات أقل من تواتر عتبة الإصدار f_0 ، فلا تملك طاقة كافية
لتزع إلكترون من المعدن المعين . ويمكن ربط تواتر العتبة بتابع العمل بجعل الطاقة الحركية
العظمى للإلكترون مساوية للصفر في العلاقة (٤-٢) فنجد

$$\phi = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \quad (٥-٢)$$

يكون تابع العمل للمعادن من مرتبة الإلكترون فولط (eV) . وبما أن طول الموجة
يعطى عادة بالنانومتر ، والطاقة بالإلكترون فولط ، فمن المفيد التعبير عن hc

$$hc = 4.14 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^8 = 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} \quad \text{بالنانومتر-إلكترون فولط أي}$$

ومنه

$$hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \quad (٦-٢)$$

مثال ١-٢

أحسب طاقة الفوتون البنفسجي $\lambda_p = 400 \text{ nm}$ والأحمر $\lambda_R = 700 \text{ nm}$.

باستعمال العلاقة (٢-٢) نجد

$$E_p = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{400} = 3.1 \text{ eV}$$

وبإعادة الحساب من أجل الضوء الأحمر نجد

$$E_R = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{700} = 1.77 \text{ eV}$$

مثال ٢-٢

إذا كانت شدة ضوء الشمس عند سطح الأرض مساوية 1400 W/m^2 ، أحسب مفترضاً أن متوسط طاقة الفوتون تساوي 2 eV ، عدد الفوتونات التي تضرب مساحة مقدارها 1 cm^2 خلال ثانية واحدة .

الطاقة الساقطة على سنتيمتر مربع واحد خلال ثانية واحدة هي : $\frac{1400}{10^4} = 0.14 \text{ J/cm}^2$

فيكون عدد الفوتون مساوياً : $N = \frac{0.14 \text{ J}}{2 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 4.38 \times 10^{17}$ فوتون

وهو عدد كبير جداً ، بحيث أن زيادة بعض الفوتونات أو نقصانها لا يؤثر ، فهذا يعني أن التكميم غير قابل للملاحظة في عالمنا اليومي .

مثال ٢-٣

إذا كان طول موجة عتبة الإصدار للبوتاسيوم مساوياً 654 nm . فما هو تابع العمل للبوتاسيوم ؟ وما هو كمون الإيقاف في حالة ورود ضوء طول موجته 400 nm على البوتاسيوم ؟

$$\phi = hf_c = \frac{hc}{\lambda_c} = \frac{1240}{654} = 2.20 \text{ eV} \quad \text{من المعادلة (٢-٥) لدينا}$$

$$(K_{\text{max}})_{\text{max}} = eV_0 = hf - \phi = 3.1 - 2.2 = 0.9 \text{ eV}$$

وبالتالي يكون كمون الإيقاف مساوياً 0.9 V .

من المظاهر المهمة أيضاً للسفعول الكهروضوئي هو غياب الفارق الزمني بين وصول الضوء إلى سطح المعدن وخروج الإلكترون منه . ويمكن حساب الفارق الزمني هذا إذا علمت شدة الضوء وفقاً للفيزياء التقليدية . ومع ذلك وحتى في حالة ضوء ضعيف جداً يكون فيه الفارق الزمني وفقاً للفيزياء التقليدية من مرتبة الساعات لا يلاحظ تجريبياً أي فارق زمني . وتفسير هذه النتيجة بسيط جداً فعندما تكون الشدة منخفضة

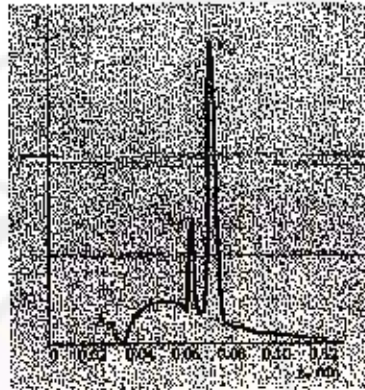
جداً يكون عدد الفوتونات التي تضرب المعدن خلال واحدة الزمن صغير جداً ، ولكن كل فوتون منها يملك طاقة كافية لزعج الإلكترون . وهناك فرصة كبيرة لامتصاص أحد الفوتونات فور وصولها . وتعطي الحسابات التقليدية القيمة المتوسطة لعدد الإلكترونات الصادرة خلال واحدة الزمن .

٢-٣ الأشعة السينية

اكتشف رونتجن في أثناء عمله على أنبوب الأشعة المهبطية عام ١٨٩٥ أن أشعة من الأنبوب تستطيع المرور من مواد عاتمة بالنسبة للضوء و تحرض شاشة من الفلوريسنت أو فيلماً فوتوغرافياً . تصدر هذه الأشعة من نقطة من هدف داخل الأنبوب أو من زجاج الأنبوب نفسه ، حيث تضرب إلكترونات الأنبوب . لم يستطع رونتجن الكشف عن هذه الأشعة ضمن حقل مغناطيسي ، كما هو متوقع في حالة كونها جسيمات مشحونة . وكذلك لم يستطع مشاهدة الإنعرج أو التداخل ، كما هو متوقع في حالة كونها أمواجاً . لذلك أطلق عليها إسم الأشعة السينية أي المجهولة . درس رونتجن هذه الأشعة بعمق ووجد أن جميع المواد تكون شفافة إلى حد ما بالنسبة لهذه الأشعة ، وأن درجة الشفافية تتناقص مع ازدياد كثافة المادة . وأدت هذه الخاصية إلى استعمال هذه الأشعة للأغراض الطبية خلال شهر واحد من ظهور مقالة رونتجن الأولى . وهكذا كان رونتجن أول الحاصلين على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٠١ .

وكان من الطبيعي الافتراض بأن الأشعة السينية هي أمواج كهرومغناطيسية تنتج عند كبح الإلكترونات وتبطئها قبل إيقافها بواسطة مادة ما . وذلك استناداً للنظرية التقليدية في الإشعاع والتي تنص على أن الشحنات المتسارعة أو المتباطئة تصدر طاقة على شكل أمواج كهرومغناطيسية . معدل يتناسب مع مربع تسارعها وتواتر يساوي تواتر حركة الشحنات المولدة لها . وبعد عدة سنوات لوحظ توسع طيف لحزمة الأشعة السينية بعد مرورها عبر شق ضيق . عرضه من مرتبة الواحد بالألف من المليمتر . وعزي ذلك إلى

الانعراج وقدر طول موجة الأشعة السينية بأنه يساوي واحد بالعشرة من النانومتر . يبين الشكل (٧-٢) رسماً بيانياً لشدة الطيف الصادر عن أنبوب أشعة سينية حيث يقذف الهدف (وهو في هذه الحالة من الموليبدنيوم) بالإلكترونات كتابع لطول الموجة . يتألف الطيف من سلسلة من الخطوط الحادة والتي تدعى بالطيف المميز ،



الشكل (٧-٢) طيف الأشعة السينية لعنصر الموليبدنيوم . تميز النهايات الحادة مادة الهدف . ويكون طول موجة القطع λ_m مستقلاً عن مادة الهدف ويرتبط بفرق الكمون عبر الأنبوب وتكون متراكبة فوق طيف مستمر يدعى بطيف الكبح . يميز الخط الطيفي مادة الهدف ويختلف من عنصر إلى آخر . فهو مماثل للطيف الضوئي المميز للعناصر المختلفة باستثناء كون الأشعة السينية صادرة عن إنتقالات للإلكترونات الذرة الداخلية بينما ينتج الطيف الضوئي عن إنتقالات للإلكترونات الذرة الخارجية . وينتج طيف الكبح المستمر من تباطؤ الإلكترونات السريع عندما تصطدم بالهدف . فإذا كان فرق الكمون عبر أنبوب الأشعة السينية مساوياً V تكون الطاقة الحركية العظمى للإلكترون مساوية eV لحظة اصطدامه بالهدف . ويصدر عادة عدة فوتونات نتيجة تباطؤ الإلكترون . ومع ذلك يصدر أحياناً فوتوناً واحداً بطاقة عظمى تساوي eV . وبما أن طول موجة الفوتون تتناسب عكساً مع طاقته $(\lambda = hc/hf = hc/E)$ ، فيقابل أصغر طول موجة

في طيف الكبح فوتوناً طاقته عظمى eV . يدعى أصغر الأطوال الموجية هذا بطول موجة القطع . ويرمز له بالرمز λ_m ويساوي

$$\lambda_m = \frac{hc}{E} \quad (٧-٢)$$

مثال ٢-٤

ما هو أصغر طول موجة للأشعة السينية الصادرة عن أنبوب شاشة تلفزيون جهده $2000V$ ؟

إن الطاقة العظمى للإلكترون تساوي eV ٢٠٠٠ وهي الطاقة العظمى للفوتون في طيف الأشعة السينية . وأصغر الأطوال الموجية هو طول موجة القطع أي

$$\lambda_m = \frac{hc}{eV} = \frac{1240}{2000} = 0.62 \text{ nm}$$

٢-٤ تبعثر كومبتون

قدم كومبتون دليلاً آخر على صحة فكرة الفوتون ، فدرس تبعثر الأشعة السينية على الإلكترونات الحرة . فوفقاً للفيزياء التقليدية ، عندما ترد أمواج كهروطيسية تواترها f_i على مادة تحوي شحنات كهربائية ، تهتز الشحنات بالتواتر نفسه وتشتع أمواجاً كهروطيسية لها التواتر نفسه . أشار كومبتون بأنه إذا وصف هذا التفاعل المتبادل كعملية تبعثر تتضمن اصطداماً بين الفوتون والإلكترون فسيرتد الإلكترون ممتصاً بعض الطاقة . وسيمتلك الفوتون المتبعثر طاقة أقل من الفوتون الوارد وبالتالي يكون تواتره أقل من تواتر الفوتون الوارد .

فوفقاً للنظريات التقليدية ترتبط طاقة الأمواج الكهروطيسية باندفاعها وفق

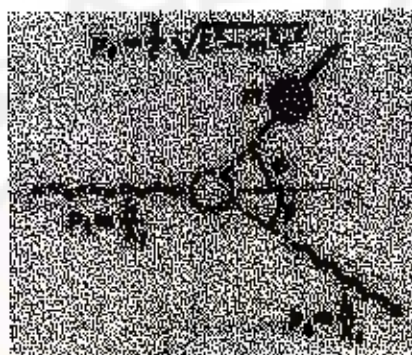
العلاقة

$$E = pc \quad (٨-٢)$$

وهي علاقة منسجمة مع الصيغة النسبية التي تربط طاقة الجسيم باندفاعه في حالة الفوتون . يبين الشكل (٩-٢) هندسة التصادم بين فوتون طول موجته λ_i وإلكترون ساكن

قبل التصادم . ربط كومبتون بين زاوية التبعثر θ وطولي موجة الفوتون الوارد λ_1 والفوتون المتبعثر λ_2 بالنظر إلى عملية التبعثر كمسألة في الميكانيك النسبي يكون فيها كل من الطاقة الكلية والاندفاع الكلي مضافاً . فإذا كان اندفاع الفوتون الوارد مساوياً p_1 واندفاع الفوتون المتبعثر p_2 واندفاع الإلكترون المرتد p_e ، فيعطي انحفاظ الاندفاع المعادلة

$$p_1 = p_2 + p_e \quad (9-2)$$



الشكل (٨-٢) تبعثر الأشعة السينية على إلكترون حر (تبعثر كومبتون)

أو $p_e = p_1 - p_2$ فإذا ضربنا كل طرف من هذه المساواة بنفسه ضرباً داخلياً نجد $p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 \cdot p_2$ أو

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \theta \quad (10-2)$$

إن الطاقة قبل التصادم تساوي $p_1 c + mc^2$ حيث mc^2 هي الطاقة السكونية للإلكترون وبعد التصادم تكون طاقة الإلكترون مساوية $\sqrt{p_e^2 c^2 + (mc^2)^2}$ ويعطي انحفاظ الطاقة

$$p_1 c + mc^2 = p_2 c + \sqrt{p_e^2 c^2 + (mc^2)^2} \quad (11-2)$$

حذف كومبتون إندفاع الإلكترون p_e من المعادلتين (١٠-٢) و (١١-٢) وعبر عن اندفاعي الفوتونين بدلالة طولي الموجتين ووصل إلى علاقة تربط بين طولي الموجتين وزاوية التبعثر وهي

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) \quad (12-2)$$

فلا يرتبط تغير طول الموجة بطول الموجة الأصلي ، فالمقدار $\frac{h}{mc}$ يرتبط بكتلة الإلكترون فقط وله أبعاد المسافة ويدعى بطول موجة كومبتون ، ويأخذ القيمة

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.43 \text{ pm} \quad (12-2)$$

استعمل كومبتون أشعة سينية طول موجتها 71.1 pm وتقابل طاقة للفوتون مقدارها 17.4 keV وهي أكبر بكثير من طاقة ارتباط الإلكترون في الذرة (من مرتبة عدة إلكترون فولط) لذلك يمكن اعتبارها حرة نسبياً . كانت نتائج كومبتون التجريبية على وفاق مع الحساب المبني على العلاقة (12-2) ، وبذلك أكد كومبتون على صحة فكرة الفوتون .

مثال ٢-٥

أحسب التغير النسبي المشاهد في تجربة كومبتون عند تبعثر فوتون طاقته 20 keV وفق الزاوية 60° .

تعطي العلاقة (12-2) مقدار تغير طول الموجة عند زاوية تبعثر مقدارها 60° فنجد

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_c(1 - \cos\theta) = 2.43 \times 0.5 = 1.22 \text{ pm}$$

$$\lambda_1 = \frac{hc}{E} = \frac{1240}{20} = 62 \text{ pm} \quad \text{و طول موجة الفوتون الوارد يساوي}$$

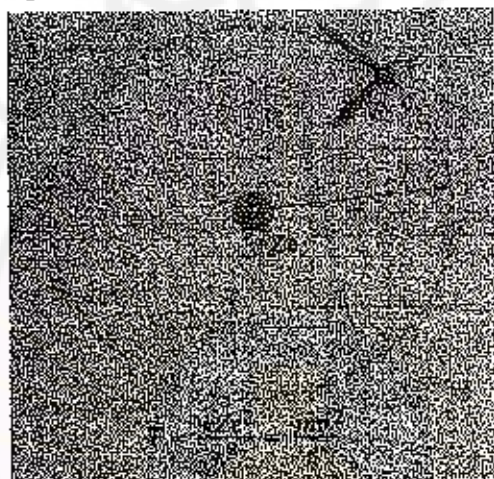
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{1.22}{62} \times 100 = 1.79\% \quad \text{فيكون التغير النسبي في طول الموجة مساوياً}$$

٢-٥ تكميم طاقات الذرة (نموذج بور)

كان أشهر تطبيق لتكميم الطاقة على الجمل المجهرية ما قام به العالم نلز بور ، حيث اقترح عام ١٩١٣ نموذجاً للذرة الهيدروجين نجح بشكل باهر في حساب الأطوال الموجية للخطوط الطيفية المعروفة في الهيدروجين ، وتنبأ بخطوط جديدة في بحالي الأشعة

تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية ، التي وجدت لاحقاً بصورة تجريبية ، وكانت على وفاق مع حسابات بور .

افترض بور أن الإلكترون في ذرة الهيدروجين يدور حول النواة تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي بينه وبين النواة الموجبة وفقاً لقوانين الميكانيك التقليدي ، التي تنبأ بمدارات دائرية أو قطعية يكون مركز القوة في أحد مشارفها ، كما هو الحال في حركة الكواكب حول الشمس . وسنختار للتبسيط مداراً دائرياً كما في الشكل (٢-٩) .



الشكل (٢-٩) إلكترون شحنته $-e$ يسير على مدار دائري نصف قطره r حول نواة شحنتها

$+Ze$. تؤمن القوة الكهربائية الجاذبة kZe^2/r^2 القوة النابذة التي تبقى الإلكترون في المدار .

وعلى الرغم من تحقق التوازن الميكانيكي ، لأن القوة الكولونية الجاذبة تؤمن القوة المركزية الطاردة اللازمة لبقاء الإلكترون في المدار ، فإن مثل هذه الذرة لا تكون مستقرة كهربائياً وفقاً للنظرية التقليدية في الإشعاع ، وذلك بسبب التسارع المركزي للإلكترون وبالتالي إصداره طاقة على شكل أمواج كهرومغناطيسية بتواتر يساوي تواتر حركته . فوفقاً للنظرية التقليدية في الإشعاع ستفقد مثل هذه الذرة طاقتها ويسلك الإلكترون مساراً حلزونياً يسقط في نهايته على النواة .

تمكن بور من حل هذه الصعوبة بتعديل القوانين التقليدية ، افترض أولاً أن الإلكترون يدور على مدارات معينة فقط لا يشع في أثناء الدوران عليها . وأطلق على هذه المدارات اسم المدارات المستقرة . وافترض ثانياً أن الذرة تشع عندما يقوم الإلكترون بالانتقال من مدار مستقر إلى مدار مستقر آخر . ولا يكون تواتر الإشعاع مساوياً لتواتر حركة الإلكترون في مداره المستقر ، بل يرتبط بطاقتي المدار الذي انتقل منه والمدار الذي انتقل إليه وفق العلاقة

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} \quad (١٣-٢)$$

حيث h هو ثابت بلانك و E_i ، E_f هما الطائقتين الكليتين للمدارين الابتدائي والنهائي على الترتيب . إن هذا الافتراض ، الذي يكافئ افتراض انحفاظ الطاقة بإصدار الفوتون ، هو المفتاح الأول في نظرية بور لأنه يبتعد عن النظرية التقليدية ، التي تتطلب أن يكون تواتر الإشعاع مساوياً لتواتر حركة الجسم المشحون .

إذا كانت شحنة النواة $+Ze$ وكانت الذرة تحوي إلكترونات واحداً شحنته $-e$ ، تكون الطاقة الكامنة مساوية

$$u = -\frac{kZe^2}{r^2}$$

حيث k هو ثابت كولون . وتكون الطاقة الكلية للإلكترون في دورانه على مدار دائري حول النواة بسرعة v مساوية

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + u = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{kZe^2}{r^2}$$

يمكن الحصول على الطاقة الحركية كتابع لنصف القطر r باستعمال قانون نيوتن الثاني

$F = ma$. فيجعل قوة التجاذب الكهربائي مساوية لجداء الكتلة بالتسارع المركزي نجد

$$\frac{kZe^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

ومن

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{kZe^2}{2r^2} \quad (14-2)$$

ففي حالة المدارات الدائرية تكون الطاقة الحركية مساوية إلى نصف القيمة المطلقة الطاقة الكامنة . وتكون الطاقة الكلية مساوية

$$E = \frac{kZe^2}{2r^2} - \frac{kZe^2}{r^2} = -\frac{kZe^2}{2r^2} \quad (15-2)$$

وباستعمال العلاقة (13-2) لحساب تواتر الإشعاع الصادر نتيجة انتقال الإلكترون من مدار أول نصف قطره r_1 إلى مدار ثاني نصف قطره r_2 نجد

$$f = \frac{E_1 - E_2}{h} = \frac{1}{2} \frac{kZe^2}{h} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (16-2)$$

وللحصول على صيغة ريد برغ - ريتز ، المثلة للملاحظات التجريبية في طيف الهيدروجين وهي $f = \frac{c}{\lambda} = cR \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$ ، من الواضح أن أنصاف أقطار المدارات المستقرة يجب أن تتناسب عكساً مع مربعات أعداد صحيحة . بحث بور عن شرط كمومي لأنصاف أقطار المدارات المستقرة يؤدي إلى هذه النتيجة . وبعد محاولات عديدة ، وجد أنه يستطيع الوصول إلى غايته بافتراض أن الاندفاع الزاوي للإلكترون في دورانه على المدارات المستقرة يساوي جداء عدد صحيح بثابت بلانك مقسوماً على العدد 2π . وبما أن الاندفاع الزاوي للإلكترون في المدار الدائري يساوي mvr نستطيع أن نعبر عن فرضية بور الثالثة بالعلاقة

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad (17-2)$$

$$h = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad \text{حيث}$$

نستطيع تعيين r بحذف السرعة v من المعادلتين (14-2) و (17-2) فنجد .

$$v^2 = n^2 \frac{\hbar^2}{m^2 r^3} = \frac{kZe^2}{mr}$$

$$\text{حيث} \quad r = n^2 \frac{\hbar^2}{mkZe^2} = n^2 \frac{a_0}{Z} \quad (18-2)$$

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{mk_e^2} = 0.0529 \text{ nm} \quad (١٩-٢)$$

ويدعى بنصف قطر بور . وبدمج المعادلتين (١٨-٢) و (١٦-٢) نجد

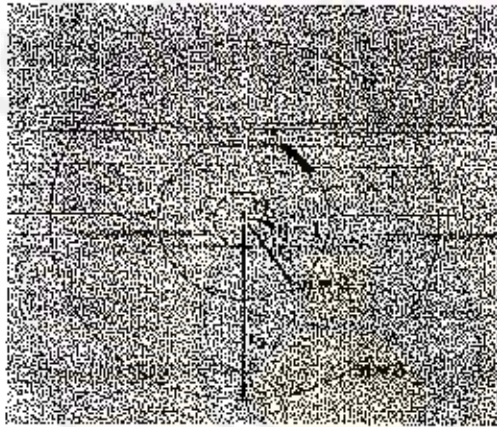
$$f = Z^2 \frac{mk^2 e^4}{4\pi\hbar^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (٢٠-٢)$$

وبالمقارنة مع علاقة ريديرغ - ريتر نحصل على ثابت ريديرغ

$$R = \frac{mk^2 e^4}{4\pi\hbar^2} \quad (٢١-٢)$$

وهي على وفاق مع القيمة التجريبية ضمن حدود الارتياب في الثوابت . ويوضح الشكل

(١٠-٢) نموذج بور لذرة الهيدروجين .



الشكل (١٠-٢) المدارات المستقرة في نموذج بور لذرة الهيدروجين

إن القيم الممكنة لطاقة ذرة الهيدروجين التي تنبأ بها نموذج بور والمعطاة بالعلاقة

(١٥-٢) حيث يعطى r بالعلاقة (١٨-٢) هي

$$E_n = -\frac{mk^2 e^4 Z^2}{2\hbar^2 n^2} = -Z^2 \frac{E_0}{n^2} \quad (٢٢-٢)$$

$$E_0 = \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} = 13.6 \text{ eV} \quad (٢٣-٢)$$

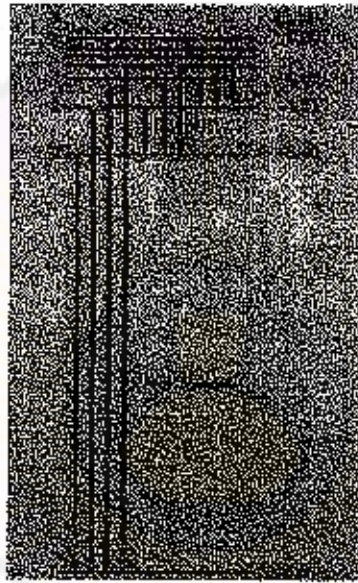
من الملائم أحياناً تمثيل هذه الطاقات على شكل مخططات لسوية الطاقة ، كما في

الشكل (١١-٢) ، تدعى أخفض سوية طاقة بالسوية الأرضية أو الحالة الأرضية ،

وتساوي في حالة ذرة الهيدروجين القيمة -13.6 eV . أما السوية الطاقية العظمى

فنفصل إليها بجعل $r \rightarrow \infty$ أو $n \rightarrow \infty$ وتدعى عملية إزالة الإلكترون من الذرة بالتأين أو التشريد .

يبين الشكل (٢-١١) سلاسل مختلفة من الانتقالات المشعة تمت الإشارة إليها بأسهم شاقولية بين مستويات الطاقة ويكون تواتر الضوء الصادر في الانتقال مساوياً فرق الطاقة بين السويتين مقسوماً على ثابت بلانك h . وفي الوقت الذي نشر بور فيه مقالته عام ١٩١٣ كانت سلسلتا بالمر وباشن معروفة وأنت حسابات بور يقيم موافقة للمقيم المعروفة .



الشكل (٢-١١) عخطط مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين وفيه نرى بعض الانتقالات في سلاسل ليمان وبالمر وباشن .

مثال ٢-٢

أوجد طاقة وطول موجة الخط المقابل لأطول موجة في سلسلة ليمان .

من الشكل (٢-١١) نجد أن سلسلة ليمن تقابل انتقالات تنتهي بالحالة الأرضية ذات الطاقة 13.6 eV - وبما أن طول الموجة يتناسب عكساً مع الطاقة فإن أطول موجة في سلسلة ليمن تقابل انتقالاً من السوية $n=2$ وتكون طاقة الفوتون المنطلق

$$E = W_2 - W_1 = -3.4 - 13.6 = 10.2 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{10.2 \text{ eV}} = 121.6 \text{ nm}$$

وهو فوتون يقع ضمن الأشعة فوق البنفسجية .

٢-٦ سلسلة دوبروي :

يتميز التقدم في الفيزياء بفترات طويلة من العمل التجريبي والنظري تتخللها بين الحين والآخر ومضات تسبب تغيرات جذرية في طريقة النظر إلى الكون وتعد سلسلة العالم الفرنسي لوي دوبروي واحدة من هذه الومضات .

لقد اختار دوبروي في أطروحته لنيل شهادة الدكتوراة ثغول للمثوية الجسمية - الموجية كمسألة جريئة وبسيطة . فاقترح دون أي دليل تجريبي يدعم مسلمته اقتران موجة طولها λ مع أي جسم مادي متحرك باندفاع خطي مقداره P حيث يرتبط الاندفاع بطول الموجة وفق العلاقة :

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2-24)$$

يدعى طول الموجة المحسوب وفق العلاقة (٢-٢٤) بطول موجة دوبروي .

مثال ٢-٧ :

أحسب طول موجة دوبري في كل من الحالات التالية : (أ) إلكترون طاقته السكونية 0.511 MeV وطاقته الحركية 10 eV . (ب) إلكترون طاقته الكلية تساوي ثلاثة أمثال طاقته السكونية . (ج) إلكترون طاقته الكلية 50 GeV .

$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2E_k}} \quad (1)$$

$$= \frac{1240}{\sqrt{2} \times 0.511 \times 10^6 \times 10} = 0.388 \text{ nm}$$

$$pc = \sqrt{E^2 - m_0^2 c^4} = \sqrt{8} m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{\sqrt{8} m_0 c^2} \quad (ب)$$

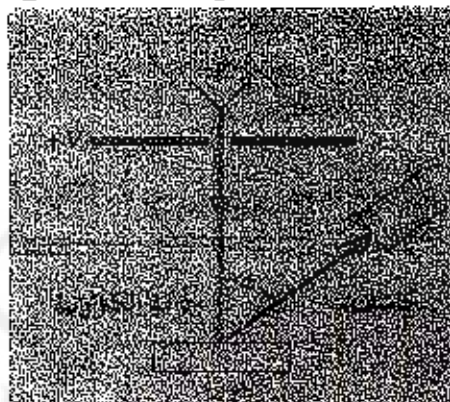
$$= \frac{1240}{\sqrt{8} \times 0.511 \times 10^6} = 0.858 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

$$E = pc = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240}{50 \times 10^9} = 2.48 \times 10^{-5} \text{ nm} \quad (ج)$$

وهنا يبرز سؤال هو ما نوع الأمواج التي نحسب أطوالها وفق علاقة ديبروي وسنوجد الإجابة عليه . وسنفترض وجود موجة تراكب كل جسم متحرك تظهر نفسها عند تنفيذ تجارب ذات طبيعة موجية ، مثل الانعراج ، على هذا الجسم . ترتبط نتائج هذا النوع من التجارب بطول الموجة المحسوب وفق علاقة ديبروي . وتستخلص هذه الطبيعة الموجية هذه الأيام بصورة منتظمة كأداة قياس في الفيزياء الذرية وكذلك عند دراسة خواص النوى والأجسام الصلبة والكيمياء الفيزيائية وكل علوم المواد في أثناء دراسة خواص المواد وفي العلوم الحيوية عند دراسة الحياة الميكروية باستعمال المجاهر الإلكترونية كما يستعملها الفلكيون المنكبون على دراسة الكون .

أتى التأكيد التجريبي الأول للطبيعة الموجية للإلكترونات عام ١٩٢٦ في أثناء دراسة انعكاس حزم الإلكترونات على سطح بلورات النيكل . وبين الشكل (٢-١٢) تخطيطاً للأجهزة المستعملة . تؤخذ حزمة إلكترونية صادرة عن سلك ساخن وتسرع بواسطة الكمون V ويمرر من خلال فتحة صغيرة لتضرب بلورة أحادية من النيكل . تتبعثر الإلكترونات في جميع الاتجاهات بواسطة ذرات البلورة ليسقط بعضها على كاشف متحرك يصنع الزاوية ϕ مع اتجاه الحزمة الواردة فيعطي هذا الكاشف قياساً لكثافة الحزمة الإلكترونية المتبعثرة وفق هذه الزاوية . فإذا افترضنا

أن كل ذرة من ذرات البلورة تعمل كعارج ، فيمكن للأمواج الإلكترونية المنعرجة أن تتداخل ، ونحصل على نوع من شبكة الانعراج البلوري للأمواج الإلكترونية .



الشكل (٢-١٢) الأدوات المستعملة في تجربة ديفسون - جيرمر لدراسة انعراج الإلكترونات . تغادر الإلكترونات السلك F وتسرع بواسطة الكمون V . تضرب البلورة وتبعثر فيلتقطها الكاشف عند الزاوية ϕ . يكون للمستوي الذري في البلورة مسافات منتظمة بين مراكز الانعراج تستطيع أن تنتج نموذجاً تداخلياً . ويبين الشكل (٢-١٣) إنعراجاً على أحد هذه المستويات وتكون زاوية الإنعراج المعروفة سابقاً مساوية $(90^\circ - \frac{\phi}{2})$.

يشاهد شعاع منعكس كثيف عند الزاوية ϕ عندما يتحقق شرط التداخل البناء $2d \sin \theta = n\lambda$ وترتبط المسافة بين الذرات a بالمسافة بين المستويات الذرية d بالعلاقة :

$$d = a \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (٢-٢٥)$$

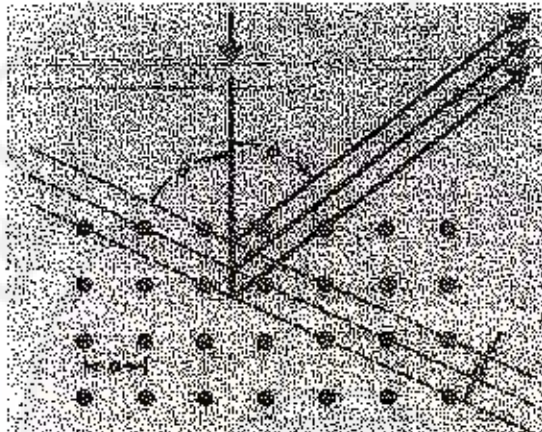
ويبين الشكل (٢-١٤) المعطيات التجريبية المسجلة من قبل ديفسون وجيرمر وهي

تظهر كثافة الحزمة المنعكسة كتابع للزاوية ϕ ضمن المجال بين $0^\circ - 90^\circ$ وتشاهد الحزمة المنعكسة الكثيفة عند الزاوية $\phi = 50^\circ$ من أجل كمون مقداره $V = 54V$. تعطي المعادلة (٢-٢٥) مع شرط التداخل البناء قيمة طول موجة

الإلكترون المنعرج وفق الزاوية 50° ، وبما أن المسافة بين الذرات في بلورة النيكل تساوي 0.215 nm ،

فنجد: $d = a \sin 25^\circ = 0.0909 \text{ nm}$ ومنه

$$\lambda = 2d \sin \theta = 0.165 \text{ nm}$$



الشكل (٢-١٣) التبعثر على المستويات البلورية . تبعد الذرات عن بعضها مسافة d وتكون المسافات بين

المستويات الذرية في حالة تبعثر براغ مساوية d ويحدث التداخل البناء عندما يتحقق شرط براغ .

نستطيع مقارنة هذه القيمة المقاسة مع القيمة المتوقعة وفق مسلمة ديبروي ، فالإلكترون
السرع يكمنون مقداره 54 eV ، يملك طاقة حركية مقدارها 54 eV ، واندهاعاً خطياً مقداره

$$p = \sqrt{2mK} = \frac{1}{c} \sqrt{m c^2 K} = 7430 \text{ eV}/c$$

ويكون طول موجة ديبروي مساوياً

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{cp} = \frac{1240}{7430} = 0.167 \text{ nm}$$

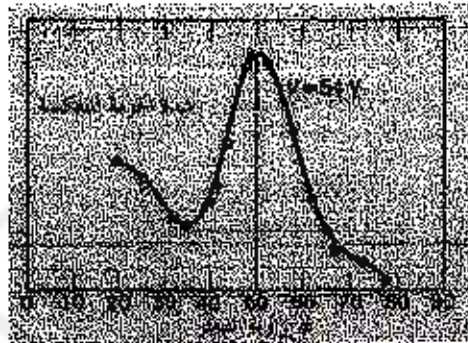
وهو على وفاق ممتاز مع القيمة المقاسة ويعطي دليلاً قوياً يدعم نظرية ديبروي . ولقد

منح كل من ديفسون وجيرمر جائزة نوبل عام ١٩٣٧ لقاء هذا العمل التجريبي .

وفي عام ١٩٦١ تمكن العالم كلاوس جونسون من تسريع حزمة

إلكترونية مستعملاً فرقاً في الكمون مقداره 50000 V ومرر الحزمة من شقين عرض

كل منهما $0.5\mu m$ وتفصلهما مسافة $2\mu m$ ، وقام بتصوير نموذج التداخل فكان
مثالاً للنموذج الذي نحصل عليه في حالة الضوء المار من شقين .



الشكل (٢-١٤) نتائج ديفسون - جورمر . يؤدي التداخل البناء إلى زيادة عظيمة لشدة الحزمة المنعكسة عند الزاوية
 50° في حالة المكون $V = 54V$.

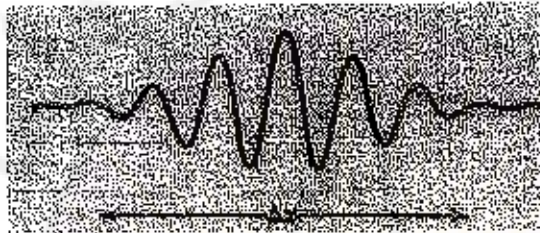
وهكذا أتى دليل قوي آخر على الطبيعة الموجية للإلكترونات . أي أن الإلكترون يسلك
سلوك الجسيم أو الموجة ولا يمكننا مشاهدة السلوكين معاً في آن واحد . وهذه هي قاعدة
مبدأ التنازع الذي ينص على أن الوصف الكامل للبنية الفيزيائية مثل الفوتون أو الإلكترون
لا يكمل باستعمال الأمواج أو الأجسام بصورة منفردة ولا بد من استعمالهما معاً . وأن
السلوك المشاهد مرتبط بنوع التجربة .

٢-٧ رزم الأمواج

لاتكون الموجة التوافقية البسيطة متوضعة ، فهي تمتد من $-\infty$ وحتى $+\infty$
بينما يكون الجسم التقليدي متوضعاً بشكل محدد . يمزج الوصف الكمومي الأمواج مع
الجسيمات . فالجسيمات متوضعة بمكان تقريبي . فيكون موضع الإلكترون مثلاً المرتبط
بذرة معينة محدد بارتفاع من مرتبة أبعاد الذرة $10^{-10} m$. تدعى الطريقة المستعملة في
الفيزياء لوصف مثل هذه الحالة بالرزمة الموجية . يمكن عد الرزمة الموجية كتراكب لعدد
كبير من الأمواج التوافقية التي تتداخل تداخلاً بناءً بجوار الجسم فتعطي للموجة الحاصلة

سعة كبيرة ، بينما تتداخل تتداخل هداماً في المواضع البعيدة عن الجسم فتعطي للموجة الحاصلة هناك سعة صغيرة حيث لا نتوقع أن نجد الجسم .

يمثل الشكل (٢-١٥) رزمة موجية مثالية ، فسعتها صغيرة ومهملة في كل مكان باستثناء مجال صغير من الفضاء طوله Δx ، ويقابل مجال من الاندفاعات مقداره Δp_x . وبما أن كل اندفاع يواكب موجة محددة الطول فإن مجال الاندفاعات Δp_x يقابل مجالاً من الأطوال الموجية $\Delta \lambda$. لذلك نتوقع أن يكون الوصف الرياضي للرزمة الموجية مقروناً بتراكب عدد من الأمواج ذات الأطوال الموجية المختلفة .



الشكل (٢-١٥) ناتج جمع عدد من الأمواج التوافقية ذات الأطوال الموجية المختلفة .

فيوصف الجسم الجير على الحركة ضمن مجال معين من الفضاء برزمة موجية يتحرك مغلفها بسرعة تدعى سرعة المجموعة وتساوي سرعة الجسم وتعطى بالعلاقة :

$$V_{\text{group}} = \frac{d\omega}{dk} \quad (٢-٢٦)$$

حيث $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ هو التواتر الزاوي ، $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ هو العدد الموجي . بينما

تنتشر الموجة ضمن المغلف بسرعة تدعى سرعة الطور وتعطى بالعلاقة :

$$V_{\text{phase}} = \frac{\omega}{k} \quad (٢-٢٧)$$

مثال ٢-٨

أوجد العلاقة بين سرعة الطور وسرعة المجموعة في حالة جسم حر سرعته $v \ll c$ ، وفي حالة جسم حر سرعته $v \sim c$.

في الحالة الأولى تكون الطاقة الكلية للإلكترون طاقة حركية إذ يكون تغير الكتلة مهملاً
ومنه :

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \hbar \omega \Rightarrow \omega = \frac{\hbar k^2}{2m}$$

$$V_{\text{group}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\hbar k}{m}$$

$$V_{\text{phase}} = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar k}{2m} \Rightarrow V_{\text{group}} = 2V_{\text{phase}}$$

وفي الحالة الثانية يجب أخذ تغير الكتلة في الحسبان أي استعمال قانون التحريك النسبوي
ومنه :

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (\hbar k c)^2 + m_0^2 c^4 = (\hbar \omega)^2$$

$$\omega = \sqrt{(kc)^2 + \frac{m_0^2 c^4}{\hbar^2}} \Rightarrow V_{\text{group}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{kc^2}{\omega} = \frac{c^2}{V_{\text{phase}}}$$

$$\Rightarrow V_{\text{group}} \times V_{\text{phase}} = c^2$$

مثال ٢-٩

تنتشر موجة بحرية بسرعة طور تساوي $V_{\text{phase}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ حيث g هو تسارع
الثقالة الأرضية أوجد سرعة المجموعة لهذه الأمواج بدلالة سرعة الطور .

بما أن $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ يكون $V_{\text{phase}} = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{\omega}{k}$ ومنه $\omega = \sqrt{gk}$

وبالتالي نجد $V_{\text{group}} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{g}{2\sqrt{gk}} = \frac{1}{2} V_{\text{phase}}$

٢-٨ علاقات هايزنبرغ في الارتباب

افترض بور في نموذج ذرة الهيدروجين ومثيلاً أن الاندفاع الزاوي للإلكترون
في دورانه حول النواة مكتمل . ولانحتاج إلى هذا الشرط إذا قبلنا بحسنة دوبروي فهو
تحصيل حاصل ، إذ يجب أن يكون طول المسار الدائري مساوياً لعدد صحيح من طول
الموجة المواكبة للإلكترون وإلا حدث تداخل هدام بين أمواج دوبروي أي :

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{p} = n \frac{h}{mv} \Rightarrow mvr = n\hbar$$

وفي حالة قياس الاندفاع الزاوي يكون الخطأ المطلق المرتكب في القياس مساوياً نصف أصغر وحدة قابلة للقياس أي $\frac{\hbar}{2}$. فإذا كان الارتفاع في موضع جسم متحرك مساوياً Δx والارتفاع في اندفاعه الخطي وفق ذلك الاتجاه هو Δp_x يكون جداء الارتفاعين مساوياً :

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (28-2)$$

وقد وضع الدليل x في رمز الاندفاع للتذكير بأن العلاقة (28-2) تطبق على حركة باتجاه واحد وترتبط بين الارتفاع في الموضع والارتفاع في الاندفاع وفق ذلك الاتجاه. ونستطيع تطبيق علاقتين مستقلتين على البعدين الآخرين عند الضرورة. وبما أن جداء الطاقة بالزمن يقاس بوحدة مماثلة لوحدة الاندفاع الزاوي (J.S) فإن جداء الارتفاع في الطاقة ΔE بالارتفاع في الزمن Δt يحقق العلاقة :

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2 \quad (29-2)$$

تدعى العلاقتان (28-2) و (29-2) بعلاقتي هايزنبرغ وتشكلان التمثيل الرياضي لمبدأ هايزنبرغ في الارتفاع. وتنصان على عدم إمكان إجراء تجربة بارتفاع أقل من الحدين اللذين تفرضهما العلاقتين (28-2) و (29-2).

مثال ٢-١٠

أوجد الطاقة الحركية الصغرى لإلكترون حر ضمن مكعب معدني طول ضلعه 1 cm.

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{(\Delta p_x)^2 + (\Delta p_y)^2 + (\Delta p_z)^2}{2m} = \frac{3(\Delta p_x)^2}{2m} = \frac{3\hbar^2}{2m(\Delta x)^2} \\ &= \frac{3(\hbar c)^2}{8 \times \pi^2 \times m c^2 (\Delta x)^2} = \frac{3 \times (1240)^2}{8 \times 0.511 \times 10^6 \times \pi^2 \times 10^{14}} \end{aligned}$$

$$= 1.14 \times 10^{-15} \text{ eV}$$

مثال ٢-١١

يملك الميزون المشحون π كتلة سكونية مقدارها $140 \text{ MeV}/c^2$ ومتوسط عمر مقداره 26 ns . أوجد الارتياح النسبي في كتلته السكونية .

$$\frac{\Delta E}{E} \geq \frac{h}{2AtE} = \frac{6.58 \times 10^{-16}}{2 \times 26 \times 10^{-9} \times 140 \times 10^6} = 9 \times 10^{-17}$$

٢-٩ معادلة شرودينغر

تتميز المسائل في الميكانيك التقليدي بوجود قوة معينة F فنكتب قانون نيوتن الثاني ثم ندير المعادلة الرياضية فنحصل على موضع الجسم وسرعته . وكذلك تتميز المسائل الكهروستاتيكية بمجموعة من الشحنات أو التيارات فنكتب معادلات ماكسويل للتوزيع المدروس وندير المعادلة الرياضية فنحصل على الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي . أما في المسألة الكمومية فلدينا حالة مميزة بكمون معين ، نكتب معادلة شرودينغر لهذا الكمون ونبحث عن حل صالح للحالة المدروسة إذ تتطلب الحالات المختلفة حلولاً مختلفة لمعادلات ملائمة .

لا يمكن اشتقاق قوانين نيوتن أو معادلات ماكسويل أو معادلة شرودينغر إنطلاقاً من المبادئ الأساسية . فهي معادلات رياضية تعطي نتائج متوافقة مع النتائج التجريبية . ويمكن إيجاد الحل الدقيق لمعادلة شرودينغر من أجل بعض الكمونات ، وأبسطها هو الكمون الثابت وكمون الهزاز التوافقي ، وتصلح كمرشد لأسلوب الحل رغم عدم كونها حالات فيزيائية بمعنى الكلمة ، فلا نجد في الطبيعة جسيمات عالقة ضمن صندوق وحيد البعد أو هزاز توافقي مثالي .

بحث شرودينغر عن معادلة تفاضلية تؤدي إلى حل ملائم لمسائل الفيزياء الكمومية فكتب الخواص المتوقعة من المعادلة وفحص أنواع الحلول التي تلي هذه الخواص.

١- يجب أن تكون الطاقة مصانة ، فبرغم رغبتنا في التضحية بجزء كبير من الأطر التقليدية إلا أن مبدأ انحفاظ الطاقة يبقى محققاً لذلك نكتب :

$$K + V = E \quad (2-30)$$

فالطاقة الكلية E تساوي مجموع الطائتين الحركية K والكامنة V .

٢- يجب ألا تتناقض المعادلة مهما كان شكلها مع مسلمة دوبروي ، فإذا انطلقنا

من جسيم اندفاعه P فيجب أن نصل إلى حل لموجة طولها $\lambda = h/p$

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

٣- يجب أن تكون المعادلة منسجمة ذاتياً بالمعنى الرياضي . إذ نتوقع أن يزودنا الحل

ببعض القيم عن احتمال وجود الجسم ، كما يجب أن يكون الحل وحيد

القيمة ، وأن يكون خطياً يؤمن تراكم الأمواج .

سنبدأ من حل للمعادلة التي نبحث عنها . فالصيغة الرياضية للموجة المنتشرة الممثلة

للمجسيم الحر تأخذ الشكل $\Psi(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$ وهذه الموجة طول

مقداره $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ وتواتر مقداره $\nu = \omega/2\pi$. سنهمل الارتباط الزمني ونعامل

مع وصف لحظي للموجة عند زمن معين وليكن $t=0$ أي أننا نعرف التابع $\Psi(x)$

عند اللحظة $t=0$ بالعلاقة :

$$\Psi(x) = A \sin kx \quad (2-31)$$

يمكن للمعادلة التفاضلية التي يشكل التابع $\Psi(x,t)$ حلاً لها أن تحوي عدداً غير

محدود من مشتقات $\Psi(x,t)$ بالنسبة للموضع أو الزمن . ولكننا نريد معادلة مرتبطة

بالتابع $\Psi(x,t)$ ومشتقاته من الدرجة الأولى وهذا يأتي من افتراض خطية المعادلة

ووحداية قيمها . كما يجب على المعادلة أن تتضمن الكمون فإذا ظهر الكمون بالدرجة الأولى فيجب على الطاقة الحركية أن تظهر بالدرجة الأولى أيضاً لكي تنسجم معادلة الحفاظ الطاقة . ولقد وجدنا أن $K = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ ، والطريقة الوحيدة للحصول على حدود بدلالة $\hbar^2$ هي أخذ المشتق الثاني للنابع $\Psi(x) = A \sin kx$ بالنسبة لمحول x فنجد :

$$\text{أو} \quad \frac{d^2 \Psi}{dx^2} = -k^2 \Psi = -\frac{2m}{\hbar^2} K \Psi = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \Psi$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + V \Psi = E \Psi \quad (٣٢-٢)$$

ويجب أن نؤكد هنا أننا لم نقوم بعملية اشتقاق أو استنتاج بل بناء معادلة تفاضلية تحقق الخواص التالية :

١- انسجام مع الحفاظ الطاقة . ٢ خطية ووحيدة القيمة . ٣- تعطي حلاً للمحسم الحر منسجماً مع مسلمة ديبروي . ويوجد معادلات أخرى تتمتع بهذه الخواص الثلاث ، ولكن المعادلة (٣٦-٢) هي الوحيدة التي تجتاز اختبار توافق نتائجها مع النتائج التجريبية في حالات فيزيائية مختلفة . تدعى المعادلة (٣٦-٢) بمعادلة شرودينغر المستقلة عن الزمن وهي وحيدة البعد .

٢-١٠ أسلوب حل المسائل الفيزيائية

إن أسلوب حل المعادلة (٣٦-٢) هو أسلوب عام لا يرتبط بشكل الكمون لذلك يمكن وضع سلسلة من الخطوات توصلنا إلى الحلول :

١- نبدأ بكتابة المعادلة (٣٢-٢) مع الكمون . وقد نضطر إلى كتابة معادلات مختلفة للمحالات المختلفة من الفضاء .

٢- نبحث عن حل للمعادلة التفاضلية باستعمال أسلوب رياضي ملائم .

٣- نطبق الشروط الحدية ونختار الحلول الملائمة مع تعيين ثوابتها وغالباً ما تحدد هذه الشروط القيم الذاتية للطاقة .

٤- نطبق شروط الاستمرار للتابع $\Psi(x)$ ومشتقه $\frac{d\Psi}{dx}$ عند حدود المناطق المختلفة.

٥- نحسب جميع الثوابت المتبقية باستعمال شرط التنظيم والذي يؤكد على وجود الجسم أي يجعل احتمال تواجدّه ضمن الفضاء مساوياً للواحد .

ترتبط الخطوات المتبقية بالتفسير الفيزيائي لحل المعادلة التفاضلية . إذ تعطي العلاقة $|\Psi|^2 dx$ احتمال وجود الجسم ضمن المجال الضيق dx بجوار الموضع x ، ولا يكون التمييز بين إيجاد الجسم عند النقطة x وإيجاده ضمن المجال dx بجوار النقطة x مهماً في المسائل وحيدة البعد ولكن عندما نتعامل مع مسائل ذات بعدين أو ثلاثة أبعاد يظهر الفرق واضحاً . فإذا عرفنا التابع $P(x)$ بأنه كثافة الاحتمال عندها يكون تفسير التابع $\Psi(x)$ وفقاً لأسلوب شرودينغر كما يلي :

$$P(x)dx = |\Psi|^2 dx \quad (2-33)$$

بعد أن أعطينا للتابع $\Psi(x)$ تفسيراً مرتبطاً بالاحتمال سنهي أسلوب حل المسائل الفيزيائية ونوضح كيفية استعمال التابع الموجي في حساب المقادير التي نستطيع قياسها في المختبر .

٦- يعطى احتمال وجود الجسم ضمن المجال $a \leq x \leq b$ بالعلاقة :

$$P = \int_a^b |\Psi|^2 dx \quad (2-34)$$

وكمتم هذه القاعدة يجب أن يكون احتمال وجود الجسم في مكان ما ضمن كل الفضاء مساوياً للواحد أي :

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dx = 1 \quad (2-35)$$

تدعى هذه العلاقة بشرط التنظيم وتساعدنا في إيجاد الثابت المتبقي المذكور في الخطوة ٥ .

٧- يجب أن يهمل كل حل لمعادلة شرودينغر يكون فيه $|\Psi|^2$ لانهائياً . لأن قيمة الاحتمال لا تتجاوز الواحد .

٨- تعطى القيمة المتوسطة لأي مقدار فيزيائي $F(x)$ تابع للمتحول x بالعلاقة :

$$\langle F(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 F(x) dx \quad (٣٦-٢)$$

كما تدعى أحياناً القيمة المحسوبة بالعلاقة (٣٦-٢) بالقيمة المتوقعة .

٢-١١ تطبيقات

أ) جسيم ضمن صندوق وحيد البعد :

سندرس في هذه الحالة جسيماً كتلته m يتحرك بحرية ضمن صندوق وحيد البعد طوله L ، فالجسيم محصور كلياً ضمن الصندوق (مثل خرزة تزلق دون احتكاك على سلك مشدود بين جدارين صلبين صانعة معهما اصطدامات مرنة) . يمكننا التعبير عن هذا الكمون كما يلي :

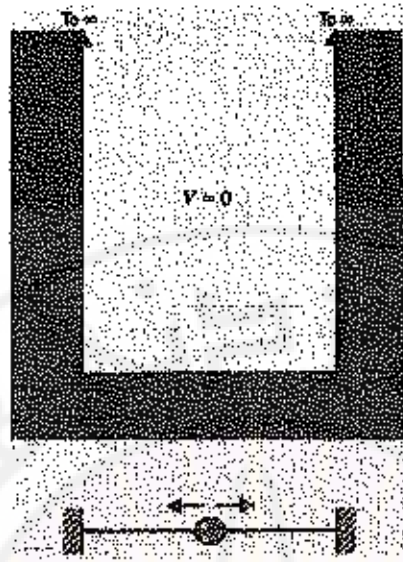
$$V(x) = 0 \quad \text{من أجل } 0 \leq x \leq L \quad (٣٧-٢)$$

$$V(x) = \infty \quad \text{من أجل } x < 0 \text{ و } x > L$$

يبين الشكل (٢-١٦) هذا الكمون الذي يدعى أحياناً بالعر التريعية اللاهائية .

وبالطبع نستطيع اختيار أية قيمة ثابتة للكمون ضمن المجال $0 \leq x \leq L$ لذلك سنختار القيمة الصفر .

سنطبق الآن أسلوب الحل على المجالين داخل الصندوق وخارجه بشكل منفصل ، ففي المجال خارج الصندوق يكون احتمال وجود الجسم معدوماً وبالتالي يجب أن يكون $\Psi = 0$ خارج الصندوق .



الشكل (٢-١٦) جسيم يتحرك ضمن مجال واحد البعد .

أما داخل الصندوق فتكون معادلة شرودينغر من الشكل $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} = E\psi$

التي نكتب على الشكل $\psi'' + k^2\psi = 0$ ويكون حلها من الشكل :

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad \text{حيث} \quad \psi(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (٢-٣٨)$$

ويجب تعيين الثابتين A و B وكذلك تحديد قيم الطاقة الممكنة E ، ولكي نفعل ذلك نطبق شرط استمرار التابع $\psi(x)$ على الحدود أي يجب أن يتساوى الحلان في المجالين $X < 0$ و $X > 0$ عند النقطة $X = 0$ ، وبالمثل يجب أن يتساوى الحلان في المجالين $X < L$ و $X > L$ عند النقطة $X = L$.

فمن أجل $X = 0$ ، لدينا $\psi = 0$ ضمن المجال $X < 0$ والعلاقة (٢-٤٢)

ضمن المجال $X > 0$ ، فنكتب :

$$\psi(0) = A \sin 0 + B \cos 0 = 0 \Rightarrow B = 0 \quad (٢-٣٩)$$

وعند النقطة $X = L$ لدينا $\psi = 0$ في المجال $X > L$ والحل (٢-٤٢) في المجال

$X < L$ ، فنكتب :

$$\Psi(L) = A \sin kL + B \cos kL = 0 \quad (٤٠-٢)$$

..... وبما أن $B=0$ فيجب أن يكون $A \sin(kL)$ مساوياً للصفر . فإما $A=0$ وهو مرفوض لأنه يجعل التابع $\Psi(x)$ مساوياً للصفر في كل مكان ، أو :

$$\sin kL = 0 \quad (٤١-٢)$$

ويصح هذا من أجل :

$$kL = n\pi \quad \text{حيث } n = 1, 2, 3, \dots \quad (٤٢-٢)$$

وبما أن $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ يكون $\lambda = \frac{2L}{n}$ وهي نتيجة مماثلة لما نجده في حالة الأمواج المستقرة على وتر مشدود مثبت من الطرفين طوله L . أي أن حل معادلة شرودينغر للجسيم المحصور ضمن مجال عظمي طوله L هو مجموعة من أمواج دوبروي المستقرة تتحدد أطوالها بالعلاقة (٤٢-٢) .

وباستعمال العلاقتين (٣٨-٢) و (٤٢-٢) التي تحدد قيم k المسموحة نصل إلى قيم الطاقة الممكنة :

$$\frac{\hbar^2 n^2}{2mL^2} n^2 = E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (٤٣-٢)$$

أي أن الطاقة في هذه الحالة مكممة . سنفترض للتبسيط أن $E_0 = \frac{\hbar^2 n^2}{2mL^2}$ هي سوية الطاقة وتحدد بكتلة الجسيم وطول المجال فتكون $E_n = n^2 E_0$ ويمكن للجسيم أن يتواجد بطاقات تساوي $E_0, 4E_0, 9E_0, 16E_0$ ، وهكذا . وبما أن الطاقة في هذه الحالة هي طاقة حركية فإن هذه النتيجة تعني قيمة معينة للسرعة . وهذا أمر يختلف كلياً عما اعتدنا عليه في الفيزياء التقليدية حيث تستطيع الخرزة أن تهتز بدون احتكاك على طول السلك وتصطدم اصطدامات مرنة بالجدارين مهما كانت السرعة الابتدائية التي نعطيها للخرزة ، وتبقى متحركة إلى الأبد جهة وذهاباً بالسرعة الابتدائية نفسها . وهذا غير ممكن في الفيزياء الكمومية إذ توجد سرع ابتدائية معينة تنتج حالات مستقرة .

لم يكتمل الحل بعد إذ بقي علينا تعيين قيمة الثابت A ويتم ذلك باستعمال شرط

التنظيم : $\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dx = 1$ وبما أن $\Psi = 0$ خارج المجال $0 \leq x \leq L$

يتلشى التكامل خارج المجال ويبقى لدينا :

$$\int_0^L A^2 \sin^2 \left(\frac{n\pi}{L} x \right) dx = 1 \quad (٤٤-٢)$$

بتنفيذ هذا التكامل نجد $A = \sqrt{\frac{2}{L}}$ ويكون الحل الكامل ضمن المجال المطلوب من

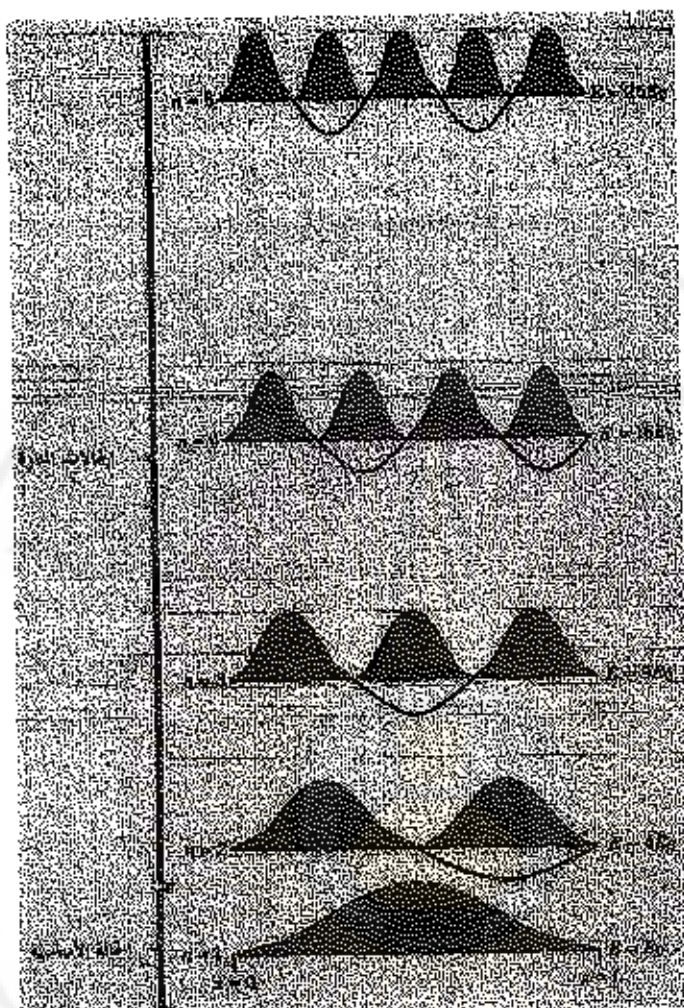
الشكل :

$$\left(\frac{n\pi}{L} x \right) \sin \Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \quad (٤٥-٢)$$

يظهر الشكل (٢-١٧) مستويات الطاقة المسموحة والتوابع الموجية $\Psi(x)$ وكثافة

الاحتمال $|\Psi(x)|^2$ من أجل بعض الحالات . تدعى أخفض حالة ، وتقابل

$n = 1$ ، بالحالة الأساسية وتدعى الحالات الأخرى بالحالات المثارة .



الشكل (١٧-٢) سويات الطاقة المسوطة لمجسم محصور في بئر تريبعية لانغالية وحيدة البعد ، والتوابع الموجية وكثافة الاحتمال .

سنوضح الآن في المثال التالي كيفية حساب الاحتمال والقيم المتوسطة .

مثال ١٧-٢

حصر إلكترون ضمن مجال وحيد البعد طوله $L = 0.1nm$. أوجد :

أ) الطاقة التي يجب أن نقدمها لإثارة الإلكترون من الحالة الأساسية إلى الحالة المثارة الأولى .

ب) احتمال وجود الإلكترون ضمن المجال $0 \leq x \leq L/4$ وهو في حالته المثارة الأولى .

ج) متوسط بعد الإلكترون عن أحد طرفي المجال .

نحسب أولاً طاقة الحالة الأساسية $E_0 = \frac{h^2 \pi^2}{2mL^2} = \frac{h^2 c^2}{8mc^2 L^2} \approx 37 \text{ eV}$ فتكون طاقة الحالة المثارة الأولى متساوية $E_2 = 4E_0$ لذلك يجب تقسيم طاقة تساوي $E_2 - E_1 = 3E_0 = 111 \text{ eV}$ لنقله إلى الحالة المثارة الأولى .

لحساب احتمال تواجد الإلكترون ضمن المجال المطلوب في الحالة المثارة الأولى نطبق العلاقة (٢-٣٤) فنجد :

$$P = \int_0^L \Psi^2 dx = \int_0^L \frac{2}{L} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{L} x \right) dx = \left[\frac{x}{L} - \frac{1}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{L} x \right]_0^L = 0.25$$

لحساب متوسط بعد الإلكترون عن أحد طرفي المجال نطبق العلاقة (٢-٤٠) فنجد :

$$\langle x \rangle = \int_0^L |\Psi|^2 x dx = \frac{2}{L} \int_0^L x \sin^2 \frac{2\pi}{L} x dx = \frac{L}{2} = 0.05 \text{ nm}$$

ب) اختراق الحواجز والانعكاس على العتبات :

لننظر إلى الحاجز المبين في الشكل (٢-١٨) حيث ترد عليه جسيمات طاقاتها E أقل من ارتفاع الحاجز V_0 . نتوقع أن نحصل على حلول لمعادلات شرودينغر في المجالات الثلاثة مماثلة للحلول الموضحة في الشكل ، أي تابع جيبي ضمن المجال $x < 0$ (موجة قادمة وأخرى منعكسة) ، تابع أسّي متناقص ضمن المجال $0 < x < a$ حيث a هو عرض الحاجز ، وتابع جيبي في المجال $x > a$ (موجة عابرة) .



الشكل (٢-١٨) التابع الموجي لجسيم طاقته $E < V_0$ إن سعة الموجة بعد الحاجز أقل مما كانت عليه قبل الحاجز .
 لا يمكن مشاهدة الجسيم ضمن الحاجز لأن الطاقة الحركية هناك سالبة ، ولكن يمكن مشاهدة الجسيم خلف الحاجز .
 تحسب شدة الموجة العابرة بتطبيق شروط الاستمرار الملائمة وترتبط بطاقة الجسيم وارتفاع الحاجز وعرضه . فمن وجهة نظر تقليدية لا يمكن أن يظهر الجسيم خلف الحاجز لعدم امتلاكه طاقة كافية للتغلب على الحاجز . وتدعى هذه الظاهرة في ميكانيك الكم بالمفعول النفقي ، فلا يمكن مشاهدة الجسيم ضمن المجال المحظور تقليدياً $0 < x < a$ ولكنه يستطيع أن يخترق هذا المجال ويشاهد في المجال $x > a$. ويوجد أمثلة كثيرة على المفعول النفقي مثل إصدار أشعة ألفا من النوى الثقيلة ، والانقلاب التبادلي ، والديوتري ، والديوتري النفقي ، ومجهر المسح النفقي .

مثال ٢-١٣

أوجد احتمال اختراق إلكترون طاقته الحركية 10eV لحاجز كموني ارتفاعه 12eV وعرضه 0.05nm .

إن معادلة شرودينجر داخل الحاجز هي $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V_0\psi = E\psi$ والتي
 تكتب على الشكل $\psi'' - k^2\psi = 0$ ويكون حلها من الشكل :

$$k^2 = \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2} \quad \text{حيث} \quad \psi(x) = Ae^{kx} + Be^{-kx} \quad (٢-٤٦)$$

ولكي يكون هذا الحل منسجماً مع الوضع داخل الحاجز نضع $A = 0$ فنحصل على تابع موجي متناقص . إن احتمال وجود الإلكترون بجوار الجانب الأيسر داخل الحاجز يساوي $\int_0^a \psi^2(x) dx = \int_0^a (B^2 e^{-2kx}) dx$ واحتمال وجوده بجوار الجانب الأيمن داخل الحاجز يساوي $\int_a^\infty \psi^2(x+a) dx = \int_a^\infty (B^2 e^{-2k(x+a)}) dx$ فيكون

احتمال اختراق الحاجز مساوياً نسبة احتمال وجود الإلكترون عند الطرف الأيمن داخل الحاجز إلى احتمال وجوده عند الطرف الأيسر داخل الحاجز أي :

$$T = \frac{(B^2 e^{-2k(x+a)}) dx}{(B^2 e^{-2kx}) dx} = e^{-2ka} \quad (٤٧-٢)$$

$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (V_0 - E)} = 7.24 \text{ nm}^{-1}$$

$$T = e^{-2ka} = 0.484$$

لننظر الآن إلى العتبة الميمنة بالشكل (١٩-٢) فإذا كانت الطاقة الكلية E أكبر من V_0

تكون معادلة شرودينغر في المجال الأول $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} = E\psi$ وتكتب بالشكل $\psi'' + k_0^2 \psi = 0$ ويعطى حلها بالعلاقة :

$$x < 0 \text{ ضمن المجال } k_0 = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \text{ حيث } \psi_0 = Ae^{ik_0x} + Be^{-ik_0x}$$

حيث يمثل الحد الأول Ae^{ik_0x} موجة واردة سعتها A والحد الثاني Be^{-ik_0x}

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V_0 \psi = E\psi \text{ موجة منعكسة سعتها } B. \text{ وفي المجال الثاني}$$

$$\psi'' + k_1^2 \psi = 0 \text{ والتي تكتب بالشكل ويعطى حلها بالعلاقة :}$$

$$x > 0 \text{ ضمن المجال } k_1 = \sqrt{\frac{2m(E-V_0)}{\hbar^2}} \text{ حيث } \psi_1 = Ce^{ik_1x}$$

وهي تمثل موجة عابرة متجهة نحو اليمين سعتها C . ويمكن إيجاد العلاقة بين الثوابت

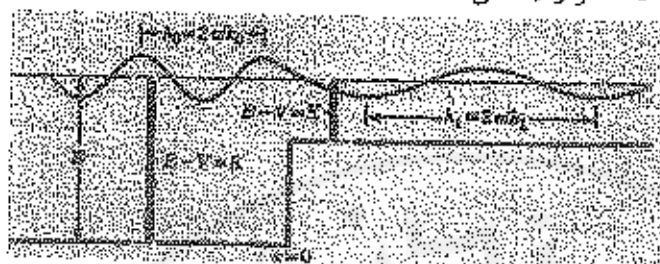
A و B و C بتطبيق شرط الاستمرار على كل من $\psi(x)$ ومشتقه $\frac{d\psi}{dx}$ عند الحدود . فعند $x=0$ نجد :

$$\psi_0(0) = \psi_1(0) \Rightarrow A + B = C$$

$$\psi'_0(0) = \psi'_1(0) \Rightarrow A - B = \frac{k_1}{k_0} C$$

$$C \frac{k_0 - k_1}{2k_0} C, \quad B = A = \frac{k_0 + k_1}{2k_0}$$

إن تطبيق شرطي الاستمرار يضمن اتفاقاً ناعماً عند الحدود .



الشكل (١٩-٢) التابع المربعي لجسيم طاقة E يجتاز عتبة ارتفاعها V_0 حيث $E > V_0$.

مثال ٢-٤

أوجد معامل الانعكاس لإلكترون طاقته الحركية 8.5 eV نحو عتبة كهربية ارتفاعها 10 eV .

نعرف معامل الانعكاس بأنه نسبة الطاقة المنعكسة إلى الطاقة الواردة ، وبما أن طاقة الموجة تتناسب مع مربع سعتها يكون معامل الانعكاس مساوياً :

$$R = \frac{B^2}{A^2} = \left(\frac{k_0 - k_1}{k_0 + k_1} \right)^2 \quad (٢٨-٢)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)} = 7.24 \text{ nm}^{-1}, k_0 = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} = 11.45 \text{ nm}^{-1}$$

$$R = 0.05 \quad \text{ومنه :}$$

٢-٤ الأعداد الكمومية

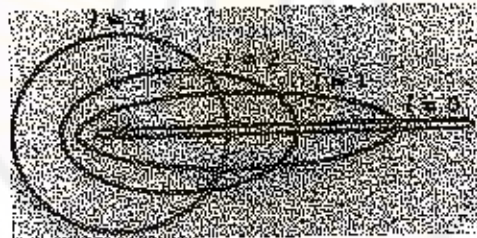
تتطلب المسائل ثلاثية الأبعاد ثلاثة أعداد كمومية لتحديد الجأول ، أي لا بد من ثلاثة أعداد كمومية لوصف التابع الموجي المسئل لفترة هيدروجين في الاحداثيات القطبية الكروية ، يرتبط العدد الكمومي الأول (الرئيس) بحل المعادلة المرتبطة بالموضع r وهو العدد n نفسه الشاهد لسويات الطاقة في نموذج بور . ويعطى حل المعادلة المرتبطة بالزاوية θ العدد الكمومي الثاني (المداري) l . أما معادلة الزاوية ϕ فتؤدي إلى العدد الكمومي الثالث (المغناطيسي) m_l . أما تفسير البنية الدقيقة فيتم بإدخال خاصية جديدة للإلكترون تدعى السبين الداخلي .

(n) : يدعى العدد الكمومي n بالعدد الرئيس ويأخذ القيم الصحيحة 1,2,3,4,...
فعند تحديد العدد n تتعين طاقة محددة كما في نموذج بور ، وبحل معادلة شرودينغر نجد
سويات مكممة للطاقة على وفق كامل مع نموذج بور .

$$E_n = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2 n^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (53-2)$$

ونلاحظ ارتباط الطاقة بالعدد الرئيس فقط وليس بأي من m أو m_l . ونحدد قيمة
العدد n في نموذج بور نصف قطر مدار الإلكترون فكلما كبرت قيمة العدد n كبر
نصف قطر المدار .

(2) : يأخذ العدد الكمومي المداري l القيم من 0 وحتى n-1 بخطوة تساوي
الواحد ، فمن أجل القيمة $n=3$ مثلاً يأخذ l ثلاثة قيم هي 0,1,2 . ويحدد العدد l
شكل المدار من حيث كونه قطعاً ناقصاً أو دائرة ويوضح الشكل (٢٠-٢) المدارات
الأساسية المقابلة لقيم l المختلفة في الحالة $n=4$.



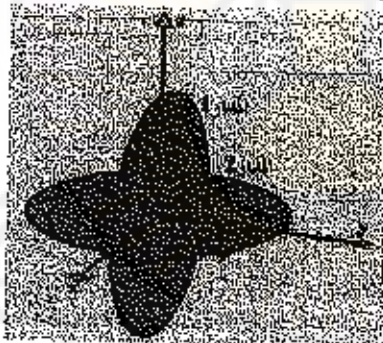
الشكل (٢٠-٢) مدارات الإلكترون المقابلة للعدد $n=4$. ونلاحظ أن القيمة المتوسطة لشعاع الوضع r واحدة في
جميع المدارات وأن الإلكترون في المدار المقابل لقيم l الصغيرة يقضي معظم وقته إما قريباً من النواة أو بعيداً عنها
ونجد من خلال هذا التفسير للعدد l ارتباطه بالاندفاع الزاوي للإلكترون فالمدار
المقابل لأكبر قيمة للعدد l أي $l = n - 1$ يملك أكبر اندفاع زاوي حول النواة
لذلك يكون دائرياً . وتقابل القيم الأصغر للعدد l مدارات قطعية ناقصية . أما أصغر
قيمة ($l=0$) فتعطي مسطحاً يمر بالنواة . وتعطي الحسابات الدقيقة المستندة إلى

حل معادلة شرودينغر علاقة بين طول شعاع الاندفاع الزاوي المداري $|L|$ والعدد المداري l هي:

$$|L| = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (2-50)$$

ولقد اصطلح إعطاء قيم العدد l رموزاً حرفية هي $s, p, d, f, g, h, \dots$ تقابل القيم $0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ على الترتيب ، وهي مأخوذة من الأحرف الأولى من الكلمات التي تصف الطيف وهي : Sharp , Principle , Diffused , Fundamental ، ثم المتابعة وفق الترتيب الأبجدي للأحرف الإنجليزية .

m_l : يعطي العدد الكمي m_l توجه مستوي المدار بالنسبة للمستوي xy . ويبين الشكل (٢-٢١) توجهين ممكنين لمدار الإلكترون . يكون لهذه التفسيرات التي أوردناها معنى ضمن الصورة التي يعطيها نموذج بور ، ويجب ألا تؤخذ بشكل حدي لأن المدار المحدد يتعارض مع مبدأ الارتياب .



الشكل (٢-٢١) توجهان مختلفان لمستوي مدار الإلكترون ، الأول يقع في المستوي xz ويقابل $m_l = 0$ والثاني يقع في المستوي xy ويقابل $m_l = \pm 1$.

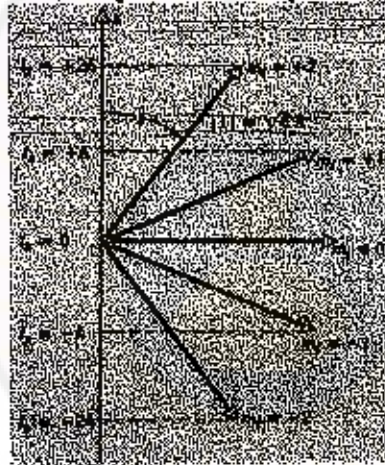
هناك خواص للمدارات ، وخاصة سلوكها ضمن الحقول المغناطيسية ، يمكن فهمها بسهولة عند استعمال نموذج نجعل فيه الاندفاع الزاوي يسلك سلوك شعاع عادي. ففي كل مدار ممكن للإلكترون يبقى الاندفاع الزاوي ثابتاً على طول المدار. سنمثل الاندفاع الزاوي بالشعاع $\vec{L}$ فهو بالمعنى التقليدي شعاع يمر بالنواة

ويعتمد مستوي مدار الإلكترون ويمكن أن يمتلك مركبات وفق أي محور في الفضاء .
تعطى مركبة شعاع الاندفاع الزاوي وفق المحور Z والتي نرمز لها بالرمز ℓ_z بالعلاقة :

$$\ell_z = m_\ell \hbar \quad (٥١-٢)$$

حيث m_ℓ هو العدد الكمومي المغنطيسي ، يأخذ القيم $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$ ، ويوضح الشكل (٢٢-٢) مركبات شعاع الاندفاع الزاوي في الحالة $\ell = 2$ ويقابل كل توجه للاندفاع الزاوي في الفضاء قيمة مختلفة للعدد m_ℓ ، وتعطى الزاوية التي يصنعها الاندفاع الزاوي مع المحور Z انطلاقاً من الشكل المبين ، حيث

$$\ell_z = |L| \cos \theta \quad \text{ومنه} \quad \cos \theta = \frac{\ell_z}{|L|} = \frac{m_\ell \hbar}{\sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar} = \frac{m_\ell}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \quad (٥٢-٢)$$



الشكل (٢٢-٢) للترجعات في الفضاء ومركبات الشعاع وفق المحور Z للحالة $\ell = 2$.

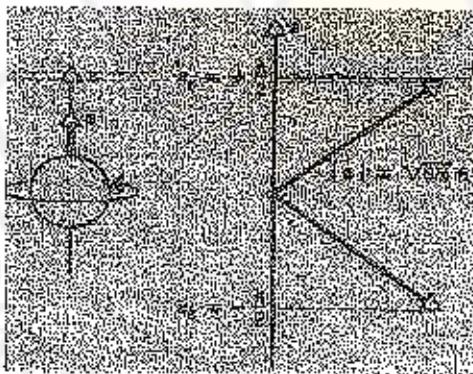
يمثل هذا السلوك فكرة جديدة في الفيزياء الكمومية تدعى تكميم الفراغ وهذا يعني أن هناك اتجاهات معينة مسموحة لأشعة الاندفاعات الزاوية . ويعطى عدد هذه الاتجاهات بالعلاقة $(2\ell + 1)$ أي بعدد قيم m_ℓ الممكنة .

أما قيم مركبات شعاع الاندفاع الزاوي المتتالية فتختلف عن بعضها بمقدار $\hbar$. ففي ميكانيك الكم يمكن للشعاع الممثل للحالة $\ell = 1$ أن يكون له ثلاث مركبات

فقط هي $(\hbar, 0, -\hbar)$ والمدهش هنا أننا نحصل على هذه النتيجة مهما كان اتجاه المحور Z .

(s): يكون للإلكترون عزم زاوي مداري L وهو يرتبط بحركة الإلكترون حول النواة ، وعزم زاوي داخلي S ، كما لو أن الإلكترون يدور حول محوره الخاص . لذلك يدعى S عادة بالسين الداخلي، وبعد إدخال فكرة دوران الإلكترون حول نفسه عام ١٩٢٥ أظهر ديراك أن الوصف النسبي للإلكترون في النظرية الكمومية يعطي سين الإلكترون كعدد كمومي رابع .

يتصرف السين الداخلي كالعزم الزاوي المداري ، أي أن هناك عدداً كمومياً S (يمكن عدّه دليلاً ناتجاً من الحل الرياضي) يقترن به عزم مغنطيسي، وله طول يساوي $|S| = \sqrt{s(s+1)}\hbar$ ومركبة وفق المحور Z تساوي $S_z = m_s \hbar$ أي عدد كمومي m_s يأخذ القيمتين $\pm \frac{1}{2}$ ويبين الشكل (٢-٢٣) خواص السين S . أي أن وصف الحالة في الذرة يتطلب أربعة أعداد كمومية هي (n, ℓ, m_ℓ, m_s)



(٢-٢٣) سين الإلكترون ونزجه في الفضاء .

مسائل وتمارين

١- أوجد طاقة الفوتون مقدرة بالجول وبالإلكترون فولط في حالة موجة كهرومغناطيسية

تواترها 900 kHz . الجواب $0.37 \times 10^{-18} \text{ eV}$

٢- ما هو تواتر فوتون طاقته 1 MeV ؟ الجواب $0.24 \times 10^{21} \text{ Hz}$

٣- ما هي طاقة فوتون طول موجته 650 nm ؟ الجواب 1.908 eV

٤- إذا كان تابع العمل للتنجستن مساوياً 4.58 eV ، أوجد تواتر عتبة الإصدار وطول الموجة . ثم أوجد كمون الايقاف في حالة ورود فوتون طول موجته 250 nm على التنجستن .

الجواب $1.106 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 270.74 nm 0.38 V

٥- عندما يزد ضوء طول موجته 300 nm على البوتاسيوم يكون الإلكترون المنطلق طاقة حركية عظمى تساوي 2.03 eV . أوجد طاقة الفوتون الوارد ، وتابع العمل للبوتاسيوم .

الجواب 4.13 eV 2.10 eV

٦- حزمة ضوئية طول موجتها 400 nm وشدها 100 W/m^2 . أوجد طاقة الفوتون الواحد في هذه الحزمة . ومقدار الطاقة التي تسقط خلال ثانية واحدة على 1 cm^2 من سطح عمود الحزمة . ما هو عدد الفوتونات التي تضرب هذه المساحة في الثانية الواحدة ؟

الجواب 3.10 eV 0.01 J $2 \times 10^{16} \text{ photons}$

٧- يستعمل فرق في الكمون قدره 460 kV لتوليد حزمة من الأشعة السينية ، ما هو أصغر طول موجة في الطيف المستمر الصادر من الأنبوب ؟ وما هو فرق الكمون الذي يجب تطبيقه كي يكون أصغر طول موجة في الطيف المستمر مساوياً 0.134 nm ؟

الجواب 2.7 pm 9.254 kV

٨- أوجد انزياح الطول الموجي $\Delta\lambda$ لفوتون يتبعثر على إلكترون ساكن وفق زاوية قدرها 60° الجواب $1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}$

٩- إذا كان الانزياح في الطول الموجي للفوتونات المتبعثرة مساوياً 0.33 pm فما هي زاوية التبعثر ؟ الجواب 30.23°

١٠- إذا كان التغير النسبي لطول الموجة مساوياً 1.5% من أجل زاوية تبعثر قدرها 90° فما هو طول موجة الفوتون الوارد على الإلكترون الحر ؟

الجواب 161.77 nm

١١- استعمل كومبتون فوتونات طول موجتها 0.0711 nm . أوجد طاقة كل من هذه الفوتونات ، وطول موجة الفوتونات المتبعثرة وفق الزاوية 180° ، وطاقتها ، والاندفاع الخطي لكل من الفوتون الوارد والمتبعثر ، والاندفاع الخطي للإلكترون المرتد وطاقته الحركية .

الجواب 17.44 KeV 0.0760 nm 16.33 KeV 1.1159 KeV

١٢- أوجد مجال الأطوال الموجية لكل من سلسلتي ليمن وبلمر .

الجواب $91.18 \text{ nm} < \lambda < 121.57 \text{ nm}$ ، $364.71 \text{ nm} < \lambda < 656.09 \text{ nm}$

١٣- ذرة هيدروجين مثارة إلى الحالة $n=11$ وفقاً لنموذج بور أوجد نصف قطر المدار ، والاندفاع الزاوي للإلكترون ، وسرعته ، وطاقته الكلية، وطاقته الحركية ، وطاقته

الكامنة ، واندفاعه الخطي الجواب 6.4 nm $11.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ $1.99 \times 10^5 \text{ m/s}$

-0.11 eV

0.11 eV -0.22 eV $18.13 \times 10^{-26} \text{ Kg.m/s}$

١٤- أوجد طول موجة دوبروي-لإلكترون طاقته الحركية 2.5 KeV .

الجواب 2.45 pm

١٥- أوجد الاندفاع الخطي والطاقة الحركية لإلكترون طول موجته 200 nm .

الجواب $6.2 \frac{eV}{c}$ $37.61 \times 10^{-6} eV$

١٦- أوجد فرق الكمون اللازم لتسريع إلكترون كي يصبح طول الموجة المواكبة له

مساوية 0.01 nm . الجواب $V_A = 15045V$

١٧- تبعثر فوتونات أشعة سينية على إلكترونات حرة ، وتلتقط عند زاوية تبعثر قدرها

100° وطول موجة قدره 0.2 nm . ما هي الطاقة الابتدائية لفوتونات الأشعة

السينية ؟

الجواب 6289.59 eV

١٨- أوجد طول الموجة المواكبة لإلكترون طاقته 200 MeV .

الجواب 6.2 fm

١٩- أثبت أن سرعة الإلكترون في المدار n لذرة الهيدروجين وفق نموذج بور يعطى

بالعلاقة $v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 \hbar n}$.

٢٠- يشع مصباح استطاعته 90 W بشكل متعانس في جميع الاتجاهات بطول موجة

قدره 650 nm . أوجد شدة الضوء عند مسافة تبعد 1.5 m عن المصباح . ما هو

عدد الفوتونات في الثانية الواحدة التي تضرب سطحاً معامداً لأشعة الضوء مساحته

$1 cm^2$ عند تلك المسافة ؟

الجواب $3.183 W/m^2$ $\approx 10^{15} photons$

٢١- ما هي طاقة الارتباط في شاردة الهليوم He^+ (حالة إلكترون واحد يدور حول نواة

الهليوم).

الجواب -54.4 eV

٢٢- احسب تواتر حركة إلكترون يدور في مدار بور الثاني عشر لذرة الهيدروجين وقارنه مع تواتر الاشعاع الصادر نتيجة انتقال الإلكترون من المدار الحادي عشر إلى المدار العاشر .

$$\text{الجواب } \approx 5 \times 10^{12} \text{ Hz} \quad \approx 6 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

٢٣- يتحرك إلكترون وبوزيترون متجهين نحو بعضهما بسرعتين متساويتين $v = 3 \times 10^6 \text{ m/s}$ فيقضي أحدهما الآخر ويتج من ذلك فوتونين يطاقان متساويين . ما هو طول الموجة المواكبة لكل من الإلكترون والبوزيترون ؟ وما هو طول موجة كل من الفوتونين ؟

$$\text{الجواب } \approx 0.24 \text{ nm} \quad \approx 1.2 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

٢٤- أوجد سرعة الطور وسرعة المجموعة وطول موجة إلكترون طاقته الحركية 2 KeV الجواب $\approx 2.7 \times 10^7 \text{ m/s}$ $= 0.027 \text{ nm}$

٢٥- ما هو احتمال اختراق إلكترون طاقته الحركية 10 eV لحاجز ارتفاعه 12 eV وعرضه 0.05 nm ؟ الجواب 0.48

٢٦- ما هي طاقة الحالة الأساسية للإلكترون محصور ضمن صندوق وحيد البعد طوله $L = 0.1 \text{ nm}$ ؟ الجواب 37.6 eV

٢٧- أوجد احتمال تواجد جسيم محصور ضمن صندوق وحيد البعد في المجال $0 < x < L/4$ الجواب 0.091

٢٨- أوجد طول موجة دوبروي لجزيئة آزوت درجة حرارتها 300 K ، وليوتون طاقته الحركية 5 MeV ، ولإلكترون سرعته 10^6 m/s .

٢٩- نريد دراسة جسيمات قطرها من المرتبة $0.10 \mu\text{m}$ مستعملين مجهرًا إلكترونيًا. أوجد طول موجة دوبروي المواكبة للإلكترون ، واحسب الكمون الذي يجب تطبيقه لتسريع إلكترونات المجهر .

٣٠- يتحرك إلكترون حبيطة وذهاباً بين جدارين المسافة بينهما $0.5nm$. أوجد أطوال أمواج دوبروي الممكنة لتشكيل أمواج مستقرة بين الجدارين ، ثم أوجد الطاقة الحركية لهذا الإلكترون .

٣١- إذا كان كمون التسريع في تجربة ديفسون - جيرمر مساوياً $105V$ فما هي الزاوية التي سيبدأ عندها الانعكاس الأول في الظهور ؟

٣٢- إذا قيست سرعة الإلكترون بارتياح مطلق يساوي $2 \times 10^4 m/s$ فما هو طول المجال الذي ينحصر فيه الإلكترون ؟

٣٣- أثبت أن سرعة الطور ترتبط بسرعة المجموعة وفق العلاقة :

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda}$$
 وعندما يجتاز الضوء الأبيض مادة شفافة ترتبط سرعة الطور لكل موجة بطول الموجة نفسها . ماهي علاقة v_p بطول الموجة λ ؟ هل تكون قيمة $\frac{dv_p}{d\lambda}$ موجبة أم سالبة ؟ أي هل تكون سرعة الطور أكبر من سرعة المجموعة ؟

٣٤- تتحرك بعض الأمواج السطحية في السوائل بسرعة طور تساوي $\sqrt{b/\lambda}$ حيث b ثابت . أوجد سرعة المجموعة لرزمة الأمواج السطحية بدلالة سرعة الطور .

٣٥- حصر إلكترون ضمن مجال وحيد البعد بطاقة صغرى تساوي $10eV$. ما هو طول المجال ؟ وما هي الطاقة اللازمة لنقل هذا الإلكترون إلى الحالة المثارة الأولى ؟ وإذا أصدر الإلكترون فوتوناً طاقته $240eV$ نتيجة انتقاله من الحالة n إلى الحالة الأساسية فما هو العدد n ؟

٣٦- حصر جسيم ضمن مجال وحيد البعد طوله L . أثبت أن احتمال وجوده ضمن المجال $0 \leq x \leq \frac{L}{n}$ وهو في حالته المثارة n يساوي $1/n$.

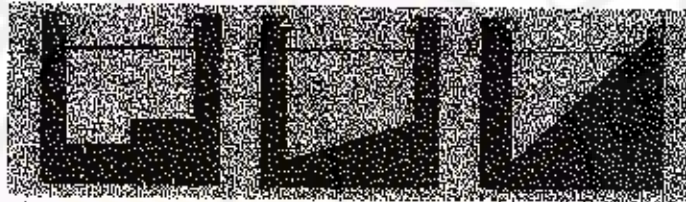
٣٧- يرد جسيم طاقته $E < V_0$ معامداً لعتبة ارتفاعها V_0 كما في الشكل المجاور .



أوجد مسافة الاختراق التي يصبح عندها احتمال وجود الجسيم مساوياً $1/e$. ثم
أحسب مسافة الاختراق من أجل :

$$E = 8eV, V_0 = 10eV, m = 0.511MeV/c^2$$

٣٨- أرسم حلول معادلة شرودينغر لكل من الكمونات المبينة أدناه :



٣٩- أحسب طول أشعة الاندفاع الزاوي الممثل لحركة الإلكترون في الحالات :

$$\ell = 1, 2, 3$$

٤٠- ماهو عدد القيم المختلفة لمركبات الاندفاع الزاوي المداري في الحالة

$$\ell = 3 \text{ وفق المحور } Z$$

٤١- ما هي الزوايا التي يصنعها شعاع الاندفاع الزاوي المداري مع المحور Z في الحالة

$$\ell = 2$$

الفصل الثالث

الفيزياء النووية والنشاط

الإشعاعي

Nuclear Physics & Radioactivity



٣-٩ بنية النواة

تتكون الذرة من إلكترونات، تدور حول النواة . وتكون مدارات الإلكترونات ذات طبيعة كمومية وتتمتع بسميات مهمة تحت دراستها في الفصل الثاني من هذا الباب وسناقش في هذا الفصل نواة الذرة ببعض التفصيل .

تتألف نواة الذرة من نوترونات وبروتونات يدعى كل منها بالنكليون . تم اكتشاف النوترون من قبل تشادويك عام ١٩٣٢ وهو جسيم معتدل كهربائياً وتزيد كتلته قليلاً عن كتلة البروتون .

يكون عدد البروتونات مختلفاً في نوى العناصر المختلفة ويدعى هذا العدد بالعدد الذري ويرمز له بالرمز Z . ويكون عدد البروتونات في الذرة مساوياً لعدد الإلكترونات التي تدور حول النواة . ويرمز لعدد النوترونات في نواة الذرة بالرمز N . يدعى مجموع عددي البروتونات والنوترونات بالعدد الكتلي ويمز له بالرمز A . أي

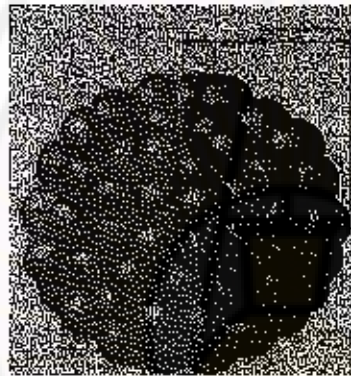
$$A = Z + N \quad (1-3)$$

وهناك رمز مختصر للنواة يربط بين العدد الكتلي A والعدد الذري Z والرمز الكيميائي للعنصر . ففي نوى جميع ذرات عنصر الألمنيوم الموجودة في الطبيعة يكون $A=27$ و $Z=13$ ويكون الرمز المختصر لهذا العنصر $^{27}_{13}\text{Al}$. ويكون عدد النوترونات في نواة ذرة الألمنيوم مساوياً $N=A-Z=14$. وبصورة عامة ، إذا كان الرمز الكيميائي لعنصر ما هو X يكون الرمز المختصر لنواته A_ZX فرمز البروتون هو ^1_1H لأن البروتون هو نواة ذرة الهيدروجين . ويرمز للنوترون بالرمز 1_0n . وفي حالة الإلكترون نستعمل الرمز $^0_{-1}e$. وقد وضع في هذا الرمز $A=0$ لأن كتلة الإلكترون صغيرة جداً بالمقارنة مع كتلة البروتون والنوترون . وكذلك $Z=-1$ لأن الإلكترون يحمل شحنة سالبة . تدعى العناصر التي لها العدد الذري نفسه ، أي عدد البروتونات نفسه ، بالنظائر . فمعظم نوى الكربون الموجودة في الطبيعة هي من النظير $^{12}_6\text{C}$ وتشكل (98.90%) بينما الجزء المتبقي النظائر الأخرى مثل $^{13}_6\text{C}$ و $^{14}_6\text{C}$. إن الكتل الذرية الموجودة في الجدول

الدوري للعناصر هي الكتل الذرية المتوسطة وقد أخذ فيها بالحسبان وفرة النظائر المختلفة . تتجمع البروتونات والنيوترونات في النواة على شكل عناقيد يكون لها شكل كروي تقريباً كما في الشكل (٢-٣) . وتشير التجارب إلى نصف قطر r للنواة يرتبط بالعدد الكتلي وفق العلاقة

$$r = 1.2A^{1/3} \text{ fm} \quad (٢-٣)$$

حيث $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ، فنصف قطر نواة الألمنيوم هو $1.2 \times 27^{1/3} = 3.6 \text{ fm}$ وتقود العلاقة (٢-٣) إلى نتيجة مهمة حول الكثافة النووية للذرات المختلفة وهي أن للكثافة النووية قيمة واحدة تقريباً في الذرات المختلفة .



الشكل (٢-٣) يكون للنواة شكل كروي تقريباً وهي تحوي بروتونات ونيوترونات

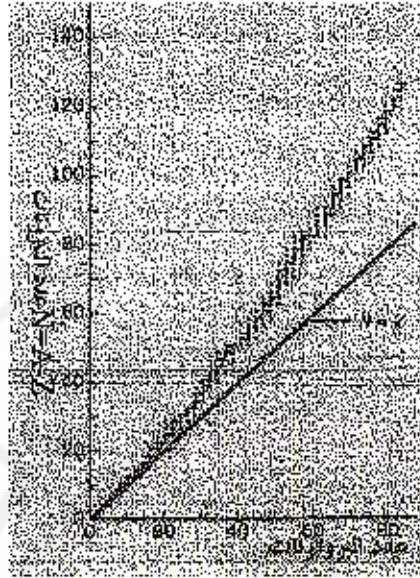
٢-٣ القوة النووية الشديدة واستقرار النواة

تتدافع الشحنات الموجبة القريبة من بعضها كما في النواة بقوة كهربائية ساكنة كبيرة . فما هو الذي يمنع أجزاء النواة من التطاير ؟ لا بد من وجود قوة جاذبة تؤمن تماسك النواة . وبما أن معظم أنواع الذرات الموجودة في الطبيعة تحوي نوى مستقرة ، وأن قوة التجاذب الكتلي بين النكليونات أضعف من أن تغلب على قوى التدافع الكهربائي ، لذلك لبد من نوع آخر من القوى يبقى على تماسك النواة . هذه القوة هي

القوة النووية الشديدة وهي واحدة من ثلاث قوى أساسية نعرفها اليوم ، أساسية بمعنى
إمكان تفسير أي قوة في الطبيعة بدلالة هذه القوى الثلاث.

أصبح الكثير من مظاهر القوة النووية معروفاً جداً . فهي غير مرتبطة بالشحنة
الكهربائية ، فمن أجل مسافة فصل معينة تكون قوة تجاذب نوترونين مساوية لقوة تجاذب
بروتونين ومساوية لقوة التجاذب بين البروتون والترون . ويكون مجال تأثيرها قصيراً
جداً ، فهي قوية جداً عندما تكون المسافة بين النكليونات من مرتبة $10^{-15} m$ وتعدم في
حالة مسافة أكبر . وتختلف عن القوة الكهربائية الساكنة التي تتباين تدريجياً متناسبة عكساً مع مربع
المسافة وبالتالي يكون مجال تأثيرها كبيراً نسبياً .

يلعب قصر مجال تأثير القوة النووية الشديدة دوراً مهماً في استقرار النواة .
فلنكون النواة مستقرة يجب أن تتوازن قوة التدافع الكهربائي بين البروتونات مع قوة
التجاذب النووية الشديدة . ولكن كل بروتون يتدافع مع جميع البروتونات الموجودة في
النواة بسبب طول مجال تأثير القوة الكهربائية الساكنة . بينما يتأثر كل نيكليون
بالنكليونات المجاورة له فقط بسبب صغر مجال تأثير القوة النووية الشديدة . ومع زيادة
عدد البروتونات ضمن النواة فإن عدد التروونات يجب أن يزداد أكثر لتأمين استقرار
النواة . يظهر الشكل (٣-٢) رسماً بيانياً لعدد التروونات كتابع لعدد البروتونات في
العناصر الطبيعية ذات النوى المستقرة . ويتضمن الشكل أيضاً الخط المستقيم الممثل
للشرط $N=Z$. فمع بعض الاستثناءات تقع النقاط الممثلة للنوى المستقرة فوق هذا الخط
المرجعي وهذا يعكس حقيقة كون عدد التروونات أكبر من عدد البروتونات مع ازدياد
العدد الذري :



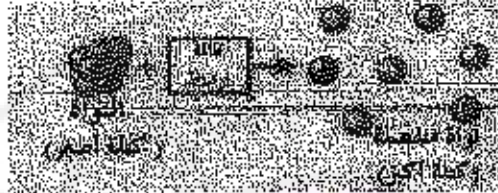
الشكل (٣-٢) إن عدد النوترونات في النوى المستقرة أكبر من عدد البروتونات فيها .

ومع ازدياد عدد البروتونات في النواة سنصل إلى حالة يصعب معها الحصول على التوازن بين قوة التدافع الكهربائي وقوة التجاذب النووي عن طريق زيادة عدد النوترونات ، لأن المجال الصغير المحدود لتأثير القوة النووية الشديدة يمنع النوترونات الإضافية من موازنة قوة التدافع الكهربائي طويلة المدى للبروتونات الإضافية .

إن أكبر عدد للبروتونات في النواة المستقرة هو $Z=83$ ويقابل عنصر البزموت $^{209}_{83}\text{Bi}$ وتكون جميع العناصر الأثقل من البزموت ، مثل اليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ وغيره ، غير مستقرة وتصدر تلقائياً أشعة نووية ، معيدة بذلك ترتيبها الداخلي مع مرور الزمن . تدعى عملية التفكك التلقائي هذه بالنشاط الإشعاعي . وتم اكتشافها من قبل بيكرل عام ١٨٩٦ ولسوف ندرس النشاط الإشعاعي ببعض التفصيل في الفقرة ٣-٤ .

٣-٣ طاقة الارتباط النووي

تكون النكليونات في النوى المستقرة متماسكة بسبب القوة النووية الشديدة . لذلك يتطلب فصل النواة المستقرة إلى مكوناتها من البروتونات والنيوترونات طاقة تدعى بطاقة الارتباط النووي كما هو موضح في الشكل (٣-٣) .



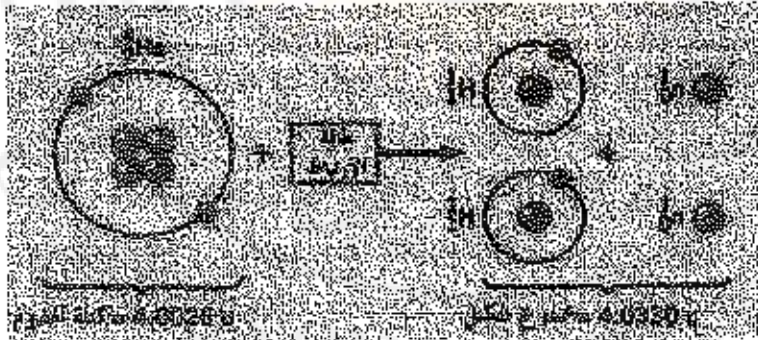
الشكل (٣-٣) يجب تقديم طاقة تساوي طاقة الارتباط لفصل النواة إلى مكوناتها . ويمكن حساب حساب طاقة ارتباط النواة من مقدار تغير الكتلة وفق العلاقة

$$(3-3) \quad \text{طاقة الارتباط} = c^2 (\text{تغير الكتلة}) = (\Delta m)c^2$$

مثال ٣-١

يعد الهليوم ${}^4_2\text{He}$ من أكثر نظائر الهليوم وفرة في الطبيعة فكتلته تساوي $6.6447 \times 10^{-27} \text{ kg}$ حيث $u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$ هي واحدة الكتلة الذرية وتساوي $1/12$ من كتلة ذرة الكربون ${}^{12}_6\text{C}$ أي تساوي 931.5 MeV أو $u = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$ أو وحدة طاقة ارتباط نواة الهليوم .

لحساب تغير الكتلة يجب طرح كتلة الهليوم من مجموع كتل النكليونات الموجودة فيها.



الشكل (٣-٤) يجب أخذ كتلة الإلكترون المداري في الحسبان عند حساب طاقة الارتباط .

الجدول (١-٢) كتل النوية لبعض العناصر

العنصر	الرمز	Z	U
الهيدروجين	^1_1H	1	1.007825
	^2_1H	1	2.014102
	^3_1H	1	3.016049
الهيليوم	^4_2He	2	4.002603
	^3_2He	2	3.016029
الليثيوم	^7_3Li	3	7.016003
البرون	$^{12}_6\text{C}$	6	12.000000
الكربون	$^{13}_6\text{C}$	6	13.003355
	$^{14}_6\text{C}$	6	14.003242
الأكسجين	$^{16}_8\text{O}$	8	15.994915
المغنيسيوم	$^{24}_{12}\text{Mg}$	12	23.985042
البوتاسيوم	$^{39}_{19}\text{K}$	19	38.963708
الحديد	$^{56}_{26}\text{Fe}$	26	55.934937
النحاس	$^{63}_{29}\text{Cu}$	29	62.929598
الفضة	$^{107}_{47}\text{Ag}$	47	106.905099
الذهب	$^{197}_{79}\text{Au}$	79	196.966569
الرصاص	$^{208}_{82}\text{Pb}$	82	207.976652
البولونيوم	$^{210}_{84}\text{Po}$	84	209.982874
الرادون	$^{222}_{86}\text{Rn}$	86	222.017531
الراديوم	$^{226}_{88}\text{Ra}$	88	226.025410
اليورانيوم	$^{238}_{92}\text{U}$	92	238.028910
البوتونيوم	$^{239}_{94}\text{Pu}$	94	239.052163

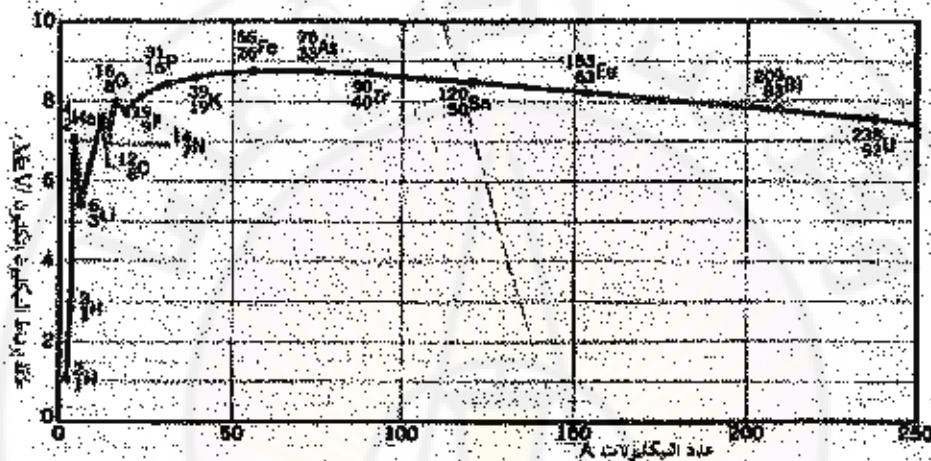
وبين الشكل (٣-٤) أن كتلة الإلكترون ستؤخذ في الحسبان عند استعمال كتلة ذرة الهيدروجين عوضاً عن كتلة البروتون . يكون مجموع كتل البروتونات والنيوترونات مساوياً

$$2(1.0087u) + 2(1.0078u) = 4.0330u$$

$$\Delta m = 4.0330u - 4.0026u = 0.0304u = 28.3\text{MeV}$$

وتغير الكتلة وهي تساوي طاقة ارتباط نواة الهليوم . ولعرفة تغير طاقة الارتباط من نواة إلى أخرى لابد من حساب طاقة ارتباط النكليون الواحد في النواة . ونجد في الشكل (٣-٥)

منحنياً يبيناً لطاقة الارتباط مقسومة على العدد الكتلي A كنابع للعدد الكتلي A . وتشير النهاية العظمى الحادة المقابلة للهليوم إلى استقرار خاص لنواة ذلك العنصر . تزداد طاقة ارتباط النكليون بسرعة في النوى ذوات الكتل الصغيرة إلى أن تبلغ القيمة 8.7 MeV تقريباً عند عدد كتلي يساوي 60 ثم تتناقص مع ازدياد العدد الكتلي بصورة تدريجية .

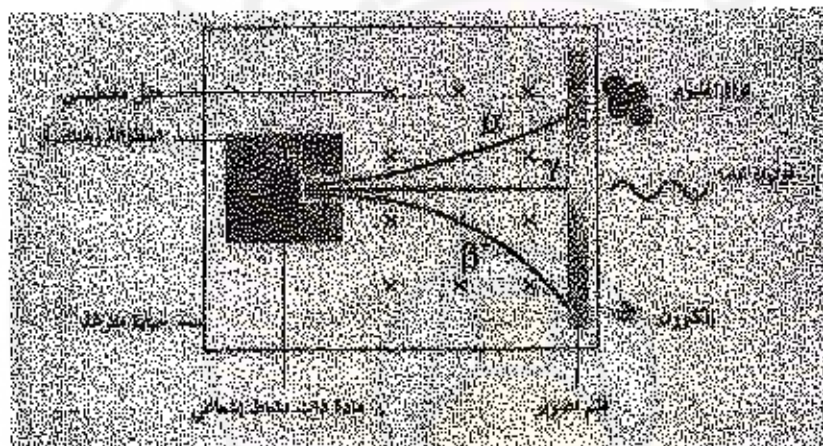


الشكل (٣-٥) طاقة ارتباط النكليون كنابع للعدد الكتلي

٣-٤ النشاط الإشعاعي

عندما تتفكك نواة مشعة أو غير مستقرة بصورة تلقائية ، فإنها تصدر أنواعاً معينة من الجسيمات وفوتونات عالية الطاقة . تدعى هذه الجسيمات والفوتونات بالأشعة النووية . تصنف الأشعة النووية وفقاً لقدرتها على اختراق المادة وتأيينها ، في ثلاثة أنواع هي : أشعة ألفا α وهي الأقل اختراقاً ، إذ تستطيع شريحة رقيقة من الرصاص منكمها 0.01mm أن توقفها ، والأكثر تأييناً ، وأشعة بيتا β وهي تستطيع اختراق صفيحة رصاصية منكمها 0.1mm ، ولها تأيين معتدل . وأشعة غاما γ وهي الأكثر اختراقاً ، إذ تصل إلى مسافة 100mm ضمن الرصاص ، والأقل تأييناً .

يمكن مشاهدة النشاط الإشعاعي الطبيعي في تجربة بسيطة نسبياً ، فتوضع عينة من مادة مشعة في قعر ثقب ضيق ضمن اسطوانة رصاصية موجودة ضمن حجرة مفرغة من الهواء ، كما في الشكل (٦-٣) . ويطبق حقل مغناطيسي يعامد مستوى الورقة ، أي يعامد مسار الأشعة التي تسقط على فيلم تصوير يوضع إلى يمين الثقب . يظهر تجميع الفيلام ثلاث بقع مرتبطة بالنشاط الإشعاعي لنوى المادة . وبما أن الحقل المغناطيسي يحرف الجسيمات المشحونة المتحركة ، فإن مكان البقع يفصح عن شحنة الجسيمات ، فأشعة ألفا موجبة وأشعة بيتا سالبة وأشعة غاما معتدلة .



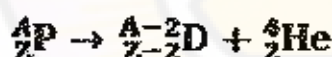
الشكل (٦-٣) تأثير الحقل المغناطيسي على الأشعة النووية .

التفكك : عندما تتفكك نواة ما وتنتج أشعة ألفا نقول أن النواة قامت بالتفكك α وتشير النتائج التجريبية أن أشعة α هي جسيمات مشحونة بشحنة موجبة بل هي نواة عنصر الهيليوم ${}^4_2\text{He}$. أي أن جسيم α شحنة تساوي $+2e$ وعدد من النكليونات يساوي $A=4$. وبما أن اجتماع بروتونين ونيوترونين في نواة الهيليوم مستقر بشكل خاص فليس مستغرباً إطلاق جسيم α كدفعة واحدة من نواة كبيرة غير مستقرة .



الشكل (٧-٣) يحدث التفكك ألفا عندما تصدر نواة مشعة الجسيم ألفا متحولة إلى نواة مختلفة .
 يبين الشكل (٧-٣) مثلاً على عملية التفكك α ، ويطلق على النواة الأصلية اسم النواة الوالدة وعلى النواة الناتجة بعد التفكك بالنواة البنت . فتحول نواة اليورانيوم ${}_{92}^{238}\text{U}$ إلى نواة الثوريوم ${}_{90}^{234}\text{Th}$ البنت . وبما أن النواة والبنات نواتان مختلفتان ، فهذا يعني أن التفكك α يحول العنصر إلى عنصر آخر بعملية تدعى بالتحويل .

تكون الشحنة مصانة خلال التفكك α إذ يبقى عدد البروتونات بعد التفكك مساوياً لعدد البروتونات قبل التفكك . كما يكون عدد النيوترونات مصاناً ايضاً . وبالاتساع مع انحفاظ كل من الشحنة وعدد النيوترونات يكون الشكل العام للتفكك α على النحو التالي :



عندما تطلق النواة جسيم α تطلق معه أيضاً مقداراً من الطاقة . وتكون الطاقة التي تطلقها التفككات المشعة مسؤولة جزئياً عن الحفاظ على الحرارة في جوف الأرض وإبقاء بعض المناطق فيه منصهرة . وبين المثال التالي أسلوب تحديد كمية الطاقة المتحررة باستعمال مبدأ انحفاظ الطاقة متذكّرين من النظرية النسبية الخاصة أن الكتلة مكافئة للطاقة بل إنها قياس لما يحويه الجسم من طاقة .

مثال ٣-٢

أوجد الطاقة المتحررة نتيجة تحول اليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ إلى الثوريوم $^{234}_{90}\text{Th}$ علماً أن الكتلة الذرية لكل من اليورانيوم والثوريوم وجسيم ألفا هي $238.0508u$ و $234.0436u$ و $4.0026u$ على الترتيب. إن مجموع كتلتي الثوريوم وجسيم ألفا يساوي

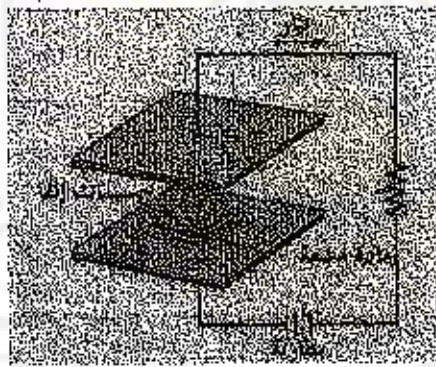
$$234.0436 + 4.0026 = 238.462u$$

وهو أصغر من كتلة اليورانيوم ، ويكون الفرق بينهما مساوياً $0.0046u$

وتكون الطاقة المتحررة مساوية $0.0046u \times 931.5 = 4.3 \text{ MeV}$

وتظهر هذه الطاقة على شكل طاقة حركية يتشارك فيها الثوريوم وجسيم ألفا ، ويكون لجسيم ألفا الجزء الأكبر بسبب صغر كتلته بالمقارنة مع كتلة الثوريوم .

ومن التطبيقات المألوفة في حياتنا اليومية للتفكك α هو استعماله في كاشفات الدخان في المنازل والمصانع . ويبين الشكل (٣-٨) مبدأ عمل كاشف الدخان .

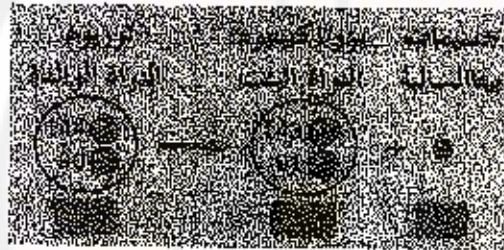


الشكل (٣-٨) كاشف الدخان

فهو مؤلف من صفيحتين معدنيتين مستويتين ومتوازيتين تفصلهما مسافة سنتيمتر واحد تقريباً ، وكمية صغيرة من مادة مشعة تصدر أشعة α توضع عند مركز إحدى الصفيحتين . تصطدم جسيمات α بجزيئات الهواء فتؤينها ، وتوصل الصفيحتان إلى قطبي بطارية ، فتصبح إحدهما موجبة والأخرى سالبة ، فتجذب كل منهما الأيونات

المخالفة لها بالإشارة . ونتيجة لذلك يمر تيار في الدارة المربوطة بالصفحتين . إن تواجد جزيئات الدخان بين الصفحتين يقلل من قيمة التيار بسبب تعديل الأيونات المصطدمة بجزيئات الدخان وبالتالي عدم انجذابها إلى الصفحتين . يستعمل انخفاض قيمة التيار في قديم جهاز الانذار .

التفكك β : تنحرف أشعة β تحت تأثير الحقل المغنطيسي باتجاه معاكس لانحراف أشعة α الموجبة كما هو مبين بالشكل (٣-٦) ، وبالتالي تتألف أشعة β هذه ، وهي الأكثر تواجداً ، من جسيمات مشحونة سلباً ، أو هي β^- ، وتشير التحارب إلى أن جسيمات β^- ماهي إلا إلكترونات . ولإيضاح التفكك β^- ننظر إلى نواة التوريوم $^{234}_{90}\text{Th}$ التي تتفكك مصدرة β^- كما في الشكل (٣-٩)



الشكل (٣-٩) عندما يتحول أحد النيوترونات إلى بروتون في نواة غير مستقرة يصدر إلكترون على شكل أشعة β^- .

يكون التفكك β^- مثل التفكك α ، بسبب تحول العنصر إلى عنصر آخر ففي المثال المذكور يتحول التوريوم $^{234}_{90}\text{Th}$ إلى البراكتينيوم $^{234}_{91}\text{Pa}$. ويكون كل من الشحنة وعدد النكليونات مضافين . ويكون الشكل العام للتفكك β^- على النحو التالي



لا تكون الإلكترونات الصادرة في التفكك β^- موجودة أصلاً في النواة الوالدة ، وليست أحد الإلكترونات المدارية . بل يتولد الإلكترون نتيجة تفكك النيوترون إلى بروتون وإلكترون ، وعندما يحدث ذلك يزداد عدد البروتونات في النواة بمقدار واحد

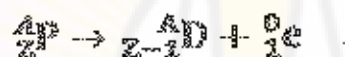
دون أن يتغير عدد النكليونات . يكون الإلكترون المتولد سريع الحركة ويهرب من الذرة تاركاً خلفه ذرة موجبة الشحنة .

يوضح المثال (٣-٣) كيفية حساب الطاقة المتحررة نتيجة التفكك ^{234}Pu وذلك بتطبيق مبدأ الحفظ الطاقة .

مثال ٣-٣

أوجد الطاقة المتحررة نتيجة تحول الثوريوم ^{234}Th إلى البراكتينيوم ^{234}Pa علماً أن الكتلة الذرية لكل منهما تساوي 234.04359u و 234.04330u على الترتيب . إن الفرق بين الكتلتين يساوي 0.00029u وهو يقابل طاقة متحررة مقدارها 0.27MeV وهي أكبر طاقة حركية يمكن أن يملكها الإلكترون المنطلق .

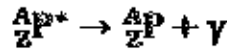
يوجد نوع آخر من التفكك ^{234}Th ينطلق خلاله من النواة حسيم يحمل شحنة موجبة تساوي $+e$ عوضاً عن $-e$ ، ويدعى بالبوزيترون أو β^+ وله كتلة الإلكترون نفسها . وتكون عملية التفكك في هذه الحالة على النحو التالي



لا يكون البوزيترون الصادر موجوداً في النواة لكنه يتولد عندما يتحول أحد البروتونات الموجودة ضمن النواة إلى نوترون ويحتاج مثل هذا التحول إلى طاقة عالية لذلك لا يحدث إلا ضمن النواة حيث القوة النووية الشديدة . فينقص بذلك عدد البروتونات بمقدار واحد ، بينما يبقى عدد النكليونات دون تغيير ، ويبقى قانونا الحفظ الشحنة و الحفظ عدد النكليونات محققين ، وكذلك يتم تحول عنصر إلى آخر .

التفكك β^+ : تتواجد النواة في حالات أوسويات من الطاقة المنفصلة ، وعندما تنتقل النواة من حالة مثارة إلى حالة أقل إثارة ، يصدر فرق الطاقة بين الحالتين على شكل فوتون ، وتشبه هذه العملية ، عملية إصدار الفوتون التي فسرت انعطاف الطيفية الذرية للهيدروجين . ويكون للفوتونات الصادرة عن النواة طاقة من مرتبة المليون

إلكترون فولت وتدعى بأشعة غاما . ويمكن التعبير عن عملية التفكك γ كما يلي



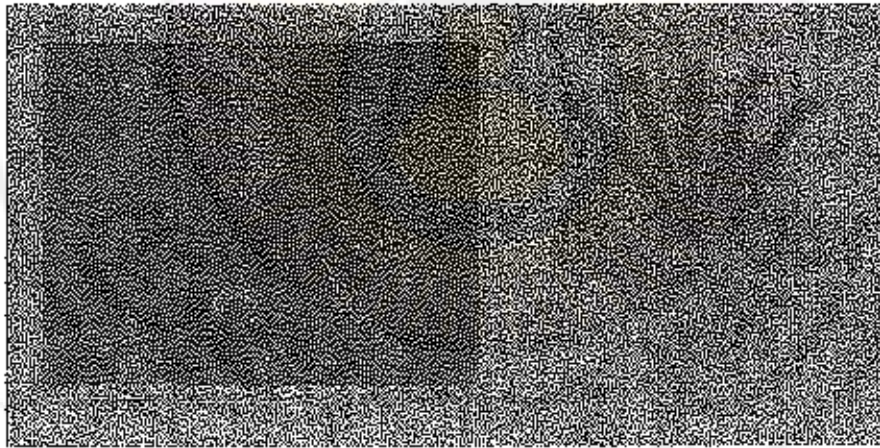
لا يسبب التفكك γ تحولاً من عنصر إلى آخر ، ومنحسب في المثال التالي طول موجة فوتون أشعة γ .

مثال ٣-٣

أوجد طول موجة فوتون أشعة γ ذي الطاقة 0.186MeV الصادر من نواة الراديوم ${}^{226}_{88}\text{Ra}$.

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1240}{186000} = 6.67 \times 10^{-3} \text{nm}$$

ويعد مشرط غاما للجراحة الإشعاعية أسلوباً طبياً واعداً جداً في معالجة مشاكل معينة في الدماغ مثل الأورام السرطانية والتشكيلات المشوهة للأوعية الدموية وغيرها . يستعمل في هذا الأسلوب ، الذي لا يتضمن مشرط على الإطلاق ، حزمة عالية التوجيه من أشعة غاما الصادرة من منبع الكوبالت ، توجه نحو الورم أو التشكيل.



الشكل (١٠-٣) (a) توضع على رأس المريض في الجراحة بمشرط غاما نحوذة معدنية واقية

تحتوي 210 ثقوباً صغيراً . (b) توجه الثقوب أشعة غاما نحو هدف صغير ضمن الدماغ.

ويبين الشكل (١٠-٣) (a) مريضاً يرتدي نحوذة معدنية واقية تحتوي 210 ثقوباً صغيراً،

وفي (b) نجد مخططاً يمثل توجيه الثقوب لأشعة غاما نحو هدف صغير واحد ضمن الدماغ . وهكذا يصل إلى خلايا الهدف جرعة عالية التركيز من الإشعاع فتدمرها ، بينما تبقى الخلايا المحيطة بالهدف دون أي تخريب . إن الجراحة باستعمال مشرط غاما دقيقة وغير مؤلمة أو مسببة للآثار وغالباً ما تجري في مستشفيات محلية ، وتقل فترة بقاء المريض في المستشفى بمقدار $(70-90)\%$ عن فترة بقائه في حالة الجراحة التقليدية ، وغالباً ما يعود المريض إلى ممارسة عمله الاعتيادي خلال عدة أيام .

٣-٥ التريينو

عندما يصدر الجسيم β من نواة مشعة ، فإن مقداراً من الطاقة يتحرر في اللحظة نفسها ، كما هو موضح في المثال (٣-٣) . ولقد وجد تجريبياً أن معظم جسيمات β لا تملك طاقة حركية تكافئ الطاقة المتحررة . فإذا أخذ جسيم β جزءاً من الطاقة ، فأين يذهب الجزء المتبقي ؟ ولقد حير هذا السؤال الفيزيائيين حتى عام ١٩٣٠ ، عندما اقترح باولي أن الجزء المتبقي من الطاقة يأخذه جسيم آخر يصدر من النواة مع الجسيم β . يدعى هذا الجسيم الإضافي بالتريينو ، وتم التحقق من وجوده عام ١٩٥٦ ، ورمز له بالحرف اليوناني ν (نيو) . وتكتب معادلة التفكك β^- بدقة أكبر وفق الشكل
$$\frac{A}{Z}P \rightarrow \frac{A}{Z+1}D + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$$
 وقد وضع الخط فوق ν لأن التريينو الصادر في هذا التفكك المعين هو التريينو المضاد ، يصدر التريينو العادي (ν بدون خط) عندما يحدث التفكك β^+ .

يكون التريينو معتدلاً كهربائياً ويصحب كشفه بسبب ضعف تفاعله المتبادل مع المادة . ويستطيع التريينو أن يخترق مسافة سنة ضوئية ($9.5 \times 10^{15} m$) ضمن الرصاص دون أي تفاعل متبادل . فبرغم مرور بلايين التريينوات في كل ثانية من خلال أجسامنا فإنها لا تؤثر علينا .

وتعد مسألة تحديد كتلة النترينو من أهم الأسئلة العلمية في أيامنا هذه ، ونأتي أهميتها بسبب تواجد النترينوات بجزارة في الكون وبالتالي أثرها الكبير في تشكيل المجرات . وقد أتى الدليل الأول غير المباشر على كتلة النترينو عام ١٩٩٨ وهي تساوي جزءاً ضئيلاً من كتلة الإلكترون . وهذا يعني أن النترينوات تسير بسرعة تقل عن سرعة الضوء.

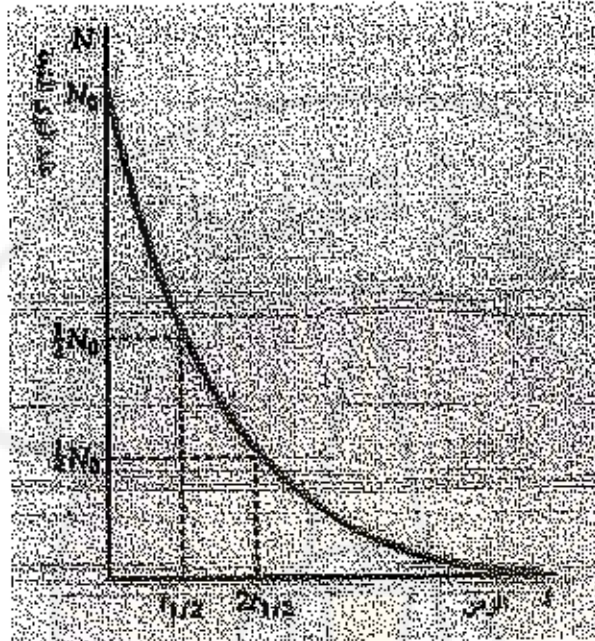
إن إصدار النترينو مع أشعة β يتطلب وجود قوة نووية ضعيفة وهي أضعف بكثير من القوة النووية الشديدة . ونعرف الآن أن القوة النووية الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية هما مظهران مختلفان لقوة أساسية واحدة هي القوة الكهروضعيفة . ولقد طور هذه النظرية كل من غلاشوا ، وعبد السلام ، و وينبرغ ، الذين اشتركوا في جائزة نوبل عام ١٩٧٩ التي منحت تقديراً لهم على هذا الإنجاز .

٣-٦ قانون التفكك الإشعاعي

تحدث تفككات النوى بصورة عشوائية على المستوى الفردي . ومع مرور الوقت يتناقص عدد النوى الوالدة N ، كما هو مبين في الشكل (٣-١١) . يمثل هذا المنحني ، العدد N كتابع للزمن ، وهو يتناقص بصورة ناعمة يتناهي فيها إلى الصفر بعد فترة طويلة جداً من الزمن . ومن المفيد في وصف هذا المنحني أن نعرف نصف العمر $T_{1/2}$ للنظير المشع بأنه الزمن اللازم لتفكك نصف النوى الموجودة . فللراديوم $^{226}_{88}\text{Ra}$ مثلاً نصف عمر يساوي 1600 سنة ، أي يتطلب مثل هذا الزمن كي يتفكك نصف أية كمية موجودة من هذا النظير المشع . وكذلك يتطلب 1600 سنة أخرى ليتفكك نصف المتبقي من الكمية أي ربع الكمية الأصلية .

ونرى في الشكل (٣-١١) أن عدد النوى في اللحظة $t=0$ هو $N=N_0$ بينما يكون مساوياً $N=N_0/2$ في اللحظة $t=T_{1/2}$ وكذلك $N=N_0/4$ في اللحظة $t=2T_{1/2}$ ،

وهكذا . ترتبط قيمة نصف العمر (ويسمى أحياناً بدور العنصر المشع) بطبيعة النواة المشعة . وتتراوح بين أجزاء الثانية وبلايين السنين .



الشكل (٣-١) نصف العمر هو الزمن اللازم لتفكك نصف النوى المشعة ،

فغاز الرادون $^{226}_{86}\text{Rn}$ هو غاز طبيعي مشع ينتج من التفكك α للراديوم $^{226}_{88}\text{Ra}$. وهناك اهتمام واسع حول الرادون كغاز مشع خطير على الصحة العامة لأن الرادون غاز موجود في التربة ويستطيع الدخول إلى أقبية المنازل من خلال شقوق الأساسات . وبعد دخوله المنزل يزداد تركيزه بشكل يرتبط بنوع البناء وتركيز غاز الرادون في التربة . يتفكك غاز الرادون إلى نواة مشعة تتفكك هي أيضاً إلى نواة مشعة ويمكن للنوى المشعة أن تلتصق بحبيبات الغبار والدخان التي يستنشقها الإنسان ، وتبقى في الرئتين مصدرة إشعاعات مخربة للخلايا . ويمكن أن يؤدي التعرض الطويل لمستويات عالية من الرادون إلى سرطان الرئة . إن قياس تركيز الرادون عملية سهلة وغير مكلفة لذلك ينصح بأن يتم اختبار تركيز الرادون في جميع أقبية المنازل .

نعرف النشاط الإشعاعي لعينة مشعة بأنه القيمة المطلقة لمعدل التفكك بالنسبة

للزمن . أي نسبة عدد الذرات المتفككة إلى الفترة الزمنية التي حدث فيها التفكك $\frac{\Delta N}{\Delta t}$.
وبما أن عملية التفكك هي عملية عشوائية دوماً ، فإن معدل التفكك لأية عينة مشعة يتناسب مع عدد النوى المشعة الموجودة فيها

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (3-4)$$

حيث λ هو ثابت التفكك . وتشير الإشارة السالبة في هذا القانون إلى تناقص عدد النوى نتيجة التفكك .

إن واحدة النشاط الإشعاعي في حملة الوحدات الدولية SI هي البيكرل (Bq) فالبيكرل الواحد هو تفكك في الثانية الواحدة . كما يقاس النشاط الإشعاعي بوحدة أخرى هي الكوري (Ci) وهو يساوي تقريباً النشاط الإشعاعي لغرام واحد من الراديوم النقي . أي أن الكوري الواحد يساوي $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. فالنشاط الإشعاعي للزاديوم الموجود في الساعة الرقمية الذي يجعلها تتوهج في الظلام يساوي $4 \times 10^4 \text{ Bq}$ تقريباً . والنشاط الإشعاعي المستعمل في معالجة الأمراض السرطانية أكثر بليون مرة أي $4 \times 10^{13} \text{ Bq}$. يمكن الوصول إلى الفيزياء الرياضية لنسبة N كتابع للزمن والبيان بالشكل (3-11) من العلاقة (3-4) مستعملين الحساب التفاضلي فنجد

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3-5)$$

ففي لحظة البدء $t=0$ يكون عدد النوى المشعة N_0 . ونستطيع ربط ثابت التفكك λ

بنصف العمر $T_{1/2}$ بحمل $t=T_{1/2}$ و $N=N_0/2$ في العلاقة (3-5) فنجد

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \text{وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي للطرفين نجد} \quad \ln 2 = \lambda T_{1/2} \quad \text{ومنه}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (3-6)$$

مثال ٣-٤

إذا كان عدد ذرات غاز الرادون المحصور في أحد الأقبية في لحظة تحصيل القيو ومنع دخول المزيد من الغاز إليه مساوياً 3×10^7 . أوجد عدد الذرات المتبقية بعد 31 يوماً ، ثم أوجد نشاطها الإشعاعي ، يوماً $T_{1/2} = 3.83$.

ينخفض عدد الذرات المشعة إلى النصف خلال نصف العمر فهو ينخفض بنسبة

$\left(\frac{1}{2}\right)^n$ خلال عدد مقداره n من أنصاف العمر . إن مدة 31 يوماً تقابل $8.1 = \frac{31}{3.83}$ من أنصاف العمر ، فيكون عدد الذرات المتبقية مساوياً

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^n N_0 = \left(\frac{1}{2}\right)^{8.1} \times 3 \times 10^7 = 1.09 \times 10^5 \text{ ذرة}$$

يمكن الحصول على النشاط الإشعاعي من العلاقة (٣-٤) فنجد

$$A = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = 0.23 Bq$$

٣-٧ التاريخ بالنشاط الإشعاعي

بعد تحديد عمر المستحاثات والعينات الجيولوجية من التطبيقات الهامة للنشاط الإشعاعي فإذا احتوى الجسم نوى مشعة لحظة تشكيله فإن تفكك هذه النوى يحدد مرور الزمن مثل المقاتية . إذ يتفكك نصف النوى خلال فترة تساوي نصف العمر فإذا كان نصف العمر لمادة الجسم معروفاً ، فإن قياس عدد النوى المشعة الموجودة اليوم بالنسبة لعدد النوى المشعة التي كانت موجودة لحظة التشكيل يعطي عمر العينة وبما أن النشاط الإشعاعي يتناسب مع عدد النوى المشعة الموجودة فنستطيع تحديد العمر بمقارنة النشاط الإشعاعي الحالي مع النشاط الإشعاعي الابتدائي . وبطريقة أكثر دقة يمكن تحديد عدد النوى المشعة الحالية باستعمال مطياف الكتلة .

يمكننا قياس النشاط الإشعاعي الحالي ، ولكن كيف نتمكن من معرفة النشاط الإشعاعي الأصلي قبل آلاف السنين ؟ يستعمل التاريخ بالنشاط الإشعاعي نظير الكربون

المشع $^{14}_6\text{C}$ الذي يصدر أشعة β^- بنصف عمر مقداره ٥٧٣٠ سنة . وهو نظير موجود في الغلاف الجوي للأرض بوفرة مقدارها حوالي ذرة واحدة مقابل 8.3×10^{11} ذرة من نظير الكربون $^{12}_6\text{C}$ ، ولقد افترض أن هذه الوفرة ثابتة على مر السنين لأن نظير الكربون $^{14}_6\text{C}$ يتولد نتيجة تفاعل الأشعة الكونية مع الغلاف الجوي العلوي بشكل يوازن خسارته نتيجة التفكك β^- . وأكثر من ذلك فإن العضويات الحية تؤمن ثبات تركيز الكربون $^{14}_6\text{C}$ عن طريق التنفس والطعام . وتتوقف لحظة موتها عن تأمين بديل للكربون $^{14}_6\text{C}$ المتفكك .

مثال ٣-٥

أوجد عدد ذرات نظير الكربون المشع $^{14}_6\text{C}$ الموجودة ضمن غرام واحد من الكربون الطبيعي في العضوية الحية ، ثم حدد ثابت التفكك ، والنشاط الإشعاعي لعينة تحوي غرام واحد من الكربون الطبيعي .

يحتوي الغرام الواحد من الكربون $^{12}_6\text{C}$ (والذي يساوي $1/12$ من الكتلة المولية التي تحوي عدد أفوغادرو من الذرات) العدد $\frac{6.22 \times 10^{23}}{12}$ من الذرات ، ويقابل كل ذرة واحدة من الكربون المشع $^{14}_6\text{C}$ عدد من الذرات يساوي 8.3×10^{11} من الكربون $^{12}_6\text{C}$ فيكون عدد ذرات الكربون $^{14}_6\text{C}$ الموجودة في غرام واحد من الكربون مساوية

$$N = \frac{6.22 \times 10^{23}}{12} \times \frac{1}{8.3 \times 10^{11}} = 6.0 \times 10^{10} \text{ ذرة}$$

ويكون ثابت التفكك مساوياً

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1.21 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1} = 3.85 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

والنشاط الإشعاعي للغرام الواحد من الكربون في العضوية الحية

$$A = \lambda N = 3.85 \times 10^{-12} \times 6.0 \times 10^{10} = 0.231 \text{ Bq}$$

فالعضوية التي تواجدت قبل آلاف السنين كان لها قبل موتها نشاطاً إشعاعياً يساوي

0.23Bq لكل غرام من الكربون فيها ، ويبدأ هذا النشاط بالتناقص فور موتها .
 فبقياس النشاط الإشعاعي الحالي للغرام الواحد من الكربون في العينة ومقارنته مع القيمة
0.23Bq نستطيع معرفة الفترة التي مرت على موت العينة .

مثال ٣-٦

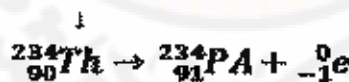
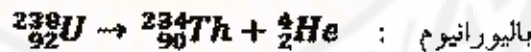
رجل الجليد هو مسافر من العصر الحجري علق مع زلجته في الجليد . وعند فحص
 عينة منه وجد أن النشاط الإشعاعي للغرام الواحد من الكربون فيها يساوي **0.121Bq** .
 حدد زمن وفاة رجل الجليد .

إن ثابت تفكك الكربون $^{14}_6C$ كما رأينا في المثال السابق يساوي $1.21 \times 10^{-4} y^{-1}$
 وبما أن $A = 0.121Bq$ و $A_0 = 0.23Bq$ فيمكن تحديد الفترة التي مرت على وفاة
 رجل الجليد باستعمال قانون التفكك الإشعاعي أي

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \rightarrow \ln \frac{A_0}{A} = \lambda t \rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A} = 5300 \text{ سنة}$$

٣-٨ سلاسل التفكك الإشعاعي

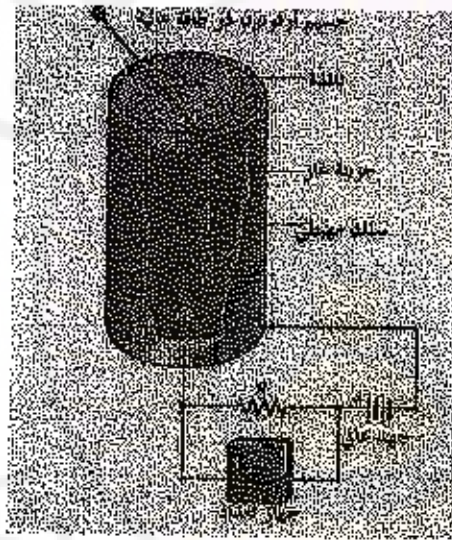
عندما تتفكك النواة الوالدة غير المستقرة ، تكون النواة البنت أحياناً غير مستقرة
 ، وفي هذه الحالة تتفكك النواة البنت منتجة نواة بنتاً خاصة بها ويستمر هذا الأمر إلى أن
 تصل إلى نواة بنتاً مستقرة . وتدعى متتالية تفكك نواة بعد أخرى بسلسلة التفكك
 الإشعاعي . ونجد في المثالين ٣-٢ و ٣-٣ المرحلتين الأولى والثانية من سلسلة تبدأ



وفي المثال ٣-٤ نجد تفكك الرادون $^{222}_{86}Rn$ الذي يتشكل ضمن سلسلة تفكك
 اليورانيوم $^{238}_{92}U$ ويظهر الشكل (٣-١٢) كامل السلسلة . ونجد عند بعض النقاط
 فروغاً يسببها إمكان حدوث تفككات من أنواع مختلفة للنوى الوسيطة . وتنتهي
 السلسلة بعنصر مستقر هو النظير $^{206}_{82}Pb$ للرصاص .

ويعد عداد غايغر أكثرها انتشاراً ، ويُحد في الشكل (٣-١٣) رسماً تخطيطياً لهذا

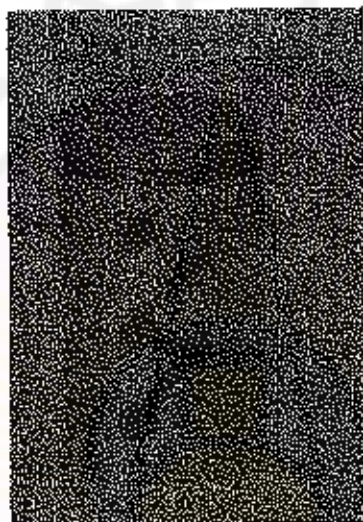
الكاشف . يتكون عداد غايغر من اسطوانة معدنية ممتلئة بالغاز . تدخل جسيمات α و β أو أشعة γ إلى الاسطوانة من خلال نافذة رقيقة عند إحدى نهايتها . كما تستطيع أشعة γ الدخول عبر المعدن . يمرر عبر محور الاسطوانة سلك يربط بكُمسون مرتفع موجب بالنسبة لسطح الاسطوانة الخارجي (ما بين 1000 V و 3000 V) . فعندما يدخل إلى الاسطوانة جسيم أو فوتون ذو طاقة عالية يصدم ويسوي جزئيات الغاز الموجودة فيها .



الشكل (٣-١٣) عداد غايغر

يتسارع الإلكترون الناتج من جزيئة الغاز نحو السلك الموجب مؤثراً في طريقه جزيئات أخرى ، ومشكلاً إلكترونات إضافية تندفع جميعها نحو السلك مولدة نبضة تيار عبر المقاومة R . يمكن عد هذه النبضات أو جعلها تولد أصواتاً مسموعة في السماعة الموصولة بالعداد . ويكون عدد النبضات أو الأصوات مرتبطاً بعدد التفككات المنتجة للجسيمات أو الفوتونات .

وبشكل عداد الوميض كاشفاً مهماً آخراً للإشعاع . يتكون هذا الجهاز من مولد ومضات مثبت على أنبوب التضاعف ، كما في الشكل (٣-١٤) . يتألف مولد الوميضات من بلورة (يود السيزيوم مثلاً) تحتوي على بعض الشوائب (الثاليوم) . ويستعمل بدلاً منها أحياناً ومضات بلاستيكية أو سائلة أة غازية . تصدر الوميضات ، استجابة للأشعة المؤينة ، فوتونات تقع أطوالها الموجية ضمن المجال المرئي وتضرب المهبط الضوئي لأنبوب التضاعف .



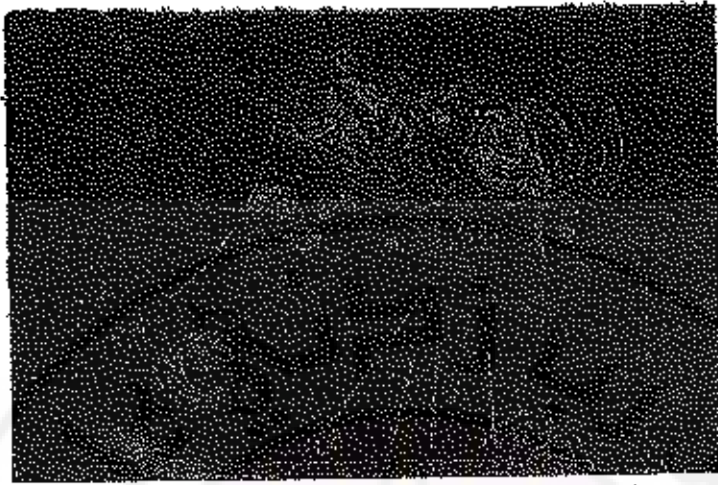
الشكل (٣-١٤) عداد الوميض

يصنع المهبط الضوئي من مواد تصدر إلكترونات وفقاً للمفعول الكهرضوئي . فتجذب هذه الإلكترونات الضوئية نحو مصعد خاص موصول مع كمون موجب يساوي 100 V تقريباً بالنسبة للمهبط الضوئي . يطلّى هذا المصعد بمادة تصدر عدة إلكترونات إضافية مقابل كل إلكترون يضرها . تجذب هذه الإلكترونات نحو مصعد مماثل للمصعد الأول يكون موصولاً مع كمون موجب يساوي 200 V ، فتولد إلكترونات إضافية أخرى . تحتوي أنابيب التضاعف التجارية على أكثر من خمسة عشر من المصاعد

بحيث تشكل الإلكترونات الناتجة من الومضة الضوئية للوماض شلالاً من الإلكترونات تشكل نبضة تيار واضحة وكما هو الحال في عداد غايغر يمكن عد هذه النبضات .

يمكن كشف الأشعة المؤينة أيضاً بوصلات من النوع $n-p$ من أنصاف النواقل حيث ترتبط العمليات فيها بالإلكترونات والثقوب المتشكلة في الوصلة نتيجة الإشعاع ومن أهم ملاميز الكواشف نصف الناقلة هو مقدرتها على التمييز بين الجسيمات التي تختلف طاقاتها اختلافاً ضئيلاً .

يؤمن عدد من أجهزة الكشف ثميلاً مصوراً لمسار الجسيمات عالية الطاقة بعد صدورها من نواة غير مستقرة . ففي حجرة الضباب يبرّد الغاز إلى درجة التكثف والتحول إلى قطرات ، فعندما يمر جسيم مثل α أو β من خلال الغاز تقوم الأيونات التي تخلفها وراءها بدور وسيط تتشكل عليه القطرات على طول مسار الجسيم . ويعمل جهاز حجرة الفقائيع بالطريقة نفسها باستثناء أنه يحوي على سائل عند نقطة الغليان . وتتشكل فقاعات صغيرة خلف الجسيم ذي الطاقة العالية والعاير لهذا السائل . وتعطي المسارات في حجري الضباب والفقائيع ، والتي يمكن تصويرها ، تسجيلاً دائماً للحدث . ويبين الشكل (٣-١٥) صورة للمسارات في حجرة الفقائيع . ويمكن أيضاً استعمال المستحلب التصويري بصورة مباشرة في تسجيل المسار الذي يسلكه جسيم من الأشعة المؤينة . إذ تسبب الأيونات المتشكلة نتيجة مرور الجسيم عالي الطاقة في المستحلب ، توضع الفضة على طول المسار عند تجميع وإظهار المستحلب .



الشكل (٣-١٥) صورة لمسار الجسيمات في حجرة الفقاعات .

٣-١٠ التأثير البيولوجي للأشعة المؤينة

تتألف الأشعة المؤينة من الفوتونات أو الجسيمات المتحركة التي تملك طاقة كافية لإخراج الإلكترون من الذرة أو الجزيء مشكلة بذلك أيوناً . ويقع الفوتون عادة في مجال الأشعة فوق البنفسجية أو الأشعة السينية أو أشعة γ ، من الطيف الكهربائي . بينما تكون الجسيمات المتحركة هي جسيمات α وجسيمات β الصادرة في عملية تفكك إشعاعي . تقع الطاقة اللازمة لإخراج الإلكترون من الذرة أو الجزيء ضمن المجال (1-35eV) ، بينما تكون طاقة الأشعة المؤينة الصادرة من عملية تفكك نووي من مرتبة MeV . لذلك يمكن للجسيم واحد أو فوتون واحد أن يؤين آلاف الجزيئات . إن الإشعاعات النووية خطيرة جداً على الإنسان ، لأن الأيونات التي تنتجها تؤثر تأثيراً كبيراً على بنية الجزيئات ضمن الخلية الحية . مما يؤدي إلى موت الخلية أو العضوية نفسها . وبالرغم من هذا الخطر فإن الأشعة المؤينة تستعمل في ميادين الطب للتشخيص والمعالجة . مثل تحديد مواضع كسور العظام ومعالجة السرطانات . ويمكن

تقليل أخطار الأشعة المؤينة إلى الحد الأدنى بفهم أساسيات التعرض للأشعة بما فيها الجرعات والآثار البيولوجية للإشعاع .

التعرض : هو قياس للتأين الناتج في الهواء من الأشعة السينية أو أشعة غاما . ويعرف على النحو التالي : عند إمرار أشعة سينية أو أشعة غاما من خلال كتلة مقدارها m من الهواء الجفاف في الشرطين النظاميين ، تنتج هذه الأشعة أيونات موجبة شحنتها الكلية q . نعرف التعرض بأنه نسبة هذه الشحنة إلى الكتلة أي q/m . ففي جملة الوحدات الدولية تكون وحدة التعرض (C/kg) . ومع ذلك فإن وحدة التعرض التي استعملت في البداية هي الرونتجن R وما زالت تستعمل حتى اليوم . ويعطى التعرض مقاساً بالرونتجن كما يلي :

$$(٧-٣) \quad \text{التعرض بالرونتجن} = \frac{1}{2.58 \times 10^{-4} \text{ m}} q$$

أي أن أشعة سينية أو أشعة غاما تؤدي إلى تعرض مقداره رونتجن واحد ، إذا أنتجت ضمن كيلو غرام واحد من الهواء الجفاف في الشرطين النظاميين شحنة مقدارها

$$2.58 \times 10^{-4} C/kg \quad 1R = \quad \text{وبالتالي} \quad 2.58 \times 10^{-4} C$$

بما أن فكرة التعرض قد بنيت على مقدرة الأشعة السينية أو أشعة غاما على التأين في الهواء ، فهي لا تعطي تأثير الإشعاع على الأنسجة الحية . ولأغراض بيولوجية تكون الجرعة الممتصة أكثر ملاءمة للاستعمال ، لأنها تساوي الطاقة التي تمتصها واحدة الكتلة من المادة الممتصة .

$$(٨-٣) \quad \text{الجرعة الممتصة} = \frac{\text{طاقة تمتصت}}{\text{كتلة المادة الممتصة}}$$

إن وحدة الجرعة الممتصة في جملة الوحدات الدولية هي الغراي (Gy) وتساوي (J/kg) ، وتطبق العلاقة (٨-٣) على جميع أنواع الأشعة وجميع أنواع المواد . ويوجد واحدة أخرى تستعمل في قياس الجرعة الممتصة وهي الراد (rd) وتساوي $0.01 Gy$.

يكون مقدار التخريب البيولوجي الناتج من الأشعة المؤينة مختلفاً في الأنواع المختلفة من الإشعاع . ولقارنة التخريب يستعمل ما يدعى بالتأثير البيولوجي النسبي (RBE) . وهو يقارن الجرعة اللازمة من إشعاع معين لإحداث تأثير بيولوجي مماثل للتأثير البيولوجي الذي تحدثه جرعة أشعة سينية طاقة فوتونها 200 keV .

$$\text{جرعة من الأشعة السينية ذات الطاقة } 200\text{keV التي تحدث تأثيراً بيولوجياً معيَّناً} \\ \text{جرعة الإشعاع التي تحدث التأثير البيولوجي نفسه} = \frac{\text{التأثير البيولوجي النسبي}}{\text{جرعة الإشعاع التي تحدث التأثير البيولوجي نفسه}}$$

يرتبط التأثير البيولوجي النسبي بطبيعة الأشعة المؤينة وطاقتها وكذلك بنوع الأنسجة المعرضة للإشعاع ، فهي تساوي الواحد لكل من أشعة γ وأشعة β والأشعة السينية ذات الطاقة 200 keV ، وتساوي 10 للبروتونات و (20-10) لأشعة α ، و 2 للنيوترونات البطيئة ، و 10 للنيوترونات السريعة . وإن كبر قيمة RBE للبروتون وحسيم α والنيوترونات السريعة تشير إلى إحداثها تخريباً وضرراً كبيراً بالمقارنة مع الأشعة المؤينة الأخرى . تستعمل RBE غالباً مع الجرعة الممتصة لإظهار التخريب الناتج من الإشعاع . فجداء الجرعة الممتصة مقدرة بالراد بالمقدار RBE يعرف بالجرعة البيولوجية المكافئة ولها الوحدة rem .

يمكن تصنيف تأثير الإشعاع على الإنسان في مجموعتين وفقاً للفترة الزمنية بين التعرض للإشعاع وظهور الأعراض . (1) قصيرة المدى أو آثار حادة تظهر خلال دقائق أو أيام أو أسابيع ، (2) طويلة المدى أو آثار بطيئة تظهر بعد سنين أو عقود أو حتى في الأجيال اللاحقة.

يطلق بصورة عامة على الآثار الحادة للإشعاع بالمرض الإشعاعي . ويعاني الشخص المعرض للإشعاع ، حسب شدة الجرعة ، من الدوخة والإقياء والسخونة والإسهالات وتساقط الشعر ، وقد ينتهي به الأمر إلى الموت . ترتبط شدة المرض بالجرعة المثلثة ، ويقصد بالجرعة البيولوجية المكافئة في مايلي جرعة واحدة لكامل الجسم . فإذا كانت الجرعة البيولوجية المكافئة أقل من 50 rem فإنها لا تسبب آثاراً

قصيرة المدى . أما إذا كانت بين 50 rem و 300 rem فتسبب المرض الإشعاعي ، وتزداد حدة وشدة المرض مع زيادة الجرعة . وتصنف الجرعات الواقعة بين 400 rem و 500 rem كجرعات مميتة بنسبة 50% من مجموع الأشخاص الذين تعرضوا لها . وعندما تتجاوز الجرعة البيولوجية المكافئة قيمة 600 rem فإنها تقضي على جميع المتعرضين لها .

تظهر آثار الإشعاع البطيئة أو طويلة المدى نتيجة تعرض قصير المدة لجرعة عالية أو تعرض طويل المدة لجرعة منخفضة . ويعد تساقط الشعر واحمرار العينين والأنواع المختلفة من السرطان من بعض الأعراض المرضية للتعرض لمثل هذا الإشعاع . وقد تنتقل التشوهات الجينية الناتجة من هذا التعرض من جيل إلى آخر .

الجدول (٢٢) التلصق وحسب شحنتها

التمسك	mm/y	
خشب		
الحلابة	45	
خشب خالص (الزيتون)	30	
خشب خالص + زيتون	25	120
خشب		
الحلابة	70	
خشب خالص (الزيتون)	<1	
خشب خالص + زيتون	<1	
خشب	<1	70
الحلابة		200

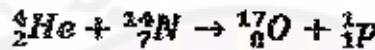
الجدول (٢٣) خيوط الخوص

التمسك	شكل دوري	5 mm	بالسنة
التمسك	شكل غير دوري	(10-15) mm	بالسنة
التمسك	المعبر R	(15-20) mm	بالسنة
الحلابة		15 mm	بالسنة
الزيتون		57 mm	بالسنة
الحلابة		50 mm	بالسنة
الحلابة		15 mm	بالسنة
الحلابة		0.5 mm	بالسنة

٣-١١ التفاعلات النووية

وجدنا في الفقرة (٣-٤) كيف تتفكك النواة الوالدة المشعة بصورة تلقائية إلى النواة البنت . ويمكن أيضاً تحريض النواة المستقرة على التفكك برجمها بنواة أخرى أو جسيم ذري أو جسيم من مكونات الذرة أو فوتون أشعة غاما . يحدث التفاعل النووي عندما تسبب نواة واردة أو جسيم أو فوتون (القذيفة) تغييراً في النواة (الهدف).

لاحظ رزفورد عام ١٩١٩ أنه عند رجم نوى الآزوت بجسيمات α تنتج نوى الأكسجين وبروتونات . ويكتب هذا التفاعل النووي على الشكل :



وبسبب تحريض جسيم α لنواة الآزوت كي تتحول إلى نواة الأكسجين ، يعد هذا التفاعل مثالاً للتحويلات النووية المحرزة .

تكتب التفاعلات النووية عادة بصورة مختزلة . فيكتب التفاعل السابق مثلاً على الشكل ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$. يمثل الرمز الأول النواة الابتدائية ، ويمثل الرمز الأخير النواة النهائية . بينما تمثل الرموز الموجودة بين القوسين جسيم α (على اليسار) والجسيم الصغير الصادر أو البروتون (على اليمين) . نجد فيما يلي بعض التحويلات النووية المحرزة مع الرموز المختزلة المقابلة لها .

الرمز المختزل	التفاعل النووي
${}^{10}_5\text{B}(n, \alpha){}^7_3\text{Li}$	${}_0^1\text{n} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$
${}^{25}_{12}\text{Mg}(\gamma, p){}^{24}_{11}\text{Na}$	$\gamma + {}^{25}_{12}\text{Mg} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Na} + {}^1_1\text{p}$
${}^{13}_6\text{C}(p, \gamma){}^{14}_7\text{N}$	${}_0^1\text{p} + {}^{13}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$

مثال ٣-٧

ترجم نواة الألمنيوم ${}^{27}_{13}\text{Al}$ بجسيم α فينتج عنصر مجهول مع نوترون أو جد العنصر المجهول ميبناً عدديه الكتلي والذري .

إن الحفاظ الشحنة في هذا التفاعل يعطينا العدد الذري للعنصر المجهول أي

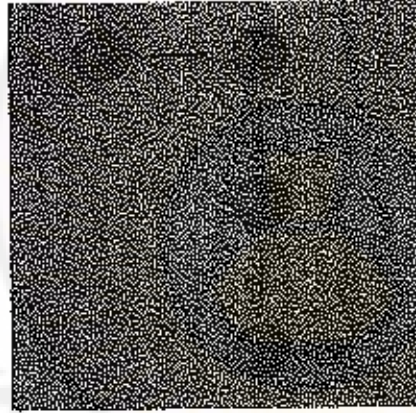
$$\rightarrow Z = 152 + 13 = Z + 0$$

كما أن انحفاظ عدد النكليونات يعطينا العدد الكتلي أي

$$A + 27 = A + 1 \rightarrow A = 30$$

والعنصر المجهول هو الفوسفور $^{30}_{15}\text{P}$.

يمكن استعمال التحويلات النووية المحرصة في إنتاج نظائر غير موجودة في الطبيعة . ولقد اقترح فيرمي عام ١٩٤٣ طريقة لإنتاج عناصر ذات عدد ذري أكبر من العدد الذري لليورانيوم مثل النبتونيوم ($Z=93$) والبلوتونيوم ($Z=94$) والأمريسيوم ($Z=95$) وغيرها ، والتي تعرف بعناصر تحولات اليورانيوم وهي عناصر لا تتواجد بشكل طبيعي . ويمكن توليدها في تفاعلات نووية بين عنصر مستقر وحسيم صغير وارد مثل النيوترون أو حسيم α .



الشكل (٣-١٦) تفاعل نووي يتحول فيه اليورانيوم إلى البلوتونيوم .

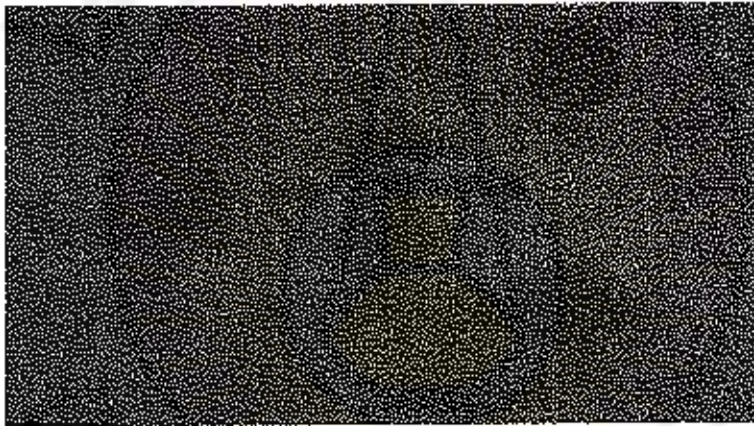
يبين الشكل (٣-١٦) تفاعلاً منتجاً للبلوتونيوم ^{239}Pu من اليورانيوم ^{238}U . حيث تأسر نواة اليورانيوم ^{238}U نوتروناً منتجاً اليورانيوم ^{239}U وأشعة غاما . يكون اليورانيوم ^{239}U مشعاً ويتفكك متحولاً إلى النبتونيوم ^{239}Np بنصف عمر يساوي 23.5 min . ويكون النبتونيوم ^{239}Np مشعاً أيضاً ويتحول إلى البلوتونيوم ^{239}Pu بنصف عمر يساوي 2.4 days . ويكون البلوتونيوم هو الناتج النهائي بنصف عمر

قدره 24100 years .

يمكن للطاقة الحركية للنترون المشارك في هذا التفاعل أن تأخذ مجاًلاً واسعاً من القيم . وتدعى النترونات ذات الطاقة الحركية التي تقل عن 0.04 eV بالنترونات الحرارية .

٣-١٢ الانشطار النووي

اكتشف العلماء الأربعة أوتو هان ، وليز ميتنر ، وفريترز ستراسمان ، وأتو فريتش ، عام ١٩٤٣ اكتشافاً مهماً أدخل العالم في عصر الذرة . فلقد وجدوا أن نواة اليورانيوم تنقسم بعد أسرها للنترون إلى جزأين كتلة كل منهما أصغر من كتلة النواة الأصلية . وعرفت عملية انقسام نواة ذات كتلة كبيرة إلى جزأين أقل كتلة بالانشطار النووي .

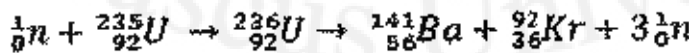


الشكل (٣-١٧) يسبب النترون البطيء انشطار نواة اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ إلى نواتي الباريوم

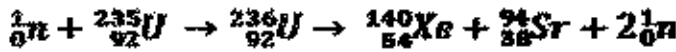
$^{141}_{56}\text{Ba}$ والكريبتون $^{92}_{36}\text{Kr}$ وثلاثة نترونات .

يظهر الشكل (٣-١٧) تفاعل انشطار تنقسم فيه نواة اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ إلى

نواتي الباريوم $^{141}_{56}\text{Ba}$ والكريبتون $^{92}_{36}\text{Kr}$. يبدأ التفاعل عندما تأسر نواة اليورانيوم نتروناً بطيئاً لتشكل نواة مركبة ، تتفكك بسرعة إلى نواتي الباريوم والكريبتون وثلاثة نترونات وفق التفاعل



وهو تفاعل من بين عدد من التفاعلات الأخرى الممكنة نتيجة انشطار اليورانيوم مثل



نتج بعض التفاعلات عدداً من النيوترونات قد يصل إلى خمسة نيوترونات ، ومع ذلك يكون متوسط عدد النيوترونات في الانشطار الواحد مساوياً 2.5 .

عندما يصطدم النيوترون ويؤسر من قبل نواة اليورانيوم ، تبدأ نواة اليورانيوم بلاهتزاز وتصبح مشوهة . ويستمر الاهتزاز إلى أن يصبح التشوه كبيراً لاستطيع معه القوة النووية موازنة قوة التدافع الكهربائي الساكنة بين بروتونات النواة . في تلك اللحظة تنقسم النواة إلى أجزاء تحمل معها الطاقة على شكل طاقة حركية . تكون الطاقة التي تحملها الأجزاء هائلة ، وقد كانت مخزنة في النواة الأصلية على شكل طاقة كهربائية كامنة . ويكون متوسط الطاقة المتحررة من انشطار واحد مساوياً 200MeV تقريباً ، وهي أكبر بعشرة بلايين مرة من الطاقة المتحررة من مول واحد في أي تفاعل كيميائي مثل احتراق البنزين أو الفحم . ويوضح المثال التالي كيفية تقدير الطاقة المتحررة من انشطار النواة .

مثال ٣-٨

قدر قيمة الطاقة المتحررة نتيجة انشطار نواة عددها الكتلي $A=240$.

إن طاقة ارتباط النكليونات الواحد في نواة عددها الكتلي $Z=240$ يساوي 7.6 MeV تقريباً ، كما أن طاقة ارتباط النكليونات في نواة عددها الكتلي 120 يساوي 8.5 MeV تقريباً وذلك وفقاً للمنحني المرسوم في الشكل (٣-٥) . أي أن هناك طاقة تتحرر نتيجة انشطار هذه النواة مقدارها $8.5 - 7.6 = 0.9 \text{ MeV}$ لكل نكليون . وتكون الطاقة المتحررة نتيجة انشطار نواة عددها الكتلي 240 مساوية

$$\Delta E = 0.9 \times 240 \approx 200 \text{ MeV}$$

يتألف اليورانيوم الطبيعي من نظيرين هما $^{238}_{92}\text{U}$ ووفرتة في الفلز تساوي 99.275% واليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ ووفرتة في الفلز تساوي 0.720% وبرغم الوفرة

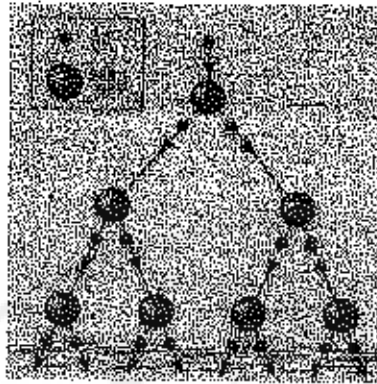
الكبيرة لليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ إلا أن احتمال أسره للنترون ثم انشطاره صغير جداً . لذلك لا يعد النظر $^{238}_{92}\text{U}$ اختياراً جيداً لتوليد الطاقة النووية . وعلى النقيض نجد أن نواة النظير $^{235}_{92}\text{U}$ جاهزة لأسر نترون حراري ومن ثم الانشطار . ويكون احتمال أسر النترون الحراري أكبر بمئسمائة مرة من احتمال أسر النترون ذي الطاقة العالية . كما يمكن استعمال التتروونات الحرارية في انشطار نوى أخرى مثل البلوتونيوم $^{239}_{94}\text{Pu}$.

مثال ٣-٩

لماذا يستطيع النترون الحراري دخول النواة بينما يحتاج كل من البروتون وجسيم α إلى طاقة حركية كبيرة لدخول النواة نفسها ؟

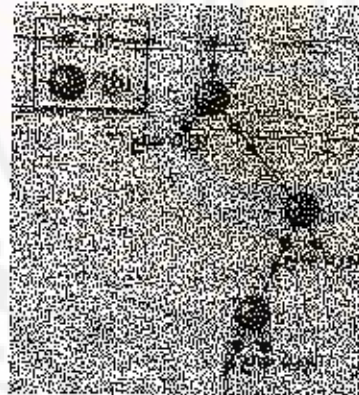
يحتاج كل من البروتون وجسيم α إلى طاقة حركية كبيرة نسبياً للتغلب على قوة التدافع الكهربائي بينه وبين النواة بسبب شحنتيهما الموجبتين ، ومن ثم الوصول إلى مجال تأثير القوة النووية الشديدة الجاذبة ، بينما لا يحتاج النترون المحتدل لمثل هذه الطاقة الحركية فلا وجود لممانع له من الوصول إلى سطح النواة والتأثر بالقوة النووية الجاذبة .

إن تحرير عدد من التتروونات في عملية انشطار اليورانيوم يسمح بوجود سلسلة من عمليات الانشطار بصورة ذاتية . ويبين الشكل (٣-١٨) إمكان كل نترون متحرر من بدء انشطار آخر منتجاً بذلك نتروونات أخرى ، يتبعها انشطارات أخرى ، وهكذا . فالفاعل المتسلسل هو سلسلة من الانشطارات النووية تسبب فيها بعض التتروونات الناتجة من كل انشطار ، انشطارات أخرى . فخلال التفاعل المتسلسل غير المتحكم به ، لا يكون مستبعداً أن يزداد عدد الانشطارات بمقدار ألف ضعف خلال عدة أجزاء من المليون من الثانية . وبالتالي يمكن للفاعل المتسلسل أن يحرر كمية هائلة من الطاقة خلال فترة زمنية قصيرة ، كما هو الحال في القنبلة الذرية (وهي في الواقع قنبلة نووية) .



الشكل (٣-١٨) تفاعل متسلسل وقد حذفت منه أجزاء الانشطار .

بتحديد عدد النيوترونات في حوار النواة المنشطرة نستطيع الوصول إلى حالة يساهم فيها كل حدث انشطاري بنيترون واحد فقط يستطيع بدء عملية انشطار نواة أخرى ، كما في الشكل (٣-١٩) . وفي هذه الحالة نستطيع التحكم بالتفاعل المتسلسل وبالتالي معدل إنتاج الطاقة . إن تفاعل الانشطار المتسلسل والمتحكم به هو المبدأ الذي تستند إليه المفاعلات النووية التجارية المولدة للطاقة الكهربائية .



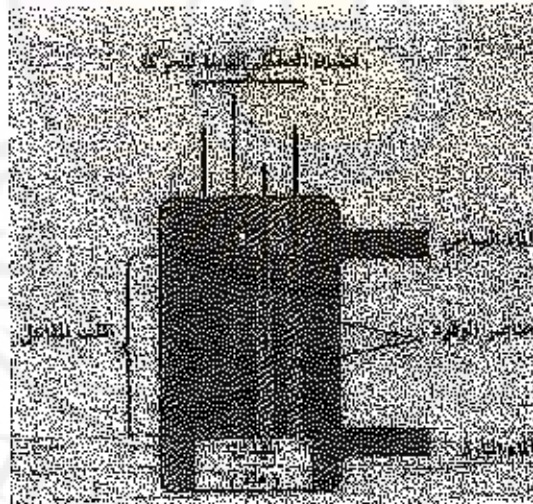
الشكل (٣-١٩) يسمح لنيوترون واحد من نواتج الانشطار بالاسهام في انشطار نواة أخرى وبالتالي تحرير الطاقة بمعدل ثابت .

٢٣-١٣ المفاعلات النووية

المفاعل النووي هو نوع من الأفران تتولد فيه الطاقة بتفاعل الانشطار المتسلسل للتحكم به . بني المفاعل النووي الأول من قبل فريدمان عام ١٩٤٢ في جامعة شيكاغو . ويوجد اليوم أنواع وحجوم كثيرة من المفاعلات ولكنها جميعاً تتألف من ثلاثة مكونات رئيسة هي : عناصر الوقود النووي ، ومهدئ النيوترونات ، وقضبان التحكم . ويوضح الشكل (٣-٢٠) هذه المكونات .

تحتوي عناصر الوقود على النوى المنشطرة وقد تأخذ شكل قضبان اسطوانية قطرها من مرتبة السنتيمتر الواحد . وفي المفاعلات عالية الاستطاعة نجد آلافاً من قضبان الوقود التي توضع بالقرب من بعضها ضمن مجال يدعى بقلب المفاعل .

يشكل اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ وقوداً لمعظم المفاعلات النووية وبسبب قلة وفرته ، فهو يشكل 0.7% من فلز اليورانيوم ، لا بد من محطات إغناء (تخصيب) خاصة لرفع نسبة تواجدته . وتستعمل معظم المفاعلات النووية اليورانيوم بعد إغناؤه وزيادة نسبة اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ إلى القيمة 3% .



الشكل (٣-٢٠) يتألف المفاعل من عناصر الوقود وقضبان التحكم والمهدئ .

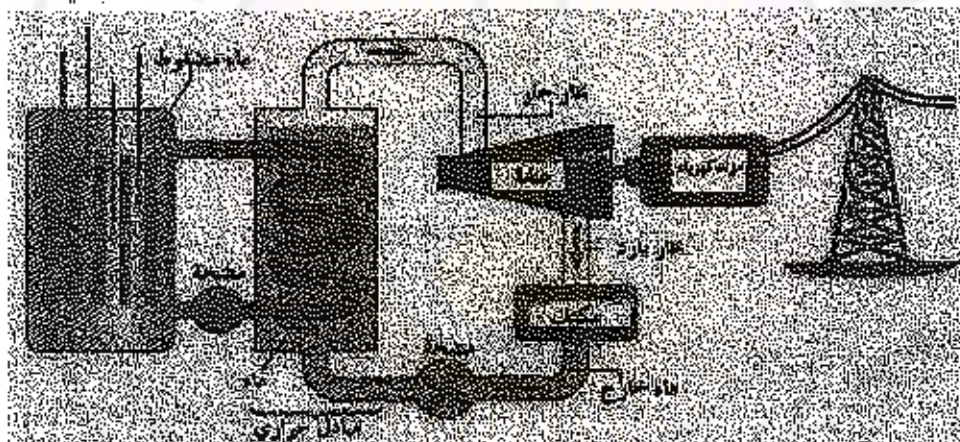
تحتاج عملية انشطار اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ إلى ترونات حرارية ، ولكن الترونات الناتجة من الانشطار تكون عالية الطاقة ، لذلك لا بد من تهدئتها . يحوي المفاعل نوعاً من المواد التي تهدئ الترونات العالية لهذه الترونات كي تساهم في عملية الانشطار . تدعى المادة التي تخفض سرعة الترونات بالمهدئ . وبعد الماء من أكثر المهدئات شيوعاً في المفاعلات . فعندما يغادر الترون السريع عنصر الوقود يدخل في الماء المحيط بعنصر الوقود ويصطدم مع جزيئات الماء . ومع كل تصادم يخسر الترون جزءاً كبيراً من طاقته وينخفض سرعته . وعندما تصل طاقته إلى طاقة الترون الحراري ، وهي عملية تستغرق عشر الثانية ، يصبح قادراً على بدء عملية انشطار فور دخوله إلى عنصر الوقود. ولكي تكون استطاعة المفاعل مستقرة يجب أن يساهم ترون واحد فقط ، من الترونات الناتجة عن عملية الانشطار ، في انشطار نواة أخرى ، كما هو ممثل في الشكل (٣-١٩) . وعندما يتبع كل انشطار ، انشطار واحد (لا أقل ولا أكثر)

يكون المفاعل في وضعه الحرج . وتعمل المفاعلات عادة بشكل مثالي في أوضاعها الحرجة . لذلك تولد استطاعة مستقرة . يكون المفاعل في الوضع تحت الحرج عندما يكون متوسط عدد الترونات الناتجة من انشطار واحد والمساهمة في انشطار آخر أقل من الواحد ، وفي هذه الحالة لن يكون التفاعل المتسلسل مستقراً بل يتلاشى مع الزمن . أما عندما يكون متوسط عدد الترونات هذا أكبر من الواحد ، يكون المفاعل في الوضع فوق الحرج وتزداد في هذه الحالة الطاقة المتحررة . وإذا لم تلاحظ هذه الزيادة فسؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة وذوبان جزء من قلب المفاعل ، مع إمكان إطلاق المواد المشعة (السقط المشع) إلى البيئة المحيطة بالمحطة النووية .

يحتاج المفاعل إلى آلية تحكم تبقيه في وضع التشغيل المثالي أي الوضع الحرج . ويتم هذا الأمر بعدد من قضبان التحكم التي يمكن تحريكها فبدخل جزء منها إلى قلب المفاعل أو يخرج منه ، أنظر إلى الشكل (٣-٢٠) . تتألف قضبان التحكم من عناصر تمتص الترونات بشراهة دون أن تنشطر مثل الكادميوم واليورن . فإذا أصبح المفاعل في الوضع فوق الحرج تتحرك القضبان بصورة آلية فتدخل في قلب المفاعل ممتصة الترونات

المسببة لجنوح المفاعل نحو الوضع فوق الحرج ، ومعيدة المفاعل إلى وضع التشغيل المثالي . وعندما يصبح المفاعل في الوضع تحت الحرج تتحرك قضبان التحكم بصورة آلية باتجاه الخروج من قلب المفاعل مقللة بذلك من عدد النيوترونات التي تمتصها فتساهم برفع متوسط عدد النيوترونات المشاركة في الانشطارات معيدة بذلك المفاعل إلى وضع التشغيل المثالي .

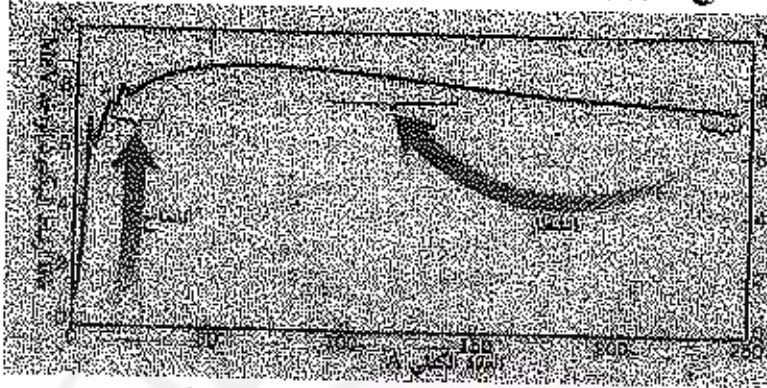
يبين الشكل (٣-٢١) مفاعل الماء المضغوط . وفي هذا النوع من المفاعلات يحمل الماء المحيط بقضبان الوقود الحرارة المتولدة ضمن القضبان . ويسمح للماء بالوصول إلى درجة حرارة مرتفعة (حوالي 300°C) لحمل أكبر كمية ممكنة من الحرارة . ولتجنب التبخير الذي يحدث عادة عند الدرجة 100°C في الضغط الجوي النظامي ، يضغط الماء إلى ضغط يزيد على 150 ضعف من الضغط الجوي النظامي .



الشكل (٣-٢١) مخطط رمزي لمخطة نووية تستعمل مفاعل الماء المضغوط .

يضخ الماء الساخن عبر مبادل حراري ينقل الحرارة إلى ماء يجري في دائرة ثانية مغلقة . تولد الحرارة المنتقلة إلى الجملة الثانية بخاراً يحرك عنفة . تربط العنفة مع مولد كهربائي وترسل استطاعته الكهربائية إلى المستهلكين عبر خطوط نقل عالية الجهد . يتم تكثيف البخار ، بعد تشغيل العنفة ، إلى ماء يعاد إلى المبادل الحراري .

٣-١٤ الاندماج النووي



الشكل (٣-٢٢) يمكن الحصول على الطاقة بالانشطار أو الاندماج .

يلخص الشكل (٣-٢٢) ما يحصل في تفاعلي الانشطار والاندماج ، فطاقة ارتباط النكليون عند طرفي المنحني البياني أقل من طاقة ارتباط النكليون في وسط المنحني . ولقد وجدنا أن الطاقة المتحررة نتيجة الانشطار الواحد تساوي 0.9MeV للنكليون الواحد . وبالمثل يمكن دمج نواتين صغيرتين ثم لكان طاقتي ارتباطيتين صغيرتين نسبياً للنكليون الواحد في نواة واحدة ذات كتلة أو طاقة ارتباط أكبر للنكليون الواحد يرافقها تحرر كمية كبيرة من الطاقة . تدعى هذه العملية بالاندماج النووي .

مثال ٣-١٠

يندمج نظير الهيدروجين الديوترون ${}^2_1\text{H}$ والتريتيوم ${}^3_1\text{H}$ لتشكيل عنصر الهيليوم ${}^4_2\text{He}$ وإطلاق نوترون ${}^1_0\text{n}$. أحسب الطاقة المتحررة في هذا التفاعل .

إن الكتل الابتدائية والنهائية في هذا التفاعل هي $(2.014u)$ للديوترون ، و $3.016u$ للترتيوم ، و $4.003u$ للهيليوم ، و $1.009u$ للنوترون . وتكون الخسارة في الكتلة

مساوية $\Delta m = 0.018u \approx 17\text{ MeV}$ ، وتكون الطاقة المتحررة للنكليون الواحد

مساوية 3.4 MeV $17/5$ وقد قسمنا الطاقة المتحررة على خمسة وهو مجموع

عدد النكليونات في الديوترون والتريتيوم . ويلاحظ أن الطاقة المتحررة للنكليون الواحد في حالة الاندماج أكبر مما هي عليه في حالة الانشطار (0.9MeV) ، أي أنه من أجل كتلة معينة من الوقود النووي ينتج تفاعل الاندماج كمية أكبر من الطاقة مما تنتجها الكتلة نفسها من الوقود النووي في تفاعل الانشطار .



الشكل (٣-٢٣) يندمج الديوترون والتريتيوم لتشكيل الهليوم ونيوترون وتحرر كمية من الطاقة يحظى مفاعل الاندماج باهتمام كبير بسبب كبر الطاقة التي تنتجها تفاعلات الاندماج . ومع ذلك فإننا لا نجد أي محطة نووية اندماجية تجارية حتى الآن ، وتأتي صعوبة بناء مفاعل اندماجي بصورة رئيسة من ضرورة تقريب النواتين صغيرتي الكتلة من بعضهما مسافة صغيرة جداً ، متغلبين على قوة التدافع الكهربائي الساكنة بينهما كي تصلا إلى المدى القصير لتأثير القوة النووية فتجذبهما ويحصل الاندماج . لذلك يجب أن تمتلكا طاقتين حركيتين كبيرتين أي درجات حرارة عالية تصل إلى مائة مليون درجة سلفريوس لبدء تفاعل مثل التفاعل المذكور في المثال (٣-١٠) .

تدعى التفاعلات التي تتطلب درجة حرارة عالية جداً بالتفاعلات النووية الحوارية ، ويحدث أكثرها في النجوم مثل شمسنا . تأتي الطاقة التي تشعها الشمس من داخلها في عمق قلبها ، حيث تكون الحرارة كافية لبدء تفاعلات الاندماج . ومن بين

التفاعلات التي يظن أنها تحدث في الشمس ما يعرف بدورة البروتون - بروتون ، وهي سلسلة من التفاعلات يندمج فيها ست بروتونات لتشكيل الهليوم مع بوزوترونين وبروتونين ونيوترونين وشعاعين من أشعة γ . وتكون الطاقة المتحررة من دورة البروتون - بروتون مساوية 25 MeV .

تم تنفيذ تفاعلات الاندماج من قبل الانسان على شكل قنبلة نووية دعت بالقنبلة الهيدروجينية . وفيها يتم قدح تفاعل الاندماج بقنبلة نووية انشطارية تستعمل اليورانيوم أو البلوتونيوم . وتكون درجة الحرارة الناتجة من القنبلة النووية الانشطارية عالية بشكل كاف لبدء التفاعل النووي الحراري . فتندمج نظائر الهيدروجين لتشكيل الهليوم مطلقة طاقة إضافية . ولكي يكون الاندماج صالحاً كمصدر للطاقة التجارية ، يجب تحرير الطاقة بشكل مستقر قابل للتحكم وليس كالقنبلة . . لم ينجح العلماء بعد في بناء جهاز اندماج ينتج من الطاقة في عملية مستمرة ، أكثر من الطاقة المستهلكة في عملية تشغيل الجهاز . يحتاج جهاز الاندماج درجات حرارة عالية لبدء التفاعل ، وتكون جميع الذرات ضمن هذه الشروط مؤينة تماماً أي على شكل بلازما (غاز مؤلف من جسيمات مشحونة) . وتكمن المشكلة في حصر البلازما الحارة لمدة كافية بحيث تؤدي التصادمات بين الأيونات إلى الاندماج .

تعد طريقة الحصر المغنطيسي للبلازما من الطرائق المؤدية للاندماج وفيها يستعمل الحقل المغنطيسي في احتواء وضغط الشحنات في البلازما . فالشحنات المتحركة ضمن حقل مغنطيسي تخضع لقوة مغنطيسية ، ومع ازدياد هذه القوة يزداد الضغط وترتفع دودة الحرارة . ويصبح الغاز على شكل بلازما حارة ذات سخونة فائقة تنتهي بالاندماج عندما يصبح الضغط ودرجة الحرارة عاليين بالقدر الكافي .

وهناك نوع آخر من حصر البلازما يدعى بالحصر العطالي ، وفيه تسقط جسيمات صغيرة من الوقود النووي ضمن حاوية ، وفي اللحظة المناسبة التي يصل فيها الجسم إلى مركز الحاوية تسلط عليه عدة حزم ليزرية عالية الشدة بصورة آتية ، فتسبب

الحرارة العالية تبخر الجزء الخارجي للحسيم ، ولكن عطلالة الذرات المتبخرة تعيقها من التمدد نحو الخارج بسرعة تشكل البخار نفسها . ونتيجة لذلك يزداد الضغط والكثافة ودرجة الحرارة إلى القيمة المطلوبة للاندماج عند مركز الحسيم .
وهناك طريقة ثالثة واعدة تستعمل فيها الأشعة السينية المركزة عوضاً عن الحزم الليزرية .





تمارين ومسائل

- ١- أذكر نظيرين لكل من العناصر التالية : ^{14}N , ^{56}Fe , ^{118}Sn
 الجواب: ^{13}N , ^{15}N , ^{54}Fe , ^{57}Fe , ^{117}Sn , ^{119}Sn
- ٢- أوجد طاقة الارتباط وطاقة ارتباط النكليون الواحد لكل من العناصر التالية:
 ^{12}C , ^{56}Fe , ^{238}U , ^6Li , ^{39}K , ^{208}Pb
 الجواب: 7.68 MeV, 8.716 MeV, 7.58 MeV, 5.33 MeV, 8.556 MeV, 7.868 MeV
- ٣- أوجد صيغة تعطي الكثافة النووية مفترضاً أن كتلة النواة تتناسب مع العدد الكتلي وفق العلاقة : $m=cA$ حيث c ثابت . ثم أوجد الكثافة وذلك بإعطاء الثابت قيمة 1g لنكليونات عددها يساوي عدد أفوكادر N_A .
 الجواب: $1.18 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
- ٤- أوجد الطاقة اللازمة لزع نوترون واحد من نواة الهليوم ^4He .
 الجواب: 20.58 MeV
- ٥- أحسب نصف قطر نواة كل من العناصر : ^{16}O , ^{56}Fe , ^{197}Au .
 الجواب: 3.78 fm; 5.74 fm; 8.73 fm
- ٦- النظير المستقر للصوديوم هو ^{23}Na ما هو نوع الإشعاع الصادر عن كل من النظيرين ^{24}Na و ^{22}Na .
 الجواب:

$$^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + \beta + \bar{\nu}$$

$$^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + \beta + \bar{\nu}$$

٧- إذا كان دور الراديوم مساوياً 1620 سنة ، فما هو عدد التفككات خلال الثانية الواحدة والناجمة من تفكك غرام واحد من الراديوم ؟ أثبت أن معدل التفكك في هذه الحالة يساوي 1Ci تقريباً .

الجواب: $1Ci \approx 3.61 \times 10^{10} Bq$

٨- إذا كان معدل العد لمنبع مشع مساوياً 8000 عدة في الثانية لحظة البدء وأصبح 1000 عدة في الثانية بعد عشر دقائق . ما هو دور العنصر ؟ وما هو ثابت تفككه ؟ وما هو معدل العد بعد عشرين دقيقة ؟

الجواب: $T = \frac{10}{3} = 3.33 \text{ min}$ ، $\lambda = 3.47 \times 10^{-3} s^{-1}$ ، $R_{20} = 125 Bq$

٩- وضعت قطعة من الفضة المشعة أمام عداد غايغر فشوهه 1000 عدة في الثانية في لحظة البدء ، فما هو معدل العد بعد زمن قدره 2.4 min وكذلك بعد 4.8 min ؟ علماً أن دور الفضة المشعة $T = 2.4 \text{ min}$. وإذا كان مردود العداد 20 % فقط ، ما هو عدد النوى المشعة لحظة البدء ؟ وما هو الزمن اللازم ليصبح معدل العد مساوياً 30 عدة في الثانية ؟

الجواب: 500 ، ٢٥٠ ، ١٢٥ . $N_0 = 1.039 \times 10^6$ ، $t = 12.144 \text{ min}$

١٠- أوجد طاقة أشعة ألفا الصادرة عن تفكك كل من ^{226}Ra و ^{242}Pu .

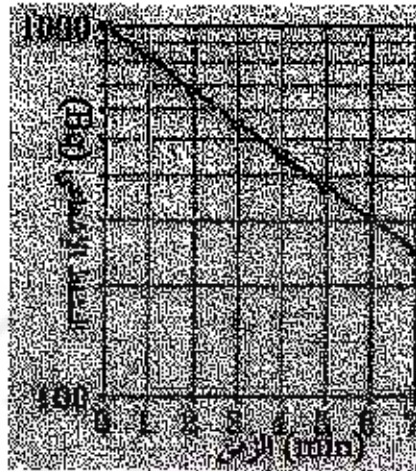
الجواب: 4.868 MeV ، 6.949 MeV

١١- قيس معدل العد لمنبع مشع كل دقيقة فوجد أن العد في الثانية الواحدة لهذه القياسات هو:

1000	820	673	562	453	371	305	250
0	1	2	3	4	5	6	7

ارسم منحني معدل العد كتابع للزمن واستنتج من المنحني دور العنصر .

الجواب: $T = 3.5 \text{ min}$



١٢- تحتوي عينة خشبية 10 g من الكربون وتظهر معدل عد للكربون ^{14}C قدره

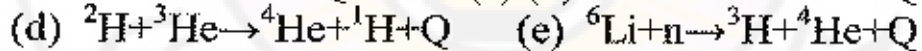
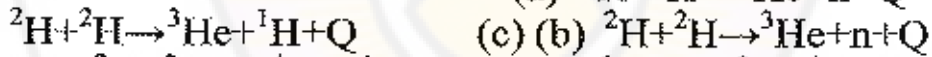
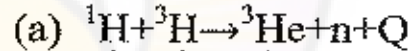
100 عدة في الدقيقة الواحدة ، ما هو عمر هذه العينة ؟

الجواب: 3351 سنة

١٣- أوجد معدل التفكك لعينة من الكربون كتلتها 10 g وعمرها 10000 سنة .

الجواب: 45 Bq

١٤- أوجد قيمة Q في كل من التفاعلات التالية :



الجواب: 4.032 MeV 3.269 MeV -0.7638 MeV 4.785 MeV 18.35 MeV MeV;

١٥- ما هو عدد الانشطارات بالثانية الواحدة التي تجري في مفاعل استطاعته 500

MW ، علماً أن متوسط الطاقة التي تنتج من انشطار واحد هي 200 MeV .

الجواب: انشطارات 1.56×10^{19}

١٦- ما هي درجة الحرارة المقابلة لطاقة قدرها 10 KeV ؟

الجواب: $71.16 \times 10^8 \text{ K}$

١٧- إذا كانت المسافة التي تقطعها البروتونات ذات الطاقة 6 MeV في الهواء مساوية

45 cm تقريباً فما هي المسافة التي تقطعها هذه البروتونات في الماء ؟ وفي الرصاص ؟

الجواب: 0.0581cm 0.00518cm

١٨- إذا كان المقطع الفعال الكلي لامتصاص النيوترونات في الحديد مساوياً 2.5 بارن

فما هي سماكة الحديد التي تنخفض شدة الحزمة النيوترونية إلى نصف قيمتها علماً أن عدد

التوى في المتر المكعب من الحديد يساوي $n=8.5 \times 10^{28}$ ؟

الجواب: $3.26 \times 10^{-2} m$

١٩- إذا كان المقطع الفعال الكلي لامتصاص أشعة غاما ذات الطاقة 3.5 MeV

الواردة على الرصاص مساوياً 20 بارن فما هي سماكة الرصاص التي تنخفض شدة هذه

الأشعة إلى 1/e من قيمتها ؟ وإلى 1/1000 من قيمتها ؟

الجواب: $1.5 \times 10^{-2} m$ $10.42 \times 10^{-2} m$

٢٠- أثبت أن ثابت التفكك ودور العنصر المشع تعطى بالعلاقين :

$$T = \frac{0.693 \times t_1}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{1}{t_1} \ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)$$

٢١- أحسب نصفي قطري نواقي الباريوم $^{141}_{56}Ba$ والكريبتون $^{92}_{36}Kr$ ، فإذا افترضنا أنه

بعد انشطار نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ إلى كل من الباريوم والكريبتون ، ابتعدت النواتان

مباشرة إلى مسافة d تساوي مجموع نصفي قطري النواتين أحسب الكمون الكهربائي

الساكن $U = k \frac{Z_1 e \times Z_2 e}{d}$ لهاتين النواتين وقارن مع الطاقة الناتجة عن الانشطار .

الجواب: $R_{Ba} = 7.81 fm$, $R_{Kr} = 6.77 fm$ $U = 199 MeV$

٢٢- تتناقص شدة حزمة النيوترونات بصورة أسية مع المسافة عماً كما هو الحال بالنسبة

للنيوترونات والفوتونات . فإذا كانت قيمة المقطع الفعال للامتصاص بالنسبة للنيوترونات من

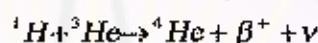
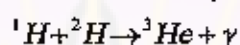
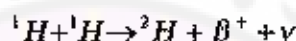
المرتبة 10^{-20} بارن ، أوجد سماكة الحديد اللازم لتخفيض شدة حزمة النيوترون إلى $1/e$ من قيمتها. وقارن هذه السماكة مع المسافة بين الشمس والأرض .

الجواب: $1.18 \times 10^{19} m$ أكبر بكثير من المسافة بين الأرض والشمس .

٢٣- أوجد ثابت التفكك ودور عنصر مشع كان معدل تفككه $1000 Bq$ في اللحظة t_0 وأصبح $800 Bq$ بعد دقيقة واحدة أي في اللحظة $t_1 = 1 min$.

الجواب: $\lambda = 3.72 \times 10^{-3} s^{-1}$; $T \approx 3.12 min$

٢٤- تتولد الطاقة في الشمس بتفاعلات اندماج نووية مختلفة منها التفاعل التالي :



أوجد الطاقة المحررة في هذه الدورة .

الجواب: $24.69 MeV$



الباب الثاني

الكهرباء الساكنة

Electrostatics



الفصل الأول
الشحنات الكهربائية و
القوى الكهربائية
**Electric Charges and
Electric forces**



1 - 1 الشحنة الكهربائية Electric charge:

الشحنة الكهربائية هي المدخل الأساسي للتعرف على الظواهر الكهربائية سواء ما نلاحظه في الطبيعة أو ما هو من اختراع الإنسان نفسه، تلك الاختراعات تمتد من المحرك الكهربائي إلى الترانزستورات وداراته الكهربائية إلى دارات الحاسوب وتطبيقاته المتباينة . والشحنة الكهربائية هي إحدى الخصائص الأساسية لمكونات المادة ولا يمكن فهم طبيعة هذه الشحنة إلا من خلال الظواهر التي ترتبط بها مثل القوى الكهروستاتيكية المتبادلة بين الجسيمات المشحونة وظهور المجال الكهروستاتيكي في الحيز المحيط بالشحنة نفسها .

والشحنة الكهربائية كالطاقة لا تفنى خلال التغيرات الفيزيائية أو الكيميائية وينطبق عليها قانون بقاء الشحنة المماثل لقانون بقاء الطاقة .

ويعود اكتشاف الجذب الكهربائي تاريخياً إلى قدماء اليونان (الإغريق)، حيث لاحظ العالم اليوناني تالس، الذي عاش في الفترة (640 - 546) قبل ميلاد السيد المسيح عليه السلام، أن العنبر (الكهرمان) إذا دُلك بالصوف اكتسب خاصية جذب الأجسام الخفيفة، وعندما تتكلم عن هذه الخاصية اليوم، نقول إن العنبر قد تكهرب . أو اكتسب شحنة كهربائية أو أنه مشحون كهربائياً . وهذه التعابير مشتقة من الكلمة اليونانية (ELEKTRON) والتي تعني العنبر الأصفر المسمى بالكهرمان (الكهرباء) .

من الممكن أن نجعل أي جسم صلب يكتسب شحنة كهربائية وذلك بدلكه بأية مادة ثانية . وهكذا فالسيارة تصبح مشحونة بنتيجة حركتها عبر الهواء، وتتولد شحنة كهربائية في طبق الورق لدى حركته داخل الآلة الطابعة، ويتكهرب المشط عند ما يُسرح به الشعر الجاف . وفي الواقع أن ما يلزم لتوليد الشحنة الكهربائية هو إيجاد تماس وثيق بين جسمين، أما ذلك فإن فائدته تقتصر على إيجاد تماس جيد بين عدد كبير من نقاط السطحين المتلامسين، لا أكثر .

في القرن السادس عشر، درس العالم الانكليزي وليم جيلبرت (W. Gilbert)، الذي عاش في الفترة (1540 - 1603)، ظاهري الكهرياء والمغناطيسية بصورة علمية، حيث أثبت جيلبرت وجود عدد كبير من المواد تملك خاصية جذب الأجسام الصغيرة عند ذلكها، غير الكهرمان، كالزجاج والمطاط وكان أول من فهم بوضوح الفرق بين هذا الجذب الكهريائي والجذب المغناطيسي ، وهو الذي أدخل اصطلاحات القوة الكهربائية والجذب الكهريائي والقطب المغناطيسي.

في عام 1734، كان العالم تشارلز فرانكوس ديوفاي (C.F.Dufay)، أول من برهن تجريبياً وجود نوعين من الكهرياء . فقطعتان صغيرتان من الزجاج إذا دلكتا بالحرير دفعتا بعضهما بعضاً ويظهر ذلك إذا ما علقنا بحيطين من الحرير وقريباً من بعضهما وكذلك تفعل قطعتان صغيرتان من الأيونيت إذا دلكتا بقطعة من الفرو . أما إذا أخذت قطعة من الزجاج المكهرب وأخرى من الأيونيت المكهرب فإلهما تتجاذبان في ذلك الحين، استنتج ديوفاي وجود نوعين من الشحنات لا ثالث لهما . أما الشحنات المشابهة للشحنات التي ظهرت على قطعة الأيونيت فسميت سالبة، إن هذه التسمية مهمة ومفيدة ولكنها اصطلاحية، ووفقاً لذلك فالشحنة التي يحملها الإلكترون بمفهومه الحديث هي سالبة، ونستنتج مما سبق النتيجة الأساسية القائلة: إن الشحنات المتماثلة تتنافر بينما الشحنات المختلفة تتجاذب .

وقد أثبت التجارب أنه عند ذلك أي مادة بأخرى مناسبة، تظهر على هاتين المادتين شحنات متعاكسة، مما يوحي لنا، بصورة جلية، أن الشحنات الكهربائية لا تتولد، ولا تخلق، وأن عملية الشحن تنتج عن انتقال جسيم من إحدى المادتين إلى الأخرى، وقد عُرف هذا الجسيم باسم الإلكترون، نسبة إلى مادة العنبر الأصفر في اللغة اليونانية الذي هو Electron ، وهو وحدة الشحنة الكهربائية السالبة، ولكسي نفهم ظاهرة الشحن فإنه يلزم معرفة التركيب الذري للمادة و الذي سنوضحه في الفقرة التالية:

في عام 1897 اكتشف العالم الإنكليزي تومسون (J. J. Tomson) جسيماتاً خفيفاً في المادة كتلته تساوي $1/1800$ من كتلة ذرة الهيدروجين ، و بينت التجارب أنه يحمل كمية صغيرة من الكهرباء و التي سميت فيما بعد بالسالبة و قد سمي هذا الجسيم بالإلكترون. وأثبت تومسون أيضاً أن جميع المواد تحتوي جسيمات تمثلك النسبة $\frac{e}{m}$ نفسها حيث e هي شحنة الإلكترون و m كتلته، ونعلم الآن أن هذه الجسيمات هي الإلكترونات و هي جزء أساسي في بناء الذرات . و في عام 1909، اكتشف العالم ميلكان أن الشحنة مكّمة، فيمكن كتابة أية شحنة على الشكل $Q = N \cdot e$ حيث N عدد صحيح و e هي قيمة الوحدة الأساسية للشحنات الكهربائية .

تعرف الشحنة الكهربائية: بأنها المقدار الفيزيائي المميز لقدرة الأجسام أو الجسيمات على المشاركة في التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية المتبادلة والذي يحدد قيم القوى والطاقات الداخلة في تلك التأثيرات المتبادلة.

من خلال هذه المقدمة التاريخية المختصرة عن الشحنة الكهربائية، نلخص الخواص الهامة للشحنة الكهربائية على الشكل التالي:

- ١- الشحنة الكهربائية مصانة وهو ما يعرف حالياً بقانون الحفاظ الشحنة .
- ٢- الشحنة الكهربائية مكّمة، حيث يمكن كتابة أي شحنة على الشكل $Q = N \cdot e$.
- ٣- إن الشحنة مقدار سلمي، تؤثر في جميع مناحي الفضاء المتجانس بالشكل نفسه . ويسمى هذا الأثر بالحقل الكهربائي، وسنعتبر كتقريب من المرتبة الأولى أن الشحنة الكهربائية عبارة عن شحنة نقطية (Point Charge) أبعادها صغيرة جداً.
- ٤- يوجد نوعان من الشحنات الكهربائية: نطلق اصطلاحاً عن الشحنة من النوع الأول اسم الشحنة الموجبة و على الشحنة من النوع الثاني اسم الشحنة السالبة .

٥- تتدافع الشحنات المتماثلة بينما الشحنات المختلفة تتجاذب.

٦- ندعو جسيماً أولياً، أصغر جسيم والذي يحمل شحنة كهربائية سالبة بالإلكترون، وأن شحنة الإلكترون تساوي شحنة البروتون بالقيمة المطلقة وتعاكسها بالإشارة .

1- 2 التركيب الذري للمادة Structure of matter:

الذرة هي أصغر جزء من المادة، تحمل الصفات الطبيعية والكيميائية لها .
فمثلاً ذرة الأوكسجين تحمل الصفات الطبيعية والكيميائية لغاز الأوكسجين، وذرة النحاس تحمل الصفات الطبيعية والكيميائية لمادة النحاس، وهكذا .

و تتكون الذرة من نواة صغيرة الحجم (Nucleus) قطرها حوالي $10^{-15}m$ وكبيرة الوزن، إذ أن وزن النواة يعادل وزن الذرة تقريباً، و النواة موجبة الشحنة و يدور حولها إلكترونات سالبة الشحنة كتلتها صغيرة جداً . في مدارات دائرية أو بيضوية قطرها يساوي تقريباً $10^{-10}m$.

$$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg mass of electron}$$

و تتكون النواة من نوعين من الجسيمات:

A- البروتون Proton: و هو موجب الشحنة و كتلته تساوي:

$$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg mass of proton}$$

أي أن كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون بحوالي 1835 مرة ، أما شحنته فتساوي عددياً شحنة الإلكترون

B- النوترون Neutron: و هو متعادل كهربائياً و كتلته تساوي كتلة البروتون

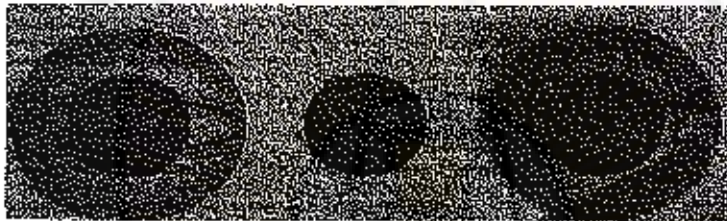
$$m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg mass of neutron} \quad \text{تقريباً}$$

و في الذرة المتعادلة . يتساوى عدد البروتونات في النواة و عدد الإلكترونات الدائرة حولها . و تدور الإلكترونات حول النواة في مدارات دائرية أو بيضوية بحيث لا يزيد عددها عن اثنين في المدار الأول و ثمانية في المدار الثاني و ثمانية عشر في المدار

الثالث و هكذا . كما أن الإلكترونات في المدارات الداخلية (القريبة من النواة) أكثر ترابطاً بالنواة من الإلكترونات في المدارات الخارجية .

عند انتزاع إلكترون من الذرة فإنها تبقى موجبة الشحنة و تسمى أيوناً موجباً Positive Ion و عند إضافة إلكترون إلى الذرة فإنها تصبح سالبة الشحنة و تسمى أيوناً سالباً Negative Ion و عملية فقد أو اكتساب الإلكترون تسمى التأين Ionization و هكذا عند ذلك أي مادة بأخرى مناسبة فإن الإلكترونات الأقل ترابطاً تنتقل من إحدى المادتين إلى الأخرى، فتصبح موجبة الشحنة لفقدائها الإلكترونات و الثانية سالبة الشحنة لاكتسابها الإلكترونات .

ويوضح الشكل (1-1) ذرة الليثيوم Li في الحالات الثلاث (a - b - c)، المعتدلة والموجبة والسالبة .



الشكل (1-1)

3-1 النواقل و العوازل Conductors & Insulators

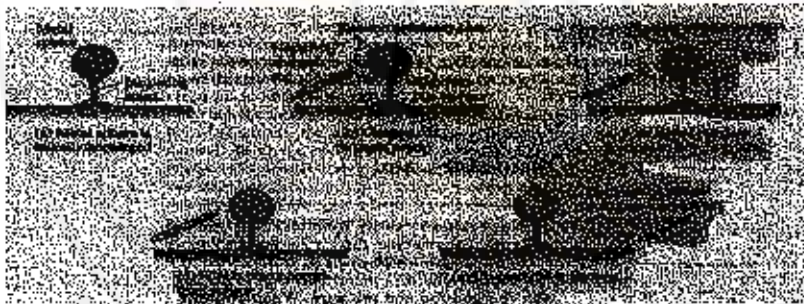
على الرغم من أن المواد تتألف من ذرات و أن كل الذرات تتكون من إلكترونات و نوى إلا أن هذه المواد تنقسم من الناحية الكهربائية إلى قسمين:

A- مواد ناقلة Conductors: هي المواد التي يكون ارتباط إلكتروناتها بالذرة ضعيفاً بحيث يسهل الانتقال من ذرة إلى أخرى في داخل المادة . أي أن الشحنات الكهربائية تكون حرة الحركة داخل المادة، و تعتبر المعادن من المواد الناقلة .

B- مواد عازلة Insulators: و فيها تكون الإلكترونات مرتبطة ارتباطاً قوياً بذراتها، بحيث يصعب عليها الانتقال من ذرة إلى أخرى داخل نفس المادة . و من أمثلة هذه المواد الزجاج و الخشب و المطاط و الورق و الهواء الخ .

1- 4 طرق التكهرب أو الشحن:

- التكهرب بالاحتكاك Friction: وينتج بذلك أي مادة بأخرى .
- التكهرب بالتماس Contact: لو أن جسماً مشحوناً لمس جسماً آخر غير مشحون فإن الشحنة توزع نفسها على كل من الجسمين . لو فصلنا الجسمين عن بعضهما فإن الجسم الثاني تظهر عليه شحنات كهربائية من نفس نوع شحنة الجسم الأول .
- التكهرب بالتأثير أو بالتحريض Induction: هي طريقة لشحن جسم معدني باستخدام جسم آخر سبق شحنه . لننظر إلى الشكل (1 - 2) . الذي يبين خطوات شحن كرة معدنية بالتحريض .



الشكل (1 - 2)

إذا عزلنا كرة معدنية عن الأرض، الشكل (a - 1 - 2)، ثم قربنا قضيباً مشحوناً بالشحنات السالبة مثلاً الشكل (b - 1 - 2) . فإن شحنات الكرة توزع نفسها بحيث تظهر شحنات موجبة على طرف الكرة القريب من القضيب . لو وصلنا طرف الكرة البعيد عن القضيب بالأرض الشكل (c - 1 - 2)، لتسربت الشحنات السالبة إلى

الأرض . و لو فصلنا الكرة عن الأرض لبقيت الشحنات الموجبة عليها فقط كما في الشكل (d - 1 - 2)، و إذا أبعدنا قضيب الزجاج عن الكرة، فإن الشحنات الموجبة توزع نفسها على الكرة، و تصبح الكرة مشحونة بشحنة موجبة . و بنفس الطريقة يمكن شحن أي جسم معدني بشحنات سالبة إذا ما قربنا منه جسماً مشحوناً بشحنة إيجابية .

1- 5 تجارب فارادي في الكهرباء الساكنة:

في عام 1843 أجرى مايكل فارادي عدة تجارب و منها تجربة "دلسو السطح" واستنتج ما يلي:

a- إذا وضع جسم مشحون ضمن وعاء معدني ناقل و متعادل كهربائياً، يتولد على السطح الداخلي للناقل شحنة مساوية في القيمة و مخالفة في الإشارة لشحنة الجسم، أما على السطح الخارجي للناقل فيتولد شحنة مساوية في القيمة و الإشارة لشحنة الجسم .

b- تكون الشحنة الكلية الموجودة ضمن الوعاء الناقل الأجوف معدومة دوماً

أي شحنة السطح الداخلي للوعاء + شحنة الجسم المشحون = 0

c- إذا لمس الجسم المشحون السطح الداخلي للوعاء المعدني الأجوف . فسيان شحنة الجسم تنتقل إلى السطح الخارجي للوعاء المعدني للناقل .

1- 6 قانون كولون Coulomb's Law:

يعتبر العالم شارل أوجستين دو كلومب (Charles Augustin de coulomb)، الذي عاش في الفترة (1806 - 1736)، هو أول من قام بدراسة مفصلة عن القوى الناشئة بين الأجسام المشحونة، واستطاع صياغة القانون الرياضي الذي يعبر عن تدافع الشحنات المتماثلة وتجاذب الشحنات المختلفة والذي سمي بقانون كولون .

في عام 1784 درس العالم كولون التأثير المتبادل بين الأجسام المشحونة، واستعان لقياس القوى بميزان القتل المشابه في شكله للذي استعان به كافنديش (Cavendish) بعده بثلاثة عشر عاماً لقياس قوى الثقالة .

ووجد كولون أن قوة التدافع أو التجاذب بين شحنتين نقطيتين. أي بين جسمين مشحونين و صغيرين جداً في أبعادهما بالنسبة للبعد r الذي يفصل بينهما، تتناسب طردياً مع جداء هاتين الشحنتين وعكساً مع مربع البعد بينهما .

إن الشحنة الصافية الموجودة في جسم من الأجسام، يمكن أن توصف بأنها مقدار الزيادة العددية للإلكترونات أو للبروتونات التي في الجسم، و على كل حال، فإن شحنة الجسم تقدر عملياً بوحدة أكبر بكثير من شحنة الإلكترون الواحد أو شحنة البروتون. وسنستعمل الحرفين q أو Q لرمزها لشحنة الجسم .

لنكن لدينا الشحنتان q_1 و q_2 التي تفصلها المسافة r فإن العبارة الرياضية للقوى المتبادلة بين هاتين الشحنتين تعطى بالعلاقة:

$$F = k \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (1)$$

حيث k هي ثابت التناسب و تتعلق أبعادها بالوحدات التي تقدر بها q_1 ، q_2 ، r و F و المعادلة (1) هي العبارة الرياضية لما يسمى اليوم بقانون كولون .

تتوقف القوة F بين الشحنتين q_1 ، q_2 على الوسط المحيط بهما، فنجد أن قيمة القوة في حالة وجود وسط ما تكون أقل من مثيلاتها في الهواء أو الفراغ . و ذلك لأن الشحنتات تؤثر على جزيئات الوسط . فتتكون فيها شحنتات تأثيرية مخالفة في الإشارة تعمل على إضعاف القوة بين الشحنتات الأصلية .

أما قيمة الثابت فتتعلق بجملة الوحدات المستخدمة، ففي جملة الوحدات الدولية (S . I) وتسمى أيضاً المكثية (M . K . S)، متر - كيلوغرام - ثانية، تكون قيمة k تساوي:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{N.m^2}{C^2}$$

حيث ϵ_0 مقدار خاص بالوسط يدعى سماحية الوسط Permittivity of the medium

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N.m^2} \quad \text{وهو يساوي:}$$

ويصبح قانون كولون:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (2)$$

وفي الجملعة السغئية للواحدات (C , G , S)، ستيومتر — غرام — ثانية، وتسمى أيضاً بالجملعة الكهربائية الساكنة (esu). فإن قيمة الثابت k تساوي الواحد ويأخذ قانون كولون الشكل التالي:

$$F = \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (3)$$

وتقاس الشحنة عندها بالكولون الساكن والقوة بالدينه حيث أن:

$$1C \quad (\text{كولون}) \approx 3 \times 10^9 \text{ stat} \quad (\text{كولون ساكن})$$

$$1N \quad (\text{نيوتن}) \approx 10^5 \text{ dyn} \quad (\text{دينه})$$

وفيق القانون (3) في تعريف وحدة الشحنة الكهربائية (الكولون الساكن)، وهي الشحنة التي تدفع شحنة مماثلة لها في القيمة والإشارة بقوة دينه واحدة عندما تكون المسافة الفاصلة بين الشحنتين ستيومتراً واحداً، بفرض أن هاتين الشحنتين q_1 ، q_2 محمولتان على جسمين صغيري الأبعاد بالنسبة للمسافة الفاصلة بينهما، (أي الستيومتر) إن الوحدة الطبيعية للشحنة الكهربائية هي الشحنة التي يحملها أصغر جزء من الكهربية السلبية، أي الإلكترون أو البروتون . وإن أدق القياسات التي أجريت لها حتى الآن تعطي لهذه الشحنة e القيمة الآتية:

$$1e = 1,6021764 \times 10^{-19} \text{ coul}$$

في حالة وجود شحنات نقطية $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ موضوعة في النقط

$M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ على الترتيب. فإن قوة كولون التي تؤثر بها هذه الشحنيات في الشحنة النقطية q الموجودة في النقطة M تساوي المجموع المتجه للقوى التي تؤثر بها كل شحنة فيما لو كانت بمفردها في الشحنة q . لرمز $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \dots, \vec{r}_n$ لتجهات الواحدة المحمولة والموجهة باتجاه للتجهات $\vec{M}_1 M, \vec{M}_2 M, \dots, \vec{M}_n M$ على الترتيب فإن قوة كولون تعطى بالعلاقة:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q}{(M_1 M)^2} \vec{r}_1 + k \frac{q_2 q}{(M_2 M)^2} \vec{r}_2 + \dots + k \frac{q_n q}{(M_n M)^2} \vec{r}_n$$

$$= k \sum_{i=1}^n \frac{q_i q}{(M_i M)^2} \vec{r}_i$$

أما في حالة وجود توزع مستمر للشحنيات فنميز ثلاث حالات لحساب قوة كولون:

A- توزع خطي للشحنيات بكثافة خطية منتظمة λ : نأخذ عنصر الطول $d\ell$ تقع النقطة N عليه، فالشحنة التي يحملها هذا الطول تكون $dq = \lambda d\ell_N$ وتكون قوة كولون التي تؤثر بها في شحنة q الموجودة في النقطة M تساوي:

$$d\vec{F} = k \cdot \frac{q \cdot \lambda d\ell_N}{(MN)^2} \cdot \vec{r}_{MN}$$

وتكون قوة كولون الكلية الناتجة عن السلك المشحون في الشحنة q تساوي مجموع القوى التي تؤثرها الشحنيات العنصرية $\lambda d\ell_i$ الموجودة في عناصر الطول $d\ell_i$:

$$\vec{F} = \int_L d\vec{F} = k \int_L \frac{q \cdot \lambda d\ell_N}{(MN)^2} \cdot \vec{r}_{MN}$$

B- توزع سطحي للشحنيات بكثافة سطحية منتظمة σ : نأخذ عنصر سطح قدره dS ، تقع النقطة N فيه، فتكون الشحنة التي يحملها هذا السطح العنصري dS تساوي: $dq_N = \sigma \cdot dS_N$ وتكون قوة كولون الكلية، الناتجة عن السطح المشحون، في الشحنة q الموضوعة في النقطة M تساوي:

$$\vec{F} = k \int \frac{q \cdot \sigma \cdot dS}{(MN)^2} \cdot \vec{r}_{MN}$$

C- توزع حجمي للشحنات بكثافة حجمية منتظمة ρ : نأخذ عنصر حجمي قدره dv ، تقع النقطة N فيه، فتكون الشحنة التي يحملها هذا الحجم العنصري $dq_N = \rho \cdot dv_N$ ، و تكون قوة كولون الكلية الناتجة عن الحجم المشحون في الشحنة q الموضوعة في النقطة M تساوي:

$$\vec{F} = k \int \frac{q \cdot \rho \cdot dv}{(MN)^2} \cdot \vec{r}_{MN}$$

مثال 1 - 1:

احسب القوة الكهربائية الساكنة (قوة التجاذب) بين الإلكترون و البروتون في ذرة الهيدروجين . إذا كانت المسافة بينهما $5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$ تقريباً و قارها مع قوة التجاذب الثقالية القائمة بينهم، علماً أن شحنة الإلكترون $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ، $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ، $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

الحل:

بما أن شحنة الإلكترون سالبة $-e$ و شحنة البروتون موجبة $+e$ فالقوة بينهما جاذبة و تعطى بقانون كولون:

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{|1,6 \times 10^{-19}|^2}{(5,3 \times 10^{-11})^2} = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

إن قوة التجاذب الثقالية تُعطى بقانون نيوتن المتعلق بالجاذبية العامة:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = G \frac{m_e \cdot m_p}{r^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{9,1 \times 10^{-31} \times 1,67 \times 10^{-27}}{(5,3 \times 10^{-11})^2} = 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

لاحظ من هذا المثال أن قوة التجاذب الكهربائية أكبر بكثير من قوة التجاذب الثقالية ويمكن القول بأن قوة التجاذب الثقلي مهملة تقريباً أمام قوة التجاذب الكهربائية الساكنة.

مثال 1-2

ما هي قوة التدافع بين بروتونين في نواة ذرة الحديد إذا علمت أن المسافة الفاصلة بينهما تساوي $4 \times 10^{-15} \text{ m}$ تقريباً .

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(4 \times 10^{-15})^2} = 14,4 \text{ N}$$

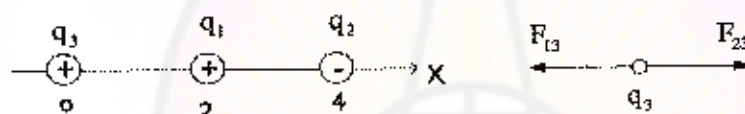
مثال 1-3:

وضعت شحنتان نقطيتان على المحور ox كما هو مبين بالشكل، الأولى

$q_1 = 1 \text{ nc}$ عند النقطة $x_1 = 2 \text{ cm}$ و الثانية $q_2 = -3 \text{ nc}$ عند النقطة $x_2 = 4 \text{ cm}$ ،

أوجد القوة المؤثرة على

الشحنة الثالثة $q_3 = 5 \text{ nc}$ الموجودة عند المبدأ .



الحل:

$$F_{13} = k \frac{|q_1 \cdot q_3|}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{1 \times 10^{-9} \times 5 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-4}} = 11,2 \times 10^{-5} \text{ N} = 112 \mu\text{N}$$

$$F_{23} = k \frac{|q_2 \cdot q_3|}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{3 \times 10^{-9} \times 5 \times 10^{-9}}{16 \times 10^{-4}} = 8,4 \times 10^{-5} \text{ N} = 84 \mu\text{N}$$

محصلة القوى تساوي:

$$F_x = F_{23} - F_{13} = -2,8 \times 10^{-5} \text{ N} = -28 \mu\text{N}$$

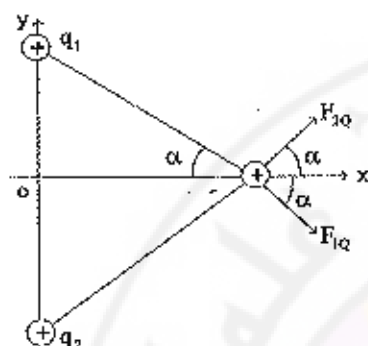
و اتجاهها نحو السينات السالبة .

مثال 1-4:

وضعت شحنتان نقطيتان متساويتان على المحور oy . كما $q_1 = q_2 = 2 \mu\text{c}$

هو مبين في الشكل، الأول عند النقطة $y_1 = 0,3m$ و الثانية عند النقطة $y_2 = -0,3m$ ،
 ما هي محصلة القوى المؤثرة على الشحنة $Q = 4\mu c$ الموجودة عند النقطة $X = 0,4m$ و
 حدد جهتها.

الحل:



بسبب التناظر في توزيع الشحنات في المستوي oxy فإن:

$$F_{1Q} = F_{2Q} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-6}}{0,25} = 0,288N$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = F_x$$

$$F_x = 2F_{1Q} \cos \alpha = 2F_{2Q} \cos \alpha$$

$$F_x = 2 \times 0,288 \times \frac{0,4}{0,5} = 0,46N$$

إذاً محصلة القوى المؤثرة في الشحنة Q تساوي $F = F_x = 0,46N$ و جهتها نحو
 محور السينات الموجبة .

مثال 5 - 1:

كرتان مشحونتان بالتساوي، كتلة كل منهما $0,1g$ ، و معلقتان من نفس
 النقطة بخيطين طول كل منهما 13 cm . بفعل التدافع الكهربائي بينهما ، استقرت
 الكرتان بحيث كانت المسافة بينهما تساوي 10cm ، احسب الشحنة Q على كل كرة
 الحل:

لنفرض الكرتان عند النقطتين B , C تفصلهما المسافة 10 cm ، إن الكرة

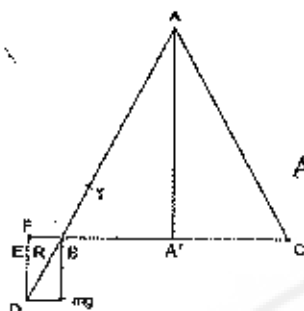
الموجودة عند النقطة B في حالة اتزان تحت تأثير ثلاث قوى، و كذلك الكرة الثانية:

— قوة الشد T في الخيط

— قوة الثقالة الناتجة عن وزن الكرة mg

— القوة الكهربائية الناتجة عن تنافر الشحنتين F

بحيث تكون دوماً قوة الشد T تساوي و تعاكس المحصلة R للقوتين mg و F .



من الشكل نلاحظ: $AA' = \sqrt{(13)^2 - (5)^2} = 12 \text{ cm}$

و من تشابه المثلثات BDE، ABA نجد:

$$\frac{F}{mg} = \frac{BA'}{AA'} \quad \frac{F}{0,1 \times 10^{-3} \times 9,8} = \frac{5}{12} \quad F = 4,1 \times 10^{-4} \text{ N}$$

و هذه القوة حسب قانون كولون، تساوي:

$$4,1 \times 10^{-4} = k \cdot \frac{Q^2}{Bc^2} = 9 \times 10^9 \cdot \frac{Q^2}{100 \times 10^{-4}}$$

و منها نجد الشحنة Q على كل كرة:

$$Q = 2,1 \times 10^{-8} \text{ C} \approx 0,021 \text{ } \mu\text{C}$$

مسائل

- 1- ما هو عدد الإلكترونات الموجودة ضمن شحنة قدرها $1\mu\text{C}$ و 21PC ؟
- 2- تكون المسافة بين البروتونين الموجودين ضمن نواة الهيليوم حوالي 10^{-15} احسب قوة تدافعهما.
- 3- شحنة قدرها $q_1 = 4.0\mu\text{C}$ موجودة في مبدأ الاحداثيات. وشحنة أخرى قدرها $q_2 = 6.0\mu\text{C}$ موجودة على المحور x عند النقطة $x = 3\text{ m}$. أوجد القوة المؤثرة على الشحنة q_2 .
- 4- ثلاث شحنات نقطية موجودة على المحور x في المواضع $q_1 = -6\mu\text{C}$ عند $x = -3$ ، $q_2 = 4\mu\text{C}$ عند المبدأ ، $q_3 = -6\mu\text{C}$ عند $x = 3\text{ m}$. أوجد القوة المؤثرة على q_1 .
- 5- ثلاث شحنات موجودة عند زوايا مربع طول ضلعه L . الشحنتان الموجودتان عند الزاويتين المتقابلتين موجبتان، والثالثة سالبة، وللشحنات الثلاث القيمة المطلقة q نفسها. أوجد القوة التي تؤثر بها هذه الشحنات الثلاث على شحنة رابعة قدرها $+q$ موجودة في الزاوية الرابعة للمربع.
- 6- شحنة نقطية $q = 4 \times 10^{-7} \text{ coul}$ متوضعة على محور حلقة مشحونة بشكل متجانس كثافتها الخطية $\lambda = 5 \times 10^{-6} \frac{\text{coul}}{\text{m}}$ فإذا كانت المسافة بين الشحنة q ومركز الحلقة تساوي إلى $d = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$ ونصف قطر الحلقة $r = 3 \times 10^{-2} \text{ m}$ فاحسب القوة المؤثرة على الشحنة q .
- 7- ليكن لدينا قضيب طوله ℓ مشحون بانتظام بكثافة خطية λ بشحنة مقسداها Q . لنكن شحنة نقطية q متوضعة في نقطة واقعة على امتقامة هذا القضيب وعلى بعد a من إحدى نهايتيه. احسب القوة التي تؤثر بها شحنة القضيب على الشحنة النقطية.

8- ثلاث شحنات كهربائية قيمة كل منها $q = 10^{-7} \text{ coul}$ متوضعة على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه l ، أوجد قيمة الشحنة السالبة التي يجب وضعها في مركز المثلث حتى تتوازن مجموعة هذه الشحنات.



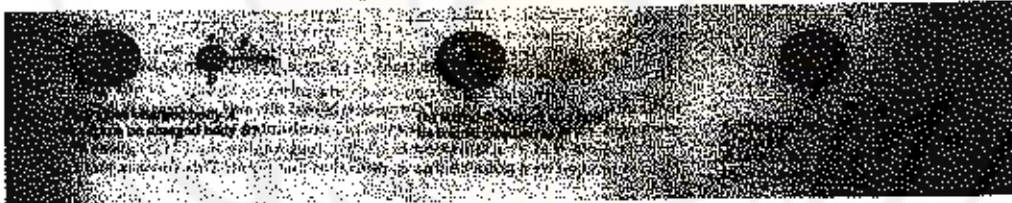
الفصل الثاني
الحقل
الكهربائي
ELECTRIC FIELD



٢- ١ تعريف الحقل الكهربائي Definition of Electric Field:

وضعت فكرة الحقل الكهربائي لتسهيل دراسة التفاعلات بين الاجسام المشحونة كهربائياً، حيث تتفاعل هذه الاجسام مع بعضها البعض بدون أن يكون بينهم أي صلة مادية . ولا يدري أحد سر ذلك . إنما هذا التأثير المتبادل هو واقع تجريبي يدلنا على أن الاجسام المشحونة تتفاعل مع بعضها بهذه الكيفية . و على كلٍ فإن من المفيد أن نفكر بأن كل جسم مشحون يحدث تعديلاً في أحوال الفضاء المحيط به تختلف اختلافاً تاماً عما كانت عليه قبل مجيء هذه الاجسام المشحونة .

لنأخذ جسمين مشحونين إيجابياً A و B . فحسب قانون كولون، يوجد بينهما قوة تدافع F الشكل (١ - ٢ - a) . لنبعد الآن الجسم B عن مكانه ، و لتكن النقطة P هي نقطة الفضاء التي كان يشغلها الجسم B سابقاً . و نقول إن الجسم المشحون A يولد حقلاً كهربائياً في النقطة P الشكل (١ - ٢ - b) . و إذا أعيد الجسم المشحون B إلى P نعتبر أن الحقل هو الذي يؤثر في B بقوة . أو يطبق على B قوة لا الجسم A مباشرة . و لما كان الجسم B يظل تحت تأثير قوة إذا نقل في جميع نقاط الفضاء المحيطة بالجسم A فإن الفضاء المحيط بـ A هو أيضاً حقل كهربائي .



الشكل (١ - ٢)

يمكن بنفس الطريقة أن نعتبر الجسم B يولد حقلاً كهربائياً و أن هذا الحقل سيطبق قوة على الجسم A بنفس المبدأ . إن الاختبار التجريبي لوجود حقل كهربائي في نقطة ما يقتصر على وضع جسم مكهرب، يسمى شحنة الاختبار، في تلك النقطة . فإذا أنشأت قوة، ذات أصل كهربائي، في شحنة الاختبار . استنتجنا أنه يوجد حقل كهربائي في تلك النقطة . أنظر الشكل (١ - ٢ - c)

نقول إنه يوجد حقل كهربائي في نقطة ما، فيما إذا أثرت قوة، ذات أصل كهربائي، في كل جسم مكهرب نضعه في تلك النقطة. ولكي نعرف هل هذه القوة ذات أصل كهربائي أم لا. نقارن بين القوتين المطبقتين على جسم الاختبار، عندما يكون مشحوناً وعندما يكون غير مشحون فالقوة التي يلاحظ وجودها عندما يكون جسم الاختبار مشحوناً وتختفي عندما يكون غير مشحون، هي قوة ذات أصل كهربائي .

نعرف شحنة الاختبار بأنها شحنة كهربائية خيالية موجبة وصغيرة جداً، بحيث يمكننا إهمال القوة الناشئة عنها في الشحنات المجاورة لها .

لما كانت القوة مقداراً شعاعياً فالحقل الكهربائي هو مقدار شعاعي أيضاً . أي يُمثل بمنحى، لها نفس الإستقامة . أي أن منحى الحقل الكهربائي في نقطة ما من الفضاء وجهته هما منحى وجهة القوة التي يؤثر بها الحقل على شحنة موجبة موضوعة في تلك النقطة . و هكذا، نعرف قيمة الحقل أو شدته E في نقطة ما بحاصل قسمة القوة F التي يطبقها الحقل على الجسم الاختباري، على الشحنة q_0 لهذا الجسم الاختباري، أو بعبارة أخرى إن قيمة الحقل الكهربائي في نقطة ما تساوي قيمة القوة المطبقة على وحدة الشحنة في تلك النقطة .

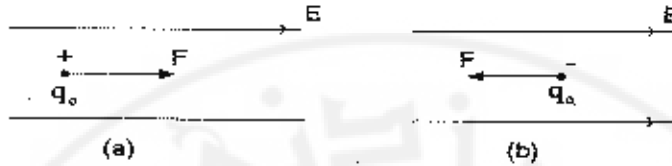
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} \quad (1)$$

نستعمل عبارة منحى الحقل الكهربائي في نقطة ما، بمعنى شدة الحقل الكهربائي في تلك النقطة أو أحياناً شدة الحقل فقط . وفي الجملة المكنية، حيث تقدر القوى بالنيوتن والشحنات بالكولون، تقدر شدة الحقل الكهربائي بالنيوتن على الكولون . يمكن كتابة العلاقة (1) بالشكل الآتي أيضاً:

$$\vec{F}_0 = q_0 \cdot \vec{E} \quad (2)$$

ومعناها أن القوة التي يطبقها حقل كهربائي شدته $\vec{E}$ على شحنة قدرها q_0 تساوي شدة الحقل بالشحنة .

يمكن أن تكون الشحنة الاختيارية q_0 موجبة أو سالبة. إذا كانت q_0 موجبة فإن $\vec{E}$ و $\vec{F}_0$ لهما نفس الاتجاه شكل (2-2-a) وإذا كانت q_0 سالبة فإن $\vec{E}$ و $\vec{F}_0$ متعاكسان بالاتجاه، كما هو موضح بالشكل (2-2-b).



شكل (2-2)

لنقارن العلاقة (2)، بقوة الجاذبية الأرضية على الكتلة m_0 والمعطاة بالعلاقة:

$$\vec{F}_g = m_0 \cdot \vec{g} \quad (3)$$

حيث $\vec{g}$ تمثل تسارع الجاذبية الأرضية، وبقسمة طرفي العلاقة على m_0 نجد:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m_0} \quad (4)$$

يمكن أن ننظر إلى $\vec{g}$ بأنها تمثل قوة الجاذبية الأرضية على واحدة الكتلة، وهي مشابهة للعلاقة (1)، وبالتالي يمكننا القول بأن $\vec{g}$ تمثل حقل الجاذبية الأرضية

2-2 حساب شدة الحقل الكهربائي Electric field Calculation

شرحنا في الفقرة السابقة، طريقة تجريبية لقياس شدة الحقل الكهربائي في نقطة ما. وتعتمد الطريقة على وضع شحنة اختبارية في تلك النقطة وقياس القوة المطبقة عليها. ثم أخذ النسبة بين القوة و الشحنة. هذا ويمكن حساب شدة الحقل الكهربائي في نقطة ما باستخدام قانون كولون. إذا كانت مقادير الشحنات المشتركة في إحداث الحقل معروفة وكذلك أوضاعها.

وهكذا، لكي نجد قيمة شدة الحقل في نقطة ما من الفضاء مثل P تبعد مسافة r عن الشحنة q. نتصور شحنة اختبارية q_0 موضوعة في P، فقانون كولون يطينساً مقدار القوة المطبقة على الشحنة الاختبارية كالآتي:

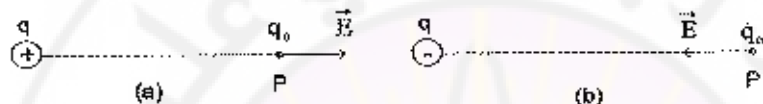
$$F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q \cdot q_0|}{r^2} \quad (5)$$

وحسب العلاقة (1) تكون قيمة الحقل الكهربائي مساوية:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2} \quad (6)$$

وباستخدام شعاع الواحدة $\vec{r}$ ، يمكن كتابة الحقل الكهربائي بشكل شعاعي:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2} \cdot \vec{r}$$



الشكل (2-3)

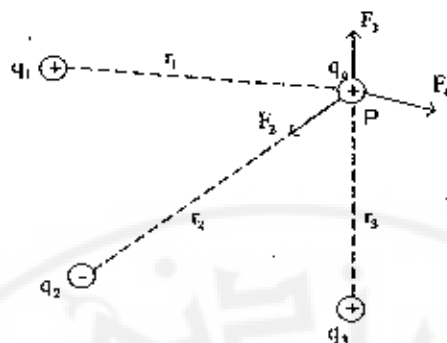
و تكون جهة الحقل الكهربائي مبتعدة عن الشحنة q إذا كانت هذه الشحنة موجبة و متجهة نحو q إذا كانت سالبة، كما هو موضح بالشكل (2-3).

من أجل حساب شدة الحقل الكهربائي، الناتج عن شحنات كهربائية في نقطة ما من الفضاء، نميز عادةً بين حالتين من الشحنات، الأولى عندما تكون الشحنات منفصلة، أي أن المسافة بين الشحنات كبيرة جداً بالمقارنة مع أبعادها، و الثانية عندما تكون الشحنات متصلة كتوزيع عدد لا نهائي من الشحنات على مسطح أو حجم.

في الحالة الأولى، لنفرض لدينا عدد من الشحنات النقطية المنفصلة

$q_1, q_2, \dots, q_n$ واقعة على الأبعاد $r_1, r_2, \dots, r_n$ من النقطة المفروضة P ،

الشكل (2-4).



الشكل (2-4)

فإن كل شحنة تطبق قوة على شحنة الاختبار q_0 الموضوعة في النقطة P . وتكون القوة المحصلة والمطبقة على شحنة الاختبار هي المتجهة الحاصلة من جمع هذه القوى شعاعياً:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = q_0 \cdot \vec{E}_1 + q_0 \cdot \vec{E}_2 + q_0 \cdot \vec{E}_3 + \dots$$

واستناداً إلى العلاقة (1) نجد:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = k \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \cdot \vec{r}_i \quad (8)$$

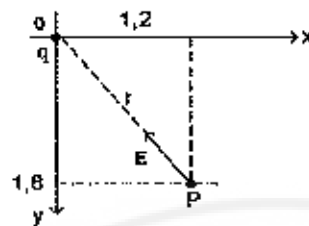
أما في الحالة الثانية، فإننا نقسم الشحنات إلى أجزاء متناهية في الصغر dq . ويصبح عندئذ المجموع الوارد في العلاقة (8) تكاملاً ويكون:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \cdot \vec{r} \quad (9)$$

3-2 تطبيقات على حساب شدة الحقل الكهربائي Applications :

مثال (1-2):

وضعت شحنة كهربائية $q = -8 \text{ nc}$ في مبدأ الإحداثيات، أوجد الحقل الكهربائي في النقطة $P (1.2 \text{ m}, -1.6 \text{ m})$.
الحل:



$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(1,2)^2 + (-1,6)^2} = 2\text{m}$$

$$E = k \frac{|q|}{r} = 9 \times 10^9 \times \frac{|-8 \times 10^{-9}|}{4} = 18 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

مثال (2-2):

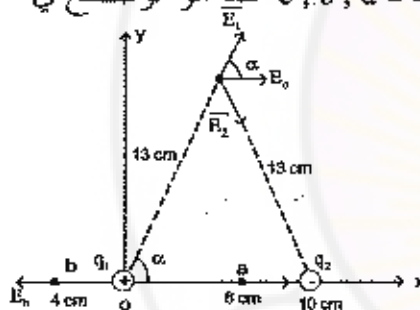
شحنتان كهربائيتان متساويتان بالقيمة المطلقة ومختلفتان بالإشارة، المسافة بينهما

10 cm، أوجد الحقل الكهربائي الناتج عنهما، في النقاط a, b, c كما هو موضح في

الشكل.

الحل:

في النقطة a:



$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = 9 \times 10^9 \cdot \frac{12 \times 10^{-9}}{(0,06)^2} = 3 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = 9 \times 10^9 \cdot \frac{12 \times 10^{-9}}{(0,04)^2} = 6,8 \times 10^4 \text{ N/C}$$

$$E_a = E_1 + E_2 = (3 + 6,8) \cdot 10^4 \text{ N/C} = 9,8 \times 10^4 \text{ N/C}$$

وتقع على محور السينات و بالاتجاه الموجب .

في النقطة b:

$$E_1 = k \cdot \frac{|q_1|}{r_1^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-9}}{(0,04)^2} = 6,8 \times 10^4 \text{ N/c}$$

$$E_2 = k \cdot \frac{|q_2|}{r_2^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-9}}{(0,14)^2} = 0,55 \times 10^4 \text{ N/c}$$

فالخصلة تكون:

$$E_b = -E_1 + E_2 = (-6,8 + 0,55) \times 10^4 \text{ N/c} = -6,2 \times 10^4 \text{ N/c}$$

فالخصلة تقع على محور السينات و بالاتجاه السالب .

في النقطة c تكون قيمة الحقلين E_1, E_2 متساويين:

$$E_1 = E_2 = k \cdot \frac{q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{12 \times 10^{-9}}{0,13} = 6,39 \times 10^3 \text{ N/c}$$

$$E_c = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = E_x$$

$$E_{1x} = E_{2x} = E_1 \cos \alpha = 6,39 \times 10^3 \times \frac{5}{13} = 2,46 \times 10^3 \text{ N/c}$$

و منه:

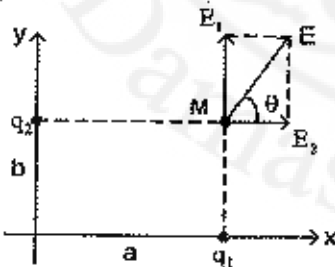
و بالتالي فالخصلة تساوي:

$$E_c = (E_c)_x = E_{1x} + E_{2x} = 2 \times 2,46 \times 10^3 = 4,9 \times 10^3 \text{ N/c}$$

مثال (2 - 3):

شحنتان نقطيتان موجبتان، الأولى q_1 تقع على المحور ox و فاصلتها a، والثانية

q_2 تقع على المحور oy و ترتيبها b . أوجد الحقل الكهربائي عند النقطة M (a, b) .



$$E_1 = k \cdot \frac{|q_1|}{b^2}$$

$$E_2 = k \cdot \frac{|q_2|}{a^2}$$

الحل:

و حسب الشكل الخائبي تكون قيمة الخصلة تساوي:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = K \left[\left(\frac{q_1}{b^2} \right)^2 - \left(\frac{q_2}{a^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

و يصنع زاوية θ تعطى بالعلاقة:

$$\tan \theta = \frac{E_1}{E_2} = \frac{q_1}{q_2} \left(\frac{a}{b} \right)^2$$

كانت الأمثلة السابقة تطبيقات على حساب الحقل الكهربائي من أجل توزيع منفصل للشحنات، ولحساب الحقل الكهربائي في حال توزيع متصل للشحنات لابد من تعريف كثافة الشحنات الكهربائية:

a - كثافة الشحنات الخطية λ : Linear charge density وهي الشحنة بوحدة

$$\frac{C}{m} \quad \lambda = \frac{Q}{L} \quad \text{واحدتها} \quad \text{والطول و تعطى بالعلاقة:}$$

b - كثافة الشحنات السطحية σ : Surface charge density وهي الشحنة في

$$\text{واحدة السطح وتعطى بالعلاقة:} \quad \sigma = \frac{Q}{S} \quad \text{واحدتها} \quad \frac{C}{m^2}$$

c - كثافة الشحنة الحجمية ρ : Volume charge density وهي الشحنة في

$$\text{واحدة الحجم و تعطى بالعلاقة:} \quad \rho = \frac{Q}{V} \quad \text{واحدتها} \quad \frac{C}{m^3}$$

من أجل حساب شدة الحقل الكهربائي الذي يولده توزيع مستمر للشحنات، نقسم الشحنات إلى أجزاء صغيرة و نحسب الحقل الذي يولده كل جزء من هذه الأجزاء، ثم نحسب المحصلة الشعاعية للحقول جميعها وهذا يتطلب إجراء عملية تكامل.

وفي حالة التوزيع الخطي للشحنات بكثافة خطية λ ، نأخذ طولاً عنصرياً dL من السلك المشحون، فهو يحمل شحنة كهربائية قيمتها $dq = \lambda dL$. فيتولد عن هذه الشحنة حقل كهربائي عنصري $d\vec{E}$ في نقطة ما M تبعد مسافة r عن dq قيمته:

$$\vec{dE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dq}{r^2} \cdot \vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda \cdot dL}{r^2} \cdot \vec{r}$$

حيث $\vec{r}$ ، متجهة الواحدة على المحور الواصل بين مركز الطول العنصري dL والنقطة M . وبعملية تكامل على طول السلك L نحصل على قيمة الحقل الكهربائي $\vec{E}$ الناشئ عن كامل السلك في النقطة M المراد حساب الحقل فيها:

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\lambda \cdot dL}{r^2} \cdot \vec{r}$$

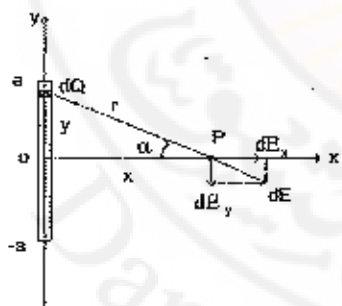
وفي حالة التوزيع السطحي للشحنات: نأخذ سطحاً عنصرياً صغيراً dS ، فهو يحمل شحنة نقطية $dq = \sigma \cdot dS$ ، ونطبق عليه نفس العلاقات السابقة، ثم بعملية تكامل على كامل السطح المشحون، نحصل على الحقل الكهربائي في نقطة ما تبعد مسافة r عن مركز dS ونكتب:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma \cdot dS}{r^2} \cdot \vec{r}$$

بنفس الطريقة، في حالة التوزيع الحجمي، نأخذ حجماً صغيراً dv ، فهو يحوي شحنة عنصرية $dq = \rho \cdot dv$ ونحصل على العلاقة التالية:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho \cdot dv}{r^2} \cdot \vec{r}$$

مثال (2-4):



تتوزع شحنة كهربائية موجبة Q بكثافة خطية منتظمة λ على قطعة مستقيمة طولها $L = 2a$ ، والمطلوب حساب الحقل الكهربائي الناشئ عن هذه الشحنة في نقطة P تقع على محور هذه القطعة وتبعد عنها x . كما هو موضح بالشكل الجانبي.

نأخذ طولاً عنصرياً من القطعة المستقيمة $dL = dy$ ، يحمل الشحنة dQ ،

ويقع على بعد y من مركز القطعة O وعلى بعد r من النقطة P ، يولد هذا العنصر حقلًا عنصرياً يعطى بالعلاقة:

$$\vec{dE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dQ}{r^2} \cdot \vec{r}$$

وعما أن $dQ = \lambda \cdot dy$ ، $\lambda = \frac{Q}{2a}$ ومن الشكل $r = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$ نجد:

$$dE = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dy}{2a(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

إن كل عنصر مثل dQ من القضيب يولد حقلًا عنصرياً، و يكون مجموع هذه الحقول العنصرية مساوياً إلى المحصلة العامة المطلوبة.

بما أن النقطة P واقعة على محور القطعة المستقيمة $L = 2a$ ، فإنه يمكن تحديد اتجاه الحقل E بسهولة، نلاحظ أنه لو استطعنا جمع الحقول العنصرية على محوري الإحداثيات ox ، oy ، لوجدنا أن محصلة المساقط على المحور oy للحقول العنصرية المتولدة عن أحد نصفي القطعة المستقيمة تعاكس بالاتجاه و تساوي بالقيمة العددية الحاصلة للمساهمة المتولدة عن النصف الآخر. أما المساقط على المحور ox فكلها ذات اتجاه واحد، لذا تجمع و تكون محصلة واحدة هي المحصلة العامة المطلوبة. يعني أن اتجاه الحقل في P هو الاتجاه العمودي على القضيب، ونحسب قيمته العددية، إذا كان مسقط dE على ox هو dE_x فيكون:

$$dE_x = dE \cos \alpha = dE \cdot \frac{x}{r} = dE \cdot \frac{x}{(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}$$

وملاحظة الشكل وتعويض dE بقيمتها نجد:

$$dE_x = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x \cdot dy}{2a \cdot (x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}}$$

ولإيجاد محصلة الحقل علينا أن نكامل العلاقة الأخيرة من $y = -a$

إلى $y = +a$

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qx}{2a} \int_{-a}^a \frac{dy}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{x\sqrt{x^2 + a^2}}$$

وهكذا محصلة الحقل الكهربائي في P تكون:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{x\sqrt{x^2 + a^2}} \cdot \vec{i}$$

حالات خاصة:

A - إذا كانت $x \gg a$ أي النقطة P بعيدة جداً عن النقطة المستقيمة، يمكن إهمال a و تصبح قيمة الحقل:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{x^2} \cdot \vec{i}$$

B - إذا كان طول القضيب $L = 2a$ لا متناهياً في الطول، وكان x محدوداً أو صغيراً جداً بالمقارنة مع طول القطعة المستقيمة ($L = 2a \gg x$) وباستخدام

$$\lambda = \frac{Q}{2a} \Rightarrow Q = 2a\lambda \quad \text{العلاقة}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{x\sqrt{\left(\frac{x}{a}\right)^2 + 1}} \cdot \vec{i} \quad \text{نجد:}$$

وبما أن $x \gg L$ فيمكن إهمال الحد $\frac{x}{a}$ وتصبح قيمة الحقل:

$$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \cdot x} \cdot \vec{i}$$

نلاحظ أن الحقل في هذه الحالة متناسب عكسياً مع بعد النقطة عن القطعة المستقيمة L

مثال (2-5):

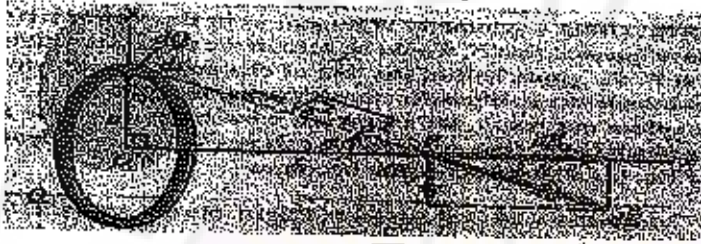
حلقة دائرية ناقلة، نصف قطرها a و مشحونة بانتظام بشحنة كلية موجبة قدرها Q . أوجد الحقل الكهربائي في نقطة P تقع على محور الحلقة و تبعد مسافة x

عن مركزها .

الحل:

نأخذ جزءاً عنصرياً ds من محيط الحلقة، شحنته dQ ، فإنه يولد في النقطة P حقلاً شدته تعطى بالعلاقة:

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dQ}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dQ}{x^2 + a^2}$$



نلاحظ من الشكل أن شعاع الحقل dE يقع في المستوي xoy ويصنع زاوية α مع المحور ox ، ويمكن أن يُفرد إلى مركبتين على المحورين ox ، oy . وعندما نأخذ جميع أجزاء الحلقة نجد أن المحصلة للمركبات dE_y على المحور oy تكون معدومة بسبب التناظر، و تكون محصلة الحقل هي مكاملة المركبات على الاستقامة ox .

$$\begin{aligned} dE_x = dE \cos \alpha &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{dQ}{x^2 + a^2} \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x \cdot dQ}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

لإيجاد محصلة الحقل على المحور ox ، نكامل العلاقة الانعرجية:

$$E_x = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{x \cdot dQ}{(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

إن كافة المقادير تحت إشارة التكامل هي ثابتة. ما عدا المقدار dQ ، حيث تكامله يسو الشحنة الكلية Q . فتكون محصلة الحقل تساوي:

$$\vec{E} = E_x \vec{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot x}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \vec{i}$$

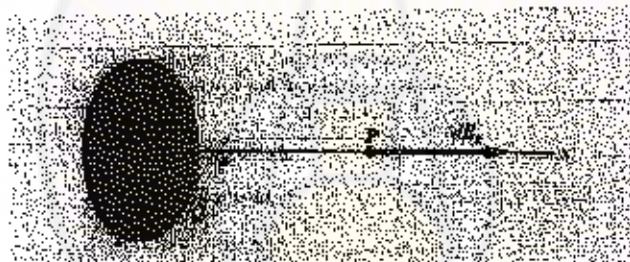
وفي الحالة الخاصة، عندما تكون P بعيدة جداً أي $x \gg a$ فيمكن إهمال a ، وتصبح قيمة الحقل مساوية:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{x^2} \vec{i}$$

العبارة الأخيرة، تعني بأن شحنة الحلقة أصبحت كشحنة نقطية.

مثال (2-6):

قرص دائري نصف قطره R، مشحون بانتظام بشحنة كلية قدرها Q وبكثافة سطحية σ ، أوجد الحقل الكهربائي الناتج عن هذا القرص في النقطة P تقع على محوره وتبعد مسافة x عن مركزه.



في هذه الحالة، نستطيع حساب الحقل الكهربائي بمعاملة القرص على أنه مجموعة من الحلقات المشحونة المتمركزة وبالتالي نستخدم النتيجة في المثال السابق (2-5). لذلك، ننظر إلى حلقة نصف قطرها r وعرضها dr، كما هو مبين بالشكل العلوي، إن مساحة هذه الحلقة هي $2\pi r \cdot dr$ وتحمل شحنة قدرها $dQ = 2\pi r \cdot dr \cdot \sigma$ والحقل الناتج عنها يعطى بالعلاقة:

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(2\pi\sigma r \cdot dr) \cdot x}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

فيكون الحقل الكلي الناتج عن كامل القرص هو بمكاملة العبارة السابقة من $r=0$ إلى

$$r = R$$

$$E_x = \int_0^R \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{(2\pi\sigma r dr)x}{(x^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0} \int_0^R \frac{r dr}{(x^2 + r^2)^{3/2}}$$

من أجل نقطة معينة مثل P تكون x ثابتة، و بفرض $Z = x^2 + r^2$ نجد قيمة الحقل:

$$E = E_x = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0} \left[-\frac{1}{\sqrt{x^2 + R^2}} + \frac{1}{x} \right]$$

$$= \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[1 - \frac{1}{(R^2/x^2 + 1)} \right]$$

وفي الحالة الخاصة، عندما $R \rightarrow \infty$ أي القرص يصبح مستوياً لا نهائياً فإن قيمة الحقل الكهربائي تعطى بالملاقة:

$$E = \frac{\sigma x}{2\epsilon_0} = 2\pi k \sigma$$

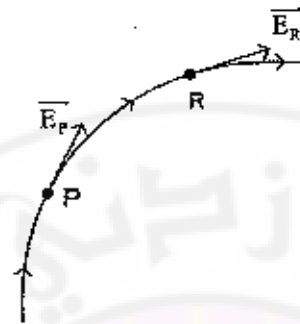
2-4 خطوط الحقل الكهربائي Electric Field lines

إن أول من أدخل مفهوم خطوط الحقل (Lines of force) هو العالم الإنكليزي ميخائيل فارادي (Michael Faraday 1791 - 1867). و غايته من ذلك تسهيل دراسة الحقول الكهربائية، ولكن يفضل استخدام مفهوم خطوط الحقل بدلاً من مفهوم خطوط القوة.

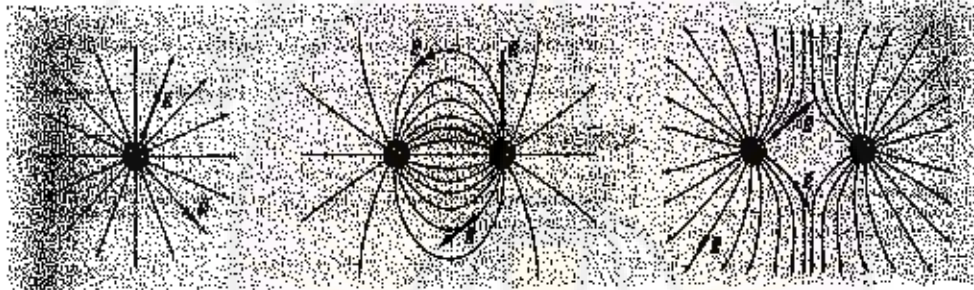
إن خط الحقل الكهربائي هو خط أو منحنى وهمي، يرسم في منطقة من الفراغ، ويمثل الحقل الكهربائي في كل نقطة بشعاع تكون استقامته متطابقة على استقامة المناس لخطوط الحقل في تلك النقطة. وجهته هي جهة الحقل كما هو موضح بالشكل (5-2).

يبين الشكل (2-6) بعضاً من خطوط الحقل الكهربائي الناتج عن شحنة كهربائية مفردة موجبة (a). و عن شحنتين متساويتين، إحداهما موجبة والأخرى

سالبة (b) وعن شحنتين موجبتين متساويتين (c).



الشكل (5-2)



الشكل (6-2)

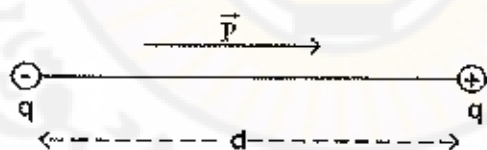
إن كل خط من خطوط الحقل الكهربائي هو خط متواصل ينتهي في أحد طرفيه بشحنة موجبة وفي طرفه الآخر شحنة سالبة. وإذا تكلمنا في بعض الأحيان بقصد التبسيط، عن شحنة معزولة ورسمنا حقلها، كما في الشكل (6-2-a). فذلك يعني أن الشحنات التي تؤدي إليها خطوط الحقل هي في مكان بعيد عن هذه الشحنة المعزولة. فإذا كان الجسم المشحون الذي في الشكل (6-2-a) هو مثلاً كرة صغيرة معلقة بخيط في سقف مخبر، فإن الشحنات السالبة التي تنتهي بها خطوط الحقل الخارجة من الكرة هي على جدران المخبر وأرضه وسقفه أو على أشياء أخرى موحسودة في المخبر.

في كل نقطة من نقاط الحقل الكهربائي، لا يمكن أن يكون للحقل إلا منحى

واحد. ويتبع عن ذلك أن كل نقطة من نقاط الحقل لا يمكن أن يمر منها سوى خط حقل واحد، أو بمعنى آخر إن خطوط الحقل لا تتقاطع أبداً $\text{Field lines never intersect}$ ويمكن طبعاً رسم خطوط الحقل المار من كل نقطة من نقاط الحقل، ولكن إذا رسمنا جميع هذه الخطوط، لأصبح الفضاء كله وكذلك سطح الشكل كله مملوء بالخطوط، ولا يمكن تمييز خط عن آخر. فإذا حددنا عدد خطوط الحقل تحديداً مناسباً، أمكن استعمال هذه الخطوط لإظهار منحنى الحقل و شدته. ويكون ذلك بالمباعدة بين الخطوط بحيث يكون عددها الذي يخترق وحدة السطح العمودية على الخطوط، في جهة الحقل، وفي كل نقطة من الحقل متناسباً مع شدة هذا الحقل، بحيث يكون الحقل شديداً، كما في النقطة الواقعة بين الشحنة الموجبة و الشحنة السالبة الشكل (6-2-6)، تكون خطوط الحقل متقاربة جداً. وأما في المناطق التي تكون فيها الشدة ضعيفة، كما هو الحال بين شحنتين موجبتين، الشكل (6-2-6)، تكون القوة متباعدة عن بعضها.

2-5 ثنائي الأقطاب الكهربائي Electric Dipoles:

يُعرف ثنائي الأقطاب الكهربائي بأنه كسل شحنتين كهربائيتين نقطيتين متساويتين بالقيمة المطلقة ومختلفتين بالإشارة و مفصولتين عن بعضهما بالمسافة d كما هو مبين بالشكل (2-7).



شكل (2-7)

و يُعرف العزم الكهربائي لثنائي الأقطاب electric dipole moment، ويرمز له بـ P ، على أنه شعاع شدته $d \cdot q = P$ ، محمول على الخط الواصل بين الشحنتين وموجه من الشحنة السالبة إلى الشحنة الموجبة.

عند وضع ثنائي الأقطاب في حقل كهربائي شدته E ، ويصنع عزمه $\vec{P}$

زاوية Φ مع الحقل $\vec{E}$ شكل (8-2) فإنه سينحصر إلى قوتين متساويتين بالقيمة و مختلفتين بالاتجاه:

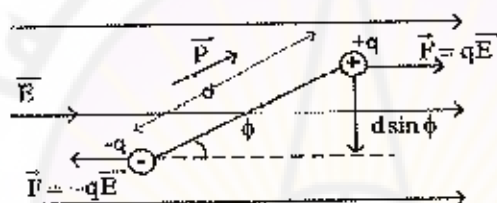
$$\vec{F}_1 = q \cdot \vec{E} \quad , \quad \vec{F}_2 = -q \cdot \vec{E}$$

فتكون محصلة القوى المؤثرة على الثنائي معدومة، ولكن هاتان القوتان ستولفان مزدوجة، تقوم بتدوير ثنائي الأقطاب، عزمها τ يعطى بالعلاقة:

$$\tau = F \cdot d \cos \Phi = q \cdot E \cdot d \sin \Phi = P \cdot E \cdot \sin \Phi$$

باستخدام الجداء الشعاعي، يمكن كتابة هذا العزم بالشكل:

$$\tau = \vec{P} \wedge \vec{E} \quad (10)$$



الشكل (8-2)

وحسب قاعدة اليد اليمنى، نجعل سبابة اليد اليمنى باتجاه شعاع الحقل $\vec{E}$ وإبهامها في جهة عزم ثنائي الأقطاب $\vec{P}$ ، فتمثل الإصبع الوسطى العمودية على مستوي الإبهام و السبابة جهة عزم المزدوجة لثنائي الأقطاب. في هذه الحالة تكون جهة τ عمودية باتجاه داخل الورقة.

وهكذا، فإن ثنائي الأقطاب سوف يخضع إلى عزم قيمته معطاة بالعلاقة (10) $PE \sin \Phi$ ، يحاول تدويره إلى وضع التوازن المقابل للزاوية $\Phi = 0$. فإذا كان ثنائي الأقطاب حرًا، فسيحدره العزم على الدوران ويهتز الشعاع $\vec{P}$ حول وضع التوازن $\Phi = 0$ حتى تنبسط طاقته.

نستطيع حساب الطاقة الكامنة لثنائي الأقطاب، الموجود ضمن حقل كهربائي منتظم. بحساب العمل اللازم لكي يصنع شعاع العزم $\vec{P}$ زاوية Φ مع الحقل الكهربائي

$\vec{E}$. فإذا طبقنا عزمًا قدره $\tau = -PE \sin \Phi$ (الإشارة السالبة تدل على العزم المعاكس) لتدوير ثنائي الأقطاب زاوية قدرها $d\Phi$ فإنّ العمل الذي نقوم به يساوي:

$$dw = \tau d\Phi = -PE \sin \Phi d\Phi$$

ويكون العمل اللازم لتدوير ثنائي الأقطاب من الزاوية Φ_1 إلى الزاوية Φ_2 هو:

$$w = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} -PE \sin \Phi d\Phi$$

$$w = PE \cos \Phi_2 - PE \cos \Phi_1$$

إنّ هذا العمل يمثل تغير الطاقة الكامنة لثنائي الأقطاب من U_1 إلى U_2 أي:

$$w = U_1 - U_2$$

وقد جرت العادة أن نختار طاقة كامنة معدومة عندما يكون شعاع عزم ثنائي الأقطاب

$\vec{P}$ معامداً لاتجاه الحقل $\vec{E}$. أي $\Phi = \frac{\pi}{2}$ ، لتصبح الطاقة الكامنة لثنائي الأقطاب معطاة

بالعلاقة: Potential energy for a dipole

$$U = -PE \cos \Phi = -\vec{P} \cdot \vec{E} \quad (11)$$

نلاحظ من العلاقة الأخيرة أنّ الطاقة الكامنة لثنائي الأقطاب تكون أصغر ما

يمكن $U = -P.E$ عندما $\Phi = 0$ أي $\vec{P} // \vec{E}$ ، بينما $U = +P.E$ تكون أعظم ما

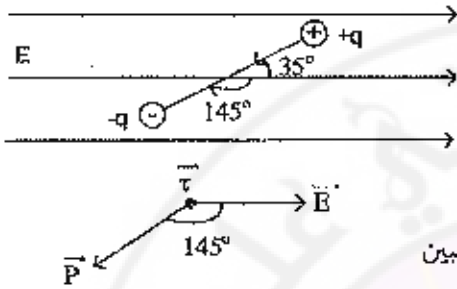
يمكن عندما $\Phi = \pi$ أي $\vec{P}$ يوازي $\vec{E}$ ويعاكسه بالاتجاه، وتكون الطاقة الكامنة

معدومة من أجل $\Phi = \frac{\pi}{2}$.

مثال 2 - 7:

ثنائي أقطاب كهربائي قيمة كل من شحنتيه $Cq = \pm 1,6 \times 10^{-19}$ ، و المسافة بينهما $md = 1,25 \times 10^{-10}$. وضع في حقل كهربائي شدته $5 \times 10^5 \frac{N}{C}$ ، والمطلوب

حساب:



- ١ - محصلة القوى المؤثرة على ثنائي الأقطاب
- ٢ - قيمة و جهة عزم ثنائي الأقطاب
- ٣ - قيمة و جهة عزم المزدوجة لثنائي الأقطاب
- ٤ - الطاقة الكامنة لثنائي الأقطاب في الوضع المبين بالشكل الجانبي

الحل:

١ - إن ثنائي الأقطاب يخضع لقوتين متساويتين بالقيمة ومتعاكستين بالجهة، فتكون محصلة القوى المطبقة عليه معدومة .

٢ - قيمة عزم ثنائي الأقطاب تعطى بالعلاقة:

$$P = q.d = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,25 \times 10^{-10} = 2 \times 10^{-29} \text{ C.m}$$

وجهته من الشحنة السالبة إلى الشحنة الموجبة ويصنع زاوية 145° باتجاه عقارب الساعة بالنسبة للحقل $\vec{E}$

٣ - قيمة عزم المزدوجة تعطى بالعلاقة:

$$\tau = P.E. \sin \Phi = 2 \times 10^{-29} \times 5 \times 10^5 \times \sin 145^\circ \\ = 5,7 \times 10^{-24} \text{ N.m}$$

وجهة العزم حسب قاعدة اليد اليمنى تكون عمودية على الورقة ونحو الخارج.

٤ - الطاقة الكامنة تحسب من العلاقة:

$$U = -P.E. \cos \Phi = -2 \times 10^{-29} \times 5 \times 10^5 \times \cos 145^\circ \\ = 8,2 \times 10^{-24} \text{ J}$$



مسائل

$$\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ n.m}^2 / \text{coul}^2, \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ coul}^2 / \text{n.m}^2\right)$$

1- يحمل جسم صغير شحنة قدرها $-5 \times 10^{-9} \text{ coul}$ وتتسلط عليه قوة قدرها: $20 \times 10^{-9} \text{ n}$ عندما يوضع في نقطة معينة من حقل كهربائي، والمطلوب:

a- ما هي شدة الحقل الكهربائي في تلك النقطة؟

b- كم يكون مقدار ومنحى القوة التي تتسلط على الإلكترون يوضع في تلك النقطة؟

2- كم ينبغي أن تكون شحنة جسم كتلته 2 g لكي يبقى ساكناً في الفضاء عندما يوضع في حقل كهربائي متجه نحو الأسفل شدته 500 n/coul ؟

3- في جملة إحداثيات متعامدة، وضعت شحنة قدرها $25 \times 10^{-9} \text{ coul}$ في مبدأ الإحداثيات، وشحنة قدرها $-25 \times 10^{-9} \text{ coul}$ في النقطة $(x = 6 \text{ m}, y = 0)$ ، ما هي شدة الحقل في:

a- النقطة $(x = 3 \text{ m}, y = 0)$ ؟

b- النقطة $(x = -3 \text{ m}, y = 4 \text{ m})$ ؟

4- وضعت في مبدأ الإحداثيات شحنة قدرها $16 \times 10^{-9} \text{ coul}$ ، وضعت شحنة أخرى مجهولة المقدار في النقطة $(x = 3 \text{ m}, y = 0)$ وضعت شحنة ثالثة مقدارها $12 \times 10^{-9} \text{ coul}$ في النقطة $(x = 6 \text{ m}, y = 0)$.

ما هو مقدار الشحنة المجهولة إذا كان الحقل الحاصل في النقطة $(x = 8 \text{ m}, y = 0)$ هو 20.25 n/coul ومتجهاً نحو اليمين؟

5- يوجد في جملة إحداثيات متعامدة شحنتان نقطيتان موجبتان كل منهما قدرها

10^{-8} coul وهما مثبتتان في النقطتين $y = 0, x = +0.1 \text{ m}$ و $y = 0, x = -0.1 \text{ m}$ ، أوجد مقدار ومنحى شدة الحقل الكهربائي في النقاط الآتية:
a- المبدأ.

. $y = 0, x = 0.2 \text{ m}$ -b

. $y = 0.15 \text{ m}, x = 0.1 \text{ m}$ -c

. $y = 0.1 \text{ m}, x = 0$ -d

6- نفس المسألة السابقة (5)، مع فارق أن إحدى الشحنتين النقطيتين هي موجبة والأخرى سالبة.

7- كرية صغيرة كتلتها 0.1 g تحمل شحنة قدرها $3 \times 10^{-10} \text{ coul}$ وهي مربوطة بأحد طرفي خيط حريري طوله 5 cm . وقد ربط الطرف الآخر بصفيحة ناقلية كبيرة تبلغ شحنتها السطحية $25 \times 10^{-6} \text{ coul/m}^2$ أوجد الزاوية التي يصنعها الخيط مع الشاقول.

8- شحنتان متساويتان قيمة كل منهما $+4 \mu\text{C}$ إحداهما في مبدأ الإحداثيات والثانية على المحور x عند النقطة $x = 8 \text{ cm}$ ، والمطلوب:

a- أوجد الحقل الكهربائي عند النقطتين $x = 10 \text{ m}$ و $x = 2 \text{ m}$ من المحور x .

b- أوجد النقطة P من المحور x ، التي ينعدم فيها الحقل الكهربائي.

9- شحنتان نقطيتان موجبتان متساويتان $q_1 = q_2 = 6 \text{ nC}$ موجودتان على المحور y عند النقطتين $y_1 = +3 \text{ cm}$ و $y_2 = -3 \text{ cm}$ ، ما هي قيمة الحقل الكهربائي واتجاهه عند النقطة $x = 4 \text{ cm}$ من المحور x .

10- تخضع شحنة اختبار قدرها $q_0 = 2 \text{ nC}$ موضوعة عند مبدأ الإحداثيات، إلى قوة قدرها $8 \times 10^{-4} \text{ N}$ باتجاه المحور y ، والمطلوب:

a- ما هي قيمة الحقل الكهربائي عند المبدأ؟

b- وما هي القوة التي تخضع لها شحنة قدرها $4nC$ - إذا وُضعت عند المبدأ؟

11- وزعت شحنة قدرها $0.5\mu C$ بشكل منتظم على حلقة نصف قطرها 3 cm .

أوجد الحقل الكهربائي على محور الحلقة عند النقاط التي تبعد مسافة 1 cm ، 2 cm ، 3 cm ، 600 cm عن مركز الحلقة.

12- وُضعت شحنة على المحور x بكثافة خطية قدرها λ من النقطة $a = -x$ حتى النقطة $b = x$ ، والمطلوب:

a- أوجد صيغة مركبة الحقل الكهربائي باتجاه المحور y ؟

b- أثبت أن الصيغة هذه تصبح مماثلة للعلاقة $E_y = \frac{2k\lambda}{y} \sin\theta$ عندما $a = b = L/2$.

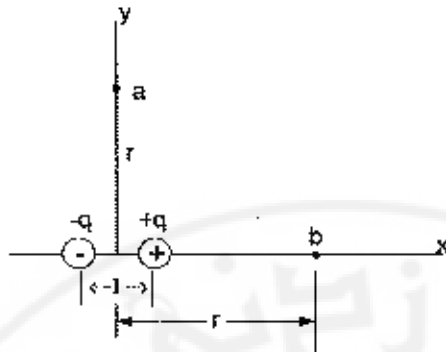
13- ثنائي أقطاب مولف من الشحنة q موجودة عند النقطة $x = a$ والشحنة $-q$ عند النقطة $x = -a$ من المحور x ، والمطلوب:

a- ما هي جهة الحقل الكهربائي عند نقاط المحور y ؟

b- أوجد صيغة تعطي قيمة الحقل الكهربائي عند نقاط المحور y وأثبت أنه من

أجل نقاط بعيدة يُعطى الحقل الكهربائي على المحور y بالعلاقة $E_y = -kp/y^3$ حيث $p = 2aq$.

14- يتألف ثنائي أقطاب كهربائي من زوجين من الشحنات الكهربائية لهما نفس المقدار وإشارتهما مختلفتان كما في الشكل، والمطلوب:



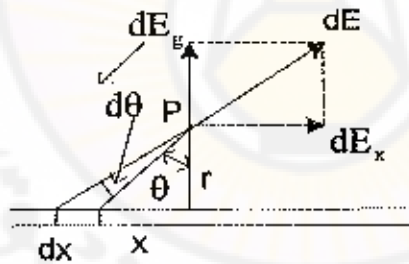
a- برهن على أن شدة الحقل الذي يولده ثنائي الأقطاب في النقطة a هي موازية

إلى محور السينات وتبلغ تقريباً: $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q.l}{r^3}$ عندما $r \gg l$.

b- برهن على أن شدة الحقل في b هي أيضاً موازية لمحور السينات وتبلغ تقريباً

عندما $r \gg l$ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q.l}{r^3}$.

15- شحن سلك مستقيم غير منته في الطول بشحنة موجبة منتظمة قدرها λ في وحدة الطول، والمطلوب:



a- ما هي الشحنة dq في عنصر منه طوله da في الشكل .

b- ما هي شدة الحقل dE الذي تولده هذه الشحنة في النقطة P

c- بين بالمكاملة أن مقدار شدة الحقل الحاصل من كامل السلك في النقطة P

هو: $E = \lambda / 2\pi\epsilon_0 r$.

16- قرص نصف قطره 6 cm يحمل شحنة ذات كثافة سطحية منتظمة قدرها $30 \mu\text{C}/\text{m}^2$. أوجد الحقل الكهربائي على محور القرص عند النقاط 0.1 cm ، 0.02 cm ، 500 cm ، 0.03 cm ، cm .

17- طبقة كروية نصف قطرها 10 cm تحمل شحنة كلية قدرها $2 \mu\text{C}$ موزعة بانتظام على سطحها. أوجد الحقل الكهربائي في النقاط التي تبعد المسافات التالية عن مركز الطبقة، 5 cm ، 9.99 cm ، 10.01 cm ، 20 cm ، 40 cm .

18- احسب النسبة $\frac{e}{m}$ للبروتون وأوجد تسارعه ضمن حقل كهربائي منتظم قيمته 100 N/C ، ثم أوجد الزمن اللازم لتسريع بروتون ساكن من الصفر حتى السرعة 0.01 .
19- احسب قيمة واتجاه الحقل الكهربائي اللازم لموازنة كل من: الكترون ، بروتون ، قطرة زيت كتلتها 0.2 mg تحمل شحنة قدرها $10 e$ ، كرة طاولة وزنها 25 g تحمل شحنة قدرها $0.01 \mu\text{C}$.

20- يُغذف الكترون سرعته الابتدائية $3 \times 10^6 \text{ m/s}$ إلى الأعلى بزاوية تصنع 30° مع الأفق ضمن حقل كهربائي شاقولي متجه نحو الأسفل شدته 10^5 N/C ، والمطلوب:

a- ما هي أعلى نقطة يصل إليها الالكترون؟

b- ما هو الزمن اللازم لوصوله إلى تلك النقطة؟

c- ما هي المسافة الأفقية التي يقطعها الالكترون.

21- وضع ثنائي أقطاب عزمه 0.5 e.nm ضمن حقل كهربائي منتظم شدته $4 \times 10^4 \text{ N/C}$ ما هي قيمة العزم المطبق على ثنائي الأقطاب عندما:

a- يكون موازياً للحقل الكهربائي.

b- عمودياً على الحقل الكهربائي.

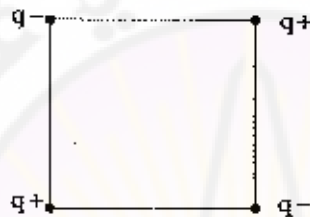
c- يصنع زاوية 30° مع الحقل الكهربائي.

22- وضعت أربع شحنات متساوية بالقيمة المطلقة عند رؤوس مربع طول ضلعه L كما في الشكل المجاور. والمطلوب:

a- أوجد قيمة القوة واتجاهها التي تؤثر بها الشحنات الثلاث على الشحنة الموجودة في الزاوية السفلية اليسرى من المربع.

b- أثبت أن الحقل الكهربائي عند منتصف أحد أضلاع المربع متجه نحو الشحنة

$$\text{السالبة وقيمته تعطى بالعلاقة: } E = k \frac{8q}{L^2} \left(1 - \frac{\sqrt{5}}{25}\right).$$

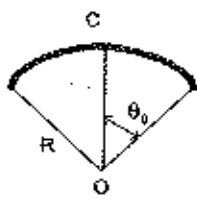


23- أوجد مقدار كل من الشحنتين q_1 و q_2 إذا كان مجموعهما $\left(\frac{1}{4}\right)$ وتدفع إحداها الأخرى بقوة قدرها 8 mN إذا وضعنا على مسافة 3 m من بعضهما بعضاً.

24- وزعت شحنات بكثافة خطية قدرها λ على أضلاع مربع موجود في المستوى oxy طول ضلعه L ويقع مركزه في مبدأ الإحداثيات، والمطلوب:

a- أوجد الحقل الكهربائي في نقطة تقع على المحور x .
b- قارن نتيجتك مع الحقل الناتج من قرص مشحون له القياس نفسه تقريباً ويحمل الشحنة نفسها.

25- خط نصف لانهائي يحمل شحنة منتظمة بكثافة لواءة الطول λ وفق المحور x من $x = 0$ وحتى $x = \infty$ أوجد كلاً من E_x و E_y عند نقطة من المحور y .



26- سلك رفيع يحمل شحنة منتظمة بكثافة خطية λ . حني

على شكل قوس دائري زاويته المركزية $2\theta_0$ كما في الشكل

المجاور أثبت أن الحقل الكهربائي عند مركز القوس يساوي

$$E = \frac{2k\lambda \sin \theta_0}{R}$$

27- كرتان صغيرتان مشحونتان كتلة كل منهما 10 g متعلقتان من النقطة نفسها

بخطين طول كل منهما 50 cm. أوجد الزاوية التي يصنعها أحد الخطين مع الشاقول إذا

كانت شحنة كل منها $2\mu\text{C}$.

28- حيط غير ناقل على شكل دائرة تقع في المستوي xy ويقع مركزها عند المبدأ

يحمل شحنة غير منتظمة تعطى كثافتها بالعلاقة $\lambda = \lambda_0 \sin \theta$ حيث θ تقاس ابتداءً من

الاتجاه الموجب للمحور x، أوجد الحقل الكهربائي عند المركز.



الفصل الثالث
قانون
غـاـوـس
Gauss's Law



في هذا الفصل، سوف نستخدم فكرة خطوط الحقل الكهربائي لتوصل إلى علاقة رياضية، تدعى بقانون غوص. ثم نوضح كيفية استخدام هذا القانون في إيجاد الحقل الكهربائي في أمثلة تتمتع بدرجة عالية من التناظر مثل الأسطوانة والكرة المشحونة بانتظام. وسنرى أنّ استخدام قانون غوص في مثل هذه الحالات، لحساب الحقل الكهربائي، أسهل بكثير من حسابه إنطلاقاً من قانون كولون. من أجل ذلك، علينا أن نبدأ بتعريف التدفق الكهربائي و قوانينه.

3-1 التدفق الكهربائي Electric Flux:

إنّ تدفق خطوط الحقل الكهربائي هو بالتعريف عدد خطوط هذا الحقل التي تعبر سطحاً ما. فإذا كان لدينا حقلاً كهربائياً $\vec{E}$ منتظم القيمة والاتجاه. و سطحاً A شعاع الواحدة للناظم عليه هو $\vec{n}$ ، نعرّف التدفق الكهربائي Φ من خلال السطح A المعامد للحقل الكهربائي E بإهداء الحقل بمساحة السطح أي:

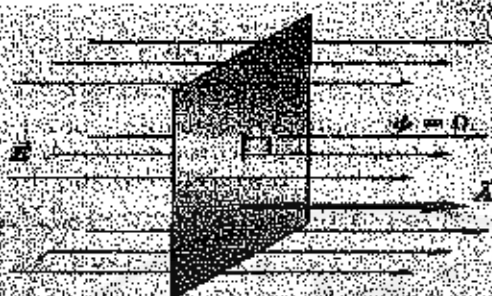
$$\Phi_E = E.A \quad (1)$$

يوضح الشكل (1-3-a) الحالة الأولى التي يكون فيها السطح معامداً للحقل، أي أنّ شعاع الحقل $\vec{E}$ يوازي شعاع الواحدة $\vec{n}$ والزوايا بينهما معدومة $\Phi = 0$ ، $(\Phi = 0, \vec{n} // \vec{E})$ ، ويقاس التدفق بـ نيوتن متر مربع على كولون $\frac{N.m^2}{C}$. وعندما

يصنع شعاع الواحدة $\vec{n}$ زاوية Φ مع شعاع الحقل $\vec{E}$ الشكل

(1-3-b) فإن قيمة التدفق تعطى بالعلاقة:

$$\Phi_E = E.A.\cos\Phi \quad (2)$$



(a) Surface face-on to electric field
 E and A parallel

angle between E and A is $\phi = 0$

$$\text{flux } \Phi_E = E \cdot A = EA$$

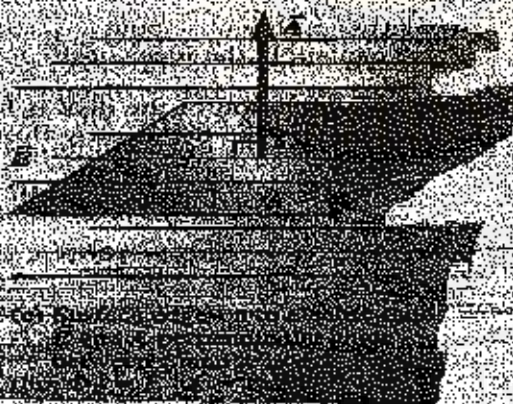


(b) Surface tilted from face-on orientation

by an angle ϕ

angle between E and A is ϕ

$$\text{flux } \Phi_E = E \cdot A = EA \cos \phi$$



الشكل (1-3)

وفي الحالة الخاصة: عندما يكون شعاع الواحدة معامداً لشعاع الحقل، كما هو

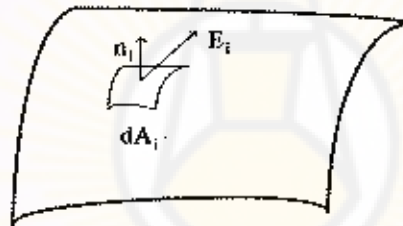
مبين في الشكل (3-1)، $(\vec{E} \perp \vec{n})$ ، فإن قيمة التدفق تكون معدومة.

ويمكن كتابة عبارة التدفق في المعادلتين 1 و 2 بعلاقة واحدة على الشكل:

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{A} = \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot A \quad (3)$$

3 2 تعميم التدفق الكهربائي General definition of electric flux

نستطيع تعميم تعريف التدفق الكهربائي، إلى حالة السطح المنحني، حيث يتغير على هذا السطح الحقل الكهربائي قيمةً وجهةً، وذلك بتقسيم السطح إلى عدد كبير من العناصر السطحية الصغيرة، فإذا كانت هذه العناصر صغيرة لدرجة كافية، يمكن عسدها مستوية، وبذلك نحمل تغيرات الحقل الكهربائي عليها. فإذا كان $\vec{n}_i$ هو شعاع الواحدة المعامد لذلك السطح العنصري وكانت dA_i مساحته كما هو مبين في الشكل (3-2).



الشكل (3-2)

عندها يكون تدفق الحقل الكهربائي من خلال هذا السطح العنصري مساوياً:

$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{n}_i \cdot dA_i \quad (4)$$

ويكون قيمة التدفق الكهربائي على كامل السطح مساوياً:

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot \vec{n}_i \cdot dA_i = \int E \cdot \cos \theta \cdot dA_i$$

في معظم الأحيان، نتم بتدفق الحقل الكهربائي من خلال سطح مغلق، وهو سطح يقسم الفضاء إلى مجالين أحدهما داخل السطح والثاني خارج السطح. ونعرف

شعاع الواحدة للناظم على السطح المغلق في كل نقطة من نقاط السطح. فعند النقطة التي يكون فيها الحقل متجهاً نحو خارج السطح. يكون الجداء $\vec{E} \cdot \vec{n}$ موجباً، أما عند النقطة التي يكون فيها الحقل متجهاً نحو داخل السطح يكون الجداء $\vec{E} \cdot \vec{n}$ سالباً. ويكون التدفق الكلي Φ_E موجباً أو سالباً حسب جهة الحقل الكهربائي.

مثال (3 - 1):

قرص دائري نصف قطره $\vec{n}, 10 \text{ cm}$ شعاع الواحدة للناظم على سطح القرص، وضع القرص في حقل كهربائي شدته $2 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ بحيث يصنع شعاع الحقل زاوية قدرها 30° مع الناظم على السطح والمطلوب:

a- احسب قيمة التدفق الكهربائي من خلال القرص.

b- ما هي قيمة التدفق عندما ندير القرص ويصبح الحقل عمودياً على الناظم $\vec{E}$

c- ماذا تصبح قيمة التدفق عندما يكون الحقل موازياً للناظم $\vec{n} \parallel \vec{E}$.

الحل:

$$a - \Phi_E = E.A.\cos\theta = 2 \times 10^3 \times \pi \times (0.1)^2 \times \cos 30 = 54 \text{ N.m}^2/\text{C}$$

لأن $\theta = \frac{\pi}{2}$ وبالتالي $\cos\theta = 0$

$$b - \Phi_E = 0$$

$$c - \Phi_E = E.A = 2 \times 10^3 \times \pi \times (0.1)^2 = 63 \frac{\text{N.m}^2}{\text{C}} \quad \cos\theta = 1 \text{ وبالتالي } \theta = 0$$

مثال (3 - 2):

شحنة نقطية موجبة قيمتها $q = 3 \mu\text{C}$ وضعت في مركز كرة نصف قطرها $R = 0.2 \text{ m}$ أوجد تدفق الحقل الكهربائي الناتج عن الشحنة النقطية، من خلال سطح الكرة.

الحل:

إن الحقل الكهربائي $\vec{E}$ يكون ناظماً على سطح الكرة، جهته نحو الخارج وقيمه

تساوي:

$$E = k \cdot \frac{q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6}}{(0,2)^2} = 6,75 \times 10^5 \text{ N/c}$$

وبما أن $\vec{n} // \vec{E}$ فإن قيمة التدفق تعطى بالعلاقة:

$$\Phi_E = E \cdot A = 6,75 \times 10^5 \times 4\pi(0,2)^2 = 3,4 \times 10^5 \frac{\text{N.m}^2}{\text{c}}$$

3 - 3 قانون غوس Gauss's Law :

إن قانون غوس، هو صيغة رياضية تستخدم لإيجاد الحقول المتولدة عن شحنات كهربائية، وتستند هذه الصيغة على فكرة خطوط الحقل الكهربائي. ويمكن بواسطة هذا القانون دراسة الحقول في الحالات التي لا تشمل على تناظر كروي وفي الحالات المعقدة. ينص قانون غوس على أن التدفق الكلي عبر سطح مغلق يساوي الشحنة الكلية التي يحصرها هذا السطح مقسوماً على ϵ_0 ، حيث ϵ_0 هي سماحية الوسط أو الفضاء الحر المعروفة سابقاً. $\epsilon_0 = 8,8 \times 10^{-12} \text{ c}^2 / \text{N.m}^2$

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = \oint E \cdot \cos \theta \cdot dA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} \quad (6)$$

نسمي السطح المغلق الذي يحيط بالشحنة الكلية Q_{enc} بـ سطح غوس، وهو سطح وهمي نختاره بشكل يناسب المسألة ويمكن حساب سطحه بسهولة. سوف نستخدم قانون غوس، من أجل حساب قيمة الحقل الكهربائي E ، عندما يكون للمسألة تناظر واضح، بشكل يُعرف منه اتجاه الحقل E في كل مكان وكذلك قيمة الحقل ثابتة على سطح بسيط.

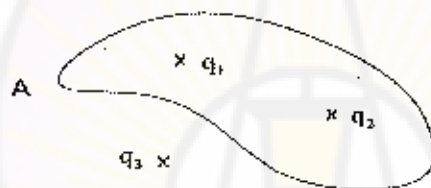
يمكن البرهان على قانون غوس، وبشكل مبسط، اعتماداً على المثال (3 - 2) المذكور سابقاً، وجدنا في هذا المثال أن التدفق الناتج عن شحنة نقطية Q من خلال سطح كروي نصف قطره R مساوياً:

$$\Phi_E = E.A = k \cdot \frac{q}{R^2} \cdot 4\pi R^2 = 4\pi k \cdot q = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (7)$$

تدل هذه العلاقة (7)، أن قيمة التدفق (عدد خطوط الحقل التي تعبر سطح الكرة)، لا تتعلق بنصف قطر الكرة، ولا بمكان الشحنة داخل السطح الكروي، ولا بشكل السطح المحيط بالشحنة. بل تتعلق فقط بالشحنة الكهربائية q .

أي أن العلاقة 7 محقة مهما كان شكل السطح المغلق المحيط بالشحنة q وبالتالي يكون التدفق من خلال سطح مغلق يحيط بشحنة نقطية قدرها q مساوياً $\frac{q}{\epsilon_0}$.

نستطيع تعميم هذه النتيجة على جمل تحوي أكثر من شحنة نقطية واحدة. يبين الشكل (3 - 3) سطحاً A يحيط بشحنتين نقطيتين q_1, q_2 وشحنة نقطية q_3 تقع خارج السطح.



الشكل (3 - 3)

بما أن الحقل الكهربائي عند أي نقطة من نقاط السطح يساوي المجموع الشعاعي للحقول الثلاثة الناتجة من الشحنات q_1, q_2, q_3 . فيكون التدفق الكلي $\oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA$ من خلال السطح A مساوياً بمجموع التدفقات الناتجة عن كل شحنة منفردة. إن التدفق الناتج عن الشحنة q_3 من خلال السطح A معدوم لأن جميع خطوط الحقل الصادرة عنها والتي تدخل من نقطة عن السطح A تخرج من نقطة أخرى. ويكون التدفق الناتج عن الشحنة q_1 مساوياً $4\pi k q_1$ والتدفق الناتج عن q_2 مساوياً $4\pi k q_2$ والتدفق الكلي من خلال السطح يساوي $4\pi k (q_1 + q_2)$.

وقد يكون هذا التدفق موجباً أو سالباً أو معدوماً حسب قيمة كل من q_1 و q_2 وإشارة كل منهما .

وبصورة عامة، في حالة جملة من الشحنات يكون التدفق الكلي من خلال أي سطح مغلق مساوياً $4\pi k$ مضروباً بالشحنة الصافية الموجودة ضمن هذا السطح أو قيمة الشحنة الكلية التي يحصرها هذا السطح مقسوماً على ϵ_0 .

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = 4\pi k \cdot Q_{\text{encl}} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$

يمكننا استنتاج قانون غوص أيضاً من قانون كولون بصورة رياضية، مستخدمين تعريف الزاوية المحسمة دون الحاجة إلى خطوط الحقل، ولكن نكتفي بالبرهان السابق المبسط .

3-4 تطبيقات على قانون غوص : Application of Gauss's Law

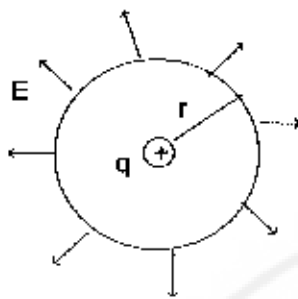
إن قانون غوص يقدم لنا طريقة سهلة جداً لحساب الحقول الكهربائية، وذلك دون اللجوء إلى طريقة الجمع الشعاعية التي تتطلب معرفة توزيع الشحنات الكهربائية والتي تقودنا غالباً إلى تكاملات معقدة . وهذا القانون يسمح بحساب الحقل الناتج عن شحنات كهربائية واقعة داخل السطح المغلق المختار ، وذلك لأن التدفق الناتج عن شحنات واقعة خارج السطح من خلال السطح المغلق المختار يساوي الصفر . من أجل استخدام قانون غوص . لحساب الحقل الكهربائي الناتج عن شحنات كهربائية في مكان ما، تتبع الخطوات التالية:

a- نختار سطحاً وهمياً مغلقاً، يدعى بـ سطح غوص، ماراً من النقطة المراد حساب الحقل عندها.

b- يجب أن تقع الشحنات الكهربائية داخل سطح غوص.

c- نختار سطح غوص الوهمي المغلق، شكلاً هندسياً متناسظاً لنتمكن من حساب مساحة سطحه بسهولة عند تطبيق قانون غوص.

مثال (3-3) حقل متولد عن شحنة نقطية:



أوجد الحقل الكهربائي الناشئ عن شحنة

نقطية موجبة q في نقطة P تبعد عنها مسافة r باستخدام نظرية غوص.

نرسم أو نتخيل سطحاً كروياً محيطاً بهذه الشحنة،

نصف قطره r ومركزه الشحنة q ، ثم نطبق قانون

غوص على هذا السطح الوهمي المغلق.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = E \oint dA = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$

وبسبب تناظر الجملة، يكون الحقل الكهربائي E ، عند أي نقطة من السطح،

ثابتاً وموجهاً من الداخل إلى الخارج بصورة عمودية على السطح، ويكون $\vec{E} \parallel \vec{n}$ ،

أي أن $\theta = 0$ ومنه $\cos \theta = 1$ ، أينما وجد dA على سطح الكرة. وبما أن $\oint dA$ هو

سطح الكرة الكلي ويساوي $4\pi r^2$ ، والشحنة الموجودة داخل هذا السطح ما هي إلا q

فإن قانون غوص يعطي:

$$\Phi_E = E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

ومنه:

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} = k \cdot \frac{q}{r^2}$$

وهذه هي النتيجة التي حصلنا عليها سابقاً حسب تعريف الحقل وقانون كولون.

مثال (3-4) حقل متولد عن توزيع خطي للشحنة: Field of a line charge

شحنة كهربائية موجبة $+Q$ موزعة بانتظام وبكثافة خطية λ على سلك لا نهائي، أوجد الحقل الكهربائي في نقطة تبعد r عن هذا السلك، باستخدام نظرية غوص.



الشكل (3-4)

من أجل ذلك، نتصور سطحاً أسطوانياً مغلقاً، يحيط بجزء طوله L من السلك المشحون. ومحوره هو السلك نفسه ونصف قطره r . كما هو مبين بالشكل (3-4). إن الحقل الكهربائي $\vec{E}$ معامد لجميع نقاط السطح الجانبي لهذه الأسطوانة وقيمته واحدة وثابتة في جميع نقاطها، ولكنه مواز لقاعدتي الأسطوانة، ويكون التدفق الكلي للحقل مساوياً

$$\phi_E = \phi_{E_1} + \phi_{E_2}$$

حيث ϕ_{E_1} التدفق من خلال قاعدتي الأسطوانة.

ϕ_{E_2} التدفق من خلال السطح الجانبي للأسطوانة.

إن التدفق من خلال قاعدتي الأسطوانة معدوماً لأن $\vec{E} \perp \vec{n}$ أي $\theta = \frac{\pi}{2}$

وبالتالي $\cos \theta = 0$ ، ويبقى التدفق من خلال سطح الأسطوانة الجانبي. إن الشحنة الكلية

ضمن هذا السطح هي $\lambda \cdot L$ ، وباستخدام قانون غوص

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = E \oint dA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda \cdot L}{\epsilon_0}$$

وبما أن السطح الجانبي للأسطوانة يساوي $2\pi r \cdot L$ فنجد:

$$E \cdot 2\pi r \cdot L = \frac{\lambda \cdot L}{\epsilon_0}$$

ومنه نجد الحقل:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r} = 2k \cdot \frac{\lambda}{r}$$

وهي نفس النتيجة التي وجدناها في المثال (2 - 4) في بحث الحقل الكهربائي.

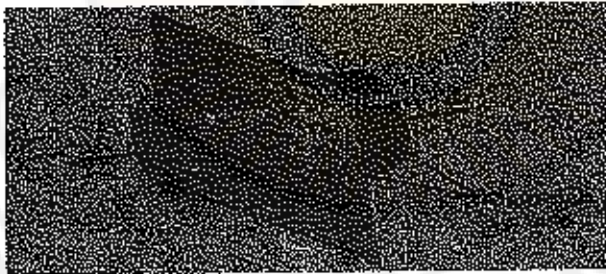
مثال (3 - 5) حقل متولد عن توزيع مستوي غير محدود للشحنة:

Field of infinite plane sheet of charge

احسب شدة الحقل الكهربائي الناتج عن مستوي لا نهائي ناقل ومشحون بشحنة موجبة موزعة بانتظام وبكثافة سطحية قدرها σ وذلك باستخدام قانون غاوس.

في هذه الحالة، إن الحقل الكهربائي معامد للمستوي. لذلك نختار مسطح غاوس على شكل أسطوانة، يكون محورها عمودياً على سطح المستوي، كما هو موضح بالشكل (3 - 5).

وتتشارك مع المستوي بمساحة قاعدتها A . ويكون التدفق الكلي من سطح غاوس مساوياً:



الشكل (3 - 5)

$$\phi_E = \phi_{E_1} + \phi_{E_2}$$

حيث ϕ_{E_1} التدفق من خلال قاعدة الأسطوانة. ϕ_{E_2} التدفق من خلال السطح الجانبي للأسطوانة.

في هذه الحالة، لا يوجد تدفق من السطح الجانبي للأسطوانة، لأن الحقل يوازي السطح الجانبي أو $\vec{E} \perp \vec{n}$ فيكون $\cos\theta = 0$ ، ويكون التدفق من خلال كل سطح من سطحي القاعدتين مساوياً $E.A$ والتدفق الكلي يساوي $2E.A$ ، وباستخدام قانون غوص نجد:

$$\Phi_E = 2E.A = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma.A}{\epsilon_0}$$

ومنه نجد:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 2k\pi.\sigma$$

وهذا يتطابق أيضاً ما توصلنا إليه في المثال (2 - 6) في بحث الحقل الكهربائي.

مثال (3 - 6) حقل متولد من طبقة كروية مشحونة:

Field of charged conducting sphere

كرة نصف قطرها R ومركزها O ، مشحونة بشحنة كهربائية موزعة q موزعة على سطحها بانتظام. أوجد الحقل الكهربائي الناتج عن هذه الشحنة بتطبيق نظرية غوص. نختار سطح غوص على شكل كرة نصف قطرها r متراكزة مع الطبقة الكروية المشحونة. إن الحقل الكهربائي يعامد هذا السطح وهو ثابت القيمة في جميع نقاطه، بسبب التناظر ولا يتعلق بقيمة r أصغر أو أكبر من R ، ويكون $\vec{E} \parallel \vec{n}$ ، وهنا نميز ثلاث حالات:

a- الحالة الأولى: النقاط الواقعة خارج الطبقة الكروية $r > R$

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = E \oint dA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$$

$$E \cdot 4\pi \cdot r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}$$

ومنه نجد، قيمة الحقل:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} = k \cdot \frac{q}{r^2}$$

وهذه هي نفس القيمة التي نحصل عليها فيما لو كانت q متمركزة في مركز الكرة.

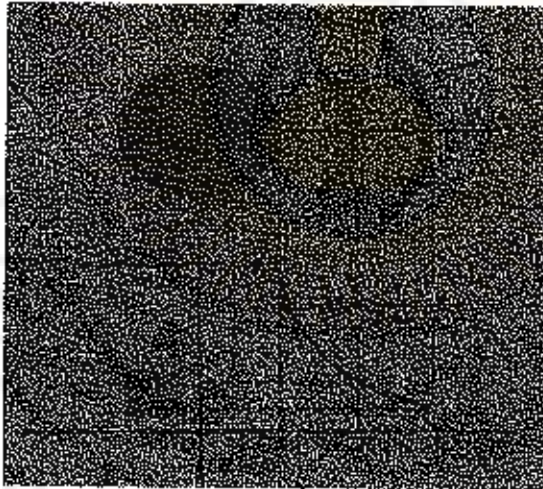
b- الحالة الثانية: الحقل على سطح الكرة $r = R$

نعوض هنا قيمة R بـ r بالعلاقة الأخيرة وتكون قيمة الحقل تساوي:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R^2} = k \cdot \frac{q}{R^2}$$

c- الحالة الثالثة: الحقل ضمن الكرة: $r < R$

من أجل النقاط الواقعة ضمن الطبقة الكروية المشحونة، فلا يوجد شحنات ضمن سطح غوص وبالتالي فالتدفق معدوم، وهذا يعني أن الحقل الكهربائي معدوم $E = 0$ ، وهذا صحيح حتى لو كانت النقطة واقعة في مركز الكرة. يوضح الشكل (3-6) تغيرات الحقل الكهربائي بدلالة r .



الشكل (3-6)

مثال (3-7) حقل متولد عن كرة مشحونة بانتظام:

Field of uniformly charged sphere

شحنة كهربائية موزعة بانتظام وبكثافة حجمية ρ ، على كرة عازلة نصف قطرها R . أوجد قيمة الحقل الكهربائي في نقطة p تبعد مسافة r عن مركزها، وذلك باستخدام نظرية غوص.

إن هذه الحالة مشابهة للمثال السابق (3 - 6). والحقل الكهربائي $\vec{E}$ يكون محمولاً على نصف قطره الكرة مهما كان وضع النقطة p داخل أو خارج الكرة، وهو ثابت القيمة على كل سطح كروي متمركز مع الكرة المشحونة، وذلك بسبب التناظر. وهنا نميز أيضاً ثلاثة حالات:

a- الحالة الأولى: النقاط الواقعة خارج الكرة $r > R$:

نأخذ سطح غوص على شكل كرة نصف قطرها r ومتمركزة مع الكرة المشحونة

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = E \oint dA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$$
 ونطبق قانون غوص

إن $\vec{E} \parallel \vec{n}$ ومساحة سطح غوص هي $4\pi r^2$ والشحنة داخل سطح غوص هي Q

$$E \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

ومنه نجد قيمة الحقل في النقاط الواقعة خارج الكرة: $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} = K \cdot \frac{Q}{r^2}$

أي أن قيمة الحقل في نقطة واقعة خارج التوزيع الحجمي الكروي للشحنات، هي نفسها كما لو كانت الشحنة Q متجمعة بكاملها في مركز الكرة المشحونة.

b- الحالة الثانية: النقاط الواقعة داخل الكرة $r < R$

بنفس الطريقة، نأخذ سطح غوص على شكل كرة نصف قطرها r ومتمركزة مع

الكرة المشحونة. كما هو مبين بالشكل (3 - 7) ونطبق قانون غوص:

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dA = E \oint dA = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$$

$$\rho = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

إن الكثافة الحجمية ρ تعطى بالعلاقة:

والشحنة Q_{encl} تمثل الشحنة الكهربائية ضمن سطح غوص وهمي والذي حجمه

$$V_{\text{encl}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{تكون قيمة هذه الشحنة تساوي:}$$

$$Q_{\text{encl}} = \rho \cdot V_{\text{encl}} = \frac{Q}{\frac{4}{3} \pi R^3} \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 = Q \cdot \frac{r^3}{R^3}$$

$$E \cdot 4 \pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \cdot \frac{r^3}{R^3} \quad \text{نعوض } Q_{\text{encl}} \text{ بقانون غوص نجد:}$$

$$E = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot r}{R^3} = k \cdot \frac{Q \cdot r}{R^3} \quad \text{أو}$$

نلاحظ أن قيمة الحقل الكهربائي تتناسب طردياً مع المسافة r . فمن أجل $r = 0$ أي

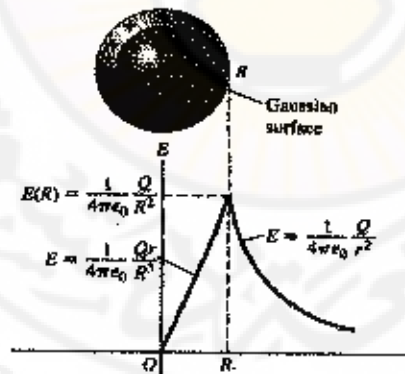
في مركز الكرة، نجد $E = 0$

c- الحالة الثالثة: النقاط الواقعة على سطح الكرة $r = R$

نعوض بالعلاقة الأخيرة ، نجد قيمة الحقل على سطح الكرة تساوي:

$$E(R) = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R^2} = k \cdot \frac{Q}{R^2}$$

يبين الشكل (3-7) تغيرات الحقل الكهربائي بدلالة المسافة r .



الشكل (3-7)

يعطي الجدول التالي، قيم الحقول الكهربائية الناشئة عن توزيعات منتظمة للشحنات الكهربائية.

توزيع الشحنة	الحقل الكهربائي في النقطة	قيمة الحقل الكهربائي
شحنة نقطية وحيدة Q	تبعد r عن Q	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$
شحنة Q موزعة على سطح كروي ناقل نصف قطره R	خارج الكرة $r > R$ داخل الكرة $r < R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$ $E = 0$
شحنة كهربائية موزعة على سلك لا نهائي يتوزع خطياً λ	تبعد مسافة r عن السلك	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r}$
شحنة كهربائية موزعة على أسطوانة ناقلة لا نهائية، نصف قطرها R ، بكثافة خطية λ	خارج الأسطوانة $r > R$ داخل الأسطوانة $r < R$	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\lambda}{r}$ $E = 0$
شحنة كهربائية Q موزعة بانتظام على كرة نصف قطرها R وبكثافة حجمية ρ	خارج الكرة $r > R$ داخل الكرة $r < R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot r}{R^3}$
شحنة كهربائية موزعة على مستوى لا نهائي وبكثافة سطحية σ	في أي نقطة	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$



مسائل

- 1- لدينا الحقل الكهربائي المنتظم $\vec{E} = 2\text{ kN/C}$. والمطلوب:
 - a- ما هو تدفق هذا الحقل من خلال مربع طول ضلعه 10 cm موجود في المستوى yz ؟
 - b- ما هو تدفق هذا الحقل من المربع نفسه إذا كان الناظم عليه يصنع زاوية 30° مع المحور x ؟
- 2- ما هو التدفق الكلي للحقل المنتظم في التمرين (1) من خلال مكعب طول ضلعه 10 cm وجووه توازي المستويات الإحداثية الديكارتية؟
- 3- شحنة نقطية قدرها $2\mu\text{C}$ موجودة في مركز كرة نصف قطرها 0.5 m . والمطلوب:
 - a- أوجد سطح هذه الكرة وقيمة الحقل الكهربائي عند نقاط سطحها وتدفق الحقل الكهربائي من خلال سطحها.
 - b- ما هو التدفق من خلال مكعب طول ضلعه 1 m يحيط بكرة؟
- 4- أعطى القياس الدقيق للحقل الكهربائي بجوار سطح صندوق أسود إلى تدفق من خلال سطح هذا الصندوق قدره $6.0\text{ k Nm}^2/\text{C}$. ما هي قيمة الشحنة الكهربائية الموجودة ضمن الصندوق؟
- 5- كرة نصف قطرها R تحمل شحنة موزعة بانتظام بكثافة حجمية قدرها ρ . استخدم نظرية غاوص وأوجد الحقل الكهربائي داخل هذه الكرة وخارجها.
- 6- طبقة أسطوانية رقيقة الجدران نصف قطرها R ، ذات طول لا نهائي وكثافة شحنتها السطحية σ . أوجد قيمة الحقل الكهربائي داخل الأسطوانة وخارجها .
- 7- قطعة معدنية نحاسية وزنها 3 g على شكل قطعة نقود وضعت ضمن حقل كهربائي خارجي شدته 1 k N/C معامد لسطح وجهيها . أوجد كثافة الشحنتات السطحية على كل وجه وما هي الشحنة الكلية على أحد الوجوه إذا كان نصف قطره 1 cm ؟
- 8- طبقة كروية غير ناقلة نصف قطرها الخارجي 15 cm وتحمل شحنة صافية قدرها $2\mu\text{C}$ موزعة على سطحها، والمطلوب:

a- ما هي كثافة الشحنات السطحية σ ؟ b- ما هي قيمة الحقل خارج

الطبقة وداخلها؟ c- أزيل جزء من الطبقة تاركاً مكان ثقب صغير ما هي

قيمة الحقل خارج الطبقة فوق الثقب وداخلها؟

9- كرة عازلة نصف قطرها R تحمل شحنة حتمية بكثافة متناسبة مع البعد عن

مركزها أي $\rho = A \cdot r$ من أجل $r \leq R$ حيث A ثابت و $\rho = 0$ من أجل

$r > R$ ، والمطلوب: a- أوجد الشحنة الكلية لهذه الكرة. b- ثم أوجد

الحقل الكهربائي E_r داخل هذه الكرة وخارجها.

10- أعد المسألة (1) من أجل كثافة قدرها $\rho = \frac{B}{r}$ في حالة $r \leq R$ و $\rho = 0$ في حالة

$r > R$.

11- أسطوانة طويلة لا نهائية نصف قطرها R تحمل شحنة منتظمة كثافتها الحجمية ρ

أوجد الحقل الكهربائي داخل هذه الأسطوانة وخارجها.

12- طبقة كروية عازلة نصف قطرها الكبير r_2 والصغير r_1 تحمل شحنة بكثافة

منتظمة أوجد الحقل الكهربائي من أجل $r < r_1$ ، $r_1 < r < r_2$ ، $r > r_2$.

13- طبقة أسطوانية طويلة نصف قطرها الداخلي a والخارجي b وتحمل شحنة كثافتها

تساوي:

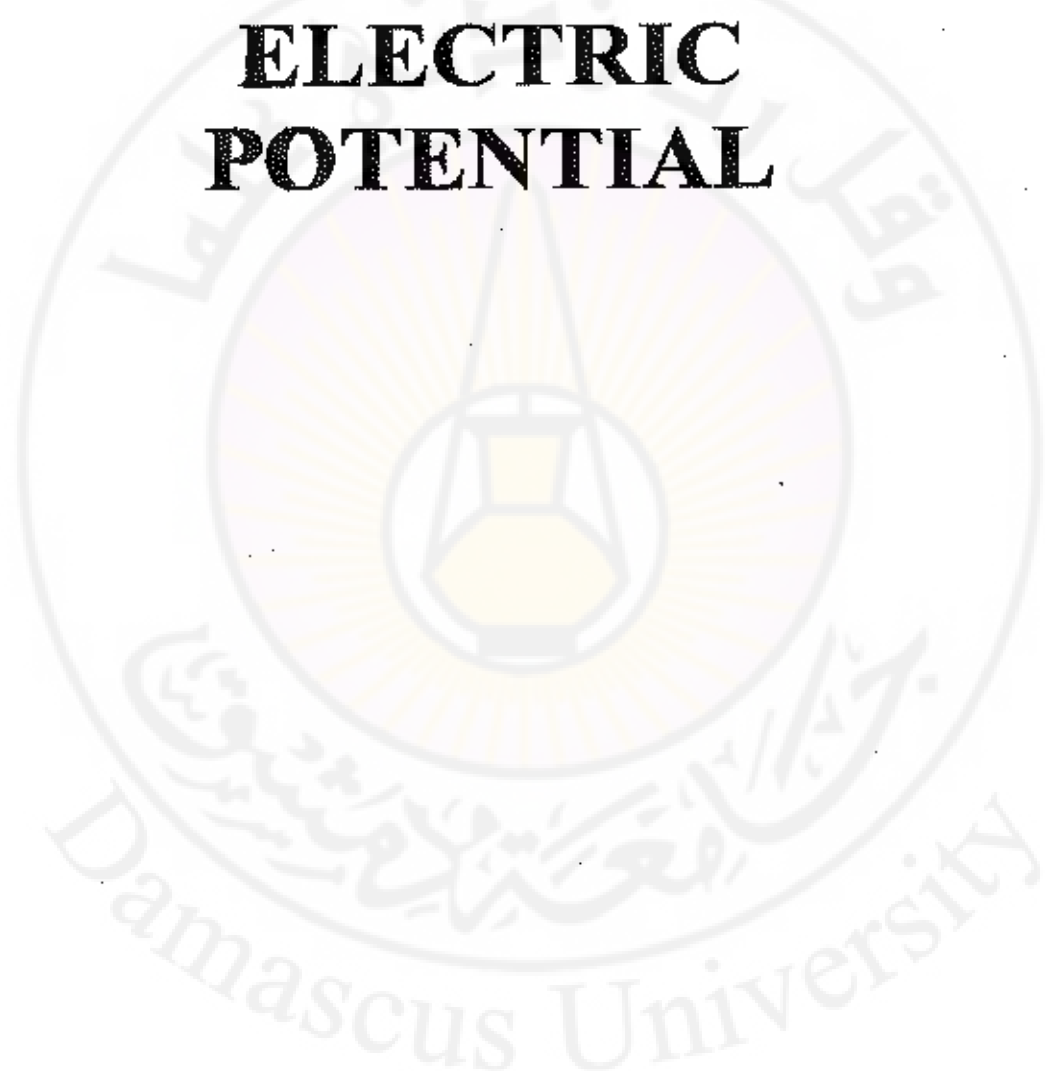
$$\rho = \begin{cases} 0 & r < a \\ \rho_0 & a < r < b \\ 0 & r > b \end{cases}$$

أوجد الحقل الكهربائي في كل مكان

الفصل الرابع

الكمون الكهربائي

ELECTRIC POTENTIAL





يلعب مفهوم العمل (Work)، الطاقة الكامنة (Potential energy) ومبدأ الحفاظ الطاقة (consummation of energy)، دوراً هاماً في دراسة الميكانيك. سنرى في هذا الفصل، أننا سوف نعتمد على هذه المفاهيم من أجل فهم وتحليل التفاعلات الكهربائية. وعلاقته بالطاقة الكامنة. ونصل من خلال ذلك إلى تعريف الكمون الكهربائي وكيفية حسابه في بعض الأمثلة.

4 - 1 الطاقة الكهربائية الكامنة في حقل كهربائي منتظم:

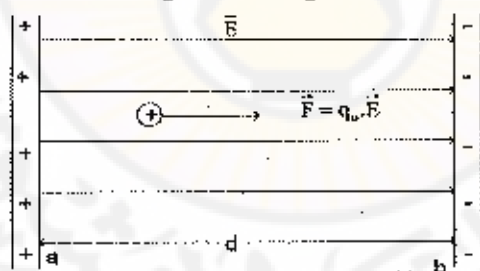
Electric Potential Energy in a uniform Field

إذا وضع جسم مشحون بشحنة كهربائية موجبة q_0 ضمن حقل كهربائي منتظم، فإنه سيخضع إلى قوة كهربائية تعطى بالعلاقة $\vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$ وهذه القوة ستقوم بعمل، لدى انتقال الشحنة مسافة قدره dL ، قيمته:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{L} = q_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (1)$$

ويكون العمل الكلي، من أجل انتقال الشحنة من النقطة a إلى النقطة b ، الشكل (4-1)، مساوياً:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{L} = \int_a^b q_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (2)$$



الشكل (4-1)

بما أن الحقل له قيمة ثابتة، وبفرض أن المسافة من a إلى b تساوي d فإن العمل يساوي:

$$W_{a \rightarrow b} = F \cdot d = q_0 \cdot E \cdot d$$

أما العلاقة بين العمل و الطاقة الكامنة، فهي أن العمل اللازم لنقل جسيم من نقطة a إلى نقطة b يساوي تغير الطاقة الكامنة u من a إلى b أي أن:

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = -(U_b - U_a) = -\Delta U \quad (3)$$

وإذا كان العمل غير تابع للطريق المسلك (المسار: path) من a إلى b فإنه يسمى عملاً محافظاً (consercutive) وتكون الطاقة الكامنة، في هذه الحالة، تابعة للموضع. وتسمى القوة أيضاً بالقوة المحافظة.

وحسب مبدأ انحفاظ الطاقة، ونظرية العمل والطاقة، فإن العمل السابق يمثل تغير الطاقيتين الحركيتين الأولى والأخيرة لهذا الجسيم، أي أن:

$$W_{a \rightarrow b} = U_a - U_b = k_b - k_a = \Delta k \quad (4)$$

حيث k_a, k_b الطاقة الحركية للجسيم عند النقطتين a ، b ، ويمكن كتابة العلاقة الأخيرة على الشكل المألوف:

$$k_a + U_a = k_b + U_b \quad (5)$$

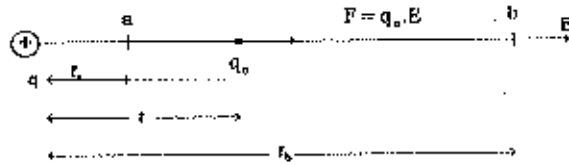
تدل العلاقة الأخيرة على مبدأ انحفاظ الطاقة، أي أن مجموع الطاقة الكامنة والحركية مضبان، فعندما تتسارع الشحنة الكهربائية q_0 ضمن الحقل $\vec{E}$ ، تزداد طاقتها الحركية وتنقص طاقتها الكامنة، وهذا يعني أن خطوط الحقل تتجه دوماً نحو تناقص الطاقة الكامنة.

2 - 4 الطاقة الكهربائية الكامنة لشحنتين نقطيتين :

Electric potential energy of two point charges

لنكن لدينا شحنة كهربائية موجبة +q وشحنة اختبارية موجبة q_0 تبعد عنها مسافة r الشكل (2 - 4). فإن القوة الكهربائية المطبقة على q_0 تعطى، حسب قانون كولون بالعلاقة:

$$F_r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} \quad (6)$$



الشكل (4-2)

ويكون العمل الذي تقوم به هذه القوة لإزاحة الشحنة q_0 من a إلى b هو:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_{r_a}^{r_b} F_r \cdot dr = \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} dr \quad (7)$$

وبمكاملة العلاقة الأخيرة نجد:

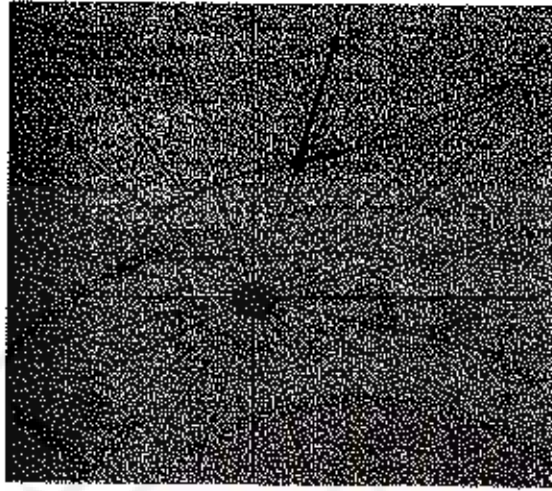
$$W_{a \rightarrow b} = \frac{q \cdot q_0}{4\pi \cdot \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad (8)$$

نلاحظ أن هذا العمل، يتعلق فقط بالنقطة النهائية والبدائية ولا يتعلق بالطريق المسلول بين النقطتين a و b .

في الحقيقة، إن قيمة العمل المبينة في العلاقة 8، تبقى ثابتة من أجل كافة المسارات، ولإثبات ذلك، نأخذ الحالة العامة التي تنتقل فيها الشحنة q_0 من a إلى b وفق مسارٍ منحني. كما هو مبين بالشكل (4 - 3) فيكون العمل معطى بالعلاقة:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_{r_a}^{r_b} F \cdot \cos \phi \cdot dL = \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} \cdot \cos \phi \cdot dL$$

نلاحظ من الشكل أن $\cos \phi \cdot dL = dr$ ، وبالتالي نعود إلى العلاقة 7 ومنها نحصل على نفس العلاقة 8 وعليه فإن العمل يتعلق فقط بالبُعدين الشعاعين r_a و r_b ولا يتعلق بالطريق المسلول للإنتقال بينهما، لذلك فإن القوة الكهربائية الناتجة من شحنة نقطية هي قوة محافظة.



الشكل (4) 3

وهكذا، فإن العلاقة 8 صحيحة من أجل كافة المسارات بين a و b ، وقيمة العمل لا تتعلق بالطريق المسلوك، فإذا، عادت الشحنة q_0 إلى نقطة البدء a ، وفق أي مسار ما، سيكون العمل الكلي مساوياً للصفر.

بمقارنة العلاقتين 3 و 8 نجد أن المقدار $\frac{q \cdot q_0}{4\pi \epsilon_0 \cdot r_a}$ يمثل الطاقة الكامنة U_a للشحنة

q_0 في النقطة a والمقدار $\frac{q \cdot q_0}{4\pi \epsilon_0 \cdot r_b}$ يمثل الطاقة الكامنة U_b للشحنة q_0 في النقطة b .

بناءً على ذلك، نعرف الطاقة الكامنة لشحنة اختبارية q_0 تبعد مسافة r عن شحنة كهربائية q بالعلاقة التالية:

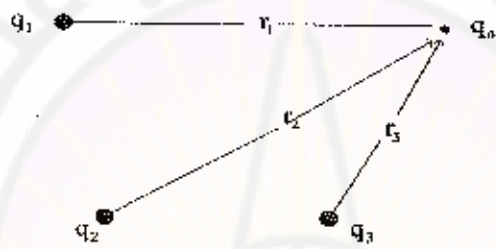
$$U = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r} \quad (9)$$

نعتبر أن البعد r في العلاقة (9) موجباً دوماً. وأن إشارة الطاقة الكامنة تتعلق بإشارتي q و q_0 فإذا كانتا كلتاهما موجبتين أو سالبتين، فإن جداءهما يكون موجباً وتكون u موجبة. وإذا كانت الشحنتان q و q_0 متعاكستين في الإشارة، فإن جداءهما سلبى وتكون الطاقة الكامنة u سلبية.

4 - 3 الطاقة الكهربائية الكامنة لعدة شحنات نقطية:

Electric potential energy with several point charges

لنفرض أن حقلاً كهربائياً $\vec{E}$ قد تولد من عدد من الشحنات الكهربائية النقطية الثابتة $q_1, q_2, q_3, \dots$ وأن r_1, r_2, r_3 هي أبعاد هذه الشحنات عن شحنة اختيارية q_0 الشكل (4 - 4). فكل شحنة من هذه الشحنات الثابتة تؤثر في الشحنة q_0 ، ويمكننا عندئذ أن نحسب أعمال كل من هذه القوى التي تحدث من أجل أي انتقال للشحنة الاختيارية q_0 . ولما كان عمل كل قوة يتعلق فقط بالنقطتين النهائيين، فإن العمل الكلي يتعلق كذلك بهاتين النقطتين فقط.



الشكل (4 - 4)

وتكون الطاقة الكامنة للشحنة q_0 في أي نقطة، هي المجموع الجبري لعدد من الحدود كالتالي في المعادلة (9) أي:

$$U = \frac{q \cdot q_0}{4\pi \cdot \epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) = \frac{q_0}{4\pi \cdot \epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (10)$$

عندما تكون q_0 بعيدة جداً لا نهائياً عن الشحنات q_i فإن $U = 0$ ، وإذا كانت الشحنات q_i موزعة على خطوط أو على سطوح أو على حجوم وبكثافة خطية أو سطحية أو حجمية منتظمة، فينبغي أن نبدل المجموع بالتكامل:

$$U = \frac{q_0}{4\pi \cdot \epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (11)$$

4 - 4 الكمون الكهربائي: Electric potential

ذكرنا سابقاً، عند دراسة الحقل الكهربائي، بأنه من المفيد استخدام الحقل

الكهربائي $\vec{E}$ ، بدلاً من القوة الكهربائية $\vec{F}$ ، والذي يمثل القوة المطبقة على وحدة الشحنة q_0 :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \text{أو} \quad \vec{F} = q_0 \cdot \vec{E}$$

بنفس الأسلوب، بدلاً من أخذ الطاقة الكهربائية الكامنة U للشحنة q_0 في نقطة ما من الحقل، فإن من الأسهل أخذ نسبة الطاقة الكامنة إلى الشحنة، أي الطاقة الكامنة في وحدة الشحنة، وتسمى هذه النسبة بالكمون الكهربائي واختصاراً بالكمون، وتعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{U}{q_0} \quad \text{أو} \quad U = q_0 \cdot V \quad (12)$$

إن الكمون هو مقدار سلمي، خلافاً لشدة الحقل التي هي مقدار شعاعي، ووحدة الكمون هي جول/ كولون وتسمى بالفولط، نسبةً للعالم الإيطالي فولتا

(1745 – 1827 – Alessandro Volta)

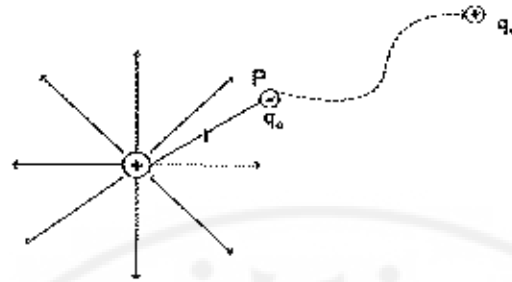
$$1 \text{ V} = 1 \text{ volt} = 1 \text{ J} / \text{C} = 1 \text{ joule} / \text{coulomb}$$

ذكرنا بالعلاقة (9)، الطاقة الكامنة لشحنة اختبارية q_0 ، فينتج من ذلك أن

الكمون لهذه الشحنة والناتج عن الشحنة q يعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r} = k \cdot \frac{q}{r} \quad (13)$$

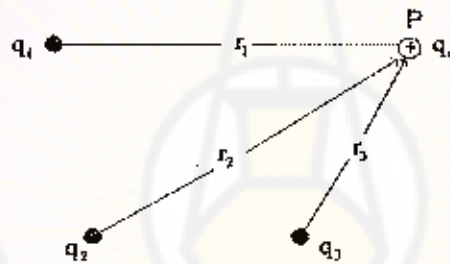
ويكون الكمون الكهربائي موجباً أو سالباً، وذلك تبعاً لنوع الشحنة الكهربائية q . فإذا جلبنا شحنة اختبارية موجبة q_0 من مسافة بعيدة جداً عن شحنة كهربائية موجبة q ، إلى النقطة P التي تبعد المسافة r عن q (الشكل 4 - 5) فإن العمل المبذول ضد القوة الكهربائية يساوي الزيادة في الطاقة الكامنة المعطاة بالعلاقة (12)، أي أن الكمون الكهربائي $V(r)$ هو العمل المبذول لجلب واحدة الشحنات من اللانهاية إلى المسافة r .



الشكل (4-5)

وفي حال عدد من الشحنات الكهربائية النقطية المنفصلة $q_1, q_2, q_3, \dots$ فإن الكمون الكهربائي عند الشحنة q_0 الواقعة عند النقطة P، والتي تبعد المسافات $r_1, r_2, r_3, \dots$ عن هذه الشحنات (الشكل 4-6)، يعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i} = k \cdot \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (14)$$



الشكل (4-6)

أما عندما يكون لدينا توزيع متصل للشحنات بكثافة خطية على منحني أو بكثافة سطحية على سطح أو بكثافة حجمية فإن الكمون يعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (15)$$

4-5 فرق الكمون: Potential difference

نستخدم عادة فرق الكمون بين نقطتين a و b لأن هذا الفرق يحدد التغير الطارئ على الطاقة الكامنة للشحنة عندما تنتقل من نقطة إلى أخرى. فإذا قسمنا العلاقة 3 على الشحنة الإختبارية q_0 نجد:

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = V_a - V_b \quad (16)$$

حيث $V_a = \frac{U_a}{q_0}$ يمثل الطاقة الكامنة لوحدة الشحنة عند النقطة a وكذلك

V_b ، اعتماداً على العلاقة (16)، نجد أن فرق الكمون $V_{ab} = V_a - V_b$ هو العمل

اللازم لتحريك واحدة الشحنات q_0 من النقطة a إلى النقطة b بقوة كهربائية .

يمكن أن نحصل أيضاً على علاقة فرق الكمون من العلاقة 7 التالية:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \mathbf{F}_r \cdot d\mathbf{r} = \int_a^b q_0 \cdot \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}$$

فإذا قسمنا هذه العلاقة على q_0 وقارنا الناتج مع العلاقة 16 نحصل على:

$$- \quad \leftarrow \quad (17)$$

ولما كان الكمون يقدر بالفولط، فإن فرق الكمون يقدر بالفولط أيضاً.

وهكذا فأماننا طريقتان لحساب فرق الكمون بين نقطتين:

١- إذا كانت قيم وموضع جميع الشحنات معروفة، فإنه يمكن أن نحسب قيمته الكمون في a و b باستخدام العلاقتين 14 و 15 وأن نظرح إحداها من الأخرى.

٢- إذا كانت قيمة الحقل $\mathbf{E}$ واستقامته معروفين في جميع النقاط، فإنه يمكن حساب التكامل في العلاقة 17.

ملاحظة 1: إن الكمون الكهربائي، هو مقدار سلمّي ويكون إما موجباً أو سالباً، وليس له منحى أو اتجاه كما هو الحال في القوة الكهربائية $\mathbf{F}$ و الحقل الكهربائي $\mathbf{E}$ ، وهكذا فالكمون الناشئ. في نقطة ما، عن الشحنة الموجبة يكون موجباً والكمون الناشئ عن الشحنة السالبة يكون سالباً .

ملاحظة 2: نلاحظ بأن لدينا واحداتان متكافئتان لشدة الحقل الكهربائي، الأولى من تعريف الحقل وهي نيوتن/ كولون $\left(\frac{N}{C}\right)$ ، والثانية من العلاقة 17 وهي فولط/متر

$$1\left(\frac{N}{C}\right) \equiv 1\left(\frac{V}{m}\right) \quad \text{وبالتالي يكون: } \left(\frac{V}{m}\right)$$

تدل هذه المساواة، أنه إذا كان حقل كهربائي شدته تساوي $E = 10 \frac{N}{C} \equiv 10 \frac{V}{m}$ وجهته باتجاه المحور ox ، فإن الكمون يتناقص بمقدار $v = 10$ كل متر باتجاه المحور ox . وهذا ما يؤكد أن جهة الحقل تتجه دوماً نحو تناقص الكمون الكهربائي كما هو مبين بالشكل (4-7).

ملاحظة 3: تعريف الإلكترون فولط، ليكن لدينا شحنة كهربائية قيمتها تساوي شحنة الإلكترون

$q = e = 1,602 \times 10^{-19} C$ وضعت بين نقطتين a و b بينهما فرق في الكمون قدره $V_{ab} = 1V$ فيكون تغير الطاقة الكامنة لهذه الشحنة مساوياً:

$$U_a - U_b = q \cdot V_{ab} = 1,602 \times 10^{-19} C \cdot 1V = 1,602 \times 10^{-19} J$$

هذه الكمية من الطاقة تدعى بالإلكترون فولط ورمزها ev . إذا، الإلكترون فولط هو كمية من الطاقة التي يكتسبها جسيم يحمل شحنة مساوية لشحنة الإلكترون ويتحرك ضمن فرق في الكمون مقداره فولط واحد. $1eV = 1,602 \times 10^{-19} J$



الشكل (4-7)

مثال (4-1)

يتألف ثنائي أقطاب كهربائي من شحنتين كهربائيتين نقطيتين، قيمة كل منهما

$q_1 = +12 \text{ nc}$ و $q_2 = -12 \text{ nc}$ تفصل بينهما مسافة قدرها 10 cm ، والمطلوب:

١- احسب الكمون الناشئ عن هذا الثنائي في النقاط a و b و c الموضحة بالشكل

٢- ماهي الطاقة الكامنة لشحنة كهربائية قيمتها $q = 4 \text{ nc}$ إذا وضعت في النقاط

a و b و c .

الحل:

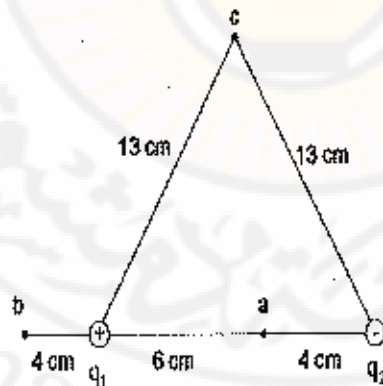
١- نطبق العلاقة

$$V = k \cdot \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

$$V_a = 9 \times 10^9 \left(\frac{12 \times 10^{-9}}{6 \times 10^{-2}} - \frac{12 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-2}} \right) = -900 \text{ V}$$

$$V_b = 9 \times 10^9 \left(\frac{12 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-2}} - \frac{12 \times 10^{-9}}{14 \times 10^{-2}} \right) = 1930 \text{ V}$$

$$V_c = 9 \times 10^9 \left(\frac{12 \times 10^{-9}}{13 \times 10^{-2}} - \frac{12 \times 10^{-9}}{13 \times 10^{-2}} \right) = 0 \text{ V}$$



٢- إن الطاقة الكامنة لأي شحنة كهربائية q تعطى بالعلاقة $U = q \cdot v$

$$U_a = q \cdot V_a = 4 \cdot 10^{-9} \cdot (-900) = -3,6 \times 10^{-6} \text{ J} \quad \text{ففي النقطة a نجد:}$$

$$U_b = q \cdot V_b = 4 \cdot 10^{-9} \cdot 1930 = 7,7 \times 10^{-6} \text{ J} \quad \text{وفي النقطة b}$$

$$U_c = q \cdot V_c = 0 \text{ J} \quad \text{وفي النقطة c}$$

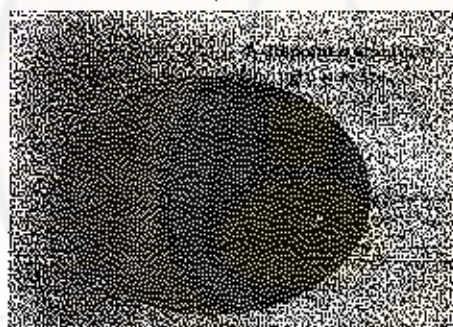
مثال (4 - 2):

أوجد الكمون الناشئ عن شحنة كهربائية موجبة $+q$ في نقطة a تبعد مسافة قدرها r عن هذه الشحنة، وذلك بطريقة التكامل.

الحل:

$$V_b - V_a = \int_a^b E \cdot dr \quad \text{نستخدم العلاقة:}$$

نعتبر النقطة a واقعة على مسافة قدرها r من الشحنة النقطية $+q$ ، والنقطة b في اللانهاية، بفرض أن الكمون في اللانهاية معلوم:



$$V_r - V_\infty = \int_r^\infty E \cdot dr = \int_r^\infty \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \cdot dr$$

$$V - 0 = \left[-\frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \right]_r^\infty = 0 - \left(-\frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \right)$$

$$V = \frac{q}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$$

ومنه نجد الكمون

مثال (4 - 3)

شحنتان نقطيتان متساويتان بالقيمة المطلقة ومتعاكستان بالإشارة،

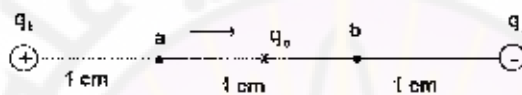
$q_1 = 3 \text{ nc}$ و $q_2 = -3 \text{ nc}$ ، المسافة بينهما 3 cm . وضع بينهما جسم كتلته

$m = 5 \mu\text{g}$ وشحنته $q_0 = 2 \text{ nc}$ في النقطة a التي تبعد مسافة 1 cm عن q_1 ، فإذا

علمت أن سرعته الابتدائية في a معدومة وتحرك وفق خط مستقيم باتجاه الشحنة q_2

تحت تأثير الحقل الكهربائي، فما هي سرعته عند النقطة b التي تبعد مسافة قدرها 2

cm عن q_1 .



الحل:

نستخدم علاقة مصبونية الطاقة

$$k_a + U_a = k_b + U_b$$

وفي هذه الحالة: $U_a = q_0 V_a$ ، $U_b = q_0 V_b$ ، $k_a = 0$ ، $k_b = \frac{1}{2}mv^2$

نعوض:

$$0 + q_0 V_a = \frac{1}{2}mv^2 + q_0 V_b \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2q_0(V_a - V_b)}{m}}$$

$$V_a = k \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right) = 9 \times 10^9 \left(\frac{3 \times 10^{-9}}{0,01} - \frac{3 \times 10^{-9}}{0,02} \right) = 1350$$

بنفس الطريقة نجد:

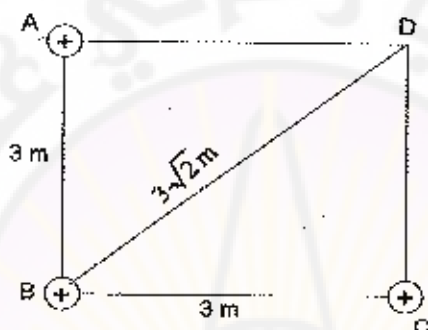
$$V_b = 9 \times 10^9 \left(\frac{3 \times 10^{-9}}{0,02} - \frac{3 \times 10^{-9}}{0,01} \right) = -1350 \text{ v}$$

نعوض بعبارة السرعة نجد: $v = 46 \text{ m/s}$

مثال (4 - 4):

- مربع ABCD طول ضلعه 3 cm، وضعت ثلاث شحنات كهربائية نقطية موجبة ومتساوية القيمة كل منها $2\mu\text{C}$ عند الرؤوس A، B، C. والمطلوب:
- ١- أوجد الكمون عند الرأس D للمربع.
 - ٢- ما هو العمل اللازم لجلب شحنة كهربائية موجبة قدرها $2\mu\text{C}$ إلى الرأس D.

الحل:



1- لإيجاد الكمون عند الرأس D، نطبق العلاقة

$$V = k \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

$$V = 9 \times 10^9 \left(\frac{2 \times 10^{-6}}{3} + \frac{2 \times 10^{-6}}{3} + \frac{2 \times 10^{-6}}{3\sqrt{2}} \right)$$

$$V = 1,62 \times 10^4 \text{ V}$$

2- إن العمل اللازم لجلب الشحنة إلى الرأس D يُعطى بالعلاقة:

$$W = q.V = 2 \times 10^{-6} \times 1,62 \times 10^4 = 3,24 \times 10^{-2} \text{ J}$$

4 - 6 تطبيقات على حساب الكمون الكهربائي: Calculating Electric

Potential

أولاً- كمون ناقل كروي مشحون A charged conducting sphere

ناقل كروي، نصف قطره R ، مشحون بشحنة كلية موجبة q . أوجد الكمون الكهربائي داخل وخارج وعلى سطح الناقل الكروي.

الحل:

إنَّ شدة الحقل الكهربائي خارج الناقل هي كما لو كانت شحنة الناقل كلها مجمعة في مركزه، فينتج من ذلك أنَّ الكمون في النقاط الواقعة خارج الناقل يعطى بنفس العبارة التي يعطى بها في حالة شحنة نقطية أي:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$$

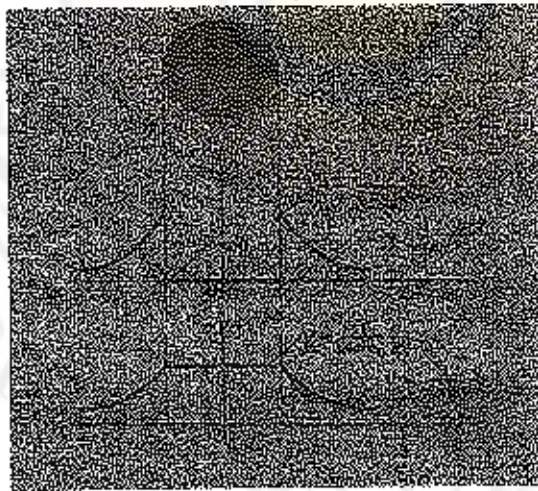
ويكون الكمون الكهربائي على سطح الناقل مساوياً:

$$V_{\text{surface}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R}$$

أما بالنسبة للنقاط الواقعة داخل الناقل الكروي، فنحن نعلم أنَّ الحقل الكهربائي معدوم فيكون، حسب العلاقة 17، فرق الكمون بين أي نقطة داخل الناقل ونقطة تقع على

سطح الناقل معدوماً. $V_s - V_i = \int E \cdot dr = 0$ أي أن:

$$V_s = V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R}$$



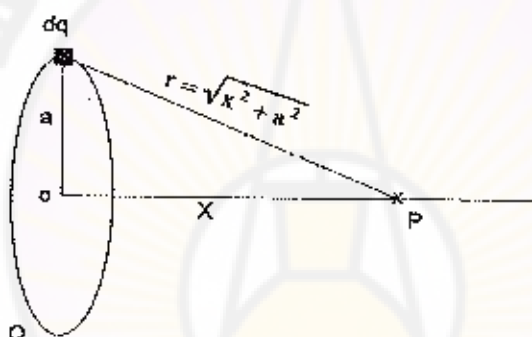
شكل (4-8)

ويوضح الشكل (4 - 8) تغيرات الحقل الكهربائي والكمون بدلالة المسافة r للناسل الكروي المشحون.

ثانياً: كمون حلقة دائرية: A Ring of charge

شحنة كهربائية Q ، موزعة بانتظام على حلقة دائرية نصف قطرها a . أوجد الكمون في نقطة P تقع على محور الحلقة وتبعد مسافة x عن مركزها .
الحل:

نقسم الحلقة إلى أجزاء صغيرة، يحمل كل منها شحنة عنصرية dq ، فيكون الكمون في النقطة P . حسب العلاقة 15 مساوياً :



$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int dq = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

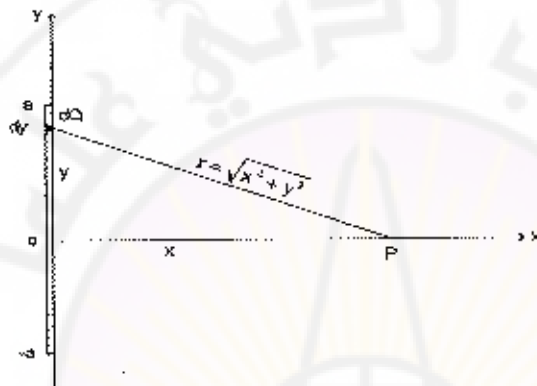
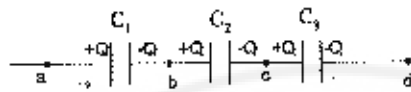
أو يمكن كتابة العلاقة الأخيرة:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

ثالثاً: كمون سلك مشحون: A Line of charge

شحنة كهربائية Q موزعة بانتظام على سلك طوله $2a$. أوجد الكمون في نقطة P تقع على محوره وتبعد مسافة x عن مركزه .
الحل:

نقسم القضيب إلى أجزاء صغيرة طول كل منها dy ، الذي يحمل كل منها شحنة
عنصرية dQ مساوية $dQ = \frac{Q}{2a} \cdot dy$ فيكون الكمون الناتج عنها مساوياً:



فالكمون الكلي الناتج عن القضيب يكون مساوياً :

$$V = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{2a} \int_{-a}^a \frac{dy}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

بالمكاملة نجد:

$$V = \frac{1}{4\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{2a} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + x^2} + a}{\sqrt{a^2 + x^2} - a} \right)$$

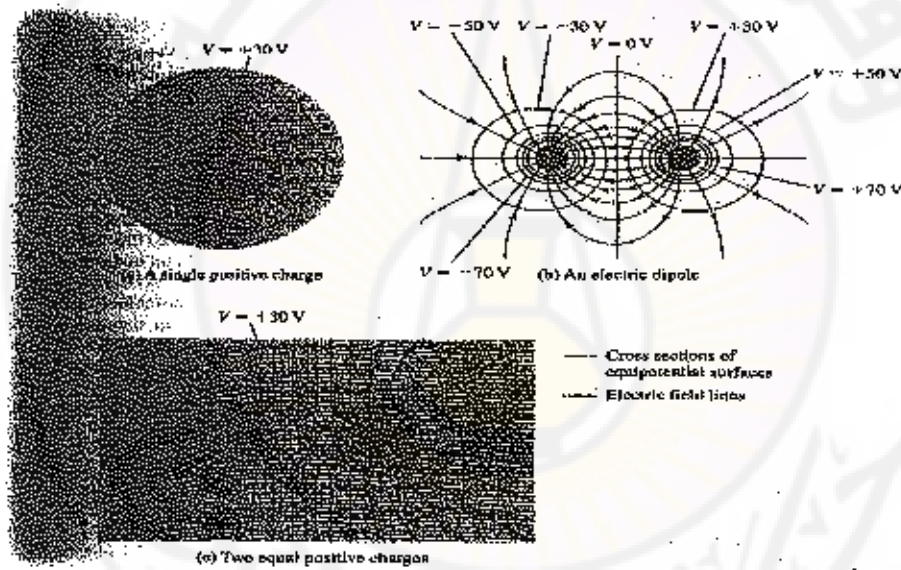
4-7 سطوح تساوي الكمون: E-quipotential surfaces

نستطيع أن نمثل، تخطيطاً، توزيع الكمون في حقل كهربائي باستخدام سطوح
تساوي الكمون . وسطوح تساوي الكمون هو الحل الهندسي للنقاط التي يكون كمونها

$V(x,y,z)$ مساوياً إلى مقدار ثابت في جميع نقاط هذا السطح . بناءً على ذلك، يمكننا رسم شبكة من سطوح تساوي الكمون، كل سطح منها يوافق قيمة معينة للكمون، وتنصف سطوح تساوي الكمون بالصفتين التاليتين:

a- سطوح تساوي الكمون لا يمكن أن تتقاطع، لأن الكمون الكهربائي له قيمة وحيدة في كل نقطة من الفراغ، كما وجدنا سابقاً .

b- سطح تساوي الكمون في أي نقطة، يكون متعامداً مع استقامة الحقل الكهربائي $\vec{E}$.



الشكل (4-9)

إن خطوط الحقل الكهربائي وسطوح تساوي الكمون يولفان شبكتين متعامدتين، وغالباً ما تكون خطوط الحقل منحنيات، وتكون السطوح المتساوية في الكمون سطوحاً منحنية . وفي الحالة الخاصة التي يكون فيها الحقل منتظماً، وخطوط الحقل مستقيمة ومتوازية، تكون السطوح المتساوية في الكمون مستويات متوازية فيما بينها وعمودية على

خطوط القوة. يبين الشكل (4 - 9) سطوح تساوي الكمون وخطوط الحقل ، من أجل توزيعات مختلفة للشحنات ؛ a: شحنة كهربائية موجبة، b: ثنائي أقطاب، c: شحنتين موجبتين متساويتين.

4 - 8 تدرج الكمون: Potential Gradient

ذكرنا في الفقرة السابقة (4 - 5)، أن فرق الكمون بين نقطتين، يمثل التغير الطارئ على الطاقة الكامنة لشحنة كهربائية q_0 . عندما تنتقل من النقطة a إلى b، مسافة قدرها dL ، وذلك بالعلاقة 17:

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

ويمكن كتابة هذه العلاقة الأخيرة بالشكل التالي:

$$\begin{array}{c} + \\ \text{---} \\ c_1 \quad \frac{+Q_1}{-Q_1} \quad c_2 \quad \frac{+Q_2}{-Q_2} \quad c_3 \quad \frac{+Q_3}{-Q_3} \\ \text{---} \\ - \end{array} \quad (18)$$

من هذه العلاقة الأخيرة نستنتج أن:

$$-dv = \vec{E} \cdot d\vec{L} = E \cdot dL \cdot \cos \theta \quad (19)$$

وهنا نميز حالتين؛ الأولى: عندما تكون الإزاحة $d\vec{L}$ عمودية على اتجاه الحقل الكهربائي أي $\left(0 - \frac{\pi}{2}\right)$ فيكون $dv = 0$ وبالتالي:

$$V = \text{cte} \quad (20)$$

تمثل هذه المعادلة سطوحاً في الفراغ تسمى سطوح تساوي الكمون، وتمتاز هذه السطوح بكون الحقل عمودياً عليها في أية نقطة وهذا ما ذكرناه سابقاً.

أما في الحالة الثانية، عندما يكون اتجاه الحقل منطبقاً على الانتقال dL أي $(\theta = 0)$ ، يصبح الكمون العنصري dv مساوياً:

$$-dv = E \cdot dL \quad (21)$$

وتكون القيمة $\frac{dV}{dL}$ عظمى وتساوي $-E$ أي:

$$E = - \left(\frac{dV}{dL} \right)_{\max} \quad (22)$$

يُدعى المعدل الأعظمي لتغير الكمون عند نقطة ما بـ تدرج الكمون ، فإذا كان الانتقال وفق أحد المحاور الإحداثية ox, oy, oz ، فإن العلاقة الأخيرة يمكن كتابتها بأحد الأشكال التالية:

$$E_x = - \frac{\partial V}{\partial x} , \quad E_y = - \frac{\partial V}{\partial y} , \quad E_z = - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (23)$$

ويتبع من ذلك النتيجة الهامة الآتية: في كل نقطة من الحقل الكهربائي. تكون مركبة شدة الحقل الكهربائي في أي منحى كان، مساوية ومعاكسة لتدرج الكمون على ذلك المنحى.

يقدر تدرج الكمون بالفولت في المتر، في حين أنّ شدة الحقل الكهربائي تقدر بالنيوتن في الكولسون، وهما وحدتان متكافئتان. كما وجدنا سابقاً

$$1 \left(\frac{N}{C} \right) = 1 \left(\frac{V}{m} \right)$$

وفي حال الإحداثيات القطبية فإنّ العلاقات (23) تعطى بالشكل:

$$E_r = - \frac{\partial V}{\partial r} \quad (24)$$

4 - 9 تطبيقات على إيجاد الحقل من الكمون:

أولاً- الكمون والحقل لشحنة نقطية: Potential and field a point charge

وجدنا في المثال (4 - 2)، أنّ قيمة الكمون لشحنة نقطية في نقطة تبعد مسافة

r عنها، تعطى بالعلاقة $V = k \cdot \frac{q}{r}$ ، أوجد قيمة شدة الحقل الكهربائي من هذه العلاقة.

الحل:

باستخدام العلاقة 24 نجد:

$$E_r = - \frac{\partial V}{\partial r} = - \frac{\partial}{\partial r} \left(k \cdot \frac{q}{r} \right) = k \cdot \frac{q}{r^2}$$

وهي نفس القيمة التي وجدناها سابقاً.

ثانياً- الكمون والحقل لحلقة دائرية مشحونة:

Potential and field of a ring of charge

وجدنا سابقاً، أن الكمون الكهربائي الناتج عن حلقة دائرية، مشحونة بشحنة

كلية قدرها Q ونصف قطرها a ، في نقطة تبعد x عن مركزها هو

$$V = k \cdot \frac{Q}{\sqrt{x^2 + a^2}} \text{، أوجد شدة الحقل الكهربائي عند هذه النقطة.}$$

الحل:

إن محصلة الحقل لكهربائي الناتج عن الشحنة Q تقع على ox ، فتكون قيمة

الحقل حسب العلاقات (23) هي:

$$E_r = - \frac{\partial V}{\partial r} = k \cdot \frac{Qx}{(x^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

وهي نفس القيمة التي وجدناها سابقاً.

مسائل

1- تبلغ شحنة جسيم $3 \times 10^9 \text{ e}$ وهو موجود في حقل كهربائي منتظم متجه نحو اليسار. فعندما يتحرك الجسيم نحو اليمين مسافة قدرها 5 cm، يكون عمل القوة المطبقة عليه $6 \times 10^{-5} \text{ J}$ وتغير الطاقة الحركية $4.5 \times 10^{-5} \text{ J}$.

a- ما هو عمل القوة الكهربائية؟

b- ما هي شدة الحقل الكهربائي؟

2- توضع شحنة قدرها $\times \times$ في حقل كهربائي موجه نحو الأعلى شدته $5 \times 10^9 \text{ n/c}$.

ما هو عمل القوة الكهربائية عندما تتحرك الشحنة:

a- 45 cm نحو اليمين؟

b- 80 cm نحو الأسفل؟

c- 260 cm في استقامة تولف زاوية 45° نحو الأعلى مع الأفق؟

3- تثبت شحنتان موجبتان نقطيتان مقدار كل منهما q ، على محور العينات في النقطتين $y = +a$ و $y = -a$.

a- ارسم مخططاً يبين مكاني الشحنتين.

b- ما هي قيمة الكمون V_0 في نقطة المبدأ؟

c- يبين أن الكمون في أي نقطة من محور السينات يساوي:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2q}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

d- ارسم مخططاً للكمون على محور السينات كتابع لـ x وذلك من أجل القيم

التي تتراوح بين $x = +4a$ و $x = -4a$.

f- من أجل أي قيمة لـ x يصبح الكمون نصف قيمته في المبدأ؟

4- نأخذ بالاعتبار نفس توزيع الشحنتين الوارد في المسألة السابقة:

a- ارسم مخططاً يبين تغير الكمون على محور العينات كتابع لـ y وذلك من أجل قيم y التي تتراوح بين $y = +4a$ و $y = -4a$.

b- ادرس الدلالة الفيزيائية للمخطط في النقطتين $y = +a$ و $y = -a$.

c- في أية نقطة أو أية تقاطع من محور السينات يكون الكمون مساوياً لقيمته في نقطة المبدأ؟

d- في أية تقاطع من محور العينات يصبح الكمون مساوياً نصف قيمته التي في نقطة المبدأ؟

5- وُضعت شحنة إيجابية $+q$ في النقطة $x = -a$ ، $y = -a$ ووضعت شحنة سالبة مساوية لها وقيمتها $-q$ في النقطة $x = +a$ ، $y = -a$ والمطلوب:

a- ارسم مخططاً يبين موقعي الشحنتين واحسب قيمة الكمون في المبدأ .

b- ما هي عبارة الكمون في نقطة من محور السينات بدلالة x .

c- ارسم مخططاً بيانياً للكمون كتابع لـ x في المجال الممتد من $x = -4a$ إلى $x = +4a$.

4a- واجعل الكمون الموجب إلى الأعلى والكمون السالب إلى الأسفل.

6- في جهاز ميليكان لقياس شحنة الإلكترون e ، احتيج إلى حقل كهربائي شدته

$6.34 \times 10^4 \text{ V/m}$ لجعل القطيرة ساكنة. فإذا كان البعد بين الصفيحتين المعدنيتين 1.5

cm فما هو فرق الكمون الذي ينبغي إحداثه بينهما؟

7- تبلغ قيمة الكمون على بعد ما من شحنة نقطية 600 V وشدة الحقل 200 n/c.

a- ما هو البعد عن الشحنة النقطية؟

b- ما هو مقدار هذه الشحنة؟

8- تبلغ قيمتا شحنتين نقطيتين $+20 \times 10^{-9} \text{ C}$ و $-12 \times 10^{-9} \text{ C}$ ، وتفصل بينهما

مسافة قدرها 5 cm. يُطلق الكترون من السكون بين هاتين الشحنتين على بعد 1 cm

من الشحنة السالبة ويتحرك على المستقيم الواصل بين الشحنتين. ما هي سرعته عندما

يصبح على بعد 1 cm من الشحنة الموجبة؟

9- يبلغ نصف قطر حلقة مشحونة إيجابياً a وهي موضوعة بحيث أنّ مستواها عمودي على محور السينات ومركزها في المبدأ.

a- ارسم مخطط الكمون V في نقاط المحور x كنسبة لـ x .

b- ارسم على نفس مخطط المنحني البياني الذي يمثل مقدار شدة الحقل E .

c- ما هي علاقة المخطط الثاني هندسياً بالنسبة للأول (ما هي العلاقة بين المخططين).

10- حقل كهربائي منتظم شدته 2 k N/C باتجاه المحور x . وضعت شحنة قدرها $Q = 3 \mu\text{C}$ في مبدأ الإحداثيات ثم تركت بدون سرعة ابتدائية، والمطلوب:

a- ما هي الطاقة الحركية لهذه الشحنة عندما تصل إلى النقطة $x = 4 \text{ m}$ ؟

b- ما هو تغير طاقتها الكامنة من $x = 0$ إلى $x = 4 \text{ m}$ ؟

c- ما هو فرق الكمون $V(4) - V(0)$ ؟

d- أوجد الكمون $V(x)$ إذا كانت $V(0) = 4 \text{ kV}$.

11- مستوي لا نهائي مشحون بكثافة سطحية $\sigma = 1 \mu\text{C/m}^2$ في المستوي yz . ما هو فرق الكمون بين النقطتين $x = 20 \text{ cm}$ و $x = 50 \text{ cm}$ ما هو العمل المبذول من قبل قوة خارجية لتحريك شحنة $q_0 = 1 \text{ nC}$ من النقطة $x = 20 \text{ cm}$ إلى النقطة $x = 50 \text{ cm}$ ؟

12- شحنة موجبة قيمتها $2 \mu\text{C}$ موجودة عند المبدأ، والمطلوب:

a- ما هو الكمون الكهربائي عند النقطة التي تبعد 4 m من المبدأ مفترضاً أنّ

$$V(\infty) = 0$$

b- ما هي الطاقة الكامنة لشحنة قدرها $1 \mu\text{C}$ موجودة عند $x = 4 \text{ m}$ ؟

c- ما هو العمل المبذول لجلب هذه الشحنة من اللانهاية ووضعها على بعد 4 m من الشحنة التي في المبدأ؟

d- ما هو العمل المبذول لجلب الشحنة الأولى وقدرها $3\mu\text{C}$ من اللانهاية ووضعها في المبدأ مع بقاء الشحنة $2\mu\text{C}$ في الموضع $x = 4\text{m}$ ؟

13- وُضعت أربع شحنات متساوية قيمة كل منها $2\mu\text{C}$ في زوايا مربع طول ضلعه 4 m ، والمطلوب:

a- أوجد الكمون عند مركز المربع إذا كانت جميع الشحنات موجبة.

b- وفي حالة ثلاث شحنات موجبة والرابعة سالبة.

c- وفي الحالة التي تكون فيها شحنتان موجبتان وشحنتان سالبتان.

14- أوجد الطاقة الكهربائية الساكنة الكامنة للحالات الثلاث المذكورة في السؤال السابق.

15- مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه 3 m وضعت شحنتان موجبتان قدر كل منهما $2\mu\text{C}$ عند الرأسين A و B والمطلوب:

a- فما هو الكمون عند الرأس الثالث ؟C

b- ما هو العمل اللازم لجلب شحنة موجبة قدرها $2\mu\text{C}$ من اللانهاية ووضعها عند ؟C

c- أعد المسألة في حالة شحنة موجبة عند A وأخرى سالبة عند B ولكل

منهما $3\mu\text{C}$.

16- شحنة نقطية موجبة قدرها $3\mu\text{C}$ في المبدأ وأخرى سالبة وقدرها $2\mu\text{C}$ عند النقطة $x = 6\text{m}$ من المحور x، والمطلوب:

a- أوجد الكمون عند $x = 3\text{m}$ من المحور x من المحور x.

b- أوجد الحقل الكهربائي عند النقطة $x = 3\text{m}$ من المحور x.

c- أوجد الكمون عند النقطة $x = 3.01\text{m}$ احسب $-\frac{\Delta V}{\Delta x}$ وقارن الجواب مع

قيمة الحقل الكهربائي عند النقطة $x = 3\text{m}$.

d- ارسم $V(x)$ كنابع لـ x من أجل هاتين الشحنتين.

17- يعطى الكمون الكهربائي في أحد المجالات بالعلاقة $V(x) = C_1 + C_2 x^2$ حيث C_1 و C_2 ثابتان. أوجد قيمة الحقل الكهربائي واتجاهه في هذا المجال.

18- شحنتان موجبتان عند النقطتين $x = a$ و $x = -a$. والمطلوب:

a- أوجد الكمون الكهربائي $V(x)$ كنابع لـ x من أجل نقاط المحور x .

b- ارسم هذا التابع.

c- ما هو معنى وجود النهاية الصغرى في هذا المنحني.

19- ارسم الكمون $V(x)$ كنابع لـ x لحلقة مشحونة بانتظام موجودة في المستوي yz ، والمطلوب:

a- حدد موضع نهاية $V(x)$ العظمى؟

b- ما هي قيمة E_x عند هذه النقطة؟

20- كرة مشحونة بانتظام نصف قطرها $R = 10^{-15} \text{ m}$ وشحنتها الكلية Q . فإذا كان مركز الكرة في مبدأ الإحداثيات أوجد الحقل الكهربائي والكمون عند $r = R$ وعند $r = 0$.

21- وزعت الشحنة $q = 10^{-8} \text{ C}$ بانتظام على طبقة كروية نصف قطرها 10 cm ، والمطلوب:

a- ما هي قيمة الحقل الكهربائي بالقرب من السطحين الداخلي والخارجي لهذه الطبقة؟

b- ما هي قيمة الكمون الكهربائي بالقرب من السطحين؟

c- وما هي قيمة الكمون الكهربائي عند مركز الطبقة؟

d- وما هي قيمة الحقل الكهربائي في هذه النقطة؟

22- يعطى الحقل الكهربائي بالعلاقة $E_x = 2x^3 \text{ kN/C}$ أوجد فرق الكمون بين النقطتين $x = 1 \text{ m}$ و $x = 2 \text{ m}$ من المحور x .

23- أثبت أن الكمون عند نقطة تبعد مسافة r عن ثنائي أقطاب تعطى بالعلاقة:

$$V = \frac{k a q \cos \theta}{r^2}$$

24- ناقل كروي مجوف نصف قطره الداخلي a ونصف قطره الخارجي b . ووضعت شحنة موجبة $+q$ في مركزه. أوجد الكمون الكهربائي في جميع النقاط مفترضاً أن $\frac{a}{b} < \frac{r}{a}$.

25- كرة غير ناقلة نصف قطرها R مشحونة بكثافة $\rho = \rho_0 r/R$ حيث ρ_0 ثابت. أثبت أن الشحنة الكلية تساوي $Q = \pi R^3 \rho_0$. وأن الشحنة ضمن كرة نصف قطرها r هي $q = Q \frac{r^4}{R^4}$ حيث $r < R$. استخدم نظرية غاوص لإيجاد الحقل الكهربائي ثم أوجد الكمون الكهربائي في كل مكان.

الفصل الخامس

السعة

والعوازل

CAPACITANCE AND DIELECTRICS



نستخدم النابض الحلزوني أحياناً لتخزين الطاقة الميكانيكية على شكل طاقة كامنة، بواسطة ضغطه عن موضع توازنه. فهل المكثفات لديها القابلية على تخزين الطاقة الكهربائية على شكل طاقة كامنة.

وتحدث أيضاً عن حوض آله يتسع لكمية من الماء تزداد بازدياد مساحته. فهل يمكننا القول نفسه عن اتساع ناقل لكمية الكهرباء ويتساءل المرء أحياناً، إذا قمنا بشحن جسم ماء، ذو حجم محدود فإلى أي قيمة يمكن ملؤه بالشحنات؟ وهل يمكن أن نقارن ذلك بالماء الذي يملأ كأساً حتى يصبح حجم الماء مساوياً حجم الكأس. ونقول عندها، إن سعة الكأس مرتبطة بحجمه فقط.

5 - 1 السعة الكهربائية لناقل Capacitance electric for conductor

يتناسب الكمون الكهربائي V لناقل معزول، مع شحنته الكهربائية Q ، وقد أثبت التجارب، أنه إذا تغيرت الشحنة الكهربائية بنسبة ما، فإن الكمون الكهربائي يتغير بنفس النسبة، بحيث تبقى نسبة شحنة الناقل إلى كمونه مساوية إلى مقدار ثابت، وقد سميت هذه النسبة (المقدار الثابت) بسعة الناقل ويرمز له بـ C ، والعلاقة المعبرة عن هذا التناسب هي:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

حيث Q : الشحنة الكهربائية للناقل

V : الكمون المتولد عن هذه الشحنة

C : سعة الناقل

ونعرف سعة الناقل بأنها كمية الشحنة اللازم وضعها على ناقل لرفع كمونه بمقدار فولت واحد، وتقاس السعة في الجملة الدولية بالفاراد (Farad) ورمزه F . والفاراد هو سعة ناقل إذا شحن بشحنة كهربائية قدرها كولون واحد كان كمونه مساوياً إلى فولط واحد ويعتبر الفاراد واحدة كبيرة جداً، ولتوضيح ذلك، نأخذ ناقل كروي نصف

قطره R ومشحون بشحنة كهربائية Q. فقد وجدنا كمون هذا الناقل يساوي:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{R} = k \cdot \frac{Q}{R}$$

فإذا عوضنا الكمون بالعلاقة 1 نجد أن:

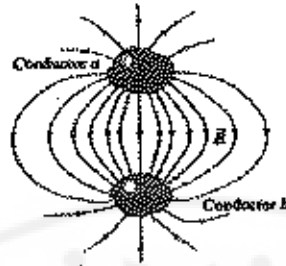
$$C = \frac{R}{k} = \frac{R}{9 \times 10^9} \quad (2)$$

يتضح من العلاقة (2) أن سعة الناقل الكروي لا تتعلق إلا بنصف قطره R. ومن أجل الحصول على ناقل كروي معزول، سعته فاراد واحد، يجب أن يكون نصف قطره مساوياً إلى $9 \times 10^9 \text{ m}$ أي أكبر من نصف قطر الأرض بحوالي 1400 مرة. لذلك نستخدم عملياً أجزاء الفاراد مثل الميكروفاراد $1\mu F = 10^{-6} F$ micro farad والنانوفاراد $1nF = 10^{-9} F$ nano farad والبيكوفاراد $1pF = 10^{-12} F$.

5-2 السعة والمكثفات: capacitors and capacitance

لا يمكن الحصول على سعات كبيرة باستعمال ناقل وحيد ذي حجم غير كبير، ولكن يمكن بحملة ناقلين صغيرين موضوعين بترتيب خاص وعلى بعد فاصل صغير، أن نملك سعة كبيرة، تدعى مثل هذه الجملة بالمكثفة (condenser) وهو الاسم القديم لهذه الجملة، ويُفضل عليه الآن استعمال اسم (capacitor) ويقابله بالعربية المتسعة، وتعتبر المكثفة إحدى العناصر الأساسية في الدارات الكهربائية.

المكثفة هي أداة تُستخدم لتخزين الشحنات الكهربائية والطاقة، وتتألف من ناقلين معزولين يفصل بينهما عازل، قد يكون الهواء أو أي مادة عازلة، ويكون الناقلان في المكثفة إما بشكل صفيحتين متساويتين متوازيتين، أو اسطوانتين متساويتين طولاً ولهما محور مشترك، أو كرتين متمركزتين، ويسمى هذان الناقلان بالبروسيين (coating).



شكل (5 - 1)

يوضح الشكل (5 - 1)، أحد أشكال المكثفات التي تتألف من ناقلين معزولين a

و b .

وتمثل المكثفة في الدارات الإلكترونية $\text{---}||\text{---}$ بالرمز $\text{---}||\text{---}$ أو .

عندما نشحن مكثفة (ناقلين متجاورين)، تتوزع شحنتان متساويتان ومتعاكستان على كل من الناقلين، قيمة كل منهما Q ، ويتولد فرق في الكمون بين اللبوسين ، يرمز له بـ V_{ab} ، نعرف النسبة بين الشحنة Q لأحد الناقلين إلى فرق الكمون بين هذين الناقلين بالإتساعية أو سعة المكثفة ويرمز لها بالرمز C وتعطى بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} \quad (3)$$

ومن البديهي أنّ الشحنة الكلية للمكثفة تساوي الصفر . ولكن عندما نتكلم عن شحنة للمكثفة، فإنه يُقصد بها، الشحنة الموجودة على أحد الناقلين بصرف النظر عن إشارتها . ومن تعريف سعة المكثفة، نلاحظ أنّها تقدر بالكولون في الفولط أي الفاراد، كما ذكرنا سابقاً . ومعنى ذلك أنّ سعة مكثفة ما تساوي الفاراد، فيما إذا انتقل كولون واحد من أحد الناقلين إلى الآخر بفضل فرق كمون بين الناقلين قدره

$$1\text{F} = 1\text{Farad} = 1\frac{\text{C}}{\text{V}} = 1\text{ coulomb/ volt} \quad \text{فولط 1 .}$$

فالفاراد ، يمثل سعة مكثفة، إذا شحنت بكمية كهربائية قدرها كولون واحد، تولد بين لبوسيهما فرق في الكمون قدره فولط واحد .

والمكثفات تطبيقات كثيرة في الدارات الكهربائية حيث نستخدم في:

١- تخزين الطاقة في الليزرات النبضية للتنعيم .

٢- دارات الراديو للتوليف أي للضغط و (التنعيم) أي تصفية التيار المقصوم
المأخوذ من شبكة المدينة، حيث يتم انقضاء تواتر معين وإبعاد تواتر آخر،
فالمكثفة تسمى إلى تمرير التيارات ذات الترددات العالية وتكبح التيارات
ذات الترددات المنخفضة، لذلك يسمى مرشح تمرير الترددات العالية high
pass filter .-

٣- زيادة مردود أجهزة نقل الطاقة الكهربائية بالتيار المتناوب، بفضل استعمال
مكثفات كبيرة.

٤- دارات التيار المتناوب، حيث تستخدم المكثفات كالتوازي في السسارات
لامتنصص الصدمات، فالمكثفات تقوم بامتصاص الزيادة في الفولط،
وتعويض النقص في دارات التقويم الكهربائي للتيار المتناوب.

٥- للتخلص من حصول الشرر الذي يحدث عندما تفتح دارة جاوية على
تفريضة فتحاً مفاجئاً فجهاز الإشعال في كل سيارة يحتوي على مكثفة
لهذا الغرض.

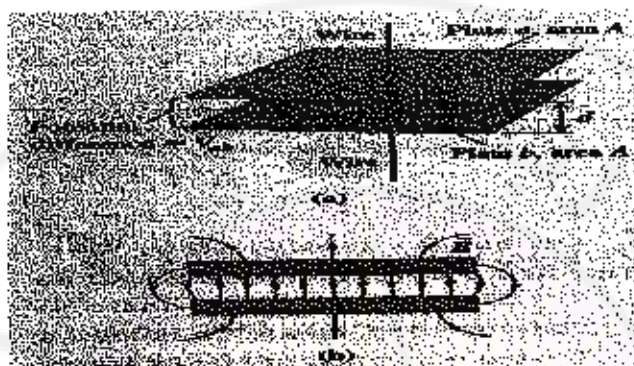
سوف ندرس فيما يلي، المكثفة ذات الصفيحتين المتوازيتين المألوفة كثيراً والسني
تسمى بالمكثفة المستوية، ثم المكثفة الكروية والأسطوانية.
3-5 حساب سعة المكثفات في الخلاء:

Calculating capacitance – capacitors in vacuum

نستطيع حساب سعة المكثفة C إذا علمنا فرق الكمون V_0 بين لبوسيهما
وقيمة الشحنة الكهربائية Q للمكثفة. وذلك باستخدام العلاقة 2. سنناقش:
أولاً، الحالة تكون فيها المكثفة في الخلاء أي أن الوسط العازل بين لبوسي المكثفة هو
الهواء.

A - سعة المكثفة المستوية Parallel - Plate capacitor

إن أبسط أنواع المكثفات، تلك المولفة من صفيحتين ناقلتين متوازيتين، مسساحة كل منهما A وتفصل بينهما مسافة d صغيرة جداً بالنسبة إلى الأبعاد الخطية للصفيحتين، كما هو مبين بالشكل (2-5).



الشكل (2-5)

وجدنا سابقاً، أن الحقل الكهربائي الناشئ عن مستوٍ سطحي A ، مشحون بشحنة كلية Q وبكثافة سطحية $\sigma = \frac{Q}{A}$. يعطى بالعلاقة: $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. من أجل النقاط الواقعة بين الصفيحتين، تكون قيمة الحقل المتولد عن الصفيحة العلوية مساوية إلى $E_+ = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ ومن أجل الصفيحة السفلية $E_- = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. وهذان الحقلان لهما اتجاه واحد من السطح الموجب إلى السالب وعمودي على مستوي الصفيحتين لأن الصفيحتين مختلفتا الشحنة وواقعتان على جانبي النقاط المفروضة.

فتكون قيمة الحقل في كل نقطة بين الصفيحتين هي حاصل جمع هذين الحقلين:

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (4)$$

ولما كان الحقل الكهربائي ثابت ومنتظم بين اللبوسين، أو تدرج الكمون بين اللبوسين منتظماً، فإن فرق الكمون بين اللبوسين هو:

$$V_a - V_b = \int E \cdot dL = E \cdot d \quad (5)$$

أو يكتب:

$$V_{ab} = E \cdot d = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot d}{A} \quad (6)$$

وبتعويض العلاقة الأخيرة بعبارة السعة الميئة بالعلاقة 3، نجد سعة المكثفة

المستوية:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad (7)$$

ولما كانت ϵ_0 ، A ، d ثابتة بالنسبة لمكثفة معينة، فإن السعة هي مقدار ثابت لا علاقة له بشحنة المكثفة. من جهة أخرى، نرى أن السعة تتناسب طردياً مع سطح اللبوسين وعكساً مع البعد بينهما. وإذا استعملت الجولية الدولية، قدرت A بالأمطار المربعة و d بالأمطار و $\epsilon_0 \rightarrow C^2 / N \cdot m^2$ فتقدر السعة بالفاراد:

$$1F = 1 \frac{C^2}{N \cdot m} = 1 \frac{C^2}{J}$$

لنحسب على سبيل المثال، سطح اللبوس في مكثفة مستوية سعتها 1F، إذا

كانت المسافة بين لبوسيهما 1 mm وكان اللبوسان في الخلاء:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

$$A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0} = \frac{1 \times 10^{-3}}{8,85 \times 10^{-12}} = 1,13 \times 10^8 m^2$$

وتعادل هذه، مساحة مربع طول ضلعه 10 600 m

مثال (5 - 1):

مكثفة مستوية في الهواء، تبلغ المسافة بين لبوسيهما 5 mm، و سطح كل منهما

$2 m^2$ ، فإذا طبقنا على لبوسيهما فرقاً في الكمون قدره 10 kV، فالمطلوب حساب:

a- السعة b- الشحنة على كل لبوس c- شدة الحقل الكهربائي الحاصل

بين اللبوسين

الحل:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} = 8,85 \times 10^{-12} \times \frac{2}{5 \times 10^{-3}} = 3,54 \times 10^{-9} \text{ F} \quad -a$$

$$Q = C \cdot V_{ab} = 3,54 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3 = 3,54 \times 10^{-5} \text{ C} \quad -b$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot A} = \frac{3,54 \times 10^{-5}}{8,85 \times 10^{-12} \cdot 2} = 20 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}} \quad -c$$

ويمكن حساب شدة الحقل الكهربائي باعتباره تدرجاً للكمون:

$$E = \frac{V_{ab}}{d} = \frac{10000}{5 \times 10^{-3}} = 20 \times 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

مع العلم بأن $\frac{N}{C}$ و $\frac{V}{m}$ هما وحدتان متكافئتان، كما ذكرنا سابقاً.

مثال (5-2):

مكثفة مستوية، سعتها PF 90، شحنت بواسطة بطارية، إلى أن أصبح كمونها مساوياً 12V، أوجد عدد الإلكترونات التي انتقلت من أحد اللبوسين إلى الآخر.
الحل:

$$Q = C \cdot V = 90 \times 10^{-12} \cdot 12 = 1080 \times 10^{-12} \text{ C}$$

$$N = \frac{Q}{e} = \frac{1080 \times 10^{-12}}{1,6 \times 10^{-19}} = 675 \times 10^7$$

B - سعة المكثفة الكروية A spherical capacitor

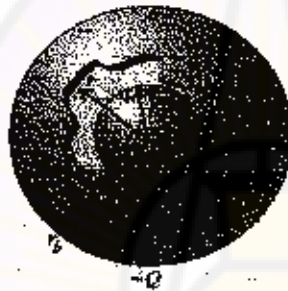
تتألف المكثفة الكروية من ناقلين (لبوسين) كرويين متحدين في المركز، كما يظهر في الشكل (5-3)، نصف قطر الكرة الداخلية r_a والخارجية r_b . يشحن اللبوس الداخلي بشحنة موجبة +Q من خلال ثقب صغير موجود في اللبوس الخارجي، وينشأ عن ذلك حقل كهربائي في المنطقة المحدودة بين سطحي الكرتين. إن الحقل الكهربائي بين اللبوسين مماثل للحقل الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية Q موجودة في مركز اللبوسين، ولا تسهم الشحنة الموجودة على اللبوس الخارجي في قيمة الحقل، ويمكننا

البرهان باستخدام نظرية غوص، على أن الحقل الكهربائي معدوم داخل الكرة الداخلية الصغيرة وخارج الكرة الخارجية الكبيرة.

أما قيمة الحقل الكهربائي بين اللبوسين في نقطة تبعد مسافة r عن المركز المشترك للكرتين $r_a < r < r_b$ ، وذلك باستخدام نظرية غوص، هي:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} = k \frac{Q}{r^2} \quad (8)$$

واتجاهه هو اتجاه الناظم على سطح الكرة الداخلية أو الخارجية، وإذا رمزنا V_a للكمون على الكرة الداخلية و V_b للكمون على الكرة الخارجية، يكون فرق الكمون الحاصل بين الكرتين هو:



الشكل (5-3)

$$V_{ab} = V_a - V_b = \int_{r_a}^{r_b} E \cdot dr = \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr \quad (9)$$

ومنه نجد:

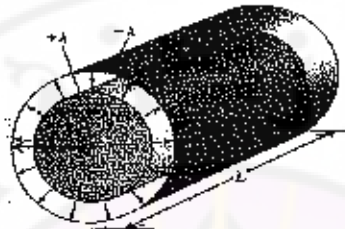
$$V_{ab} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_a} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_b} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_b - r_a}{r_a r_b}$$

وتكون سعة المكثفة الكروية مساوية:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{r_a r_b}{r_b - r_a} \quad (10)$$

C - سعة المكثفة الأسطوانية A cylindrical capacitor

تتألف المكثفة الأسطوانية من ناقلين (البوسين) أسطوانيين متحدين في المحور، كما يظهر في الشكل (4 - 5). طول كل منهما L ، نصف قطر الأسطوانة الداخلية r_a والخارجية r_b ، يشحن اللبوس الداخلي بشحنة موجبة $+Q$ فتكون شحنة اللبوس الخارجي $-Q$.



الشكل (4-5)

يتولد من شحن هذه المكثفة، حقل كهربائي يكون اتجاهه عمودياً على المحور المشترك للأسطوانتين. وتعطى قيمة الحقل، في نقطة واقعة بين سطحي اللبوسين، وعلى بعد r من المحور المشترك، بالعلاقة:

$$E = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot L} = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot L} \cdot \frac{1}{r} \quad (11)$$

لأنه يمكن اعتبار الأسطوانة الداخلية كمستقيم يحمل نفس الشحنة Q وموزعة بكثافة خطية منتظمة λ ، أما فرق الكمون بين اللبوسين فيعطى بالعلاقة:

$$V_{ab} = V_a - V_b = \int_{r_a}^{r_b} E \cdot dr = \int_{r_a}^{r_b} \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 \cdot L} \cdot \frac{dr}{r} \quad (12)$$

$$V_{ab} = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 \cdot L} \cdot L \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (13)$$

وحسب تعريف السعة، نجد سعة المكثفة الأسطوانية مساوية:

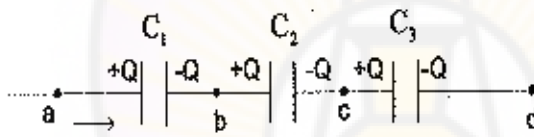
$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \frac{2\pi \epsilon_0 \cdot L}{L \ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (14)$$

4 - 5 وصل المكثفات: connection capacitors

تُصنَّع المكثفات عادة بسعات قياسية، فإذا أردنا وضع مكثفة في دائرة كهربائية سعتها مختلفة عن السعات القياسية المتوفرة لدينا، فإننا نصل مجموعة من المكثفات معاً بالشكل الذي يعطينا المكثفة ذات السعة المطلوبة، وهناك طريقتان أساسيتان لوصف المكثفات في الدارات الكهربائية هما:

1 - وصل المكثفات على التسلسل أو على التوالي: Capacitors in series

يتم وصل نهاية كل مكثفة مع بداية المكثفة التي تليها، كما يظهر في الشكل (5) (5) - فعند تطبيق فرق في الكمون V_{ab} بين المربطين a و b ينشحن اللبوس الأيسر للمكثفة C_1 بشحنة قدرها $+Q$ مما يؤدي، بالتأثير، إلى ظهور شحنة سالبة قدرها $-Q$ على اللبوس الأيمن، وهكذا نتيجة الشحن بالتأثير أو التحريض، سوف تظهر بالوقت نفسه شحنة قدرها $+Q$ على اللبوس الأيسر للمكثفة C_2 وشحنة $-Q$ على لبوسها الأيمن.



الشكل (5-5)

وهكذا تتلقى كل مكثفة شحنة مقدارها Q على كل من لبوسيهما ويكون فرق الكمون بين طرفي كل مكثفة مساوياً:

$$V_{ab} = \frac{Q}{C_1}, V_{bc} = \frac{Q}{C_2}, V_{cd} = \frac{Q}{C_3}$$

وبما أن:

$$V_{ad} = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$$

فإذا رمزنا بـ C_{eq} بالسعة المكافئة *equivalent capacitance*، أي السعة

الوحيدة للمكثفة التي إذا أعطيت نفس الشحنة Q كان فرق الكمون بين أقطابها V_{ab}

$$V_{ab} = \frac{Q}{C_{eq}} \quad \text{فيكون:}$$

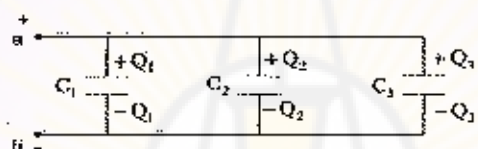
$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \quad \text{ويكون:}$$

ومنه نجد قانون صل المكثفات على التسلسل:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (16)$$

2 - وصل المكثفات على التفرع أو التوازي: *Capacitors in parallel*

في هذه الحالة، يتم وصل بداية كافة المكثفات إلى نقطة واحدة ولهايتها إلى نقطة واحدة أخرى كما يظهر في الشكل (5-6)



الشكل (5-6)

عندما نطبق فرق في الكمون قدره V_{ab} على المربطين a, b للمجموعة المتوازية يكون فرق الكمون، عندئذ، لكل مكثفة مساوياً V_{ab} ولكن الشحنات في هذه المكثفات تكون مختلفة لأن:

$$Q_1 = C_1 \cdot V_{ab} \quad , \quad Q_2 = C_2 \cdot V_{ab} \quad , \quad Q_3 = C_3 \cdot V_{ab}$$

والشحنة الكلية للمجموعة هي:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (17)$$

فإذا رمزنا، أيضاً، بـ C_{eq} بالسعة المكافئة، أي سعة المكثفة الوحيدة التي تكسب

نفس الشحنة Q عندما يطبق فرق في الكمون V_{ab} ، يكون:

$$Q = C_{eq} \cdot V_{ab}$$

ومنه نجد:

$$C_{eq} \cdot V_{ab} = C_1 \cdot V_{ab} + C_2 \cdot V_{ab} + C_3 \cdot V_{ab}$$

ويكون قانون وصل المكثفات على التفرع هو:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (18)$$

5-5 السعة المكافئة: Equivalent capacitance

عند وصل عدد من المكثفات، على التسلسل أو التوازي، في دائرة كهربائية نجد:

1- في المكثفات الموصولة على التسلسل، أن شحنة المكثفة المكافئة تساوي شحنة كل مكثفة من المكثفات الموصولة على التسلسل، أما فرق الكمون للمكثفة المكافئة يساوي مجموع فروق كمون المكثفات الموصولة على التسلسل.

2- في المكثفات الموصولة على التفرع، أن شحنة المكثفة المكافئة تساوي مجموع شحنات المكثفات الموصولة على التفرع، بينما فرق الكمون للمكثفة المكافئة يساوي فرق الكمون لكل مكثفة موصولة على التفرع.

مثال (5-3):

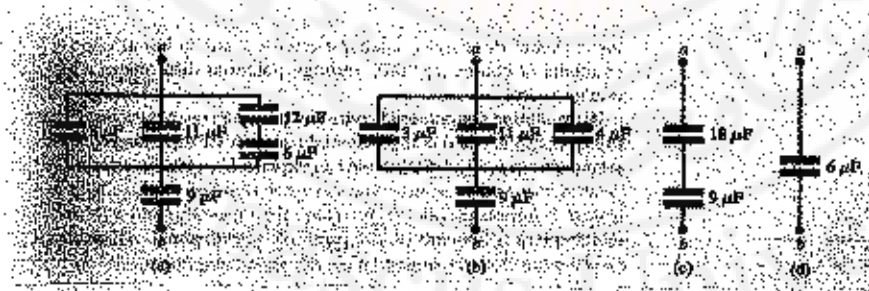
أوجد السعة المكافئة للمكثفات المبينة في الشكل المبين أدناه:

الحل:

إن المكثفتين $6 \mu F$, $12 \mu F$ موصولتان على التسلسل، بفرض C' السعة المكافئة،

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} \Rightarrow C' = 4 \mu F$$

نجد:



تصبح هذه المكثفة C' موصولة على التفرع مع المكثفتين $4\mu F$, $11\mu F$ فالمكثفة المكافئة لهم C'' تساوي:

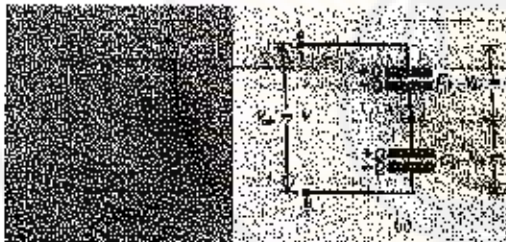
$$C'' = 3 + 11 + 4 = 18\mu F$$

أخيراً، هذه المكثفة $\times \times$ موصولة على التسلسل مع المكثفة $9\mu F$ فتكون المكثفة المكافئة لها السعة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{18} + \frac{1}{9} \Rightarrow C_{eq} = 6\mu F$$

مثال (5 - 4):

لدينا مكثفتان، سعة الأولى $C_1 = 6\mu F$ ، والثانية $C_2 = 3\mu F$ وفرقاً في الكمون قدره $V_{ab} = 18V$ ، أوجد: السعة المكافئة، شحنة كل مكثفة وفرق الكمون بين طرفي كل مكثفة عندما نصل هاتين المكثفتين على التسلسل، ثم على التفرع.
الحل:



أولاً - المكثفان على التسلسل:

المكثفة المكافئة تعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \Rightarrow C_{eq} = 2\mu F$$

إن شحنة كل مكثفة، في حال الوصل على التسلسل هي نفسها شحنة المكثفة المكافئة:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_{eq} = C_{eq} \cdot V_{ab} = 2 \times 18 = 36\mu C$$

فرق الكمون بين طرفي كل مكثفة يعطى بالعلاقة:

$$V_{\infty} = V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{36}{6} = 6V$$

$$V_{\infty} = V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{36}{3} = 12V$$

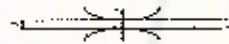
أزياً- المكثفان على التوازي:



المكثفة المكافئة تعطى بالعلاقة:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 6 + 3 = 9\mu F$$

فرق الكمون بين طرفي كل مكثفة هو نفسه V_{∞} أي:



أما شحنة كل مكثفة فتعطى بالعلاقة:

$$Q_1 = C_1 \cdot V = 6 \times 18 = 108 \mu C$$

$$Q_2 = C_2 \cdot V = 3 \times 18 = 54 \mu C$$

5-6 الطاقة المخزنة في المكثفات Energy storage in capacitors

حين نشحن مكثفة ماء، فإننا نبذل عملاً، وهذا العمل يُخزن في المكثفة كطاقة

كامنة، سنقوم بحساب هذه الطاقة. إن عملية شحن المكثفة تقوم على نقل الشحنيات

الموجبة من اللبوس ذي الكمون الأخفض (الناقل المشحون بشحنة سالبة) إلى اللبوس ذي

الكمون الأعلى (الناقل المشحون بشحنة موجبة). لذلك فإن عملية الشحن تتطلب إنفاقاً

في الطاقة وبالتالي فإن الطاقة الكامنة للشحنيات المنقولة تزداد.

لنفرض أن عملية الشحن لمكثف، بدأت من لبوسين مختلفين، أي ليس فيهما أية

شحنة، ثم جرى بالتتابع نقل شحنيات موجبة صغيرة من أحد اللبوسين إلى اللبوس

الآخر، وعندما تبلغ هذه العملية المرحلة التي تكون فيها الكمية الكلية للشحنة المنقولة قد بلغت المقدار Q ، يصبح فرق الكمون بين اللبوسين مساوياً:

$$V_{ab} = \frac{Q}{C}$$

لنفرض أن شحنة كهربائية q انتقلت خلال عملية الشحن، فيكون فرق الكمون مساوياً $V = q/C$. فإذا أردنا نقل شحنة عنصرية صغيرة dq من اللبوس الأخفض إلى اللبوس الأعلى، فإننا نقوم بعمل يتحول إلى طاقة كامنة يعطى بالعلاقة:

$$dw = du = V, dq = \frac{q}{C} \cdot dq \quad (19)$$

ويكون العمل الكلي المبذول في عملية الشحن، لزيادة شحنة المكثف q من الصفر إلى Q ، هو الطاقة المخزنة الكامنة في المكثف:

$$U = W = \int_0^Q dw = \frac{1}{C} \int_0^Q q \cdot dq = \frac{Q^2}{2C} \quad (20)$$

ولما كان $V_{ab} = \frac{Q}{C}$ ، فإن الطاقة المخزنة يمكن كتابتها بالصيغة التالية:

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} Q \cdot V \quad (21)$$

وتقدر الطاقة بالجول عندما نقدر السعة C بالفاراد والشحنة Q بالكولون.

إن صيغة الطاقة المخزنة في العلاقة 21 هي عامة وتصلح لجميع المكثفات، وهذه

الطاقة المخزنة في المكثف قابلة للاستفادة منها بشكل آخر عند تفريغ المكثف، لذلك نرى أن المكثف، بخلاف المقاومة، هي مقر لقوة محركة كهربائية ق. م. ك (F. E. M).

5-7 طاقة الحقل الكهربائي: Electric - Field energy

عندما نشحن مكثف مستوية، سطح أحد لبوسيهما A والمسافة بين اللبوسين d ، فإنه يتولد بينهما حقل كهربائي E ، وتنشأ طاقة مخزنة في المكثف معطاة بالعلاقة (21)، فإذا رمزنا بـ U لكثافة الطاقة في واحدة الحجم energy density، فاعتماداً على العلاقة

21 تكون كثافة الطاقة لمكثفة مستوية تساوي:

$$U = \frac{\frac{1}{2} C \cdot V^2}{A \cdot d} \quad (22)$$

وبما أن السعة وفرق الكمون لمكثفة مستوية معطى بالعلاقة: $C = \epsilon_0 \cdot A/d$ و $V = E \cdot d$ تكون الطاقة المخزنة بوحدة الحجم في مكثفة مستوية مساوية:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot E^2 \quad (23)$$

وهكذا نستنتج أن الحقل الكهربائي الذي تولد خلال عملية الشحن، كان نتيجة العمل المبذول لشحن المكثفة، وهو نفسه العمل أو الطاقة اللازمة لتوليد الحقل الكهربائي.

مثال (5-5):

نُشحن مكثفة سعتها $C_1 = 8 \mu F$ عن طريق وصلها بمنبع كهربائي فرق كمونه $V_0 = 120 V$ ، ثم أبعدنا المنبع الكهربائي والقاطع S مفتوحاً، كما هو مبين بالشكل أدناه.

وصلنا المكثفة الأولى بمكثفة ثانية غير مشحونة، سعتها $C_2 = 4 \mu F$ وذلك بإغلاق القاطع S ، والمطلوب:

- 1- احسب الشحنة Q_0 المتولدة في المكثفة C_1 عندما كان القاطع S مفتوحاً.
- 2- ما هي الطاقة المخزنة في المكثفة C_1 والقاطع S مفتوحاً.
- 3- أوجد فرق الكمون الجديد بعد وصل المكثفتين عن طريق القاطع S وشحنة كل منهما.
- 4- احسب الطاقة الكلية المخزنة في المكثفتين.



الحل:

$$1 - Q_0 = C_1 \cdot V_0 = 8 \times 10^{-6} \times 120 = 960 \times 10^{-6} \text{ C} = 960 \mu\text{C}$$

$$2 - U = \frac{1}{2} Q_0 \cdot V_0 = \frac{1}{2} \times 960 \times 10^{-6} \times 120 = 0,058 \text{ J}$$

3 - عند وصل المكثفين عن طريق القاطعة، فإن الشحنة Q_0 تنوزع على المكثفين أي أن:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad Q_1 = C_1 \cdot V, \quad Q_2 = C_2 \cdot V$$

وتصبح المكثفتان موصولتين على التوازي ويكون لهما نفس فرق الكمون:

$$Q_0 = C_1 \cdot V + C_2 \cdot V = V(C_1 + C_2)$$

$$V = \frac{Q_0}{C_1 + C_2} = \frac{960 \times 10^{-6}}{8 \times 10^{-6} + 4 \times 10^{-6}} = 80 \text{ V}$$

$$Q_1 = C_1 \cdot V = 640 \times 10^{-6} \text{ C}, \quad Q_2 = C_2 \cdot V = 320 \times 10^{-6} \text{ C}$$

4- إن الطاقة المخزنة الكلية هي مجموع الطائقتين المخزنة في كل مكثفة:

$$\begin{aligned} U_{\text{total}} &= U_1 + U_2 = \frac{1}{2} Q_1 \cdot V + \frac{1}{2} Q_2 \cdot V = \frac{1}{2} Q_0 \cdot V \\ &= \frac{1}{2} \times 960 \times 10^{-6} \times 80 = 0,038 \text{ J} \end{aligned}$$

نلاحظ أن قيمة هذه الطاقة المخزنة U_{total} أقل من قيمة الطاقة الابتدائية

$U_{\text{initial}} = 0,058 \text{ J}$ ، ويعود ذلك نتيجة تحول الطاقة من شكل لآخر، وتحول قسم منها إلى حرارة بفعل مقاومة الأسلاك.

مثال (5-6):

شحن اللبوس الداخلي، لمكثفة كروية، بشحنة قدرها $+Q$ والخارجي بشحنة -

Q ، أوجد طاقة الكمون الكهربائي المخزنة في المكثفة باستخدام:

- a- سعة المكثفة المعطاة بالعلاقة 10
b- بمكاملة كثافة طاقة الحقل الكهربائي.

الحل:

a- إن سعة المكثفة الكروية، تعطى بالعلاقة 10، هي:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{r_a \cdot r_b}{r_b - r_a}$$

فتكون الطاقة المخزنة في المكثفة، حسب العلاقة 21، هي:

$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r_b - r_a}{r_a \cdot r_b}$$

b- إن قيمة الحقل الكهربائي بين لبوس المكثفة هي:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

أما قيمة هذا الحقل داخل اللبوس الداخلي وخارج اللبوس الخارجي تكون معدومة، لأنه إذا طبقنا نظرية غوص على أي سطح كروي نصف قطره $r < r_a$ أو $r > r_b$ فإن الشحنات معدومة. إذاً كثافة الطاقة تكون غير معدومة بين اللبوسين $r_b > r > r_a$ ، وتساوي:

$$U = \frac{1}{2}\epsilon_0 \cdot E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 \left(\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \right)^2 = \frac{Q^2}{32\pi^2\epsilon_0 r^4}$$

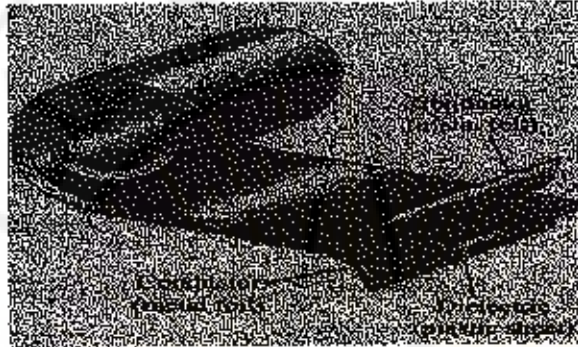
نلاحظ أن كثافة الطاقة، غير ثابتة، وهي تتناقص بسرعة كلما ابتعدنا عن مركز اللبوسين. ولإيجاد الطاقة الكلية، نقسم الحجم بين اللبوسين إلى حجومات عنصرية $dV = 4\pi r^2 dr$ ، سطح كل منها $4\pi r^2$ وسماكته dr فتكون الكثافة الكلية:

$$U = \int U \cdot dV = \int_{r_a}^{r_b} \frac{Q^2}{32\pi^2\epsilon_0 r^4} \cdot 4\pi r^2 dr$$

$$= \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r^2} = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0} \left(-\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_a} \right) = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r_b - r_a}{r_a \cdot r_b}$$

٣- 8 العوازل: Dielectrics

إنَّ القسم الأكبر من المكتشفات يستخدم بين لبوسيه مادة غير ناقلة (عازلة).
والنوع الدارج منها، هو نوع المكثفة المولفة من أوراق معدنية طويلة، تُولف اللبوسين
ومن شريط ورقي مشرب بالشمع أو شريط من البلاستيك، يُولف المادة العازلة، فعندما
تلف هذه المجموعة على نفسها يمكن الحصول على مكثفة سعتها، تبلغ عدة ميكروفاراد
في حجم صغير نسبياً، كما هو مبين بالشكل (5-7) .



الشكل (5-7)

لدراسة تأثير العازل في المكثفة، ينبغي قياس سعتها أولاً، بوجود عازل بين
لبوسيه (C_0) ثم بوجود وسط عازل (C). تدعى نسبة هاتين السعتين بثابتة العازل
(Dielectric constant) ويرمز إليها بـ k ، وتعطى بالعلاقة:

$$k = \frac{C}{C_0} \quad (24)$$

وتدعى، هذه الثابتة أيضاً، بالسماحية النسبية للوسط (Relative permittivity)،
التي هي نسبة سماحية الوسط ϵ إلى سماحية الخلاء ϵ_0 وتعطى بالعلاقة:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (25)$$

وعليه، يصبح قانون سعة مكثفة مستوية، في حال وجود عازل، بالشكل:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = k\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (26)$$

إن سماحية الهواء قريبة جداً من سماحية الخلاء ϵ_0 ، لذلك يكون تأثير الهواء بين لبوسى المكثفة على سعتها ضعيفاً فيهمل في معظم الأغراض. وثابتة العزل عدد مجرد ليس لها واحدة قياس.

إن قيمة ثابتة العزل ϵ تساوي الواحد من أجل المكثفات التي وسطها العازل هو الخلاء، والجدول (5 - 1) يعطينا بعض القيم لثابتة العزل من أجل مواد مختلفة، نلاحظ من هذا الجدول أن قيم ثابتة العزل هي دوماً أكبر من الواحد. لذلك، نستنتج أن مفعول العازل في المكثفة هو زيادة سعة المكثفة.

بينت التجارب أن سعة المكثفة ذات الأبعاد المعينة، تزداد عدة مرات عندما تفصل لبوسيتها مادة عازلة، عما لو كان اللبوسان في الخلاء، ويمكن تفسير سلوك العازل هذا، من الناحية البنوية، على الصورة التالية:

لنأخذ مكثفة مستوية، لبوسيتها في الخلاء، الشكل (a - 5 - 8)، وقد أعطي لهدين اللبوسين شحنتان متساويتان ومتعاكستان، مقدار كل منهما Q وبكثافة سطحية σ فكان فرق الكمون بينهما V_0 ، فإذا أدخلنا، بين اللبوسين، مادة عازلة كالميكسا أو الزجاج أو البلاستيك، فملأ الفراغ الواقع بينهما الشكل (b - 5 - 8)، نلاحظ أن فرق الكمون يتناقص حتى يبلغ قيمة V أصغر من الأولى. وإذا أبعدنا العازل عاد فرق الكمون إلى قيمته الأولى. مما يدل على أن الشحنتات الأصلية على اللبوسين لم يطرأ عليها شيء بإدخال المادة العازلة.

إذا كانت شدة الحقل الكهربائي تساوي E_0 في المنطقة الواقعة بين اللبوسين، عندما يكون الخلاء هو العازل بين اللبوسين، فإن قيمة الحقل تعطى بالعلاقة:

$$E_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (27)$$

فالنقصان الملحوظ في فرق الكمون عند إدخال المادة العازلة، بين اللبوسين يقتضي حدوث نقصان في شدة الحقل، وهذا بدوره يقتضي أو يفترض حدوث نقصان

في الشحنة، ولما كان توزيع الشحنات من اللبوسين معدوماً، فإن هذا النقص يمكن أن يكون ناجماً فقط عن ظهور شحنات ذات إشارة معاكسة على وجهي المادة العازلة. أي أن سطح العازل المجاور لللبوس الموجب ينبغي أن تتولد فيه شحنة تأثيرية (تحريرية) سالبة، وأن سطح العازل المجاور لللبوس السالب ينبغي أن تظهر فيه شحنة متأثرة (متحررة) إيجابية مساوية للأولى في المقدار، كما هو موضح بالشكل (b - 5 - 8). ويكون الحقل، الذي تولده الشحنتان المتحرضتان بالتأثير على سطحي العازل، معاكساً للحقل الأصلي، وهذا يُفسر انخفاض الكمون بين اللبوسين وبالتالي زيادة سعة المكثفة. فإذا رمزنا بـ V, E لشدة الحقل والكمون الناتجان بعد وضع العازل، يكون:

$$E = \frac{V}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (28)$$

حيث ϵ هي سماحية العازل المذكورة في العلاقة 25، وما دامت التجربة والملاحظة تدلنا على أن V هي أصغر من V_0 ، فإن ϵ ستكون أكبر من ϵ_0 وهذا ما يفسر أن $k \geq 1$ دوماً. كما هو موضح في الجدول (5 - 1). واستناداً إلى العلاقتين 27،

$$E = \frac{E_0}{k} \quad \text{نجد:}$$

في حالة المكثفة المستوية، يمكن حساب الكثافة السطحية σ ، المبينة في الشكل (8 - b) (5 - b)، للشحنات المتحرضة في المادة العازلة كما يلي، إذا كانت σ هي كثافة الشحنات السطحية على لبوسي المكثفة و $\bullet$ كثافة الشحنات السطحية المتحرضة على سطحي العازل، فإن الكثافة السطحية الصافية على كل من لبوسي المكثفة، بوجود العازل، هي $\bullet \bullet \bullet \bullet$ ، وتكون قيمة الحقل الكهربائي E_0 بدون العازل وقيمه E مع العازل هي:

$$\text{○} \quad (30)$$

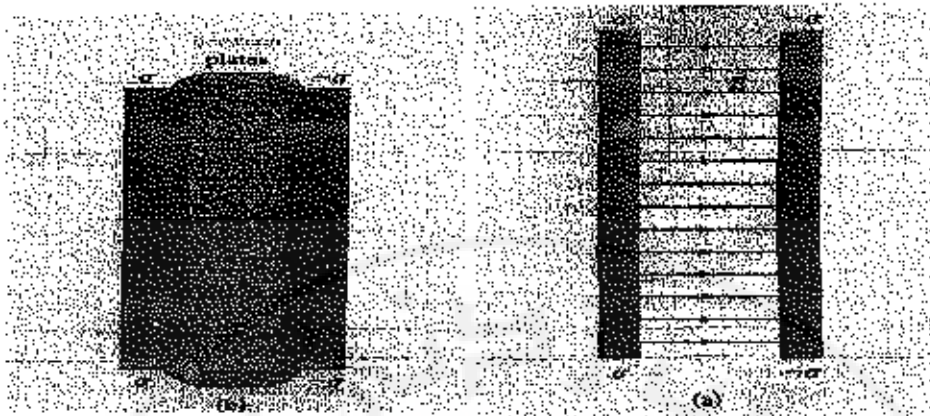
وباستخدام العلاقة (29) نجد كثافة الشحنات السطحية المتحرضة ○ تعطى

بالمعلاقة:

$$\sigma_r = \sigma \left(\frac{k-1}{k} \right) = \sigma \left(1 - \frac{1}{k} \right) \quad (31)$$

الجدول (1-5) قيم ثابتة العزل k في الدرجة 20°C

Material	المادة العازلة	ثابت العزل k
Vacuum	الخلا	1
Air (1 atom)	الهواء (ضغط جوي واحد)	1,00059
Air (100 atom)	الهواء (100 ضغط جوي)	1,0548
Teflon	التيفلون	2,1
Polyethylene	البولي إيثيلين	2,25
Benzene	البنزين	2,28
Mica	الميكاف	3 - 6
Plexiglas	البلاكسي غلاس	3,40
Glass	الزجاج	5 - 10
Neoprene	نيوبرين	6,70
Germanium	الجرمانيوم	16
Glycerin	الجلسرين	42,5
Water	الماء	80,4



الشكل (8-5)

تبين العلاقة (31)، أنه عندما تكون ثابتة العزل k كبيرة جداً فإن قيمة σ تكون قريبة من قيمة σ_0 وأن قيم الحقل والكمون تكون صغيرة جداً بالمقارنة مع قيمها في الخلاء.

أما كثافة الطاقة الكهربائية U ، لكثافة مستوية بوجود عازل، فإنها تعطى بالعلاقة:

$$U = \frac{1}{2} k \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \cdot E^2 \quad (32)$$

في الخلاء، يكون $k = 1$ و $\epsilon_0 = \epsilon$ ، فنعود بذلك إلى العلاقة 23.

مثال 5 - 7:

مكثفة مستوية، المسافة بين لبوسيهما تساوي d ، وضعنا شريحة عازلة بين لبوسيهما بسماكة قدرها $\frac{3d}{4}$. احسب سعة المكثفة بعد إدخال الشريحة بدلالة سعتها الأصلية C_0 بدون عازل.

الحل:

ليكن V_0 ، E_0 هما الكمون الكهربائي والحقل الكهربائي للمكثفة بدون عازل،

$$E_0 = \frac{V_0}{d} \Rightarrow V_0 = E_0 \cdot d \quad \text{فيكون:}$$

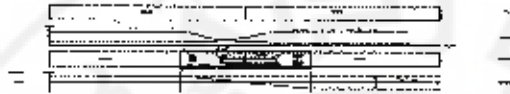
وبفرض V و E هما لكمون و الحقل للمكثفة بعد إدخال العازل، فإن قيمة الحقل

$$E = E_0 / k$$

أما قيمة الكمون فتساوي:

$$V = \left(\frac{d}{4} \right) + \frac{E_0}{k} \left(\frac{3d}{4} \right) = E_0 \cdot d \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4k} \right) = V_0 \cdot \left(\frac{3+k}{4k} \right)$$

وتصبح سعة المكثفة بعد إدخال العازل مساوية:



أي أن السعة ازدادت بعامل قدره $\left(\frac{4k}{3+k} \right)$ ، بينما الكمون انخفض بعامل قدره

بينما بقيت الشحنة على حالها.

مثال 5-8:

مكثفة مستوية، مساحة كل من لبوسيهما 202 cm^2 ، تفصلهما طبقة من الهواء

سمكها $0,4 \text{ cm}$ ، والمطلوب:

$$1- \text{ حساب سعة المكثفة إذا علمت أن } \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{N}}$$

2- وصلت المكثفة بمنبع كهربائي فرق كمونه 500 V . أوجد شحنة المكثفة،

الطاقة المخزنة فيها وشدة الحقل الكهربائي بين اللبوسين وخارجهما .

3- وضعنا شريحة عازلة من الميكاء سمكها $0,4 \text{ cm}$ ، بين اللبوسين، فما هي الشحنة

الإضافية للمكثفة والطاقة الكلية المخزنة فيها، إذا علمت أن قيمة ثابتة العزل للميكاء

تساوي 6.

الحل:

$$1 - C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{202 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-3}} = 44,7 \times 10^{-12} F$$

$$2 - C_0 = \frac{Q_0}{V} \Rightarrow Q_0 = C_0 \cdot V = 44,7 \times 10^{-12} 500 = 2,24 \times 10^{-8} C$$

$$U_0 = \frac{1}{2} Q_0 \cdot V = \frac{1}{2} \times 2,24 \times 10^{-8} \times 500 = 5,6 \times 10^{-6} J$$

شدة الحقل بين اللبوسين:

$$V = E \cdot d \Rightarrow E = \frac{V}{d} = \frac{500}{4 \times 10^{-3}} = 1,25 \times 10^5 V/m$$

بينما شدة الحقل خارج اللبوسين تكون معدومة .

٣- وبما أن فرق الكمون V ثابتة، فإن سعة المكثفة مع وجود العازل سوف

تزداد ستة أضعاف لأن $C = k \cdot C_0$ وبالتالي ،

٤- الشحنة الكلية سوف تكون ستة أضعاف الشحنة الابتدائية:

$$C = k \cdot C_0 \Rightarrow C = 6 \frac{Q}{V}$$

وبذلك تكون الشحنة الإضافية مساوية خمسة أضعاف الشحنة الابتدائية، أي أن:

$$الشحنة الإضافية = 5Q_0 = 5 \times 2,24 \times 10^{-8} = 11,2 \times 10^{-8} C$$

وكذلك الطاقة الكلية سوف تساوي ستة أضعاف الطاقة الابتدائية:

$$U = \frac{1}{2} Q \cdot V = 6 \cdot \frac{Q_0 \cdot V}{2} = 3 \times 5,6 \times 10^{-6} = 33,6 \times 10^{-6} J$$

مثال (5 - 9):

..... ليكن لدينا مكثفة مستوية. مساحة كل من لبوسيهما 2000 cm^2 ، ويبعدان

عن بعضهما مسافة قدرها 1 cm ، وصلت المكثفة بمنبع كهربائي حتى أصبح فرق

الكمون بين لبوسيهما مساوياً 1000 V ، فصلنا المنبع عن المكثفة . ثم أدخلنا بين

لبوسيهما صفيحة عازلة من البلاستيك سمكها 1 cm ، فوجدنا أن فرق الكمون تناقص إلى

1000 V ، بينما بقيت الشحنة ثابتة على كل من لبوسي المكثفة، والمطلوب حساب:

- 1- السعة الأصلية C_0 للمكثفة والشحنة Q على كل من ليو سيها.
- 2- سعة المكثفة C بعد إدخال العازل وقيمة ثابتة العزل k .
- 3- السماحية ϵ للعازل والشحنة المتحرضة Q_1 على كلا وجهي العازل.
- 4- الشدة الأصلية E_0 للحقل بين اللبوسين والشدة E بعد إدخال العازل.
- 5 - الطاقة الكلية المختزنة قبل وبعد إدخال العازل.
- 6- كثافة الطاقة قبل وبعد إدخال العازل.

$$1 - C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{0,2}{0,01} = 1,77 \times 10^{-10} F$$

الحل:

$$Q = C_0 \cdot V_0 = 1,77 \times 10^{-10} \times 3000 = 5,31 \times 10^{-7} C$$

$$2 - C = \frac{Q}{V} = \frac{5,31 \times 10^{-7}}{1000} = 5,31 \times 10^{-10} F$$

$$k = \frac{C}{C_0} = \frac{5,31 \times 10^{-10}}{1,77 \times 10^{-10}} = 3$$

أو نحسب k من العلاقة:

$$k = \frac{V_0}{V} = \frac{3000}{1000} = 3$$

نلاحظ أن سعة المكثفة ازدادت ثلاثة أضعاف.

$$3 - \epsilon = k \cdot \epsilon_0 = 3 \times 8,85 \times 10^{-12} = 2,66 \times 10^{-11} \frac{C^2}{N.m^2}$$

بضرب طرفي المعادلة 31 بمساحة اللبوس الواحد A نجد:

$$Q_1 = Q \left(1 - \frac{1}{k}\right) = 5,31 \times 10^{-7} \left(1 - \frac{1}{3}\right) = 3,54 \times 10^{-7} C$$

$$4 - E_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{3000}{0,01} = 3 \times 10^5 V/m$$

$$E = \frac{V}{d} = \frac{1000}{0,01} = 1 \times 10^5 V/m$$

ويمكن حساب E أيضاً من المعادلات:

$$4 - E = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0} = \frac{Q - Q_i}{\epsilon_0 \cdot A}$$

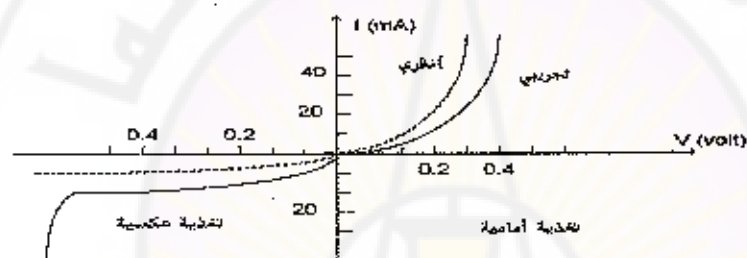
$$= \frac{(5,31 - 3,54) \times 10^{-7}}{8,85 \times 10^{-12} \times 0,2} = 1 \times 10^5 \text{ V / m}$$

$$E = \frac{E_0}{k} = \frac{3 \times 10^3}{3} = 1 \times 10^5 \text{ V / m} \quad \text{أو من}$$

$$5 - U_0 = \frac{1}{2} C_0 \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \times 1,77 \times 10^{-10} \times (3000)^2 = 7,79 \times 10^{-4} \text{ J}$$

$$U = \frac{1}{2} C \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 5,31 \times 10^{-10} \times (1000)^2 = 2,66 \times 10^{-4} \text{ J}$$

نلاحظ أن الطاقة المخزنة النهائية تساوي ثلث الطاقة المخزنة الأصلية .





مسائل

1- تبلغ سعة مكثفة $8.5 \mu F$. ما هي الشحنة التي ينبغي انقراها منها حتى يهبط فرق الكمون بين لبوسيه بمقدار 50 فولط؟

2- ماذا يجب ان تكون مساحة لبوس مكثفة مستوية سعته 1F إذا كانت المسافة بين لبوسيهها 50.4 mm

3- مكثفة بمستوية سعتها $2 \mu F$ والمسافة بين لبوسيهها 1 mm ، والمطلوب:

a- ما هو فرق الكمون الأعظمي الذي يمكن تطبيقه قبل أن يتحطم عازلها إذا كان العازل هو الهواء؟

b- ما هي أكبر شحنة يمكن تخزينها فيها؟

4- كابل محوري يصل بين مديتين نصف قطره الداخلي 1.0 cm والخارجي 1.1 cm وطوله $8 \times 10^4 \text{ m}$. ما هي سعة هذا الكابل إذا عاملناه كمكثفة أسطوانية؟

5- يتألف عداد غايغر من سلك نصف قطره 0.2 mm وطوله 12 cm يحيط به طبقة أسطوانية ناقلة نصف قطرها 1.5 cm ولها الطول نفسه . أوجد السعة مفترضاً أن العازل هو غاز ثابت عزله $k = 1$ ثم أوجد شحنة واحدة الطول على السلك عندما تطبق على العداد 1.2 kV .

6- ما هي سعة ناقل كروي معزول نصف قطره 1.8 cm ؟

7- ما هي سعة الأرض إذا افترضناها ناقلاً كروياً نصف قطره 6400 km .

8- احسب سعة مكثفة مستوية سطح لبوسها 1.0 m ومسافة فصلها 1.0 cm .

9- ربطت مكثفة سعتها $10 \mu F$ على التسلسل مع مكثفة أخرى سعتها $20 \mu F$ بطارية كمونها 6 V . ما هي سعة المكثفة المكافئة؟ ما هي الشحنة على مكثفة؟ ما هو فرق الكمون عبر كل مكثفة؟

10- أعد المسألة السابقة من أجل ربط على التفرع بين المكثفتين.

11- أوجد السعة المكافئة لثلاث مكثفات سعاتها 2 ، 4 ، 8 ميكروفاراد في حالة وصلها على التسلسل وفي حالة وصلها على التفرع.

12- شحنت مكثفة سعتها $2\mu F$ عبر فرق في الكمون قدره 12 V ثم فصلت البطارية، والمطلوب:

a- ما هي الشحنة الموجودة على اللبوسين؟

b- عندما وصلت مكثفة ثانية معها على التسلسل هبط الكمون إلى القيمة 4 V

ما هي سعة المكثفة الثانية؟

13- كم مكثفة سعة كل منها $1\mu F$ يجب ربطها على التوازي لكي تختزن 1 mc من

الشحنة بحيث يكون فرق الكمون عبر كل منها مساوياً 10 V؟

14- وصلت مكثفة سعتها $1\mu F$ على التوازي مع مكثفة سعتها $2\mu F$ ، ثم وصلت

المجموعة على التسلسل مع مكثفة سعتها $6\mu F$ ، والمطلوب، ما هي سعة المكثفة المكافئة

للمكثفات الثلاث؟

15- وصلت مكثفة سعتها $3\mu F$ على التسلسل مع مكثفة سعتها $6\mu F$ ثم وصلناها

على التفرع مع مكثفة سعتها $8\mu F$ ، ما هي سعة المكثفة المكافئة لهذه المجموعة؟

16- طبق فرق كمون قدره 100 V على مكثفة سعتها $3\mu F$ ، والمطلوب:

a- ما هي الطاقة التي اختزنت في المكثفة؟

b- وما هي الطاقة اللازمة لرفع الكمون من 100 V إلى 200 V بين لبوسي

المكثفة؟

17- ما هي الطاقة المخزنة في ناقل كروي معزول نصف قطرها 10 cm وكمونه 3

kV

18- وضعت شحنة قدرها 4nC على مكثفة سعتها $1\mu F$ ، والمطلوب:

a- ما هي الطاقة المخزنة في المكثفة؟

b- إذا أزيل نصف الشحنة كم من الطاقة يبقى في المكثفة؟

19- ثلاث مكثفات سعاتها 8 ، 8 ، 4 ، ميكرو فاراد قد وُصلت بالتسلسل عبر خط كهربائي توتره 12 فولط، والمطلوب:

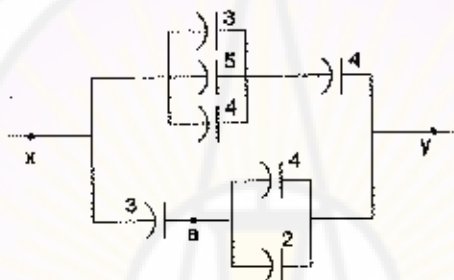
a- ما هي شحنة المكثفة ذات الـ 4 ميكروفاراد؟

b- ما هي الطاقة الكلية للمكثفات الثلاث؟

c- يُعاد وصل المكثفات فتوصل على التوازي بعد فصلها عن الخط وتوصل لبوساتها المشحونة إيجابياً مع بعضها، ما هو التوتر عبر المجموعة المتوازية؟

d- ما هي طاقة المجموعة؟

20- إنَّ سعات جميع المكثفات المبينة في الشكل هي بالمكروفاراد، والمطلوب:



a- ما هي السعة المكافئة بين x و y؟

b- إذا كانت الشحنة في مكثفة الـ 5 ميكروفاراد هي 120 ميكروكولون فما هو

فرق الكمون بين x و a؟

21- تشحن مكثفة سعتها 500 ميكروفاراد حتى يبلغ كمونها 120 فولط، ما هي كمية الحرارة التي تنتج من تفريغها كلياً عبر سلك؟

22- تُربط مكثفتان سعتهما 1 و 2 ميكروفاراد، على التسلسل على خط تغذية كمونه 1200 فولط، والمطلوب:

a- أوجد الشحنة في كل مكثفة وفرق الكمون بين لبوساتها.

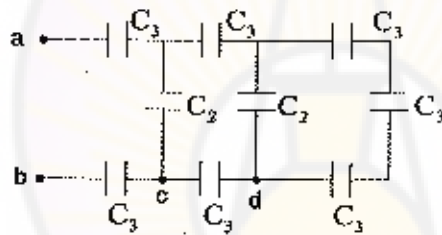
b- تفصل المكثفتان المشحونتان عن خط التغذية وعن بعضيهما بحيث يتصل كل لبوسين من إشارة واحدة. أوجد الشحنة النهائية لكل منهما وتوترها.

23- توصل مكثفتان سعة الأولى منهما $1\mu F$ وسعة الثانية $2\mu F$ على التوازي مع منبع للتيار كمونه 1200 فولط. والمطلوب:

a- أوجد الشحنة الموجودة على كل من المكثفتين وفرق الكمون بين طرفيهما.

b- تفصل المكثفتان المشحونتان بعدد عن المنبع كما تفصلان عن بعضهما، ثم توصلان ببعضهما بحيث تلتقي المراتب ذات الإشارات المتباعدة معاً. أوجد الشحنة النهائية الموجودة على كل من المكثفتين وكذلك فرق الكمون بين لبوسيهما.

24- **a-** احسب سعة المكثفة للشبكة الواقعة بين **a** و **b** في الشكل بفرض أن C_3 تساوي 3 ميكروفاراد و C_2 تساوي 2 ميكروفاراد.



b- احسب الشحنة على كل من المكثفات القريبة من **a** و **b** بفرض $V_{ab} = 900 \text{ volt}$.

c- احسب في هذه الحالة V_{cd} .

25- صفيحتان مستويتان متوازيتان، سطح كل منهما 100 cm^2 ، أعطي لها شحنتان متقابلتان قيمة كل واحدة 10^{-7} كولون. وملئ الفضاء بينهما بمادة عازلة جازلة فبلغت شدة الحقل الكهربائي في العازل $3.3 \times 10^5 \text{ volt/m}$.

a- ما هو عامل العزل K للمادة العازلة؟

b- ما هي الشحنة المتحرضة الكلية على أحد وجهي العازل؟

26- صفيحتان مستويتان متوازيتان طما شحنتان متساويتان ومتعاكستان. وعندما يكون الفضاء بينهما محلي، تكون شدة الحقل الكهربائي بينهما $2 \times 10^4 \text{ volt/m}$ ، وعندما يكون الفضاء مملوءاً بمادة عازلة، تبلغ شدة الحقل $1.2 \times 10^5 \text{ volt/m}$. ما هي كثافة الشحنة المتحرضة على سطح العازل؟

27- يوجد فرق كمون قدره 100 فولط بين لبوسين مكثفة متوازية عازلها الهواء.

a- ماذا يصبح فرق الكمون إذا كان العازل مادة عاملها العزلي 2.5 مع بقاء شحنة اللبوسين على حالها؟

b- بلغت سعة المكثفة مع وجود الهواء كعازل 100 ميكروفاراد. احسب طاقة المكثفة من أجل كل من العازلين.

c- إذا فرضنا أنه لا يوجد تآك بين العازل واللبوسين، فما هو العمل اللازم لإبعاد العازل عن اللبوسين؟

28- تتألف مكثفة من صفيحتين متوازيتين سطح كل منهما 25 cm^2 تفصل بينهما مسافة قدرها 0.2 cm ، والعازل الذي يفصل بينهما عامله العزلي 5 يوصل اللبوسان ببطارية قوتها المحركة 300 فولط.

a- ما هي سعة المكثفة؟

b- ما هي الشحنة على كل لبوس؟

c- ما هي طاقة المكثفة المشحونة؟

29- صفيحتان ناقلتان مشحونتان بشحنتين متعاكستين وتساوي فيهما قيمة الشحنة في وحدة السطح ويفصل بينهما عازل ثخنه 5 mm وعامل عزله 3. يبلغ الحقل الناتج في العازل 10^6 volts/m . احسب:

a- الشحنة الحرة في وحدة السطح على الصفيحتين الناقلتين.

b- الشحنة المتحرضة في وحدة السطح على سطح العازل.

30- تتألف مكثفة كروية من كرة معدنية داخلية نصف قطرها r_a محمولة على عازل في مركز كرة معدنية بحوفة نصف قطرها الداخلي r_b . يوجد شحنة قدرها $+Q$ على الكرة الداخلية وشحنة قدرها $-Q$ على الكرة الخارجية.

a- ما هو فرق الكمون V_{ab} بين الكرتين؟

b- برهن على أن السعة تساوي: $C = 4\pi\epsilon_0 \frac{r_b r_a}{r_b - r_a}$.

31- تبلغ الشحنة على لبوسين مكثفة متوازية في الخلاء: $+Q$ و $-Q$ والبعد بين اللبوسين هو x . يُفصل اللبوسان عن المربع الذي كان يشحن المكثفة ويبعدان عن بعضهما بمسافة قصيرة قدرها dx والمطلوب:

a- ما هو التغير dC في سعة المكثفة؟

b- ما هو التغير في طاقتهما؟

c- سو بين معادلة العمل $F dx$ وبين زيادة الطاقة dW وأوجد قوة التجاذب F

بين اللبوسين؟

c- أوضح السبب الذي يجعل F غير مساوية لـ QE ، حيث E هي شدة الحقل

الكهربائي بين اللبوسين.

32- شُحنت مكثفة مستوية، سطح لبوسها A ومسافة الفصل فيها d ، إلى فرق في الكمون قدره V ثم فصلت البطارية. أبعاد اللبوسان بعد ذلك عن بعضهما بعضاً إلى مسافة تساوي $2d$ ، والمطلوب:

a- أوجد بدلالة كل من A و d و V السعة الجديدة للمكثفة وفرق الكمون

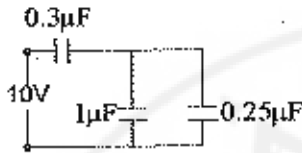
الجديد والطاقة الجديدة المخزنة.

b- ثم احسب العمل الذي بذل من أجل زيادة مسافة الفصل من d إلى $2d$.

33- شُحنت مكثفة مستوية سطح لبوسها 2 m^2 ومسافة الفصل فيها 1 mm إلى فرق كمون قدره 100 V .

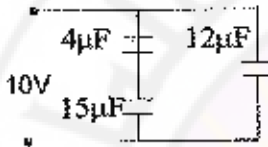
- a- ما هو الحقل الكهربائي بين اللبوسين؟
b- ما هي طاقة واحدة الحجم بين اللبوسين؟
c- أوجد سعة هذه المكثفة ثم احسب الطاقة الكلية فيها.

34- أوجد من أجل الشكل المجاور:



- a- السعة المكافئة.
b- الشحنة على كل مكثفة.
c- الطاقة الكلية المختزنة.

35- أوجد من أجل الشكل المجاور:



- a- السعة المكافئة.
b- الشحنة على كل مكثفة.
c- الطاقة الكلية المختزنة.

36- أثبت أن سعة المكثفة المكافئة لثلاث مكثفات موصولة على التسلسل هي:

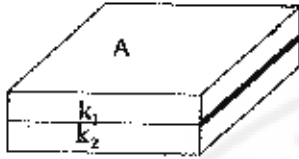
$$C = \frac{(C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3)}{C_1 C_2 C_3}$$

37- وصلت مكثفة سعتها 20 PF إلى بطارية كمونها 3 kV ثم فصلت عن البطارية وربطت على التوازي مع مكثفة فارغة سعتها 50 PF، والمطلوب:

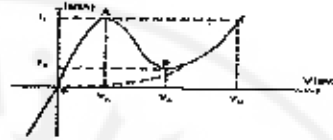
- a- ما هي الشحنة الجديدة على كل من المكثفتين؟
b- ما هي الطاقة الابتدائية المختزنة في المكثفة الأولى والطاقة النهائية المختزنة في كل من المكثفتين الأولى والثانية؟

38- مكثفتان سعاتهما 100 و 400 بيكوفاراد شحن كل منهما إلى كمون قدره 2 kV وفصلتا عن منبع الكمون. ثم وصلتا على التفرع (الموجب مع الموجب والسالب مع السالب) أوجد فرق الكمون النهائي بين مربطي كل منهما ثم أوجد الطاقة الضائعة في هذا الوصل.

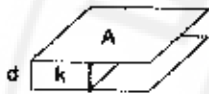
- 39- مكثفة مستوية سعتها C_0 ومسافة فصلها d . وضعت شريحتان عازلتان ثابتاهما k_1 و k_2 وسماكة كل منهما $\frac{1}{2}d$ بين اللبوسين كما في الشكل المجاور.



أثبت أن سعة المكثفة الجديدة تعطى بالعلاقة:



- 40- مكثفة مستوية سطح لبوسها A ومسافة فصلها d شحنت إلى فرق كمون قدره V ثم فصلت عن البطارية. وضعت شريحة عازلة ثابت عزلها $k=2$ وسماكة d وسطحها $A/2$ بين اللبوسين كما في الشكل المجاور، والمطلوب:



a- ما هي قيمة الحقل الكهربائي بين اللبوسين

(داخل العازل وخارجه)؟

- b- أثبت أن σ_1 هي كثافة الشحنات الحرة في مكان العازل و σ_2 كثافة الشحنات الحرة في المكان الذي لا يحوي العازل. أثبت أن السعة الجديدة هي $\frac{380A}{2d}$ وأن الكمون الجديد هو $\frac{2}{3}V$.

- 41- مُلئت مكثفة مستوية بعازلين لهما حجمان متساويان أثبت أن المكثفة تزداد بالعامل $\frac{k_1+k_2}{2}$.

- 42- كرة مشحونة نصف قطرها R وكثافة شحنتها ρ وشحنتها الكلية $Q = \frac{4}{2}\pi R^3\rho$ ، والمطلوب:

- a- أوجد كثافة الطاقة الكهربائية الساكنة عند مسافة r عن المركز من أجل $r < R$ و $r > R$.

b- أوجد الطاقة الموجودة ضمن طبقة كروية حجمها $4\pi r^2 dr$ في الحالتين $r < R$ و $r > R$

c- احسب الطاقة الكلية بتكامل الصيغة التي حصلت عليها في الطلب السابق وأثبت أنها تساوي $u = \frac{3kQ^2}{5R}$





الباب الثالث

أنصافه النواقل والليزر

Semiconductors
and Laser



أولاً

أنصاف النواقل

Semiconductors





تقديم

يتضمن هذا الفصل عرضاً موجزاً ومبسّطاً لبعض المواضيع في فيزياء أنصاف النواقل، التي تساعد طلاب الهندسة الكهربائية والميكانيكية على فهم بعض الظواهر الفيزيائية والاستفادة من هذه المعلومات في دراستهم الجامعية والتطبيقات العملية .

تتواجد المادة في الطبيعة في ثلاثة حالات: الغازي والسائل والصلب، ففي الحالة الغازية يكون البعد بين الجزيئات المتجاورة كبيراً بالنسبة لقطر الجزيء ويكون التأثير المتبادل فيما بينهم ضعيفاً . أما في السوائل أو الأجسام الصلبة فتكون الجزيئات فيها أكثر تقارباً فيما بينها من تقارب الغاز ويحدث فيما بينها تأثيرات متبادلة تؤدي إلى قوى رابطة فيما بين الجزيئات من رتبة القوى التي تربط الذرات فيما بينها .

إذا بردنا سائل ماء، تبردأ بطيئاً بحيث تنقص طاقة الجزيئة الحركية تناقصاً تدريجياً، فإن جزيئات السائل تتجمع وترتب على شكل بلورة منتظمة الصفوف تُعرف باسم الشبكة البلورية، أما إذا بردنا السائل تبردأ سريعاً، فإن الجزيئات تتجمع وتتصلب لتشكّل جسماً صلباً عديم الشكل البلوري في بنيته، ولا تتشكل بلورات منتظمة كما في الحالة الأولى أي عديم الشكل البلوري (Amorphe). وأبسط مثال على ذلك هو الزجاج.

إن بعض الأجسام الصلبة تتبلور على شكل متعدد البلورات (polycrystalline)، إذ يتألف من العديد من بلورات وحيدة الشكل، وتتميز البلورة الوحيدة الشكل بالتناظر والإنتظام في بنيتها ويتكرر حدوثها في كامل البلورة في الجسم البلوري، لهذا يطلق على أصغر واحدة منها من عدة أنواع تتوقف على ترتيب الذرات فيها ونذكر منها:

1- الشبكة المكعبة البسيطة (SC) Simple Cubic .

2- الشبكة المكعبة المركزية (BCC) Body-centered cubic وتعني وجود ذرة

في مركز المكعب مثل: (Ba) ، (Li) ، (Fe) ، (Na) ، (Mo).

3- الشبكة المكعبة مركزية الوجوه (FCC) Face-centered cubic وتعني وجود

ذرة في مركز كل وجه من وجوه المكعب مثل: (Ag) ، (Au) ، (Al) ، (Ca) ، (Cu).

4- الشبكات السداسية (hcp) hexagonal close-packed مثل: (Be) ، (Cd) ،

(Ce) ، (Mg) ، (Zn).

1-1 المعادن والعوازل وأنصاف النواقل:

Metals, Insulators and Semiconductors

إنّ الإلكترونات الجسم الصلب تتوزع على مستويات من الطاقة، وكل سوية ذرية قد تنشطر إلى N سوية فرعية متقاربة، حيث N عدد الذرات في الجسم الصلب، ولكن بما أن N كبيرة جداً، فإنّ السويات الفرعية تكون متقاربة من بعضها للغاية، لدرجة أنّه يمكن اعتبارها مستمرة وتشكل مجالاً يدعى عصابة الطاقة (Energy band).

إنّ أكثر لحقل البلورة يقع على الإلكترونات التكافؤ، ولهذا تكون عصابات الطاقة التي تشكلها هذه الإلكترونات أعرض العصابات، وذلك بعكس الإلكترونات الداخلية التي لا تتأثر إلا قليلاً بوجود الذرات المجاورة، وتبقى بالتالي عصابات طاقتها ضيقة.

تفصل بين عصابات الطاقة المسموحة (المقابلة للسويات الذرية) بمحالات ممنوعة، لا يمكن للإلكترونات أن تحتلها، تدعى بالعصابات الممنوعة (Forbidden bands) أو

بفواصل الطاقة (energy gaps). وهكذا فإنّ طيف الطاقة في الجسم الصلب يتألف من

مجموعة من عصابات الطاقة تفصل بينها فواصل طاقة لا يمكن أن تتواجد فيها

الإلكترونات، ويشكل هذا المفهوم أحد الخواص الرئيسية للأجسام الصلبة.

تقسم الأجسام الصلبة إلى صنفين أساسيين: المعادن (النواقل) والعوازل، فالمعدن

هو الجسم الصلب الذي يجري فيه تيار كهربائي، إذا طبق عليه حقل كهربائي، وبالعكس من ذلك، لا يؤدي تطبيق الحقل الكهربائي على العازل إلى مرور تيار كهربائي فيه. ويمكننا التمييز بين هذين الصنفين على أساس نظرية عصابات الطاقة، حيث أنّ بعض العصابات سيكون مملوءاً تماماً، بينما يمكن لبعضها الآخر أن يكون مملوءاً

بشكل جزئي فقط، وهذا ما يميز النواقل عن العوازل. فالجسم الصلب يسلك سلوك المعدن فقط إذا كانت بعض عصاباته مملوءة جزئياً، وسبب ذلك أن العصابة المملوءة تماماً لا يمكن أن تنقل التيار الكهربائي حتى بوجود حقل كهربائي.

هناك مواد تقع في موقع وسط بين المعادن والعوازل. فإذا كان الفاصل بين عصابة التكافؤ والعصابة التي فوقها مباشرة صغيراً، كان بإمكان الإلكترونات أن تتهيج حرارياً وتنتقل من العصابة الأولى إلى الثانية: وتصبح كلتا العصابتين بهذا الشكل مملوءتين جزئياً فقط. وتسماهمان في النقل الكهربائي. هذه المواد هي أنصاف النواقل (semiconductors). مثال هذه المواد: السيليكون Si، والجرمانيوم Ge اللذان يبلغ فاصل الطاقة في أولهما حوالي 1.1 eV وفي الثاني 0.7 eV وهي فواصل صغيرة إذا ما قورنت بفاصل الطاقة في الماس الذي يبلغ أكثر من 5 eV، لذلك يعتبر الماس من العوازل الجيدة. وبشكل تقريبي، نقول أن سلوك المادة يكون كسلوك نصف الناقل في درجة الحرارة العادية حين يكون فاصل الطاقة أقل من 2 eV.

إن ناقلية أنصاف النواقل صغيرة جداً بالمقارنة مع ناقلية المعادن، لكنها أكبر بعدة مرات من ناقلية العوازل. وهذا ما يبرر تصنيف أنصاف النواقل في صنف ثالث، بالرغم أنها في الواقع، عوازل في درجات الحرارة المنخفضة جداً. ويمكن القول أن بلورة نصف الناقل، نعتبرها كاملة إذا كانت خالية من العيوب ونقية تماماً إذا كانت خالية من الشوائب، فهي عازلة تماماً في درجة الصفر المطلق. إلا أن وجود العيوب البلورية وبعض الذرات الشائبة، الذي لا بد منه، يشوش الدورية الكاملة لكمون البلورة، وهذا يؤدي بدوره إلى وجود مستويات طاقة إضافية ضمن فاصل الطاقة بين عصابتي التكافؤ والنقل، بحيث أن تهيج الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى مستويات العيوب غير المشغولة. أو في مستويات العيوب المشغولة إلى عصابة النقل يؤدي إلى ظهور عصابات طاقة غير مملوءة تماماً (عصابة التكافؤ أو عصابة النقل) مما يجعل النقل الكهربائي ممكناً حتى في درجات الحرارة المنخفضة.

2-1 البنية البلورية والروابط في أنصاف النواقل

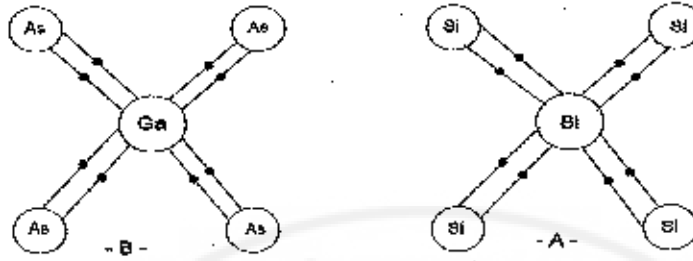
Crystal structure and banding in the SC.

تضم أنصاف النواقل عدداً كبيراً من المواد ذات الخواص الفيزيائية والكيميائية المختلفة جداً وتُصنّف هذه المواد وفقاً لخواصها ولوقوعها في جدول التصنيف الدوري للعناصر، وتعتبر أنصاف نواقل المجموعة IV [الماس (C) والسيلكون (Si) والجرمانيوم (Ge) والقصدير (Sn)] الصنف المعروف بشكل أفضل من غيره، وقد درست بشكل مفصل وعلى الأخص Si و Ge.

تبلور العناصر نصف الناقلة كلها وفق بنية الماس، التي تتميز بأن لها شبكة مكعبة مركزية الوجوه (Fcc)، ذات قاعدة مولفة من ذرتين متماثلتين وبأن كل ذرة فيها محاطة بأربع ذرات مجاورة تقع على رؤوس رباعي وجوه منتظم.

إن الروابط بين ذرات أنصاف نواقل المجموعة IV هي روابط تكافؤية، بحيث أنها تتألف من إلكترونين سبينهما متعاكسان وواقعان تقريباً في منتصف المسافة على الخط الواصل بين ذرتين، ففي الشكل (A-1-3) كل واحدة من الروابط الأربع التي تصل ذرة السيلكون بجاراتها هي رابطة تكافؤية بإلكترونين، حيث تساهم كل ذرة من الذرات المحيطة بالإلكترون واحد في الرابطة.

هناك صنف آخر هام من أنصاف النواقل هو مجموعة المركبات (III-V)، حيث كل منها يحتوي على عنصرين أحدهما من المجموعة الثالثة والآخر من المجموعة الخامسة من جدول مندلييف للعناصر. وأهم هذه المركبات نصف الناقلة هي: Ga P، Ga As، Ga Sb، In Sb، In As، تبلور هذه المواد وفق بنية كبريت التوتياء، وهي بنية الماس ذاتها، إلا أن الذرتين المشكلتين لقاعدة الشبكة مختلفتان هنا، ففي المركب Ga As تتألف قاعدة الشبكة Fcc من ذرتين هما Ga و As. وبسبب هذه البنية فإن كل ذرة تكون محاطة بأربع ذرات من النوع الآخر. وهذه تقع على رؤوس رباعي وجوه منتظم، كما هو مبين بالشكل (B-1-3).



الشكل (1 - 3)

والروابط في هذه المركبات III-V هي أيضاً تكافؤية حيث أن الإلكترونات الثمانية اللازمة من أجل الروابط الأربعة تؤمنها الذرتان من النوعين المختلفين، فالذرة الثلاثية التكافؤ تساهم بالإلكتروناتها التكافؤية الثلاثة والذرة الخماسية بالإلكتروناتها الخمسة.

3 - 1 البنية المبسطة لعصابات الطاقة Simplified Energy Band Structure

ذكرنا سابقاً أن نصف الناقل هو الجسم الصلب الذي تكون أعلى عصابة مشغولة فيه، عصابة التكافؤ (valence band)، مملوءة تماماً في الدرجة $T = 0^\circ K$ ، لكن الفاصل الممنوع فوق هذه العصابة صغير. بحيث أن الإلكترونات يمكن أن تتهيج حرارياً، في درجة حرارة الغرفة وتنتقل من عصابة التكافؤ إلى العصابة المسموحة التي فوقها والمسماة عصابة النقل (conduction band)، وبشكل عام يكون عدد الإلكترونات المثيجة في درجة الحرارة العادية، كبيراً عندما يكون فاصل الطاقة E_g ، أقل من 2 eV. وتنصف المادة عندئذٍ كنصف ناقل. أما عندما يكون هذا الفاصل أكبر من 2 eV، فيكون عدد الإلكترونات المثيجة مهماً، وتكون المادة عازلة. حين تتهيج الإلكترونات عبر فاصل الطاقة E_g ، يصبح قعر عصابة النقل E_c مشغولاً بالإلكترونات، كما تصبح قمة عصابة التكافؤ E_v مشغولة بالثقوب، ونتيجة لذلك تصبح كلتا العصابتين مملوءتين جزئياً وقادرتين على نقل التيار فيما لو طبق حقل كهربائي. إن ناقلية أنصاف النواقل صغيرة

بالمقارنة مع ناقلية المعادن بسبب كون عدد الإلكترونات والثغوب المشتركة صغيراً، إلا أنها مع ذلك، كافية للأغراض العملية.

إن أبسط بنية لعصابات الطاقة في أنصاف النواقل هي تلك الممثلة على الشكل (3)

(2-)، ونعبر عن الطاقة في عصابتي النقل والتكافؤ بالعلاقيتين:

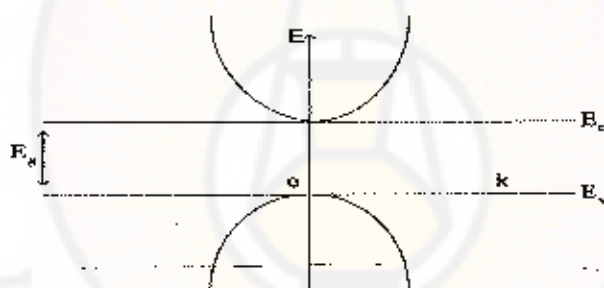
$$E_v = E_g + \frac{\hbar^2 \cdot k^2}{2 m_e}$$

$$E_v = - \frac{\hbar^2 \cdot k^2}{2 m_h} \quad (2)$$

حيث، k : الشعاع الموجي.

m_h ، m_e : الكتلة الفعالة للإلكترون وللتقوب.

E_g : فاصل الطاقة.



شكل (3-2)

لقد اختيرت سوية الطاقة صفر هنا، بحيث تنطبق على قمة عصابة التكافؤ E_v ،

واستخدمنا هذا الشكل النموذجي للعصابة، لوصف عصابة النقل E_c . لأننا

مهتمون في مجال الطاقة القريب من قعر هذه العصابة.

نلاحظ في العلاقتين 1 و 2 أن الوسطاء الأساسية لبنية العصابات هما الكتلتان

الفعالتان للإلكترونات والثغوب m_e ، m_h وفاصل الطاقة E_g . يبين الجدول (1-3)

هذه المقادير من أجل مختلف أنصاف النواقل. لاحظ أن الكتل تختلف كثيراً عن كتلة الإلكترون الحر، وهي غالباً أصغر منها بكثير. يتغير عرض فاصل الطاقة في أنصاف النواقل مع درجة الحرارة بسبب التمدد الحراري وتغير ثابتة الشبكة، كما يؤدي إلى تغير الجدول (1 - 3) ثوابت بنية عصابات أنصاف النواقل (في درجة الحرارة العادية)

Group	Crystal	Effective mass , m/m_0		
		E_g, ev	Electrons	Holes
IV	C	5.3		
	Si	1.1	$m_L = 0.97, m_t = 0.19$	0.5 , 0.16
	Ge	0.7	$m_L = 1.6, m_t = 0.08$	0.3 , 0.04
	Sn	0.08		
III - V	GaAs	1.4	0.07	0.09
	GaP	2.3	0.12	0.50
	GaSb	0.7	0.20	0.39
	InAs	0.4	0.03	0.02
	InP	1.3	0.07	0.69
	InSb	0.2	0.01	0.18
II - VI	CdS	2.6	0.21	0.80
	CdSe	1.7	0.13	0.45
	CdTe	1.5	0.14	0.37
	ZnS	3.6	0.40	5.41
	ZnSe	2.7	0.10	0.60
	ZnTe	2.3	0.10	0.60
IV - VI	PbS	0.4	0.25	0.25
	PbSe	0.3	0.33	0.34
	PbTe	0.3	0.22	0.29

بنية العصابات. إلا أن هذا التغير في العادة طفيف، ففي السيلكون Si يتغير E_g من 1.17 ev في الدرجة $T = 0^\circ \text{K}$ إلى 1.14 ev في الدرجة $T = 300^\circ \text{K}$.

ملاحظة: حيث أن m_e ، m_h تدلان على الكتل الطولية (Longitudinal) والعرضية (transversal) لسطوح الطاقة المقطع ناقصة. في حال وجود قيمتين لكثافة الثقب تشير هاتان القيمتان إلى الثقب الثقيل والثقب الخفيف.

4-1 الانتقالات المباشرة وغير المباشرة في أنصاف النواقل:

Direct transition and Indirect transition in Semiconductors

يمكن أن نوضح معنى الانتقالات المباشرة وغير المباشرة في أنصاف النواقل من خلال رسم مخطط الطاقة بدلالة الشعاع الموجي (E, k) والذي يصف انتقال الإلكترونات في عصابة النقل والثقوب في عصابة التكافؤ لنصف ناقل. يوضح الشكل (3 - A)، البنية العصبية للـ Ga As، والانتقال المباشر فيها، وبمثل الشكل (3 - 3 - B)، البنية العصبية للـ Si، والانتقال غير المباشر فيها.

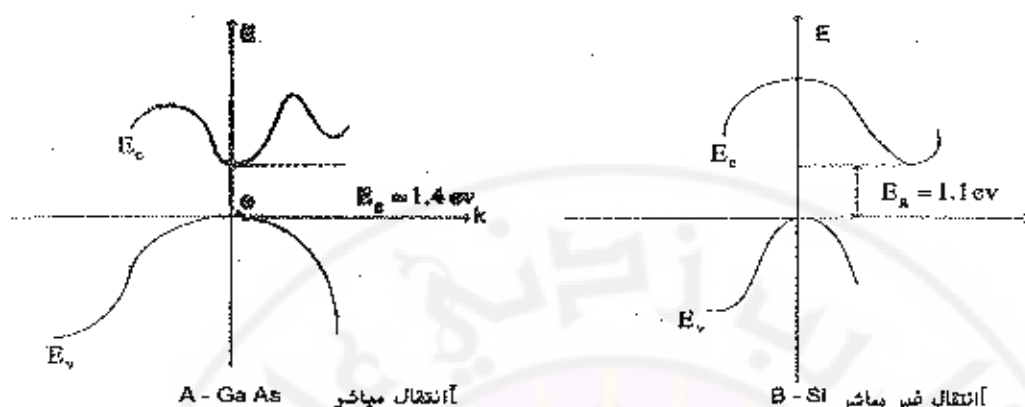
ففي الحالة الأولى، نلاحظ أن النهاية الصغرى لعصابة النقل E_c والنهاية العظمى لعصابة التكافؤ E_v واقعيتين في نفس النقطة من منطقة بريلوين BRILLOUIN zone أي أن لهما قيمة واحدة لـ k ($k=0$). وبالتالي فإن الإلكترون الذي يحرص من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل، يستطيع أن ينتقل دون أن يؤدي ذلك إلى تغير في قيمة الشعاع الموجي k .

إن انتقالاً كهذا: ندعوه انتقالاً مباشراً وأنصاف النواقل التي تتمتع بذلك،

تدعى أنصاف نواقل مباشرة. أما في الحالة الثانية (3 - 3 - B)، نلاحظ أن النهاية

العظمى لعصابة التكافؤ E_v والنهاية الصغرى لعصابة النقل E_c ، غير واقعيتين في نفس منطقة بريلوين، أي أن النهاية العظمى لـ E_v تقع عند قيمة لـ k تختلف عن القيمة المقابلة للنهاية الصغرى في E_c ، وهكذا فإن الانتقال من نقطة النهاية العظمى في عصابة التكافؤ إلى نقطة النهاية الصغرى في عصابة النقل يتطلب تغيراً في قيمة الشعاع k . إن انتقالاً كهذا ندعوه انتقالاً غير مباشر، وأنصاف النواقل التي تملك مثل هذه الانتقالات تدعى أنصاف النواقل غير المباشرة. وهكذا نرى أنه يوجد نوعان من

عصابات الطاقة لأنصاف النواقل: مباشرة وغير مباشرة .



شكل (3-3)

ففي نصف الناقل المباشر، يستطيع إلكترون في عصابة النقل E_c أن يهبط إلى حالة فارغة في عصابة التكافؤ E_v ، ناشراً فرق الطاقة E_g على هيئة فوتون من الضوء، الذي يتضمن تغيراً في k ، إلى الشبكة البلورية على شكل حرارة بدلاً من فوتون صادر.

إن هذا الفرق بين أنصاف النواقل ذات الانتقالات المباشرة وغير المباشرة، مهم جداً في تحديد الخواص البنيوية والإلكترونية لأنصاف النواقل. فمن أجل الأجهزة الضوئية التي تتطلب خرجاً ضوئياً، على سبيل المثال، أجهزة الليزر من أنصاف النواقل، نختار أنصاف نواقل انتقالات مباشرة من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ أو أنصاف نواقل ذات انتقالات شاقولية بين مستويات العيب.

إن الفرق في الطاقة بين النهاية الصغرى لعصابة النقل E_c والنهاية العظمى لعصابة التكافؤ E_v ، يدعى بشغرة الطاقة E_g ويعطى بالعلاقة:

$$E_g = E_c(\min) - E_v(\max) \quad (3)$$

ولما كانت النهاية الصغرى لعصابة النقل والنهاية العظمى لعصابة التكافؤ تحدثان

عند نقطتين مختلفتين من القطاع في السيليكون، لذا يقال إنَّ للسيليكون ثغرة طاقة صغرى غير مباشرة. لو وقعت النهاية الصغرى لعصابة النقل والنهية العظمى لعصابة التكافؤ عند نقطة واحدة من القطاع لقليل عن نصف الناقل إلى ذو ثغرة طاقة صغرى مباشرة نذكر: اثنونيد الإنديوم (In sb) وكبريت الرصاص (pb s).

5-1 تركيز حوامل الشحنات في نصف الناقل الذاتي:

Carrier concentration in intrinsic semiconductor

يطلق اسم حوامل الشحنات (charge carriers) أو الحوامل (carriers) في أنصاف النواقل، على الإلكترونات (electrons) والثقوب (holes) لأنها هي المسؤولة عن حمل التيار الكهربائي. ولعدد الحوامل الحرة (free carriers) أهمية كبيرة لأنه يحدد الناقلية الكهربائية لنصف الناقل.

إنَّ كل إلكترون يثار حرارياً إلى عصابة النقل، في بلورة نصف ناقل نقية، يولد ثقباً في عصابة التكافؤ، لذلك نتكلم عن تولد أزواج من الإلكترونات والثقوب $(e^- - h^+)$. يكون عدد الإلكترونات (n) في هذه الحالة مساوياً بالضرورة عدد الثقوب (p). ويدعى نصف الناقل الذي يتحقق فيه هذا الشيء بنصف الناقل الذاتي. ويعرف بالشرط:

$$n = p \quad \Leftrightarrow \quad \text{Intrinsic Semiconductors} \quad (4)$$

حيث n تمثل كثافة الإلكترونات، ومثل p كثافة الثقوب.

من أجل حساب تركيز حوامل الشحنات في نصف ناقل ذاتي، ننظر أولاً إلى تابع توزيع فرمي - ديراك (Fermi-Dirac) $F(E)$ والمعطى بالعلاقة:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} \quad (5)$$

حيث، $F(E)$: هو تابع فرمي ويمثل احتمال اشغال حالة الطاقة E بحسيم .

E_f : هي الطاقة المحسوبة بدءاً من أسفل العصابة.

E_f : هي طاقة فرمي وتسمى في أنصاف النواقل بسوية فرمي.

k : ثابت بولتزمان.

فإذا كان عدد الإلكترونات المثارة إلى عصابة النقل صغيراً، فإنه يكون

$(E - E_f) \gg kT$ وتصبح قيمة تابع فرمي $F(E) \ll 1$ ، ويقال عن نصف

الناقل في هذه الحالة، أنه غير متشكس أو غير منحل، ويمكن تقريب تابع فرمي إلى

العلاقة:

$$F(E) \approx \exp[-(E - E_f)/kT] \quad (6)$$

أما إذا كان عدد الإلكترونات كبيراً بقدر كاف، فإن العبارة $F(E) \ll 1$ تصبح غير

عققة، والتقريب في العلاقة 6 لا يغدو صالحاً، ويقال عن نصف الناقل في هذه الحالة أنه

متشكس أو منحل.

باستخدام تابع فرمي في العلاقة 5 وبعمليات إحصائية رياضية. نحصل على:

تركيز عوامل الشحنات للإلكترونات n وللثقوب p بالعلاقتين:

$$n = N_c \cdot e^{\frac{(E_f - E_g)}{kT}} = N_c \exp\left[\frac{(E_f - E_g)}{kT}\right] \quad (7)$$

$$p = N_v \cdot e^{\frac{-E_f}{kT}} = N_v \exp\left(\frac{-E_f}{kT}\right) \quad (8)$$

حيث أن N_v و N_c معطاة بالعلاقات:

$$N_c = 2 \left(\frac{m_e \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{m_h \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

إذا ضربنا قيمتي n و p المعطاة بالعلاقتين 7 و 8 ببعضهما البعض نحصل على:

$$n \cdot p = 4 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^3 \cdot (m_e \cdot m_h)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \frac{-E_g}{kT} \quad (11)$$

تبين العلاقة (11)، بأن الجداء $n.p$ لا يتعلق بطاقة فيرمي في نصف ناقل غير متكسري. وله قيمة ثابتة عند درجة حرارة معينة. من أجل نصف ناقل ذاتي يكون لدينا:

$$n \approx p = n_i = p_i \Rightarrow n.p = n_i^2 = p_i^2 \quad (12)$$

إن قيمة n_i^2 في الدرجة $300^\circ K$ ، في السيليكون، تساوي $2.2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-6}$ ، محسوبة باستخدام القيم التالية:

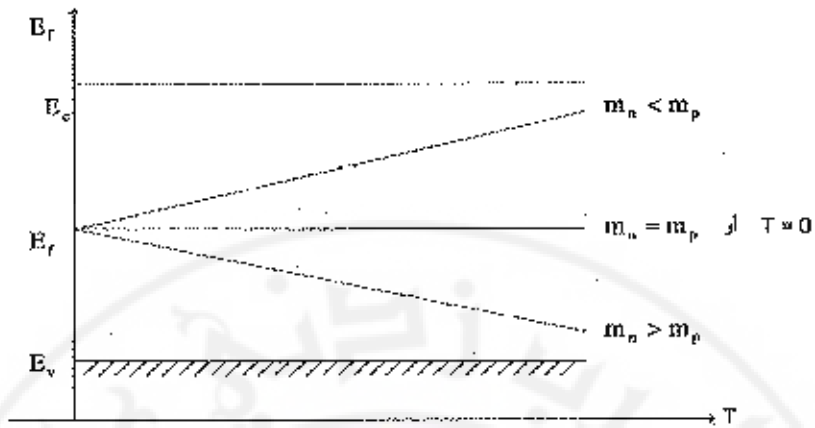
$$m_p = 0.49 m_0, \quad m_e = 0.26 m_0$$

حيث m_0 كتلة الإلكترون الحر، للكتلتين الفعاليتين للإلكترون والكهرون والتعب. وفي حالة نصف الناقل الذاتي، أي $n = p$ ، وبالإعتماد على العلاقات 7، 8، 9، 10 نحصل على موضع سوية فرمي:

$$E_f = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \cdot \ln \frac{m_p}{m_e} \quad (13)$$

نلاحظ من العلاقة الأخيرة (13)، أن سوية فرمي تابعة للكتلتين الفعاليتين m_p ، m_e لحاملات الشحنة (ولدرجة حرارة T). فإذا كان $m_e = m_p$ فإن $E_f = \frac{1}{2} E_g$ وتكون سوية فرمي في منتصف ثغرة الطاقة تماماً، وعندما $T = 0$ نجد أيضاً أن سوية فرمي تقع في منتصف القطع المظفور أيضاً.

يبين الشكل (3-4) تغيرات E_f مع درجة الحرارة والنسبة بين الكتلتين الفعاليتين. أما إذا كانت $m_p > m_e$ أو $m_p < m_e$ ، فإن الحد الثاني في العلاقة (13) يكون موجباً أو سالباً، وبالتالي فإن سوية فرمي تقع في مكان فوق منتصف ثغرة الطاقة أو أسفل ثغرة الطاقة. كما هو موضح بالشكل (3-4).



الشكل (3-4)

6-1 أنصاف النواقل المشوبة Doped Semiconductors :

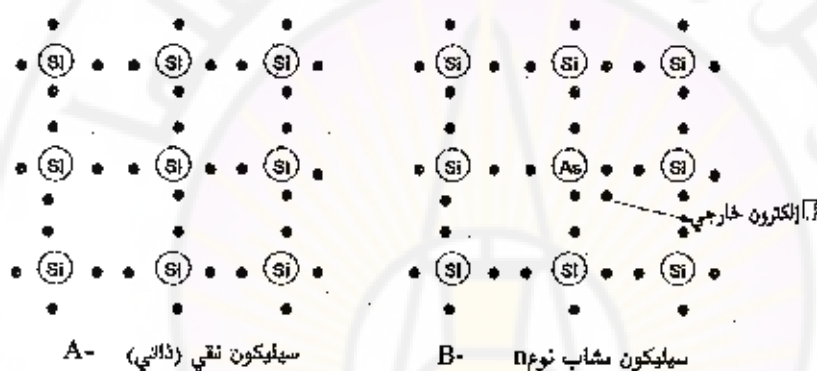
ينصب إهتمامنا في الحالة العامة ، ومن أجل التطبيقات على الأجهزة الإلكترونية، على أنصاف النواقل غير الذاتية، أي تلك التي يكون تركيز الإلكترونات والثغوب فيها محكوماً بشوائب أضيفت بصورة اختيارية. تدعى أنصاف النواقل هذه، بأنصاف النواقل المشابه Extrinsic، ويتم الحصول على مثل هذه العينات بواسطة تطعيم (doping) نصف ناقل بالشوائب المناسبة.

يعتبر كلاً من السيليكون ($_{14}\text{Si}$) و الجرمانيوم ($_{32}\text{Ge}$) من أنصاف النواقل النموذجية المستخدمة في الصناعات الإلكترونية. إن كلاً من (Si) و (Ge) يحتوي على أربعة إلكترونات خارجية تستطيع أن تربط الذرات في شبكتها البلورية، وعند إدخال شوائب حماسية التكافؤ كالزرنيع (As) أو الفوسفور (P)، أو ثلاثية التكافؤ كالغاليوم (Ga) أو البورن (B) على نصف الناقل الذاتي، كـ Si أو Ge ، يصبح له سميات أساسية وهامة في الصناعات الإلكترونية. فنقول عندئذ أن نصف الناقل مشوب، وهنا نميز نوعان من أنصاف النواقل المشابه هما: النوع (n) (type n) والنوع (p) (type p).

A- نصف الناقل من النوع n:

لندخل في بلورة السيليكون ($_{14}\text{Si}$) نسبة ضئيلة من ذرات الزرنيع ($_{33}\text{As}$) الذي

تحتوي الذرة الواحدة منها على خمسة إلكترونات خارجية، كما في الشكل - 5 - 3 (B) فيتحرك الإلكترون الخامس منها حركة حرة (تقريباً)، تماماً مثلما تتحرك الإلكترونات الحرة في الناقل، ويصبح نصف الناقل المشاب هذه النسبة الضعيفة من الشوائب، ضعيف الناقلية لوجود هذا العدد القليل من الإلكترونات الخارجية في الزرنيخ. تدعى مثل هذه الشوائب بالمعطيات أو الماشحات، لأنها تسهم بإضافة إلكترونات حرة إلى البلورة، وهكذا فإن الشوائب في نصف الناقل، تسيطر على الناقلية بحيث يمكن أن نتحكم بدقة بوضع سوية طاقة الناقلية هذه.



الشكل (3 - 5)

ويسمى نوع البلورة المولفة من (Si) المشوب بالزرنيخ (As)، نصف ناقل نوع n (اختصاراً لكلمة negative) وذلك بسبب أن الإلكترونات فيه (سالبة الشحنة) هي المسؤولة عن مرور التيار الكهربائي.

B- نصف الناقل نوع P:

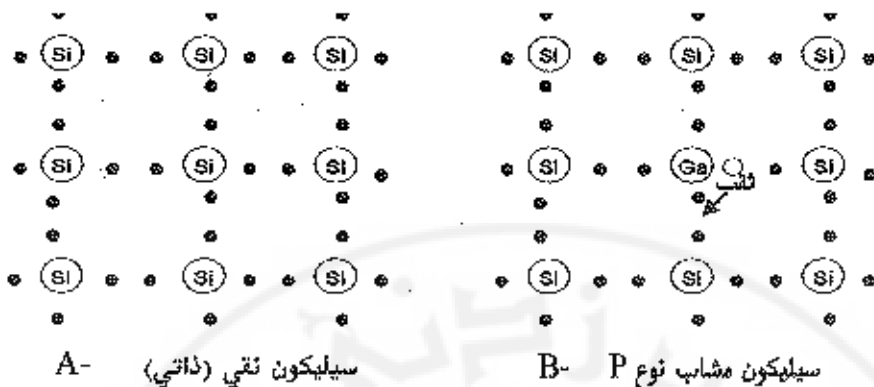
في هذه الحالة، ندخل في بلورة السيليكون ذرات ثلاثية التكافؤ مثل الغاليوم ($_{31}\text{Ga}$)، الذي تحتوي الذرة الواحدة منها على ثلاثة إلكترونات خارجية، كما هو مبين بالشكل (B - 6 - 3).

نلاحظ في بنية الشبكة البلورية للسيليكون، ثقباً مرتبطاً بذرة الغاليوم (Ga) وأن أحد الإلكترونات السيليكون المجاورة للثقب مباشرة، ينتقل إلى هذا الثقب يحتل مكانه، ولكنه بهذا الانتقال يترك وراءه فراغاً (ثقباً)، فينتقل إلكترون حر آخر من الإلكترونات الـ (Si) الخارجية الأربعة مجاور لهذا الفراغ (الثقب) ليملاً هذا الثقب (الذي تركه الإلكترون الأول) ولتصبح ذرة الـ (Si) معتدلة من جديد بالإلكترونات الأربعة. وهكذا تتكرر العملية بانتقال الثقوب والتي تعني انتقال الشحنات الموجبة لهذه الثقوب، بحيث أن الثقب الموجب يمثل فراغاً تركه أحد إلكترونات ذرة الـ (Si).

وبانتقال الثقوب يحدث انتقال للشحنات الكهربائية الموجبة في نصف الناقل من (Si) المشوب بالغاليوم (Ga)، تدعى مثل هذه الشوائب بالآخذات، ويسمى نوع البلورة المولفة من (Si) المشوب بالغاليوم، نصف ناقل نوع P (اختصاراً لكلمة Positive) وذلك بسبب أن الثقوب فيه (موجبة الشحنة) هي المسؤولة عن مرور التيار الكهربائي. وهكذا، فإن الشوائب في أنصاف النواقل المشوبة، تحدث حالات إضافية من

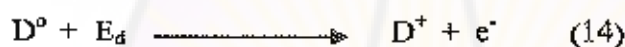
الطاقة بين منطقتي التكافؤ E_v والناقلية E_c ، كما هو مبين في الشكلين (7 - 3) و (8 - 3). فمن أجل نصف ناقل من النوع n، تكون سوية طاقة الشوائب الإضافية (المانحة) متوضعة قريباً جداً من المنطقة الناقلية E_c وتحتها مباشرة كما هو موضح بالشكل (7 - 3). إن مقدار الطاقة E_d لتحرير إلكترون من الذرة المانحة وتركه طليقاً في عصابة النقل يشكل ما نسميه، اسم طاقة تأيين المانحة أو المعطية.

إن قيم E_d من أجل مختلف الشوائب خماسية التكافؤ هي في حدود 0.01 eV في (Ge) وفي حدود 0.05 eV في الـ (Si)، ويطلق اسم سوية الماخذ (donor level) على السوية التي تتواجد فيها إلكترونات الشوائب المانحة. (donor level سوية المانح) يبين الشكل (7 - 3)، إلكترونات مقيداً (- • -) إلى ذرته المانحة. حيث سوية طاقته تقع تحت طاقة النهاية الصغرى لعصابة النقل بمقدار E_d .

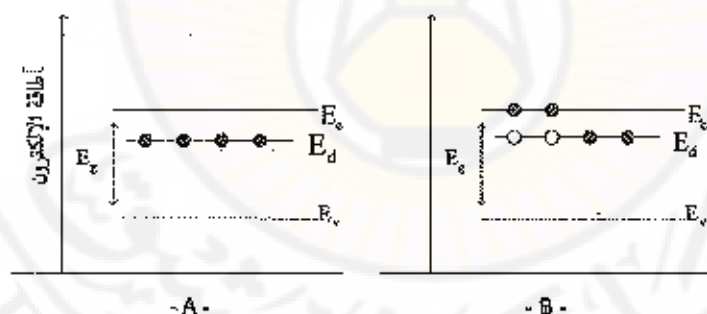


الشكل (3-6)

وبالتالي فإن طاقة تأيين للذرة المانحة، سوف يحرض الإلكترون للإنتقال إلى سوية عصابة النقل E_c . الشكل (3-7-B). حيث تبقى في ثغرة الطاقة حالة فارغة للمانحة (-----) ويمكن أن نلخص العملية:



حيث D^0 هي الشائبة المانحة المعتدلة، E_d هي طاقة تأيين الإلكترون e^- و D^+ هي المانحة المتأينة ذات الشحنة الموجبة.



الشكل (3-7)

بالطريقة نفسها، نجد في نصف ناقل من النوع P، إن سوية طاقة الشوائب الآخذة متوضعة قريباً جداً من المنطقة المكافئة E_v وفوقها مباشرة (E_a) وتدعى سوية الآخذة (Acceptor level). إن قيم E_a ، طاقة تأيين الآخذة، من أجل الشوائب ثلاثية التكافؤ في

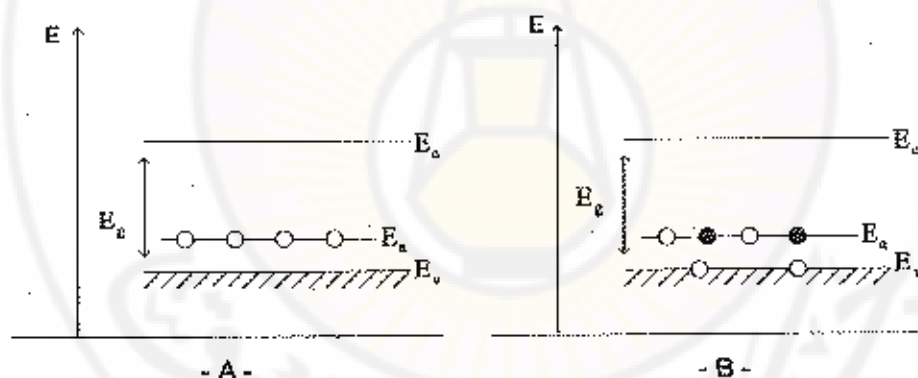
السيليكون تتراوح ما بين 0.016 eV و 0.065 eV أما في الجرمانيوم فهي حوالي 0.01 eV.

إن إضافة طاقة E_B تحفز إلكترونات من النهاية العظمى لعصابة التكافؤ E_v إلى سوية طاقة الآخذة تاركاً خلفه ثقباً حراً، حيث تلخص العملية بالعلاقة التالية:



حيث A^0 هي الآخذة المعتدلة، A^+ هي الآخذة المشحونة بشحنة سالبة، h^+ هي الثقب و E_B طاقة تأين الآخذ.

يبين الشكل (3-8-أ)، الثقب $(- \circ -)$ مقيداً إلى ذرة الآخذة عند طاقة E_B ، فوق النهاية العظمى لعصابة التكافؤ، حيث أن طاقة الثقب تزداد نحو الأسفل على مخطط طاقة الإلكترون، إن إضافة طاقة تأين E_B للآخذة ترفع الثقب $(- \circ -)$ إلى عصابة التكافؤ E_v كما هو مبين في الشكل (3-8-ب).



المكمل (3-8)

أو نقول أيضاً، إن إضافة طاقة E_B إلى نصف الناقل P يؤدي إلى نقل إلكترونات من منطقة التكافؤ E_v إلى سوية الآخذ، وخلق ثقباً، بينما هذه الإلكترونات تُخلّف وراءها ثقباً موجباً في منطقة التكافؤ، بحيث أن إلكترونات أخرى من E_v تنتقل إلى هذه الثقوب من جديد وتكرر هذه العملية بانتقال الثقوب.

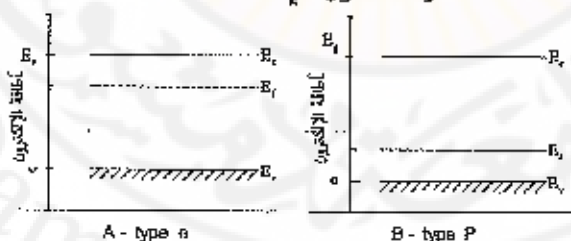
لقد ذكرنا أن مستويات طاقة المانحات والآخذات تقع في فاصل الطاقة، وليس في هذا أي تناقض مع ما سبق ذكره، من أن فاصل الطاقة هو مجال ممنوع ولا يمكن أن توجد فيه حالات إلكترونية، لأن هذا التأكيد يتعلق بالبلورة الكاملة. بينما مستويات طاقة الذرات المانحة والآخذة تتعلق بحالات ذرات شائبة بعيوب في البلورة.

7 - 1. مستوى فرمي في أنصاف النواقل المشوبة:

Fermi level in the Doped Semiconductors

نعطينا المعادلتان 7 و 8 تركيز الإلكترونات والثغوب P, n بدلالة مستوى فرمي E_F والوسطاء المختلفة لأنصاف الناقل.

لكن مستوى فرمي نفسها تتعلق بدرجة الحرارة وتركيز حوامل الشحنة. فوضعها يتغير بشدة عند إدخال الشوائب التي تشكل مستويات إضافية في المنطقة المحظورة. وهذا طبيعي ما دامت مستوى فرمي معين -توزع- الإلكترونات حسب حالتها الطاقية -فإدخالنا الشائبة، في نصف الناقل، يشكل، في ثغرة الطاقة، مستويات يمكن أن تتواجد عليها الإلكترونات والثغوب. وقد تبين أن مستوى فرمي E_F تكون أقرب إلى عصابة النقل E_c في نصف الناقل من النوع n ، أما في نصف الناقل من النوع P فإن هذه المستوى تكون أقرب إلى عصابة التكافؤ، كما هو مبين بالشكل (9 - 3). لقد أخذنا صفر طاقة الإلكترون، في الشكل، عند النهاية العظمى لعصابة التكافؤ، لذا فإن النهاية الصغرى لعصابة النقل تقع عند طاقة الثغرة المحظورة E_g .



الشكل (9 - 3)

8-1 زمن حياة الحامل في أنصاف النواقل:

عند إثارة أحد حوامل الشحنات إلى عصابة النقل E_c ، في نصف ناقل، فإنه سيعود في النهاية للإتحاد ويختفي بعد زمن يدعى زمن الحياة للحامل، وهذا الزمن يتعلق بمسار حركة الحامل، فيما إذا كانت إعادة الإتحاد مباشرة أو غير مباشرة عبر حالة متوسطة (مصيدة). ففي أنصاف النواقل، ذات ثغرات الطاقة المباشرة مثل (GaAs, InSb) تكون عملية الإتحاد مباشرة للإلكترون مع الثقب لإنتاج فوتون. أما في نصف الناقل ذات ثغرة الطاقة غير المباشرة مثل (Si, Ge)، فإن عملية إعادة الإتحاد تكون غير مباشرة، (عبر مصيدة) وبالتالي فإن إعادة الإتحاد مع ثقب تتم بإصدار فوتون لإبقاء المنحنية الموجبة محفوظة. ولهذا السبب نتوقع أن تكون أزمنة حياة الحوامل أطول في أنصاف النواقل غير المباشرة منها في المباشرة.

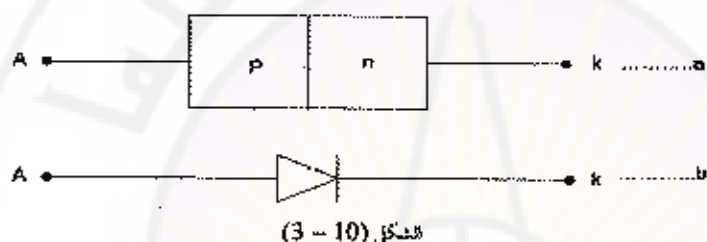
9-1 الوصلة P-n The P-n junction

تستخدم الوصلات (الديودات Diodes) والترانزستورات في الدارات الإلكترونية الحديثة، حيث صنعت منها دارات صغيرة الأبعاد، وصلت أبعادها حداً من الصغر بحيث أن دائرة مساحتها، ستمتر مربع واحد، تحتوي على مئات من الوصلات والترانزستورات والمقاومات وغير ذلك من أجزائها المكونة للدائرة الإلكترونية.

يطلق اسم الوصلة (p-n) على عينة نصف ناقلة من بلورة وحيدة جعلت فيها منطقتان إحداهما من النوع n والأخرى من النوع p، وهي عبارة عن منطقة بلورية واحدة طُعمَ جانبها بشكليْن مختلفين، فهي ليست قط مؤلفة من قطعتين مختلفتين على اتصال فيما بينهما، كما توحي التسمية بذلك، لأنه لا يمكن التوصل إلى الوصلة n-p، بخواصها المعروفة حالياً، إلا انطلاقاً من بلورة وحيدة بحيث تكون البنية البلورية مستمرة في المنطقتين n و p وفي منطقة الاتصال بينهما، ويستحيل الحصول على استمرار البنية البلورية ابتداء من قطعتين منفصلتين (n) و (p) فجعلان على اتصال فيما بينهما بأي شكل كان. ويبين الشكل (a - 10 - 3) رسماً توضيحياً للوصلة

(P - n) ويرمز له بالشكل (b - 10 - 3)، ويسمى القطب المتصل بنصف الناقل من النوع P بالمصعد (Anode - A) ويسمى القطب الآخر المتصل بنصف الناقل من النوع n بالمهبط (cathode - k).

إن أهم الخصائص الكهربائية للوصلة P - n، هو نشوء فرق في الكمون V_0 بين طرفيها وحقل كهربائي داخلي $\vec{E}$ في منطقة التماس d. فعند تشكيل الوصلة (P - n)، الشكل (A - 11 - 3)، تبدأ الإلكترونات بالانتشار، عبر الوصلة، من المنطقة n إلى المنطقة P، وبالمثل تنتشر الثقوب من P إلى n، وذلك بسبب

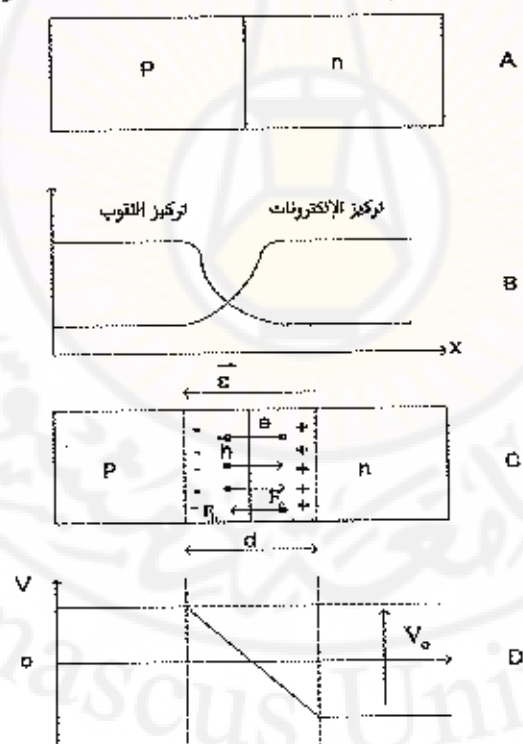


وجود تدرج كبير في التركيز عند الوصلة بالنسبة لكل من الإلكترونات والثقوب، الشكل (B - 11 - 3)، وتمثل الأسهم المتصلة انتشار الإلكترونات والثقوب، الشكل (3 - C - 11). وينشأ، بسبب هذا الانتشار للشحنات في منطقة التماس d، شحنتان فراغيتان متعاكستان بالإشارة من الذرات المتأينة، لذلك تدعى بمنطقة الشحنة الفراغية أو شحنة الفضاء (space - Charge)، وبما أنها شبه خالية من الحوامل الحرة فهي تدعى كذلك بمنطقة النفاذ (depletion layer). ففي هذه المنطقة تظهر شحنة موجبة في المنطقة n تظهر شحنة سالبة في المنطقة (P) تكونها الإلكترونات التي جاءت إليها. ونتيجة لذلك، ينشأ في منطقة التماس فرق في الكمون (V_0) يسمى حاجز الكمون، الشكل (D - 11 - 3).

إن وجود فرق في الكمون في المنطقة (d)، هو دليل على نشوء حقل كهربائي داخلي فيها $\vec{E}$. يتجه من المنطقة (n) إلى المنطقة (P) ويمنع استمرار انتشار

الحوامل ويحافظ على انفصال الشحنتين الفراغيتين عن بعضهما البعض. ويتولد أيضاً، عن هذا الحقل، قوة جهتها تعاكس حركة الإلكترونات والثقوب على السواء وتسبب هذه القوة انتقالاً للثقوب من المنطقة (n) إلى المنطقة (P) وانتقالاً للإلكترونات من المنطقة (P) إلى المنطقة (n) يسمى الانتقال الحراري. وأشير إليه بالشك (C - 11 - 3) بأسهم منعكسة في منطقة التماس، أما خارج منطقة التماس، فلا يتأثر تركيز الحوامل بالوصلة، بل يقيان ثابتين، ويكون الحقل بالتالي معدوماً بسبب الإعتدال الكهربائي.

عند درجة حرارة معينة (T)، تكون الوصلة (P - n) في حالة توازن ديناميكي في كل لحظة، إذ ينتشر ضمن منطقة التماس عدد معين عن الثقوب والإلكترونات في اتجاهين متعاكسين وينحرف بتأثير الحقل الكهربائي عدد مساو لها من الثقوب والإلكترونات في اتجاهين متعاكسين لاتجاه الانتشار.

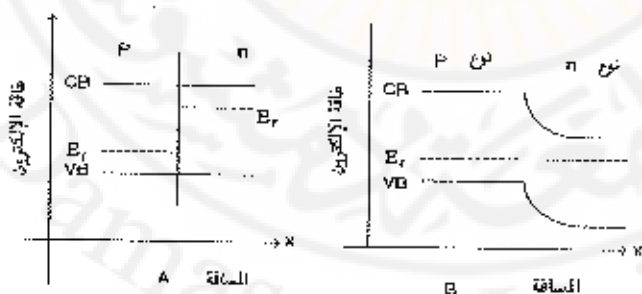


المشكل (11 - 3)

يمكن الحصول على تيار كهربائي من الوصلة ($P - n$). عند وضعها في دائرة كهربائية. إذا تعرضت للضوء (لأشعة الشمس مثلاً). لأن الفوتونات الضوئية، ذي الطاقة المناسبة، عندما تسقط على الوصلة، يتم امتصاصها وتولد، مقابل ذلك، أزواجاً من الإلكترونات والثقوب في منطقة الوصلة، حيث يقوم الحقل الكهربائي الداخلي E إلى دفع الثقوب إلى المنطقة P ودفع الإلكترونات إلى المنطقة n ، وهكذا يجري تيار في الدارة من n نحو P ، أي أن طاقة الفوتون تحولت في الوصلة إلى طاقة كهربائية، وهذا هو مبدأ عمل الخلايا الشمسية (solar cells) التي تُستخدم لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية.

1-9-1 سويتا فرمي في الوصلة $P - n$ Fermi Levels in the $P - n$

يبين الشكل (A - 12 - 3)، موضع سويتا فرمي في نصفي الناقلين من النوع P والنوع n ، في حالة التماس وقبل بلوغ التوازن. ففي نصف الناقل من النوع P تكون سويتا فرمي قريبة من عصابة التكافؤ، بينما تكون هذه السوية قريبة من عصابة النقل فينصف الناقل من النوع n ، أما في حالة التوازن، كما هو مبين بالشكل (B - 12 - 3) فإن سويتا فرمي تصبح على استقامة واحدة، وهذه العملية مكافئة لإنقاص طاقة الإلكترونات في الجانب n من الوصلة.



الشكل (3 - 12) A

نلاحظ من الشكلين (3 - 12 - A - B) إنَّ الانزياح في الطاقة بين الجانب n والجانب P، عندما تتساوى سويتا فرمي، ليس إلا الفرق بين طاقتي فرمي على الجانبين. فإذا فرضنا أنَّ $E_F(n)$ طاقة فرمي في الجانب (n) و $E_F(p)$ طاقة فرمي في الجانب P، فإنَّ انزياح الطاقة ليس إلا $E_F(n) - E_F(P)$ ، وهذا الانزياح للطاقة بين الجانبين يمثل ارتفاع حاجز الكمون qV_0 بينهما، وتكون لدينا العلاقة:

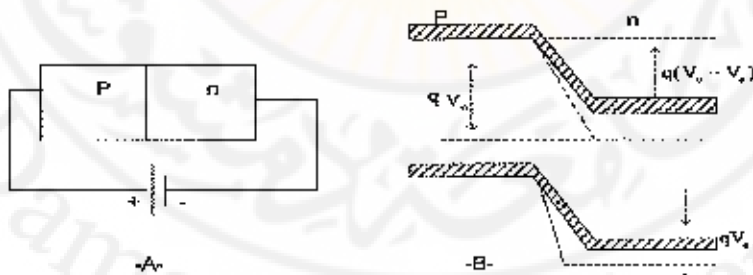
$$qV_0 = E_F(n) - E_F(P) \quad (16)$$

حيث V_0 هو كمون التماس. وتبين العلاقة 16 أنَّ كمون التماس هو الفرق بين طاقتي سوية فرمي في الجانبين مقسوماً على شحنة الإلكترون.

2 - 9 - 1 التغذية الأمامية والعكسية للوصلة P - n

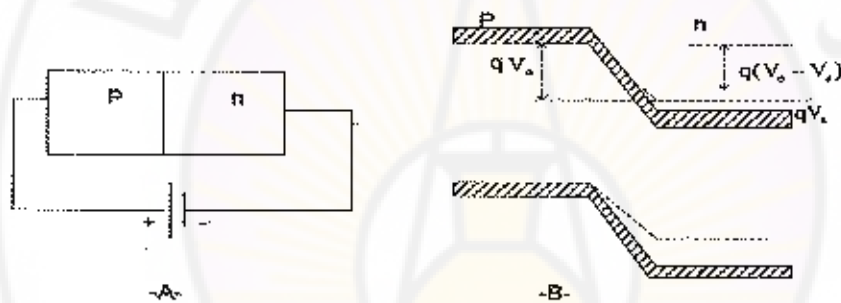
Forward bias and Reverse bias of the junction P - n

إذا طبقنا فرقاً في الكمون مستمراً (V_a) على طرفي الوصلة (P - n) بحيث يكون القطب الموجب متصلاً بالطرف (P) والقطب السالب بالطرف (n)، تدعى طريقة الوصل هذه بالتغذية المباشرة أو الأمامية، كما هو مبين بالشكل (3 - 13 - A). فإنَّ الكمون الخارجي V_a يعاكس فرق الكمون الداخلي للوصلة V_0 ، ويصبح فرق الكمون بين طرفي الوصلة P و n يساوي $(V_0 - V_a)$ وينقص ارتفاع حاجز الطاقة إلى القيمة $q(V_0 - V_a)$ ، كما هو مبين بالشكل (3 - 13 - B).



شكل (3 - 13)

كما يفسر جريان التيار في الوصلة (P - n)، فإذا كان الجهد كبيراً ومن رتبة 0.3 V بالنسبة للجرمانيوم Ge، ومن رتبة 0.6 V، بالنسبة للسيليسيوم Si، فإن تياراً كهربائياً يمر في الدارة وهي في درجة حرارة الغرفة $T = 300^\circ K$ أما إذا عكسنا وصل الدارة، كما مبين بالشكل (A - 14 - 3)، بحيث يصبح الديود في هذه الحالة، بما تسمى حالة تغذية العكسية أو غير المباشرة، فيصبح فرق الكمون بين طرفي الوصلة $(V_o + V_n)$ ويزداد ارتفاع حاجز الطاقة إلى القيمة $q(V_o + V_n)$ ، كما هو مبين بالشكل (B - 14 - 3)، مما يفسر التيار الضعيف جداً في هذه الحالة.



الشكل (14 - 3)

3-9-1 المنحني المميز للوصل P - n

إن المنحني المميز للوصلة P - n، هو الخط البياني الذي يمثل تغيرات شدة التيار الكهربائي I الذي يمر بالدارة، بدلالة فرق الكمون المطبق (V_n) على الوصلة (P - n)، وذلك في الحالتين: حالة التغذية الأمامية وحالة التغذية العكسية. ويبين الشكل (15 - 3) المنحني المميز للديود (الوصل) I بدلالة V_n حسب العلاقة التالية:

$$I = I_s \exp \left(\frac{qV_a}{kT} - 1 \right) \quad (17)$$

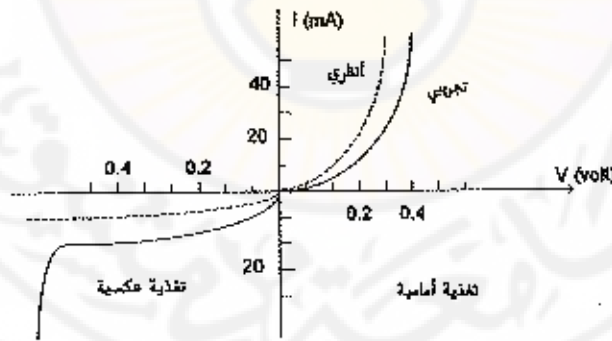
حيث، I_s : هو تيار الإشباع في حالة التغذية العكسية.

V_a : فرق الكمون المطبق بين طرفي الوصلة $P-n$.

K : ثابت بولتزمان وقيمته $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$.

T : درجة الحرارة المطلقة.

إن قيم التيار I الموجبة تعني أن التيار يجري عبر الوصلة من الجانب P إلى n ، بينما تعني قيم I السالبة أن التيار يسير بالاتجاه المعاكس، وبالطبع يكون التيار في حالة التغذية الأمامية أكبر كثيراً منه في حالة التغذية العكسية. يعني ذلك أن الوصلة $(P-n)$ تقوم بعمل مقوم، فهي تسمح للتيار بسهولة أكبر بكثير بالمرور من P إلى n مما هو الأمر بالنسبة للتيار العكسي. يدعى المقدار I_s ، الذي هو عبارة عن التيار العكسي بتيار الإشباع (Saturation current). إن القيم المألوفة لتيار الإشباع هي $I = 10^{-5} \text{ A} \approx 10 \mu\text{A}$ بالنسبة للجرمانيوم ومن رتبة (pA) بالنسبة للسيليكون Si. أما التيار الأمامي فيعتمد بالطبع على التوتر المطبق V_a وقيمته المألوفة هي 100 mA من أجل توتر قدره 0.2 V.



الشكل (1.5 - 3)

نلاحظ في حالة التغذية العكسية، إذا ازداد التوتر العكسي كثيراً فإنه يحدث تصدع كهربائي ويزداد عنده التيار العكسي فجأة بسرعة كبيرة وهناك آليتان

لهذا التصدع:

a- التصدع الإهلياري (avalanche breakdown) الذي تصبح فيه لبعض الإلكترونات المسرعة بواسطة التوتر العكسي الكبير طاقة كافية لتفريق أزواج (الإلكترونات - ثقب) تكون نفسها ذات طاقة عالية تكفي لتوليد أزواج أخرى. وهكذا

b- تصدع زينر (Zener breakdown) الناشئ عن كون عرض حاجز الكمون (وليس ارتفاعه) بين جانبي الوصلة يصبح، لدى تطبيق كمون عكسي عال، صغيراً لدرجة أن مرور الإلكترونات يتم عبره بفعل أثر النفق الكوانتي. عند ذلك يزداد التيار بسرعة، تكون آلية زينر هي المسيطرة في مجال التواترات المنخفضة (حوالي 4 V)، أما في مجال التواترات الأعلى (8 V) فإن التصدع الإهلياري يكون هو الآلية المسيطرة.

10 - 1 ديود زينر Zener Diode :

يستخدم ديود زينر في تثبيت الجهد حتى قيمة معينة ثابت $V_z = |V|$ ، يُطلق عليها اسم كمون زينر وذلك خلال مجال واسع من شدة التيار I (السالب في حالة التغذية العكسية) المحصور في المجال التالي: $I_z(\min) \leq I \leq I_z(\max)$ ، كما في الشكل (3-16) الذي يبين تحويلات شدة التيار I (السالب) في ديود (Zener) في التغذية العكسية من أجل:

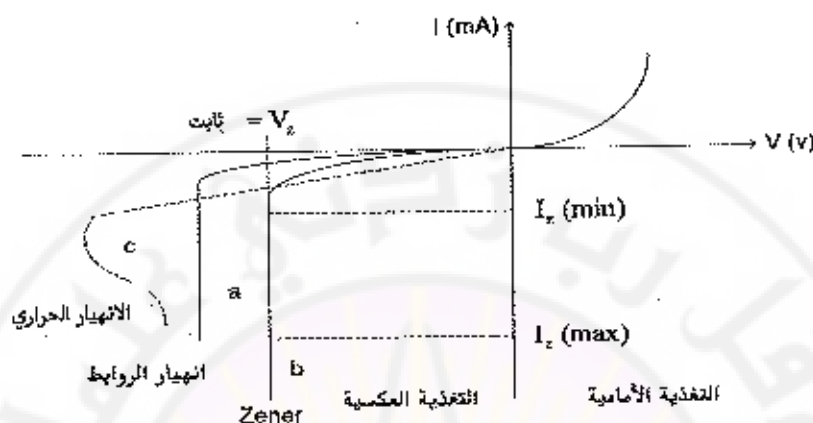
(a) - ظاهرة الهيار الروابط حيث تكون منطقة الالتحام (d) في الديود عريضة.

(b) - ظاهرة (Zener) حيث تكون منطقة الالتحام (d) في الديود ضيقة.

(c) - ظاهرة الإهلياري الحراري في الديود.

1- الحالة الأولى a- عرض منطقة الالتحام (d) كبير - نستخدم حالة التغذية العكسية في الديود، فعندما يزداد فرق الكمون $|V|$ (السالب)، بين طرفي الديود ازدياداً كبيراً،

فإن شدة التيار $|I|$ ، (السالب) تزداد ازدياداً كبيراً أيضاً حتى تصل، من أجل جهد معين: $(V = V_z)$.



الشكل (16-3)

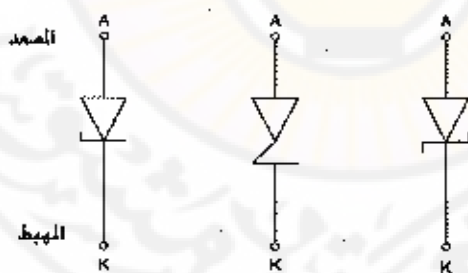
يسمى جهد (Zener)، إلى قيم أكبر بس: (100) مرة وحتى بس: (1000) مرة مما هو عليه في الدبود العادي. حيث تحصل كل من الثقوب والإلكترونات في منطقة الالتحام العريضة (d)، على طاقة حركية عالية تكفي، لدى اصطدامها في جواهر بلورة نصف الناقل، أن تفكك روابط جواهرها وينجم عن ذلك تأين في الذرات، وعندها تتحاذب الإلكترونات والذرات المتأينة فتتمز أو تساهم في مرور تيار كبير في الدارة، وتعرف هذه الظاهرة، باسم ظاهرة انهيار الروابط، الشكل (16-3-a).

2- الحالة الثانية b- إذا كان عرض منطقة التلام (d) ضيقاً، وعندئذ نستخدم التغذية العكسية أيضاً، فإنه بازدياد الجهد (السالب) $|V|$ بين طرفي الدبود، فإن التيار العكسي $|I|$ (السالب)، يزداد بشكل مفاجئ بحيث تتوافر للثقوب والإلكترونات المسافة الكافية في منطقة الالتحام (d) الضيقة، لكي تتسارع (كما في الحالة الأولى)، وبالتالي تكون لها طاقة حركية كبيرة لتحدث التأين، وإلما تحدث ظاهرة أخرى هي مفعول (Zener)، إذ يحدث حقل كهربائي شديد $(\vec{E})$ على طرفي منطقة الالتحام يولد قوة كهربائية ساكنة

تتسبب اقتلاع الإلكترونات من ذرات بلورة نصف الناقل، فيزداد بالتالي، تركيز كل من الإلكترونات والثغوب مما يؤدي إلى ازدياد كبير في التيار $|I|$ ، وقد تكون قيمته محصورة في مجال واقع بين هاتين: صغرى $I_z(\min)$ وعظمى $I_z(\max)$ ، كما في الشكل (3-16-b) $I_z(\min) \leq I \leq I_z(\max)$ لشدة تيار (Zener) $|I_z|$ وذلك من أجل قيمة ثابتة للجهد $|V_z|$ يسمى جهد (Zener) (السالب)، وتستخدم هذه الحالة عملياً، فيما يعرف باسم تثبيت الجهد في ديود (Zener).

3- الحالة الثالثة C: إن زيادة فرق الكمون المطبق على الديود في حالة التغذية العكسية على قيمة معينة، يؤدي إلى ازدياد في الطاقة الضائعة فيه على شكل طاقة حرارية، وبالتالي يؤدي إلى تحطيم البنية البلورية كلياً في المادة نصف الناقل، فيتلف الديود في منطقة الالتحام، فيحصل ازدياد مفاجئ في التيار أولاً ثم نقصان فيه بعد ذلك، وتسمى هذه الظاهرة بالانهيار الحراري، حيث يتلف من أجلها الديود، الشكل (3-16-c). وأخيراً يمثل الشكل (3-17) رموزاً ثلاثة مستخدمة لتمثيل ديود (Zener).

ملاحظة: تصنع ديودات (Zener) بحيث يكون كمون (Zener)، فيها يتراوح بين فولط واحد وحتى بضع مئات من الفولطيات.



الشكل (3-17)

11 -- 1 الثنائي أو الديود النفقي Tunnel Diode:

يتألف الثنائي النفقي من نوعين من أنصاف النواقل المشوبة (n) و (P) متصلين بمنطقة (d) صغيرة جداً (وهي أصغر مما في الديودات الأخرى —: 100 مرة أو حتى — 1000 مرة).

ويعتمد هذا الديود في عمله على مفعول النفق، ويتميز هذا الديود أيضاً بأن له حاجزاً كمونياً عالياً (V_0) وهو أعلى من حاجز الكمون في الديود العادي. يمرّتين على أقل تقدير.

- وعندما يطبق على طرفيه جهد يتزايد تدريجياً، فإن تياراً ينشأ في دارته مولفاً من ثلاثة أنواع: تيار انتشار الشحنات، والتيار المعاكس الناجم عن الحقل الكهربائي ($\vec{E}$)، وأخيراً عن التيار النفقي الذي نحن بصددده، والناجم عن عبور الإلكترونات لحاجز الكمون (V_0) المتواجد في منطقة التماس بين المنطقتين (n) و (P) في الديود النفقي، والتي، طبقاً لقوانين الميكانيك الكوانتي، تستطيع عبور هذا الحاجز بالمفعول النفقي حتى ولو لم تكن طاقتها مساوية طاقة حاجز ارتفاع الكمون، أو بتعبير آخر: يمكن لهذه الإلكترونات أن تعبر حاجز الكمون حتى عندما تكون طاقتها أصغر من طاقة حاجز الكمون ولكن يشترط في ذلك أن تتوافر في الجهة الثانية من الحاجز، سويات طاقة خالية (غير مشغورة) كي تستطيع هذه الإلكترونات الانتقال إليها وأن تشغرها بعد اجتيازها حاجز الكمون. ومع ذلك يمكن إيضاح عملية آلية عمل الديود النفقي كفيلاً ودون اللجوء إلى الميكانيك الكوانتي، بالاستعانة بمفهوم المناطق على النحو التالي:

- ليكن لدينا ديود نفقي مصنوع من مادة الجرمانيوم المشوب، الشكل (18 - 3) ولنفرض أن طاقة ارتفاع حاجز الكمون فيه تساوي: $V_0 = 0,8 \text{ (ev)}$ ، وليكن عرض المنطقة المحظورة بين منطقة الناقلية (E_c) ومنطقة التكافؤ (E_v) تساوي: $E_g = 0,6 \text{ (ev)}$.

أولاً- لنفرض أنه لا يوجد جهد مطبق بين طرفي الديود النفقي أي: ($V = 0$)
 كما في الشكل (a - 18 - 3) فنجد أن عدداً متساوياً من الإلكترونات النفقية يجتاز
 منطقة الالتحام (d) وتنتقل في الاتجاهين على السواء من (n) إلى (P) ومن (P) إلى (n)،
 بحيث يكون التياران متساويان في الاتجاهين، أي تكون محصلتهما معدومة، فلا يمر أي
 تيار.

ثانياً- لنطبق جهداً صغيراً على طرفي الديود النفقي في حالة التغذية الأمامية، وليكن
 هذا الجهد مساوياً: ($V = 0,1 \text{ (v)}$). لما كان ارتفاع حاجز الكمون مساوياً فرضاً:
 $V_0 = 0,8 \text{ (ev)}$ ، فإنه سينخفض بمقدار ($0,1 \text{ (ev)}$) ويصبح مساوياً:

$$V_0 - V = 0,8 \text{ (ev)} - 0,1 \text{ (ev)} = 0,7 \text{ (ev)}$$

فيمر تيار نفقي أعظمي من (n) إلى (P)، (يضاف إليه التيار العادي الكبير الناجم
 عن الحقل الكهربائي $\vec{E}$)، الشكل (b - 18 - 3)، أما ما يتعلق بالانتقال من (P) إلى (n)
 في الاتجاه المعاكس، فلا يمر أي تيار في هذا الاتجاه (ويكون معدوماً فيه) وذلك لعدم
 توافر سويات طاقة محالية في المنطقة (E_0) يمكن أن تنتقل إليها الإلكترونات في هذا
 الاتجاه (من P إلى n).

ثالثاً- عندما يزداد الجهد المطبق على طرفي الديود النفقي ازدياداً بطيئاً حتى يصبح
 مساوياً: ($V = 0,2 \text{ (v)}$)، الشكل (c - 18 - 3)، فإن التيار النفقي يتناقص حتى ينعدم،
 لأن ارتفاع حاجز الكمون ينخفض بمقدار ($0,2 \text{ (ev)}$) ويصبح مساوياً:

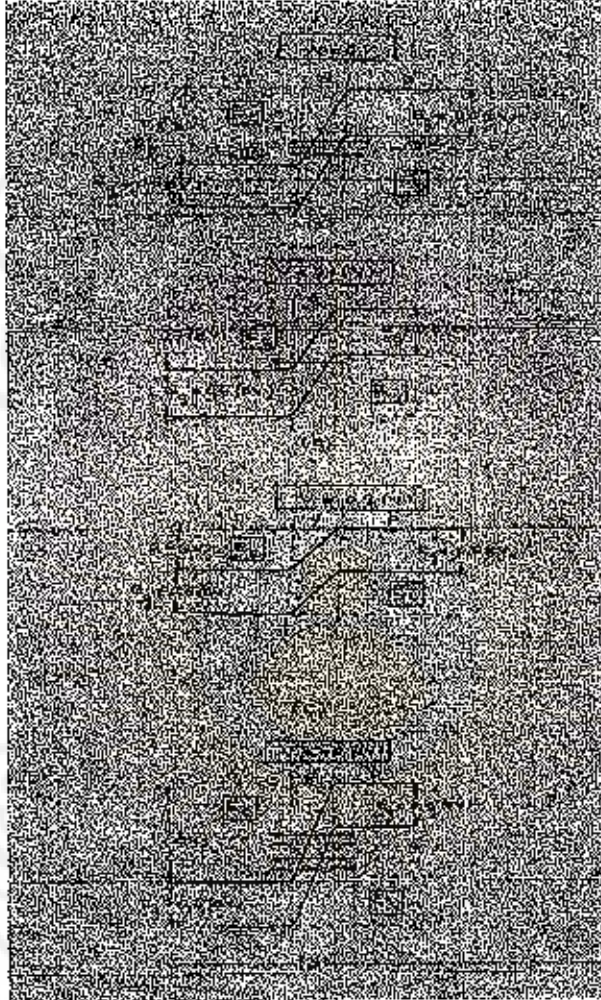
$$V_0 - V = 0,8 \text{ (ev)} - 0,2 \text{ (ev)} = 0,6 \text{ (ev)}$$

أي يساوي عرض المنطقة المحظورة: $E_g = 0,6 \text{ (ev)}$ بين المنطقتين (E_0) و (E_v)،
 وتصبح مقاومة الديود النفقي سالبة: ($r < 0$) في هذه الحالة.

وعندما يزداد فرق الكمون أيضاً ويصبح كبيراً جداً، فإن التيار النفقي يصبح
 مهماً (أي معلوماً) بينما تزداد محصلة التيارين، التيار الناجم عن انتشار الشحنات،
 والتيار المعاكس الناجم عن وجود الحقل الكهربائي ($\vec{E}$)، كما هو الحال من أجل

ديود عادي.

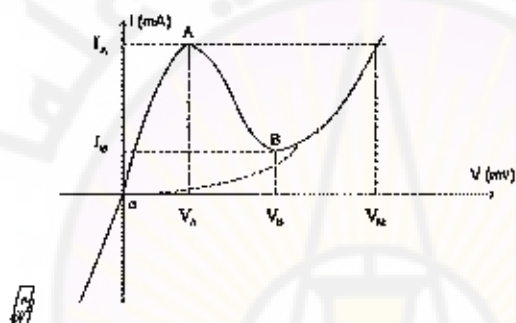
رابعاً- أما في حالة التغذية العكسية، الشكل (c - 18 - 3)، فإن التيار النفقي $|I|$ ، يزداد بشكل كبير بازدياد فرق الكمون $|V|$ المطبق على طرفي الديود النفقي.



الشكل (18 - 3)

وتمثل الشكل (3 - 19) تحولات التيار النفقي (I) بدلالة الجهد المطبق على طرفيه (V) في حالتي التغذية الأمامية والتغذية العكسية للديود النفقي (المنحني المستمر) ومقارنته

مع الديود العادي (المنحني المنقط). ونلاحظ أن شدة التيار تأخذ القيمة نفسها (I_A) من أجل جهد يساوي V_A ومن أجل جهد V_B يسمى فرق الكمون المباشر، ففي هذا الشكل نبين تحولات التيار النفقي (I) من الصفر حتى (I_A) الموافق للذروة (A) في حالة التغذية الأمامية، ثم يتناقص حتى (I_B) الموافق للنهاية الصغرى (B) وذلك بازدياد الجهد من V_A إلى (V_B) حيث تكون مقاومة الديود النفقي سالبة، ثم يزداد التيار العادي (مع انعدام التيار النفقي عملياً) فيعمل الديود النفقي عمل ديود عادي في المجال من (V_B) وحتى أعلى من (V_B): (فرق الكمون المباشر)



الشكل (3 - 19)

والشكل (3 - 20) يبين رمز الديود النفقي.



الشكل (3 - 20)

إن من أهم استخدامات الديود النفقي هي التالية:

١- يستخدم في المجال ($V_A < V < V_B$)، الشكل (3 - 19)، أي من أجل

كمونات توافق المجال المحصور بين الذروة (A) للمنحني وبين النهاية الصغرى

(B)، تكون مقاومة الديود النفقي سالبة، وفي هذا المجال يستخدم في دائرة

المزازة الكهربائية (Oscillator) لتوليد اهتزازات ذات تواترات عالية جداً ومن رتبة الس: (GHz).

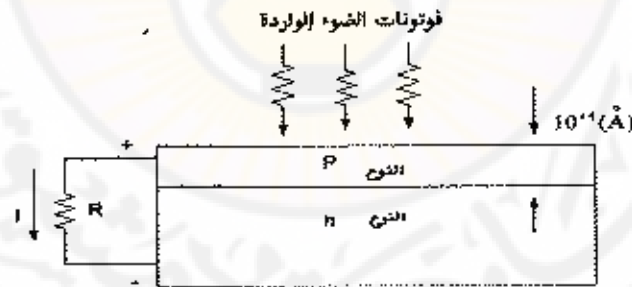
٢- يستخدم كمفتاح تحويل سريع، لأن الانتقال النفقي خلال حاجز كمونه، إنما يتم خلال زمن قصير جداً هو زمن الاستجابة أو زمن التحليل وهو من رتبة تتراوح بين 10^{-12} (s) و 10^{-4} (s).

٣- يستخدم في كثير من الأجهزة الإلكترونية وفي الحاسبات الإلكترونية.

12 - 1 الخلية الشمسية Solar cell

تتألف الخلية الشمسية من متصل ثنائي (P-n) مصنوع من السيليكون (Si)، فإذا ورد فوتون ضوئي على المنطقة (P) منه، فإنه يتولد زوج مولف من إلكترون وثقب وإن الإلكترونات الناجمة عن هذا التحويل من فوتونات الضوء تولد تياراً كهربائياً ملائماً (I) يسري في مقاومة (R) موصولة بالمنطقتين (P) و (n)، كما في الشكل (21 - 3).

فإذا كانت طاقة الفوتون الوارد (E_p) أكبر من طاقة المنطقة المحظورة (E_g) الفاصلة بين المنطقتين: منطقة الناقلية (E_c) ومنطقة التكافؤ (E_v)، حيث تكون (E_g) في السيليكون من رتبة $E_g \approx 1.1$ (ev)، فإنه لدى اصطدامه بالنوع (P)، فإنه يحرض

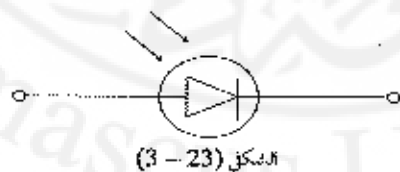
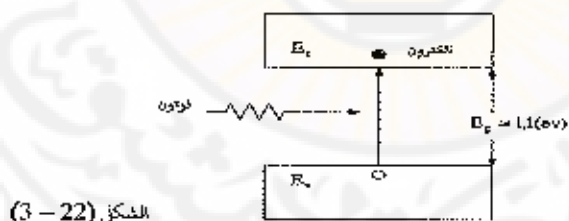


الشكل (21 - 3)

إلكتروناً من منطقة التكافؤ (E_v) إلى منطقة الناقلية (E_c)، كما في الشكل (22 - 3) مولداً بذلك ثقباً في (E_v) التي تصبح غنية بالثقوب من تكرار عملية تحريض فوتونات الضوء، إلا أن بعضاً من الإلكترونات التي تولدت بالتحريض المذكور قد يعود ويتحد

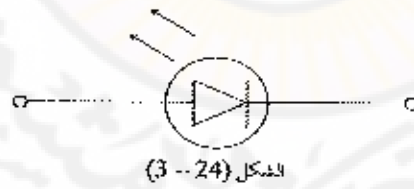
من حديد مع بعض الثقوب مشكلاً بعض الفوتونات ولكن أغلب الإلكترونات الكثيرة، تتحرر من المتصل الثاني فتتركه وهي خاضعة لحقل كهربائي ($\vec{E}$)، ينشأ في المجال المحصور بين الإلكترونات والثقوب، فيعمل على تسريع تلك الإلكترونات. فيحدث فائض منها في المنطقة (n)، كما يحدث فائض من الثقوب في المنطقة (p)، وتكون النتيجة أن يتولد فرق كمون بينهما، وهو من رتبة $V \approx 0,6$ (v) بالنسبة للسيليكون، فإذا وصلنا هاتين المنطقتين (p) و (n) بمقاومة خارجية (R)، حصل تيار كهربائي (I) وبالتالي، تكون متناسبة مع شدة الضوء الوارد:

هذا وتصنع الخلية الشمسية من مادة السيليكون في أغلب الحالات، بحيث يكون سطح المنطقة (p) أكبر ما يمكن لاستقبال أكبر عدد ممكن من الفوتونات الواردة عليه، وبحيث تكون سماكة المنطقة (p) المعرضة للضوء صغيرة جداً ومن رتبة 10^{-4} "A" بحيث أن الإلكترونات الحاصلة عن تحريض الفوتونات لها، تصدر عن المتصل الثاني قبل أن تتحد من حديد مع بعض الثقوب الحاصلة. هذا وعندما تنتقل الإلكترونات في المتصل الثاني، من المنطقة (p) إلى المنطقة (n)، فإن كمون المنطقة (p) يصبح موجباً، ويصبح كمون المنطقة (n) سالباً، وهكذا تصبح الخلية الشمسية مصدراً لتحويل الضوء إلى طاقة كهربائية، والشكل (23-3) يمثل رمز الخلية الشمسية.



13 - 1 الديود المصدر للضوء (LED) : Light - Emitting Diode

يتألف الديود المصدر للضوء (LED)، من متصل ثنائي (P - n) يتميز بمجال واسع من التغذية لكي تحدث تركيزاً كبيراً من الإلكترونات في المنطقة من النوع (P) من الديود، وثقوباً كثيرة في منطقته من النوع (n) ففي تلك الشروط، يُصدر الديود ضوءاً عندما تتحد الإلكترونات مع الثقوب بحيث أن عمل الديود (LED) يعاكس عمل الفوتون - ديود الخلية الشمسية، بحيث ينتقل الكترول الناقلية من المنطقة (E_v) إلى منطقة التكافؤ (E_c)، عكس حالة الشكل (22 - 3)، ليملاً الثقب وليتحد معه مشكلاً فوتوناً، ولحصول ذلك لا بد من تطبيق فرق كمون خارجي على طرفي الديود ليعادل الطاقة الصادرة على شكل ضوء من الديود، بحيث نصل القطب الموجب من الكمون الخارجي بالمنطقة (P) ونصل القطب السالب من بالمنطقة (n) فيحدث عندئذٍ بين طرفي المتصل الثنائي (P - n) حقل كهربائي تتحرك بموجبه الإلكترونات من المنطقة (n) إلى المنطقة (P) وتتحرك الثقوب من المنطقة (P) إلى المنطقة (n) وبذلك تصادم الإلكترونات والثقوب مع بعضها وتتحد فتحدث فوتونات الضوء الذي يبرز من الديود (LED) في مجال الضوء الأحمر من الطيف. ويستخدم الديود المصدر للضوء (LED) في الأجهزة الالكترونية وبخاصة في الحاسبات الالكترونية، ويبين الشكل التالي (24 - 3) رمزاً للديود المصدر للضوء (LED).



14 - 1 الديود كاشف الجزيئات، ويسمى كاشف الحاجز السطحي:

ويتألف من متصل ثنائي (P - n) يتميز بأن له مجالاً واسعاً في التغذية العكسية، بحيث لا يمر فيه أي تيار وهو في حالته الطبيعية، ولكن عندما يمر خلاله جزيء ذو طاقة عالية (كالإلكترون مثلاً)، فإنه يُحدث أزواجاً مؤلفة من الإلكترونات والثقوب ذات

طاقة أدنى من طاقة الجزيء الوارد، وتكون النتيجة أن مردود هذا الجزيء يؤدي إلى حدوث نبضة (أو إشارة) تدل على مروره ويتناسب ارتفاعها مع طاقته.



ثانياً

الليزر وتطبيقاته

LASER and Applications



قلما تركت اكتشافات علمية أثرها على مجالات وفروع قائمة مثلما ترك اكتشاف أشعة الليزر على فروع العلوم الأساسية، والكيمياء، والجيولوجيا، والبيولوجيا، وفروع العلوم التطبيقية، كالطب والهندسة، بصفة عامة، وعلى علم البصريات وعلم الفيزياء بصفة خاصة.

الليزر والميزر... ما الفرق بينهما؟

كانت أول محاولة تجريبية للحصول على إشعاع مستحث (ناتج بعملية الحث الكهرومغناطيسي) هي تلك التي قام بها العلماء تاونز في الولايات المتحدة وباسوف وبروكورف في روسيا عام ١٩٥٤ حيث تم الحصول على موجات ميكروية مضخمة أو مكبرة باستخدام أشعة في مدى تلك الموجات وأطلق على الموجات أو الإشعاع الناتج اسم الميزر (maser) وهو اختصار للجمل

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

ومعناها : تضخيم الموجات الميكروية بالإصدار المحث للإشعاع وفي عام ١٩٦٠ تمكن العالم الأمريكي مايمان من الحصول على إشعاع مضخم ناتج بالحث في مدى موجات الضوء وأطلق عليه اسم الليزر :

light amplification by stimulated emission of radiation

ومعناها : تضخيم الضوء بالإصدار المحث للإشعاع وقد تم منح كل من تاونز الأمريكي وباسوف وبروكورف (الروسيان) جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٦٤ نتيجة اكتشافهم المتعلقة بأشعتي الميزر والليزر.

ولقد دأب كتاب الخيال العلمي لعشرات من السنين، على ذكر استخدام سلاح رهيب يصدر أشعة ذات قوة تدميرية عالية، أطلقوا عليها اسم "أشعة الموت". ولعل أول من استخدمها هو الكاتب الإنجليزي "ويلز" في روايته الشهيرة "حرب النجوم" Star

Wars، إذ دمر بها سكان المربخ مناطق من كوكب الأرض. وهكذا لعب الخيال العلمي دوراً كبيراً في تكوين صورة معينة عن الأشعة القادرة على تدمير أي أهداف، مهما كانت مسافتها، وفتح الخزائن المغلقة، وقتل الأفراد. والخيال العلمي لا يقف عند حد. وما نعهده خيالاً اليوم قد يصبح حقيقة واقعة في يوم قريب.

وعندما خرج أول ليزر هليوم-نيون للوجود عام ١٩٦٠، بعد بحوث استمرت ست سنوات، في نظرية الإشعاع وتفاعل الموجات الكهرومغناطيسية مع ذرات المواد، سواء منها الغازية أو الصلبة، كان الأمل منعقداً على أن العلم قد توصل أخيراً إلى "أشعة الموت"، القادرة على تدمير الأهداف وقتل الأفراد. ولكن الطبيعة الضوئية لليزر أوضحت أن هذا المطلوب سوف يكون بعيد المنال. ولكن الليزر فتح الطريق أمام أفرع المعرفة في مجال الكهرو بصريات عموماً. وقد تميزت العقود التالية بسرعة تطوّر نظم الليزر. وظهرت التطبيقات الواسعة في مجال نظم التسلّيح عموماً، وتوجيه المقذوفات خاصة، وفي الاتصالات والكيمياء الحيوية.

وتحققت نبوءة الخيال العلمي، إذ بدأ استخدام أشعة الليزر في المجالات العسكرية. وأضيفت أشعة الليزر بالطبع قدرات هائلة إلى نظم التسلّيح، بما حقّقتها لها من إمكانية قياس مسافة الأهداف بدقة عالية، في حدود الأمتار، لحظياً، منع سهولة كسيرة في الاستخدام. ويؤثر ذلك بالطبع بدرجة كبيرة على دقة نظم إدارة الحرب، كما استخدمت نظم الليزر في توجيه المقذوفات البالغة الدقة في إصابة الأهداف، مما يعود بالتالي على فاعلية النيران، إذ تحولت المقذوفات من أسلوب الضرب التقليدي إلى التوجيه الدقيق. ولا تنحصر استخدامات الليزر في نظم التسلّيح على هذين الاستخدامين، ولكنهما أكثر الاستخدامات فاعلية وانتشاراً.

الفصل الأول

طبيعة أشعة الليزر وخصائصها





I - 1 - ما هو الليزر؟

الليزر هي كلمة مشتقة من العبارة التالية :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

وهذه العبارة هي وصف لعمل جهاز الليزر. حيث يقوم هذا الجهاز بتضخيم الضوء بنفس الطريقة التي يتكون فيها ثمر ضخم كنهر المس سي مثلاً من العديد من الروافد . حيث يتكون الضوء الاعتيادي من مجموعة من الألوان ذات أطيااف مرئية وشبه مرئية ، فيقوم جهاز الليزر بتحويل هذه الأطيااف إلى تردد واحد قوي جدا وله نقاوة تختلف عن خليط ترددات الضوء المألوف .

يستخدم الليزر هذه الأيام في كثير من المجالات الطبية والصناعية والعلمية . حيث يستخدم في توجيه المركبات الفضائية وتدمير الصواريخ المعادية والكشف عن الغواصات في أعماق المحيطات، كما يستخدم في جراحة الدماغ وفي اللحام وتشغيل المعدات الثقيلة ، وفي الاتصالات بين الكواكب .

وفكرة استخدام الليزر في عمليات اللحام ، تقوم على أساس أن الأشعة الإلكترونية يمكنها أن تسلط طاقة عالية على مساحة دقيقة جداً، ويستخدم الليزر في عمليات تشغيل ولحام المعادن التي يصعب التعامل معها .

وهناك تطور كبير في مجالات استخدام الليزر ، والمستقبل وحده هو الذي سيقدر مدى عظمة وفائدة هذا النوع من التكنولوجيا .

I - 2 - اكتشاف أشعة الليزر

كلمة ليزر LASER تعني "تضخيم الضوء بواسطة إثارة موجاته الإشعاعية". وكان "أينشتين" Einstien أول من تنبأ في عام ١٩١٧م بأن الإلكترونات تستطيع أن تطلق نوعاً خاصاً من الضوء، ولكن ذلك لم يحدث إلا في شهر يولييه من عام ١٩٦٠م، عندما نجح العالم "تيودور ميمان" Theodore H. Maiman، المهندس بمختبرات

شركة "هيوز" Hughes للبحوث بالولايات المتحدة الأمريكية، في توليد شعاع ضوئي قوي تفاذ من ياقوتة حمراء تغطي الفضة طرفيها، ويسقط عليها ضوء غامر من مصباح أنبوبي زجاجي يحيط بها. فعندما يسقط ضوء المصباح على الياقوتة يهيج ذراتها، وينبعث منها وميض ينتشر إلى طرفيها ليصطدم بالفضة التي تعكسه كالمرآة، فترتد ذهاباً وإياباً، فتزداد قوته وتركيزه، وينطلق شعاع لامع من الضوء الأحمر من نوع غير معهود من قبل.

وتذكر بعض المصادر، أن أول جهاز ليزر قد صمم ونفذ عام ١٩٥٩ بواسطة عالم إيراني يعيش في الولايات المتحدة، وكان جهاز هليوم-نيون، أي أن المادة الفعالة هسي خلط من غازي الهليوم والنيون في أنبوبة طولها ٤ سم وقطرها ١ سم. وكان العالم الأمريكي "شاو" قد سبق وأثبت إمكانية الحصول على أشعة الليزر بالحسابات النظرية.

وليزر "ماتمان" الأول بعث ضوءاً أحمر فقط، الأمر الذي حد من فائدته. فأحد أسباب بطء استخداماته التطبيقية كان من أسباب الحاجة إلى تطوير أشعة ليزرية متنوعة ترسل ضوءاً بموجات وطاقت مختلفة. واليوم، هناك عدد كبير من أنواع أشعة الليزر التي تستخدم مواداً مختلفة لتوليد أشعة ضوئية، لأغراض متخصصة. وأشعة الليزر قد تكون في الطيف المرئي، أو في منطقة الأشعة تحت الحمراء، أو في منطقة الأشعة فوق البنفسجية.

والضوء هو نوع من الإشعاع. والضوء الأبيض الذي نراه، كأشعة الشمس، مكون من ألوان الطيف التي تتدرج من الأحمر إلى البرتقالي، فالأصفر، فالأخضر، فالأزرق، فالنيلي، ثم البنفسجي. وقد تمكن العالم الإنجليزي "إسحق نيوتن" من الحصول على هذه الألوان عندما مرر شعاعاً ضوئياً في موشور زجاجي، فخرج الضوء وقد تفرق إلى هذه الألوان التي تعرف بـ "الطيف المرئي". ويفسر حدوث هذا الطيف بأن الضوء يتكون

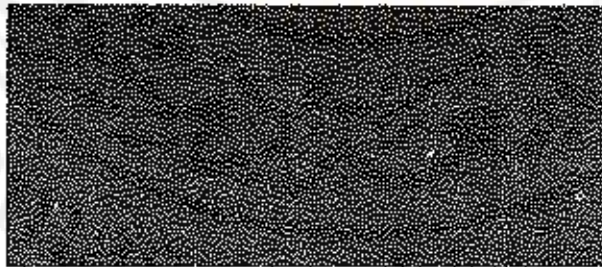
من موجات ضوئية ذات ترددات مختلفة، وهذه الموجات تسير بالسرعة نفسها في الهواء، ولكن سرعتها تختلف عن بعضها عندما تمر في وسط أكثر كثافة من الهواء، فتتكرر وتخرج في مجموعات طبقاً لتردداتها.

1-3- خصائص شعاع الليزر

جهاز الليزر عبارة عن مصدر للضوء، يعمل على تجميع الإشعاعات الضوئية، التي تتولد داخل الجهاز، وتركيزها، وتقويتها، على شكل حزمة ضوئية رفيعة جداً في اتجاه واحد مركز، وهي أشعة كهرومغناطيسية متجانسة coherent ومتراصة، وتستطيع قطع مسافات طويلة في خط مستقيم. وتتميز بأنه يقوي بعضها بعضاً عند الانطلاق. يمتلك شعاع الليزر خصائص تميزه عن أي مصدر من مصادر الإشعاع الكهرومغناطيسي وهذه الخصائص هي:

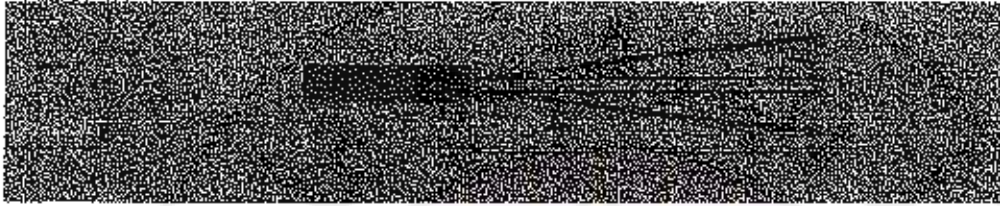
١- أحادية اللون : Monochromaticity

تعني أن الليزر أحادي اللون وهذا ما يميزه عن الضوء العادي حيث أن بتحليل الضوء الأبيض الصادر من الشمس أو من مصباح ضوئي فإنه يدل على احتوائه على العديد من الأطوال الموجية، كما هو واضح عند تحليل الضوء باستخدام المنشور Prism



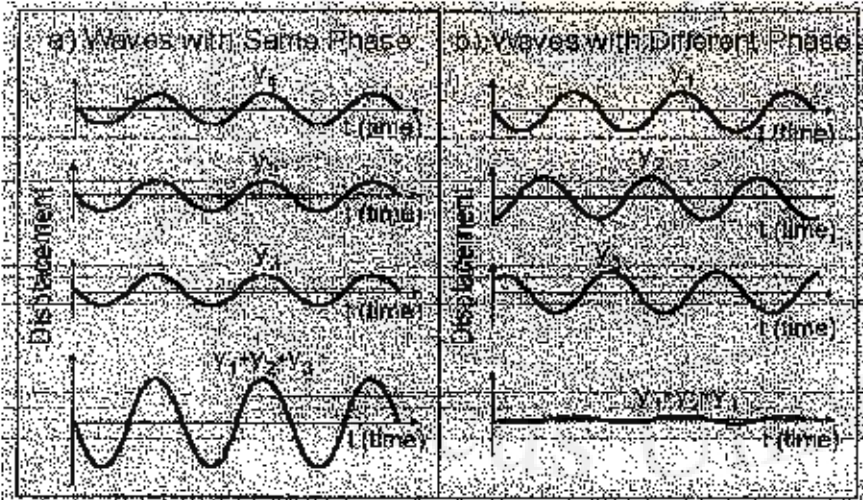
٢- الاتجاهية : Directionality

الضوء الصادر عن الليزر له اتجاه واحد بحدود مهملة بالمقارنة بالضوء الصادر من مصباح كهربائي حيث ان الضوء ينبعث في كافة الاتجاهات وبحدود كبير كما في الشكل التالي.



٣- الترابط : Coherence

و تعني أن هناك فرق طور ثابت بين الأمواج المتداخلة مما يؤدي إلى ظاهرة التداخل. و يوضح الشكل التالي كيف أن ثلاث موجات لها نفس الطور Phase تعطي تداخلا "Constructive" بينما تلك التي تختلف في الطور بمقدار عدد فردي من π تتداخل بشكل هدام وتكون المحصلة هي تلاشي الموجة.



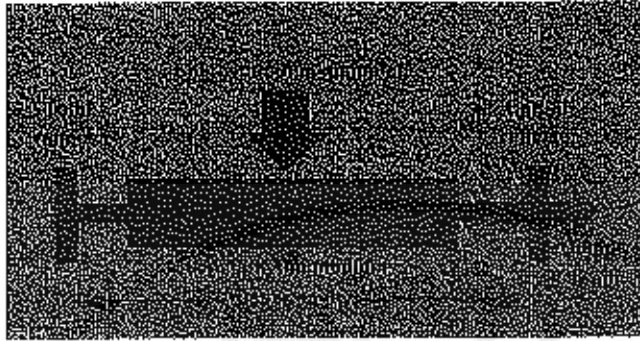
١ - 4- المكونات الأساسية لجهاز الليزر

عملية توليد أشعة الليزر تنتج عن تعريض المواد المختلفة لمصادر إثارة وتغذية خارجية. ويختلف الطول الموجي لأشعة الليزر الناتجة باختلاف المادة التي تنتجها، مع احتفاظها بطبيعتها الأساسية، وخصائصها العامة بوصفها موجة ضوئية، والخصائص العامة للموجات الكهرومغناطيسية. ويتكون جهاز الليزر من ثلاثة أجزاء رئيسية هي:

١. مادة الوسط الفعال: وهي التي تنتج أشعة الليزر، وقد تكون مادة صلبة، مثل اللياقوت الصناعي، الذي يتكون من أكسيد الألومنيوم مضافاً إليه كمية ضئيلة من الكروم، لا تزيد نسبتها عن ٠,٠٥%. وهذه النسبة من الكروم هي المسؤولة عن إنتاج الليزر، أي أنها المادة الفعالة في هذا النوع من الليزر. وقد تكون مادة الوسط الفعال مادة سائلة، مثل مادة النيوديم *Nudium* المذابة في أكسيد كلوريد الصوديوم، أو قد تكون مادة غازية، مثل الهليوم أو النيون، أو ثاني أكسيد الكربون، أو نصف ناقلة مثل زرنيخ الغاليوم. والوسط الفعال يقذف بضوء شديد التركيز والترابط، إذا وجهت إليه طاقة مثل تيار كهربائي أو إشعاع ضوئي.

٢. مصدر للطاقة لإثارة ذرات مادة الوسط الفعال، وذلك بعملية الضخ.

٣. المجاوبة الضوئية، وتكون غالباً في شكل مرآتين.



I-5- نظرية توليد أشعة الليزر

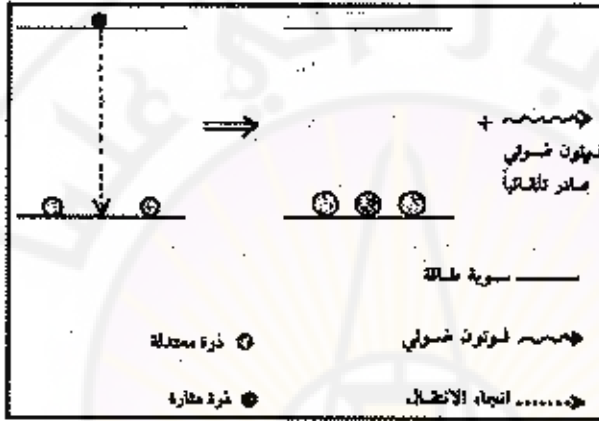
يمكن توضيح نظرية إنتاج أشعة الليزر بسهولة ويسر إذا أخذنا في الاعتبار تركيب الذرة، ومستويي الطاقة E_1 , E_2 الموضحين في الشكل. فلكي تنتقل ذرة من المستوي الأدنى E_1 إلى المستوي الأعلى E_2 فإنها تمتص قدراً من الطاقة يساوي الفرق بين هذين المستويين. ولكي تنتقل الذرة من المستوي الأعلى إلى المستوي الأدنى، فإنها تطلق قدراً من الطاقة يساوي، أيضاً، الفرق بينهما، ويكون ذلك على شكل فوتون photon.



وفي عام ١٩١٧، أوضح "أينشتاين" أن الإصدار يمكن أن يتم بإحدى الطريقتين:

٦. الانبعاث التلقائي

وفيه تنتقل الذرة من المستوى الأعلى E_2 إلى المستوى الأدنى E_1 تلقائياً، دون تدخل خارجي. والإصدار التلقائي هو السمة المميزة لجميع المصادر الضوئية المألوفة، كمصباح بخار الصوديوم، أو بخار الزئبق، أو النيون. وفي كل منها تحدث ملايين الانتقالات التلقائية، نظراً لأن الانتقال التلقائي للذرات يحدث بدون تحكم. ونتيجة لذلك، فإن الضوء الصادر تكون فوتوناته غير مترابطة.



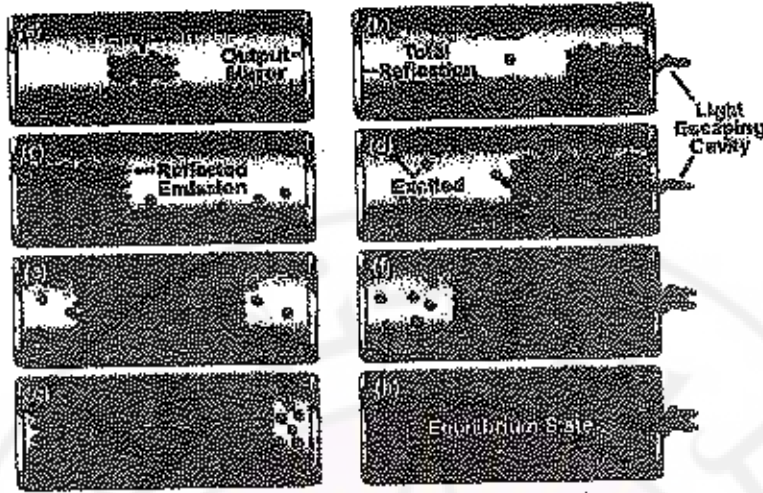
٢. الإصدار المحثوث *Stimulated Emission*

وفيه تنتقل الذرة من المستوى الأعلى E_2 إلى المستوى الأدنى E_1 عندما يمر بها فوتون طاقته تعادل الفرق بين مستويي الطاقة. ويتميز الإصدار المحثوث بانبعاث فوتون جديد، فضلاً عن الفوتون الأصلي. ويكون للفوتون المحثوث نفس طاقة الفوتون الأصلي، ونفس تردده، وطوله الموجي، ولذلك يقال إنهما مترابطان. والإصدار المحثوث هو السمة المميزة لمصادر الليزر، إذ تحدث الانتقالات المحثوثة.

في عام 1917 توقع آينشتاين أنه بالإضافة إلى الإصدار التلقائي السابق هناك نوع آخر من الإصدار هو الإصدار المحثوث *Stimulated*، فقد يحدث أن الفوتون

الذي يتحرر تلقائياً من ذرة مثارة يمكن أن يصطدم بذرة مثارة أخرى مباشرة فيسبب "خللاً" في حالتها المستقرة و يحثها قسرياً الى العودة إلى حالتها المستقرة - وذلك قبل أن تمضي فترة زمنية (10^{-8} s) - فلا تلبث أن تطلق فوتوناً أخر له نفس طاقة الفوتون الأصلي و نفس طوره و طوله الموجي *Coherent*، و تواصل الفوتونات انتشارها معاً متلازمين في نفس الاتجاه لكي يحثا ذرات أخرى على إطلاق فوتونات إضافية تلحق بهما على نفس النوال في نظام متتابع . حيث تنضم أفواجها المترابطة والمتحركة حديثاً إلى الفوتونات الصادمة مما يؤدي لزيادة أعدادها وصلابة تماسكها وتضخيم طاقتها. ومن هنا أتت كلمة (*Laser*). و تعني تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث للإشعاع.

ولقد وجد أن مقدار التضخيم يتناسب طردياً مع طول المادة الفعالة التي يجتازها هذا الإشعاع، وبغية الوصول إلى هذه العلاقة يتم استخدام ما يسمى بالمجاذبة الضوئية (*Optical Resonator*) ، وهي عبارة عن مرآتين عاكستين للضوء (أحدهما ذات انعكاس كلي والأخرى تعكس جزئياً - 99%) وتوضعان متقابلتين والمادة الفعالة بينهما ، فيحدث عليها انعكاسات متعددة مما يسبب زيادة المسير الضوئي وزيادة في الإصدارات المحرزة وتوحيد طاقاتها وتوازيها في اتجاه واحد. يبين الشكل التالي المراحل المتتالية في انتظام حركة الفوتونات. ثم يبرزها بشكل أشعة ليزيرية من إحدى المرآتين الأقل انعكاسية.



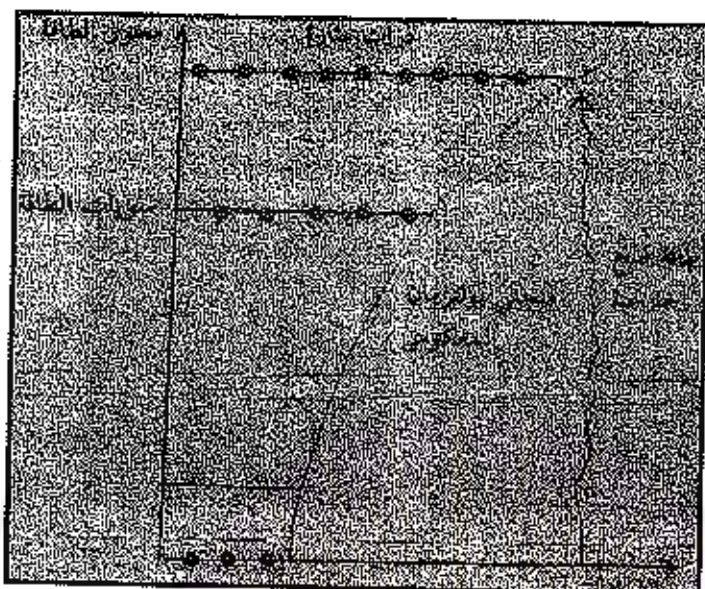
شروط حدوث الإصدار المحثوث (الليزري):

لكي تتم ظاهرة الإصدار المحثوث لا بد من توافر الشروط التالية :

* أن تثار ذرات المادة لسويات أعلى وبأعداد هائلة . ويتم ذلك بتطبيق طاقة إثارة مناسبة عليه عن طريق المضخ، يتحقق ذلك إذا أمكن قلب توزيع بولتزمان، أي إذا تحقق للذرات ما يسمى بالتوزيع الإسكاني المعكوس *Population Inversion*، والهدف من ذلك كله هو زيادة احتمال حدوث الاصطدام الفوتوني.

* أن توضع المادة الفعالة بين مرآتين كي تتحقق انعكاسات متعددة للسشعاع بينهما. وبالتالي يتحقق أكبر عدد ممكن من الإصدارات المحثثة ذات الفوتونات المترابطة.

* أن تطبق على الحملة طاقة حقن خارجية، كي تحدث إثارة لسذرات المادة وشحنها بالطاقة عن طريق المضخ (الضوئي أو الكهربائي).



ويمكن توضيح كيفية إنتاج شعاع الليزر من خلال دراسة ليزر الياقوت على سبيل المثال. فأول جهاز ليزر ياقوت Ruby Laser صممه "ميمان" عام ١٩٦٠ .

يتكون من قضيب اسطواني من الياقوت ذي اللون الأحمر الوردى، قطره ١ سم وطوله ٥ سم، وطرفاه متوازيان ومصقولان صقلاً جيداً، وأحدهما مغطى بطبقة غير شفافة من الفضة، وثانيهما مغطى بطبقة نصف شفافة من الفضة، أيضاً. والياقوت هو عبارة عن أكسيد ألومنيوم تم استبدال بعض ذرات الألومنيوم فيه ببعض ذرات الكروم. واسطوانة الياقوت محاطة بأنبوبة تفريغ حلزونية الشكل بها غاز زينون Xenon، وعند تشغيلها ينبعث منها ضوء أبيض متوهج يحتوي على مدى عريض من الترددات.

ويمكن فهم فكرة عمل ليزر الياقوت بالاستعانة بنظام ثلاثي مستويات الطاقة الموضح أنفاً، إذ المستوى E_1 هو المستوى الأرضي، والمستوي E_2 هو مستوى الإثارة، والمستوي

E_2 هو مستوي شبه مستقر، عمره الزمني طويل نسبياً، ويقدر بحوالي جزء من مئة ألف من الثانية، وهو يفوق العمر الزمني لمستويات الإثارة العادية بمقدار مئة ألف مرة.

فعندما يضاء الياقوت المشوب بالكروم بالضوء الصادر من أنبوبة زينون، وعندما تكون قدرة الأنبوبة مناسبة، تثار معظم ذرات الكروم الموجودة في المستوي الأرضي E_1 لتنتقل إلى منسوب الإثارة E_3 . ويطلق على عملية نقل الطاقة إلى المادة الفعالة في الليزر، والتي يترتب عليها نقل ذرات المادة الفعالة من المستوي الأرضي إلى منسوب الإثارة اسم عملية "الضخ" Pumping.

وعودة ذرات الكروم من منسوب الإثارة E_3 إلى المستوي الأرضي E_1 تتم بطريقتين:

أ. الطريقة الأولى

وفيها تفقد ذرات الكروم المثارة في المستوي E_3 بعض طاقتها إلى بلورة الياقوت، ونتيجة لذلك تهبط هذه الذرات إلى المستوي E_2 شبه المستقر. ونظراً لطول عمره الزمني، يزداد فيه عدد ذرات الكروم المثارة حتى يصبح أكبر من عددها في المستوي الأرضي E_1 ، وهذا هو شرط الحصول على الإصدار المحثوث، أو هو شرط الحصول على أشعة الليزر.

ب. الطريقة الثانية

وفيها تنتقل بعض ذرات الكروم تلقائياً من المستوي E_2 إلى المستوي E_1 ويصحب هذا الانتقال انبعاث فوتونات طولها الموجي ٦٩٤٣ المجهز. وهذه الفوتونات، الصادرة تلقائياً، عندما تمر بذرات الكروم المثارة في المستوي E_2 فإنها تستحثها على الانتقال من المستوي E_2 إلى المستوي E_1 قبل أن يحين زمن عودتها تلقائياً. ويتولد نتيجة لذلك عدد

من الفوتونات الممتصة. وهذه وغيرها تولد مزيداً من الفوتونات، وهكذا سرعان ما يتولد شلال من الفوتونات يكون لها اتجاه الفوتونات الساقطة نفسه.

والفوتونات التي يكون اتجاه حركتها موازياً، تقريباً، لمحور الاسطوانة تعاني من انعكاسات متعددة عند سطحي المرآتين الموجودتين عند هاتين الاسطوانتين، فيزداد تبعاً لذلك طول المسار الذي تقطعه داخل البلورة، مما يتيح لها أن تستحث عدداً أكبر من ذرات الكروم المثارة في المستوى E_2 لتنتقل إلى المستوى E_1 ، فيتضخم بذلك شلال الفوتونات في اتجاه المحور، وعندما تبلغ شدته حداً معيناً، ينفذ جزء منه إلى خارج الجهاز من خلال المرآة نصف الشفافة. وحديثاً بالذكر أن الفوتونات الصادرة تلقائياً في الاتجاهات الأخرى ستفقد بنفاذها خلال السطح الجانبي للأسطوانة.

وليزر الياقوت ليزر نبضي، أي تنبعث أشعة الليزر منه على هيئة نبضات، وتتولد أثناء عملية تشغيل الجهاز كمية كبيرة من الحرارة داخل البلورة، مما يتطلب تبريدها بهواء مسال يمر في غلاف يحيط بأسطوانة الياقوت.

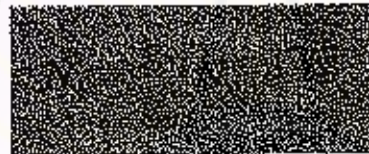
أمثلة لفكرة الليزر

زخات المطر: يُمكن أن نفهم ما تتمتع به أشعة الليزر من تأثير فعال وقدره عالية إذا قمنا بمقارنة هذا الوضع بمطول الأمطار، حيث تسقط قطرات المطر فرادى ليس بينها توقيت زمني واحد، مما يجعل زخات المطر تهطل على الأرض والمباني والمشاة دون ضرر يُذكر. أما إذا افترضنا أن هذه القطرات قد ترابطت مع بعضها، وهطلت في لحظة واحدة فإن الذي سوف يحدث هو أن آلاف الأطنان من الماء سوف تسقط في نفس الوقت على المباني والمشاة مما سينتج عنه - بطبيعة الحال - أضرار جسيمة، وموجات تسونامي المدمرة إلا قطرات من الماء تجمعت فسي حركه ذات إيقاع مشترك لتستدمر ما يقابلها من حجرة، وتلك من يعترض مسارها من بشر.

ضربة الكاراثيه: كيف يستطيع لاعب الكاراثيه المتمرس تحطيم لوح خشبي سميك بضربة واحدة؟. إن الذي يحدث هنا أن لاعب الكاراثيه يركز طاقته العضلية والفكرية، ويوجهها، في ضربة واحدة خاطفة خلال زمن قصير جداً، إلى أصغر مساحة ممكنة من الهدف، فتتضاعف بذلك طاقته عشـسـرات المرات، وتكون كافية لتحطيم اللوح.

I - 6 - تعداد الذرات في حالة التوازن الحراري Population at thermal equilibrium

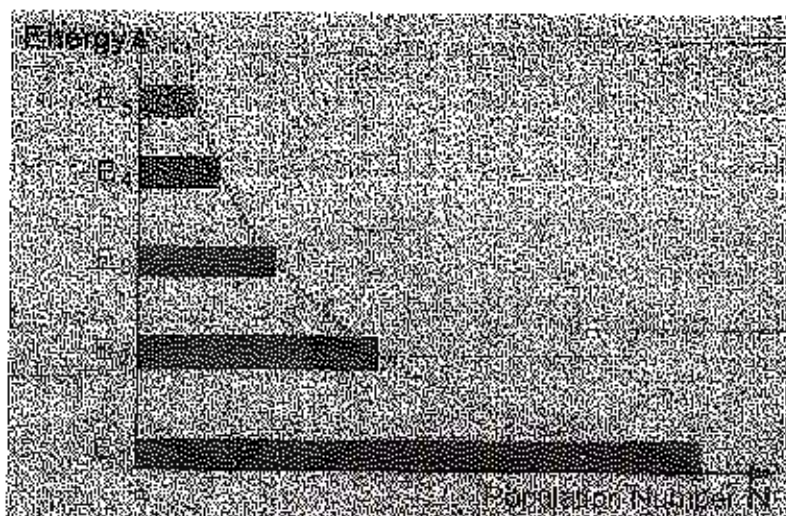
إن العلاقة بين تعداد الذرات في مستويات الطاقة عند الاتزان الحراري توصف بمعادلة ماكسويل بولتزمان للتوزيع الاحصائي Maxwell-Boltzman Law.



حيث N_0 هي تعداد الذرات في مستوى الطاقة السفلي

N_1 هي تعداد الذرات في مستوى الطاقة العلوي

g_0 و g_1 هما الوزن الاحصائي والذاتان يعبران عن طرق توزيع الذرات المختلفة في مستويي الطاقة السفلي والعلوي على الترتيب.



I-7- معاملات اينشتاين The Einstein Relations

تعرف المعاملات B_{10} & B_{01} & A_{10} بمعاملات اينشتاين Einstein Coefficients وهي التي تعطينا فكرة جيدة عن احتمالية حدوث انتقال بين مستويات الطاقة. وسنقوم بإيجاد العلاقات التي تربط بين هذه المعاملات حيث ان الانتقالات الثلاثة تحصل في المادة بصورة مستمرة وبمعدل ثابت لكل منها عند ثبوت درجة الحرارة أي في حالة الاتزان الحراري. وبمعرفة معامل من المعاملات الثلاثة يمكن حساب المعاملات الأخرى.

سنقوم في هذه المرحلة بدراسة تأثير كل عملية من العمليات الانتقالية الثلاث على معدل

تغير تعداد الذرات N_1 في مستوى الطاقة المثار E_1 وذلك في حالة الاتزان الحراري
 $\frac{dN_1}{dt}$ ؛ لذا سنفترض مجموعة من الذرات موزعة على مستويين للطاقة E_0 , E_1

الإصدار التلقائي Spontaneous Emission

كما قد ذكرنا أن عملية الإصدار التلقائي تعتمد على تعداد المستوى E_1 أي كلما ازداد N_1 كلما زادت عملية الإصدار التلقائي، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل A_{10} الذي يعبر على احتمالية حدوث الإصدار التلقائي. يكون معدل التغير في تعداد المستوى E_1 بالنسبة للزمن بالسالب لأنه كلما زاد معدل التغير كلما نقصت N_1 . ويمكن التعبير عن ذلك بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = - A_{10} N_1 \quad (1)$$

الامتصاص المحثوث Stimulated Absorption

تعتمد عملية الامتصاص على تعداد المستوى E_0 أي كلما ازداد N_0 كلما زادت عملية الامتصاص، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل B_{01} الذي يعبر على احتمالية حدوث عملية الامتصاص. يكون معدل التغير في تعداد المستوى E_1 بالنسبة للزمن بالموجب لأنه كلما زاد معدل التغير كلما زاد N_1 . وحيث أن عملية الامتصاص تحدث إذا توفر Photon ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين المستويين E_1 و E_0 أي أن

$$h\nu = (\Delta E) = E_1 - E_0$$

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الامتصاص فإننا نعرّف ~~عنه~~ ~~بـ~~ طاقة

الاشعاع بالدالة ρ كتابع للتردد Energy density of radiation والتي تعطي

احتمال وجود فوتونات عند تردد ν

ويمكن التعبير عن تأثير عملية الامتصاص على تغير تعداد المستوى E_1 بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = + B_{01} N_0 \rho(\nu) \quad (2)$$

Stimulated Emission المحثوث

تعتمد عملية الإصدار المحثوث على تعداد المستوي E_1 أي كلما ازداد N_1 كلما زادت عملية الإصدار المحثوث ، وكذلك يعتمد هذا الانتقال على المعامل B_{10} الذي يعبر على احتمالية حدوث عملية الإصدار المحثوث. يكون معدل التغير في تعداد المستوي E_1 بالنسبة للزمن بالسالب لأن كلما زاد معدل التغير كلما قل N_1 . حيث أن عملية الإصدار المحثوث تحدث إذا توفر Photon ذو طاقة تساوي فرق الطاقة بين المستويين E_0 و E_1 أي أن

$$h\nu = (\Delta E) = E_1 - E_0$$

وللتعبير عن مدى تحقق المعادلة السابقة في عملية الإصدار المحثوث فإننا نعبر عنها بكثافة الإشعاع بالدالة ρ كتابع للتردد Energy density of radiation والتي تعطي احتمال وجود فوتونات عند تردد ν

ويمكن التعبير عن تأثير عملية الإصدار المحثوث على تغير تعداد المستوي E_1 بالمعادلة التالية:

$$dN_1/dt = - B_{10} N_1 \rho(\nu) \quad (3)$$

تمثل المعادلات الثلاث السابقة الذكر الحالات المختلفة التي يمكن من خلالها أن يتفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع ذرات المادة. وفي حالة الاتزان الحراري عند درجة حرارة T فإن عدد الذرات N_1 في مستوى الطاقة E_1 يكون ثابتاً أي أن

$$N_1 = \text{Constant} \quad \& \quad dN_1/dt = 0$$

لذلك :

$$dN_1/dt = -A_{10} N_1 + B_{01} N_0 \rho(\nu) - B_{10} N_1 \rho(\nu) = 0$$

وبالتالي :

$$N_1 (-A_{10} - B_{10} \rho(\nu)) + B_{01} N_0 \rho(\nu) = 0$$

$$N_1 (A_{10} + B_{10} \rho(\nu)) = B_{01} N_0 \rho(\nu)$$

نحصل على :

$$(4) \quad \frac{N_1}{N_0} = \frac{B_{01} \rho(\nu)}{A_{10} + B_{10} \rho(\nu)}$$

وحيث أن المعادلات الثلاث الأخيرة تم اشتقاقها تحت شرط الاتزان الحراري

ولهذا فإن معادلة ماكسويل بولتزمان متحققة

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{\frac{-h\nu}{kT}} \quad (5)$$

وبمقارنة المعادلة (٤) بالمعادلة (٥) نحصل على المعادلة التالية:

$$\frac{g_1}{g_0} e^{\frac{-h\nu}{kT}} = \frac{B_{01} \rho(\nu)}{A_{10} + B_{10} \rho(\nu)} \quad (5^*)$$

تكون كثافة الاشعاع عند درجات الحرارة العالية كبيرة وهنا يمكن اهمال تأثير عملية الإصدار التلقائي التي لا تتأثر بتغير درجة الحرارة.

عندما يكون : $KT \gg hv$ يكون $g_1/g_0 = N_1/N_0$

لذلك :

$$\frac{g_1}{g_0} = \frac{B_{01}}{B_{10}} \quad (6)$$

من المعادلات السابقة نحصل على :

$$\rho(\nu) = \frac{A_{10}}{B_{10}} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (7)$$

تدعى المعادلة (٧) بمعادلة اينشتاين لاشعاع الجسم الأسود

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (8)$$

نحصل :

$$\frac{A_{10}}{B_{10}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad (9)$$

تدعي المعادلتان (٧) و (٩) بمعادلتَي اينشتاين . تسمح لنا المعادلة الثانية بحساب نسبة احتمال الاصدار التلقائي الى احتمال الاصدار المحثوث من أجل سويتي طاقة .

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{من المعادلة (٨)}$$

لتقدير النسبة بين الاصدار التلقائي والاصدار المحثوث نفترض أن :

$$R = e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1$$

لذلك :

$$\rho(\nu) = \frac{A_0}{B_{10}} \frac{1}{R}$$

النسبة بين الاصدار التلقائي والاصدار المحثوث نكتبها بالشكل :

$$R = \frac{A_{10}}{B_{10}} \frac{1}{\rho(\nu)}$$

مثال : احسب النسبة بين الاصدار التلقائي والاصدار المحثوث لسلك من التنغستين يعمل بدرجة الحرارة 2000 K أخذاً "تواتراً" وسطي الاصدار $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

الحل :

$$R = \exp[(6.6 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14}) / (1.38 \times 10^{-23} \times 2000)]$$

تم إهمال كثافة الإشعاع

$$R \approx 1.5 \times 10^5$$

هذا يثبت أن الإصدار المحدث تحت الشرط الطبيعي للتوازن الحراري لا يكون ذو عملية هامة وبالتالي لا يتحقق فعل الليزر.

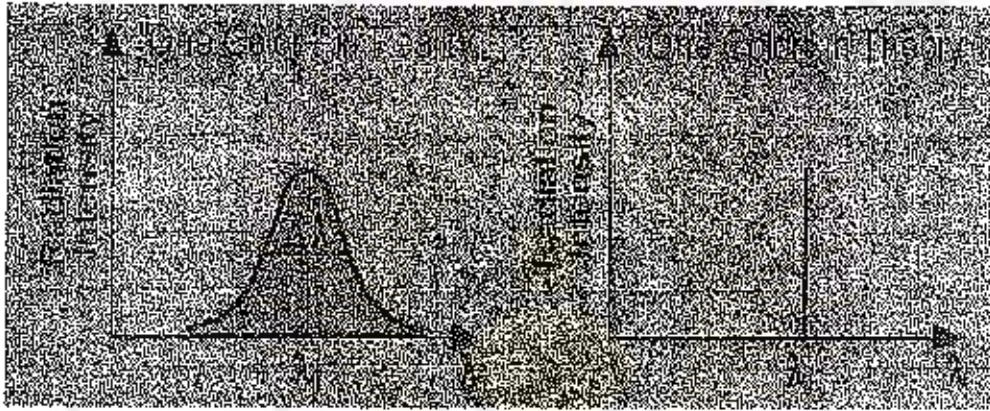
كما سبق نستنتج أن عملية الإصدار المحدث تنافس عمليتي الإصدار التلقائي والامتصاص المحدث وحتى نضخم شعاعاً "ضوئياً" بواسطة الإصدار المحدث فإنه يجب أن نزيد معدل هذه العملية بالنسبة للعمليات الأخرى. وحتى يتحقق ذلك فإنه يجب زيادة كثافة الإشعاع وتعداد المستوى E_2 وهذا ما يعرف بالانعكاس السكاني Population Inversion.

I - 8 - عرض الخط الطيفي :

يتولد الليزر داخل المادة عند أطوال موجية محددة تساوي أحد الأطوال الموجية لخطوط الطيف الصادرة من المادة. ولتمثيل خطوط الطيف نرسم شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر من المادة كتابع للتردد أو الطول الموجي.

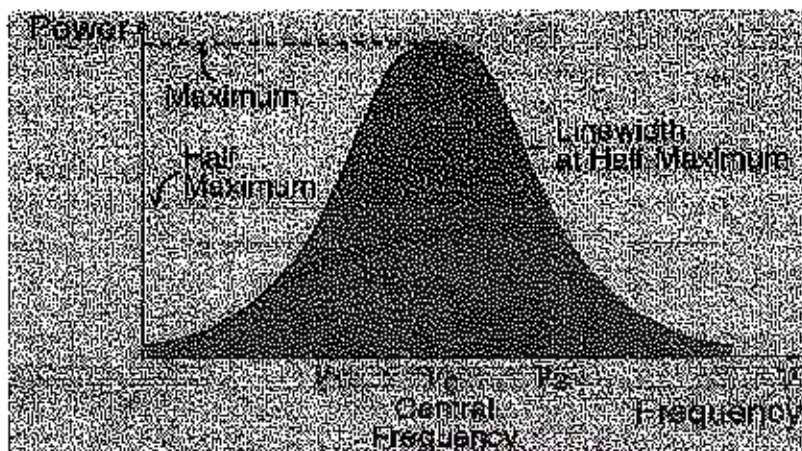
افترضنا سابقاً أن الطيف الصادر من الذرة المثارة يتركز فقط عند تردد وحيد وهو ν_0 والذي يدعى Resonance Frequency ، (تواتر التناوب). ولكن في الحقيقة فإن عمليتي الامتصاص والإصدار لا تحدثان عند تردد وحيد فقط ولكن عند حزمة من الترددات التي تشكل اتساعاً في الخط الطيفي $\Delta\nu$ وهذا الاتساع في الخط الطيفي line emission يعتمد على الكثير من العوامل سندكرها بالتفصيل فيما يلي.

المقصود بمصطلح أحادي اللون **Monochromatic** : نظريا فإن مصطلح أحادي اللون يعني طولاً موجياً محدداً λ_0 ، وعند رسم منحنى التغير في شدة الطيف الصادر للمستويين طاقة مع الطول الموجي ينتج خط يعرف بالخط الطيفي **spectral line** كما في الشكل الموضح على الجانب الأيمن حيث أن شدة الأشعة عند أطوال موجية خارج λ تساوي صفراً. والحقيقة ، فعند تمثيل العلاقة بين شدة الطيف الصادر والطول الموجي نلاحظ أن للخط الطيفي اتساعاً معيناً مقداره $\Delta\lambda$ يعرف بـ **width spectral** بحيث تكون أعظم قيمة عند λ وتنقص على الأطوال الموجية المجاورة بحوار λ كما في الشكل على الجانب الأيسر من الشكل التوضيحي.



وللتعبير عن شكل واتساع الخط الطيفي يمكن استخدام العديد من الطرق ولكن سنستخدم الطريقة الأكثر شيوعاً وهي الاتساع عند منتصف القمة أي:

FWHM Full Width at Half Maximum كما في الشكل التالي:



FWHM = Full Width at Half Maximum

لقد سلمنا بأن مستويات الطاقة التي تعاملنا معها حادة تماماً أي أن قيمة الارتياح (الشك) يساوي صفراً $\Delta E = 0$ لكل منهما، وهذا يتناقض مع مبدأ هايزنبرج للشك الذي ينص على وجوب بقاء الذرة المثارة إلى المستوى E_1 زمناً "لا نهائياً" حتى يكون الشك في تحديد مستوى الطاقة E_1 يساوي صفراً. وحسب هايزنبرغ :

$$\Delta E \Delta t > h$$

$$\Delta E = h \nu \Delta \nu$$

$$\Delta \nu > 1 / \Delta t$$

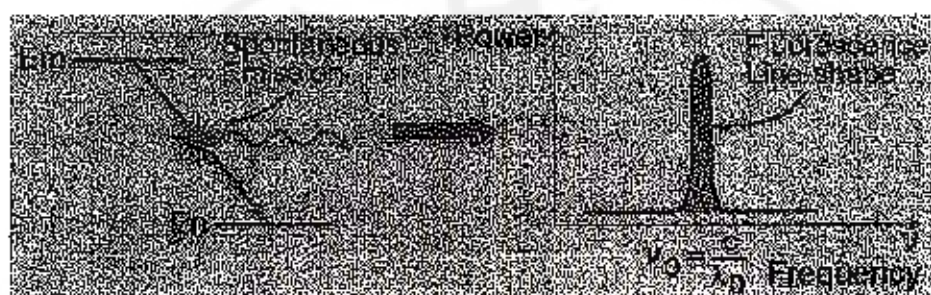
مثال عددي :

$$\Delta t = 10^{-8} [s] \quad \Rightarrow \quad \Delta \nu = 10^8 [Hz]$$

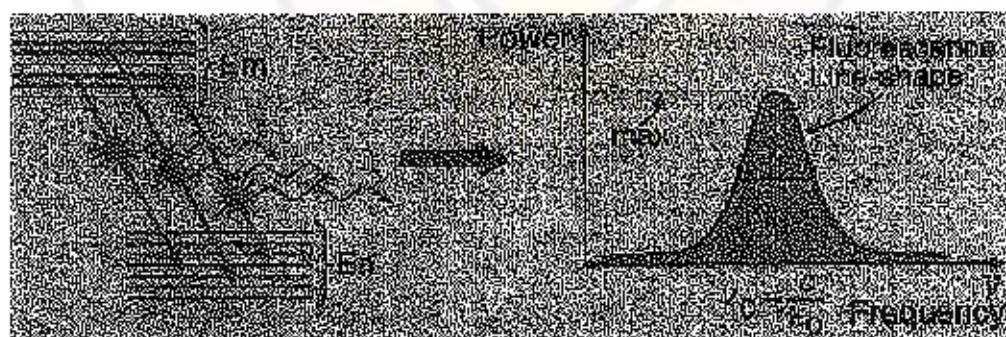
$$\Delta t = 10^{-4} [s] \quad \Rightarrow \quad \Delta \nu = 10^4 [Hz]$$

كلما كانت فترة حياة الانتقالات **transition lifetime** بين مستويات الطاقة أكبر كان عرض الخط أضيق **line width $\Delta\nu$** .

فإذا أثيرت ذرة إلى مستوى طاقة ما فسوف تبقى فيه فترة زمنية محددة ثم تعود إلى المستوى الأرضي للطاقة **Ground level** وتطلق فوتونات.



وللتغلب على هذا التناقض بين مبدأ الشك والعمر المحدود لبقاء الذرة مثارة نفرض أن مستويات الطاقة لها اتساع وأن احتمالية توزيع الذرات أكبر ما يمكن عند التردد ν_0 كما في الشكل الموضح، ولذلك فإن احتمالية الانتقال ν أقل من احتمالية ν_{21} لأن احتمالية توزيع الذرات في منتصف مستوى حزمة الطاقة أكبر ما يمكن.



يؤخذ متوسط عمر المستوى τ Average life time لمستوى الطاقة كمقياس للشك في الزمن Δt .

ويمكن تقدير اتساع الخط الطيفي نتيجة الاتساع الطبيعي Natural Broadening لمستوي طاقة i بالمعادلة التالية:

$$\Delta\nu_i = 1/2\pi\tau_i$$

عندما $\Delta\nu_i = 0$ هذا يقابل حالة أرضية $\tau_i = \infty$

أعلى حالة (المثارة) لها زمن حياة وسطي بين 10^{-6} - 10^{-9} ثانية.

زمن الحياة life time في الحالة المثارة هو مقلوب احتمال الاصدار التلقائي spontaneous emission probability (A_{21})

$$\tau = 1/A_{21}$$

في الحالة العامة : $\tau = 1/\sum A_{2i}$

درسنا فيما سبق تأثير العمر المحدود لمستويات الطاقة على اتساع الخط الطيفي Natural Broadening، وسنقوم بدراسة تأثير ظاهرة دوبلر على اتساع الخط الطيفي.

كما نعلم أن ظاهرة دوبلر هي تغير في التردد المقاس نتيجة الحركة النسبية بين المصدّر والمراقب، مثل الصوت الذي نسمعه لدى مرور سيارة اسعاف بسرعة بالنسبة لنا، فعندما يتحرك المصدر باتجاه مراقب ثابت فإن التردد المقاس بواسطة المراقب يزداد

وعندما يتبعد المصدر عن المراقب الثابت يصبح التردد المقاس أقل من تردد المصدر في حالة سكون.

تحدث ظاهرة دبلر للذرات الباهضة للعطيف الكهرومغناطيسي حيث ان الذرات في حالة حركة مستمرة أثناء الإصدار الضوئي ولهذا فإن المراقب الذي يقيس تلك الترددات المظياف (Spectrometer) سوف يقيس ترددات مختلفة حسب ما إذا كانت الذرات مقتربة من المظياف أو مبتعدة عن المظياف. والترددات المقاسة تعتمد على السرعة النسبية للذرات بالنسبة للمظياف كما في معادلة دبلر التالية:



Classical Doppler Effect

يمكن التمييز بين مجموعة من الذرات على حسب سرعتها فلو اختلفت مجموعة في سرعتها فإن الترددات الصادرة منها تختلف وبالتالي نستطيع تمييز الترددات نتيجة لاختلاف السرعات.

وحيث ان الترددات الصادرة من الذرة نتيجة للانتقال بين مستويي الطاقة ١ و ٢ سوف يعتمد على سرعة الذرة من خلال معادلة دبلر السابقة.

ويكون مدى الاتساع الناتج عن ظاهرة دبلر



لاحظ أن مدى الاتساع يتناسب طردياً مع التردد الأصلي للطيف الصادر وعليه فإن ظاهرة دبلر تؤثر على الترددات الكبيرة مثل الإصدار الكهرومغناطيسي في مدى اللون الأزرق أو أكثر، أما الترددات في مدى اللون الأحمر أو أقل فإن ظاهرة دبلر لاتلعب دوراً أساسياً في الاتساع.

كما أن الاتساع نتيجة ظاهرة دبلر يزدلد بزيادة درجات الحرارة ويقل بنقصان كتلة الذرة.

وهناك مسبب أخير لاتساع الخط الطيفي ينتج عن التصادمات المرنة بين الذرات الباعثة للأشعاع الكهرومغناطيسي بعضها ببعض :

Pressure Broadening (Collision Broadening)

ويحسب التصادم في انقطاع القطر المويحي الصادر من الذرة وهذا الانقطاع يدوم لفترة قصيرة جداً 10^{-13} ثانية، مما يسبب أحداث قفزات عشوائية في طور القطر المويحي كما في الشكل، وتكون المحصلة النهائية لهذه التصادمات هو اتساع في مدى الترددات الصادرة من الذرات المتصادمة حول التردد الأصلي ν_0 .

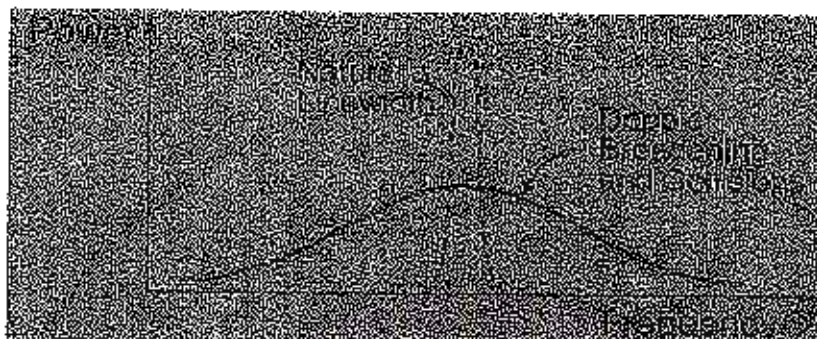
وهذا يعطي الاتساع نتيجة للتصادمات وقد تم إهمال الاتساع نتيجة العمر المحدود لمستويات الطاقة وذلك لصغر قيمته بالمقارنة بالاتساع الناتج عن التصادمات بين الذرات.

وبالنتيجة نقول أن : يقسم الاتساع إلى نوعين يعرفان

١- بالاتساع المتجانس Homogenous Broadening مثل الاتساع الناتج عن

Life time Broadening & Pressure Broadening

٢- والنوع الثاني يعرف بالاتساع الغير متجانس Non-homogeneous Broadening مثل Doppler Broadening.



وذلك لأن في دبلر يمكننا التمييز بين مجموعة وأخرى من الذرات حسب سرعتها، أما في Life time و Pressure فلا يوجد تمييز بين مجموعة من الذرات وأخرى . وفي حالة الاتساع الغير متجانس فإن التكبير لليزر يحدث فقط بواسطة مجموعة محددة من الذرات أما في الاتساع المتجانس فإن كل الذرات تشارك في عملية التكبير لانتاج الليزر .

I - 9 - امتصاص الاشعاع الكهرومغناطيسي :

علمنا مما سبق أن عملية امتصاص فوتون photon absorption بواسطة ذرة فإن حالة الذرة تتغير من ذرة غير مثارة الى ذرة مثارة بعلاقة تساوي طاقة الفوتون الذي اكتسبته . وهذا بالفعل ما يحدث عند النظر إلى الذرة في المادة على حدى . ولكن إذا اعتبرنا الحالة الجهرية لوصف عملية الامتصاص macroscopic system فإن جزءاً من الشعاع الكهرومغناطيسي الساقط على المادة سوف يمتص وفي الحالة الحادي Equilibrium Thermal فإن شدة الشعاع النافذ أقل من الشعاع

الساقط والعلاقة التي تربط شدة الشعاع النافذ مع الشعاع الساقط وسمك المادة هو قانون لامبرت Lambert Law

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

I_0 : شدة الاشعاع الواردة

α : معامل الامتصاص للمادة ، x ثخانة المادة.

من الشائع استخدام وحدات السنتيمتر (10^{-2} [m]) لقياس ثخانة المادة x ، لذلك تكون وحدات معامل الامتصاص (α) هي :

$$[\text{cm}^{-1}] = [1/\text{cm}].$$

ومن هذه المعادلة نستنتج أن كلما ازداد سمك المادة كلما كانت شدة الأشعة النافذة transmitted أقل.

مثال : احسب معامل الامتصاص α للمادة التي ثخانتها 10 [mm] التي تفسر 50% من الشدة الواردة عليها.

الحل :

$$\alpha = 1/x \times \ln(1/T) = 1/1 \times \ln(1/0.5) = 0.69 [\text{cm}^{-1}]$$

10- I - معامل الربح الأصغري : Small signal gain coefficient

إن ماسبق لا ينتج شعاع ليزر لأن الأشعة النافذة أقل من الأشعة الساقطة والمطلوب هو الحصول على شعاع مكبر بعد نفاذه من المادة، وكما نعلم أن كل من عمليتي الإصدار

التلقائي والحثي تزيد من شدة الأشعة بينما عملية الامتصاص تقلل من شدة الأشعة النافذة. وللحصول على الليزر يجب أن تكون عملية الإصدار أكبر من عملية الامتصاص حتى نحصل على شعاع ليزر.

وقد درس العالم اينشتاين تأثير تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع المادة من خلال عمليات الانتقال الثلاثة :

١- الإصدار التلقائي Spontaneous Emission

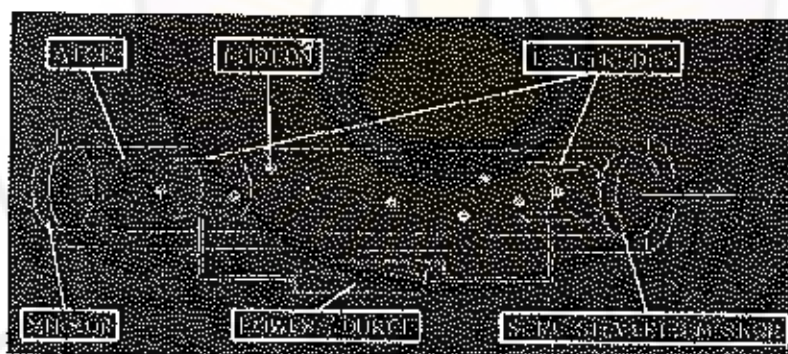
٢- الامتصاص الحثي Stimulated Absorption

٣- الإصدار الحثي Stimulated Emission

وذلك حسب التسلسل التالي : نفترض أن الانتقالات الإشعاعية تحصل بين سويتين

E_1 و E_2 حيث $E_2 > E_1$. عندها تواتر الإصدار

$$\nu_{21} = (E_2 - E_1) / h$$



فكرة عمل الليزر

وتوصف حزمة الضوء بالتشعيع I :

$$I_v = C \rho(v)$$

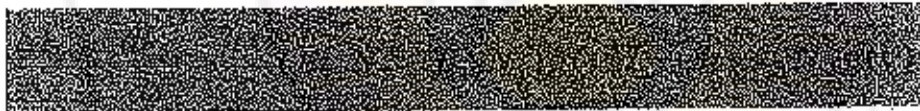
حيث I_v هو التشعيع و C سرعة الضوء بـ (m/sec) و $\rho(v)$ كثافة الطاقة (J/m².sec)

ان المقدار I_v يشبه التفاعل الذري في السويتين E_1 و E_2 على طول الاتجاه Z كما يلي :

$$\Delta I_v = + N_2 \Delta z x_1 (I_v/C) B_{21} g(v) \times h\nu - N_1 \Delta z x_1 (I_v/C) + B_{12} g(v) \times h\nu + N_2 \Delta z x_1 A_{21} g(v) \times h\nu$$

حيث تضم المعادلة السابقة الانتقالات الثلاث سابقة الذكر.

يمكن تجميع المعادلة بالصورة التالية



حيث أن عملية الإصدار التلقائي تحدث بوجود أو عدم وجود فوتونات ساقطة على المادة أي أنها لا تعتمد على I لذا فإنها قمل في المعادلة

نلاحظ أيضاً أن قيمة التغير في تشكّل الأشعة بالنسبة للمسافة Z تكون قيمة سالبة إذا كانت $N_2 < N_1$ وهذا ما يحدث في الطبيعة وهنا لا نحصل على تكبير، ولذلك إذا أردنا تكبير الأشعة لنحصل على ليزر فإنه من الضروري أن تكون $N_1 < N_2$ وهذا ما يعرف

بالانعكاس السكاني Population Inversion. لنعود إلى المعادلة السابقة
ونستخدم معادلات اينشتين السابق الذكر وهما:





وبذلك ينتج أن





وبالتعويض عن B_{21} باستخدام معادلات اينشتين ينتج التالي:



باختصار المعادلة السابقة ينتج أن



الثوابت التالية في المعادلة لها وحدة m^{-1} أو cm^{-1} ولهذا تعرف باسم معامل الربح
الصغري Small signal Gain Coefficient وقد سميت كذلك لأننا اعتبرنا أن I_v

صغيرة بحيث لا تؤثر على N_1 أي أن N_2 ستبقى ثابتة. والحال سيكون مختلفاً إذا كانت الشدة I_0 كبيرة فإن المعادلة لا تصلح لأن N_2 ستتغير مع الشدة.

$$\frac{dN_2}{dt} = -\sigma N_2 I_0 + \sigma N_1 I_0$$

وتأخذ المعادلة الصورة التالية:

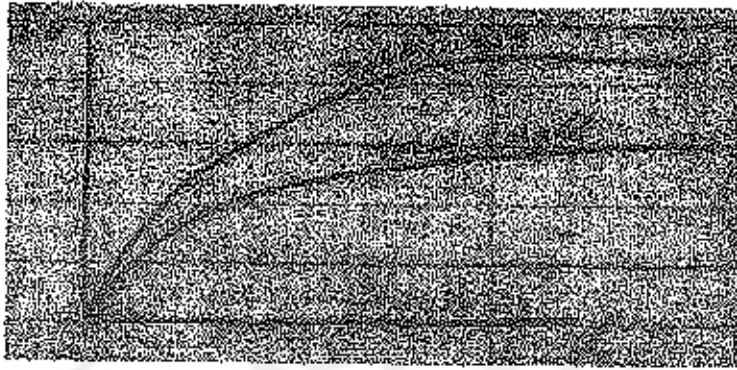
$$\frac{dN_2}{dt} = -\sigma (N_2 - N_1) I_0$$

بتكامل طرفي المعادلة مع العلم بأن dZ يتغير من القيمة 0 إلى l وهو أبعاد المادة التي طولها l

$$\int_0^l \frac{dN_2}{dZ} dZ = -\sigma (N_2 - N_1) \int_0^l I_0 dZ$$

$$N_2(l) - N_2(0) = -\sigma (N_2 - N_1) I_0 l$$

$$N_2(l) = N_2(0) - \sigma (N_2 - N_1) I_0 l$$

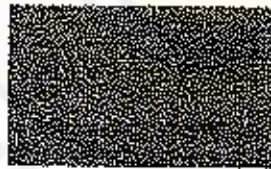


عندما تكون Small signal gain coefficient كبيراً فإن الشدة تزداد بسرعة
إلى حد الاشباع Saturation level

لنعود إلى معادلة التكبير التالية



حيث أن وحدة الكميات الفيزيائية التالية في المعادلة السابقة



هي وحدة مساحة فإنها تعرف باسم مساحة مقطع عملية الإصدار المحثوث Cross-
section for stimulated emission وهذه تعبر عن احتمالية حدوث
الإصدار المحثوث فكلما زادت مساحة المقطع كلما ازدادت عملية الإصدار المحثوث.

وهذا يمكن كتابة معادلة التكبير لليزر على النحو التالي:

حيث أن ΔN تعطي مقدار فارق التعداد بين مستويات الطاقة E_1 و E_2 وفي حالة الليزر يجب أن يكون فارق التعداد موجباً.

$$\Delta N = N_2 - N_1 = \frac{P_{out}}{h\nu}$$

وبالنتيجة ان - الربح ومعامل الربح **Gain and Gain coefficient** تلخص بالشكل :

التابع G يعرف باسم التكبير **Gain** والتابع γ_0 تعرف بمعامل التكبير وكلتا الدالتين تعتمدان على التردد ولكن التابع G يعتمد على التردد بدالة اسية حيث ان

$$G(v) = e^{\gamma_0(v)l} = e^{C g(v)l}$$

$$\gamma_0(v) = C g(v)$$

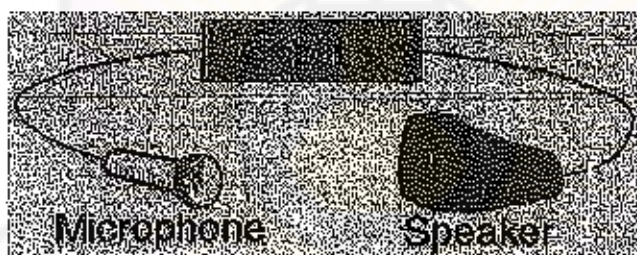
$$G(v) = e^{\gamma_0(v)l} = e^{C g(v)l} \quad \text{أما التابع } G :$$

I - 11 - التغذية العكسية الضوئية Optical Feedback

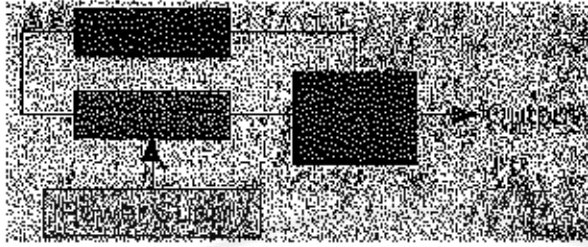
يعمل الليزر مثل أي منبذب الكتروني، وفكرة المذبذب هو جهاز ينتج ذبذبات بدون وجود مؤثر خارجي، ولشرح ذلك نستخدم مثال جهاز مكبر الصوت والذي يتكون من ميكروفون microphone وسماعة speaker يوصل بينهما جهاز تكبير amplifier كما في الشكل التالي:



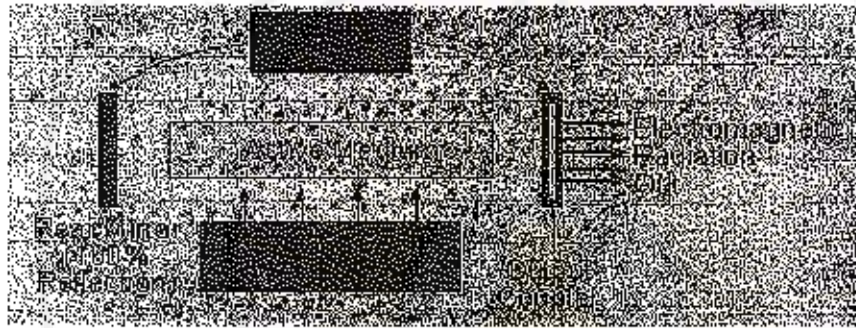
عندما يكون الميكروفون موضوعاً امام السماعة كدائرة مغلقة فإننا نسمع صغير متصل من السماعة وذلك بدون الحاجة إلى مصدر صوت خارجي.



وهذه فكرة التغذية العكسية حيث أن الاشارة الصوتية الداخلية الصادرة من السماعة (noise) تلتقط بواسطة الميكروفون ومن ثم يتم تكبيرها بواسطة المكبر ويعاد بثها من خلال الميكروفون وتكرر العملية إلى أن يتم تكبير الصوت ويصدر على شكل صفيراً متصلاً.



وبنفس الفكرة يعمل مذبذب الليزر حيث تتم إعادة جزء من الفوتونات المكبرة بواسطة عملية الإصدار المحثوث باستخدام مرآة ليتم تكبيرها، والشكل التالي يوضح فكرة عمل مذبذب الليزر.



عندما تسقط فوتونات ذات شدة I_0 خلال مادة مكبر الليزر active medium فإنها تتكبر بمقدار G وتصبح شدة الأشعة $I_0 G$ وباستخدام مرآة R_2 فإن جزءاً من الأشعة ينعكس بمقدار R_2 وتصبح شدة الأشعة $R_2 I_0 G$ ، تعمل المرآة على إعادة الأشعة للمكبر مرة أخرى لتتكبر الأشعة بمقدار G مرة أخرى وتخرج $R_2 G I_0 G$ لتسقط على المرآة الأخرى R_1 وتكون شدة الأشعة عند انعكاسها $R_1 R_2 G I_0 G$. وهذا ما يحدث للأشعة عند دخولها للمكبر خلال دورة تكبير واحدة ويكون التكبير المكتسب في المقدار GG والفقد في الأشعة يكون ناتجاً عن $R_2 R_1$



والشرط الاساسي ليصبح المذبذب يعمل كمكبر للاشارة هو ان يكون الناتج النهائي بعد دورة واحدة أكبر من الاشارة الاصلية I_0 أي أن:

$$I_0 GR_2 GR_1 \geq I_0$$

$$GR_2 GR_1 \geq 1 \quad **$$

هذا هو شرط الهزاز ليصبح مضخما" أي أن الربح يحقق العلاقة السابقة :

وذكرنا سابقا" أن معادلة الربح :

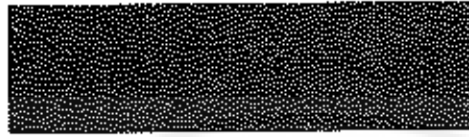
$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

وبالتعويض في ** نجد :

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

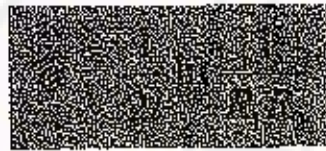
$$G(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

هذه المعادلة تصبح بالشكل :

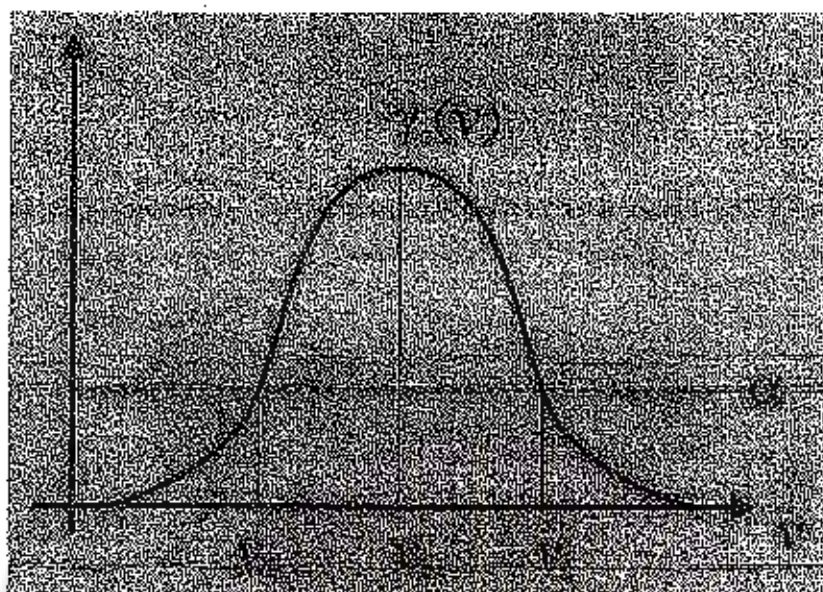


الطرف الأيسر من العلاقة السابقة تمثل $\text{length Gain per unit}$ والطرف الأيمن يمثل $\text{Losses per unit length}$.

لنفرض أن الرمز α يعبر عن مقدار الفقد في الإشارة لذا فإن



نلاحظ أن الخسارة losses لا تعتمد على التردد وفي هذه الحالة يمكن تمثيل الخسارة على منحنى الـ Gain كدالة في التردد بخط مستقيم كما في الشكل



لاحظ أنه ليست كل الترددات تحت منحنى Gain يمكن ان تنتج ليزرا" ولكن فقط تلك الترددات التي تحقق الشرط الذي ينص على أن التحصيلة يجب أن تكون أكبر من أو تساوي الخسارة وهذا يتحقق في المدى الترددي $\nu_2 - \nu_1$. كما موضح في الشكل أعلاه.

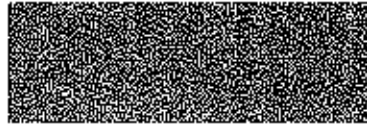
من معلوماتنا السابقة عن دالة الـ Gain نرى أنه يمكن التعبير عنها بثابت مضروب في دالة line shape function كما يلي:

$$\gamma_o(\nu) = C g(\nu)$$

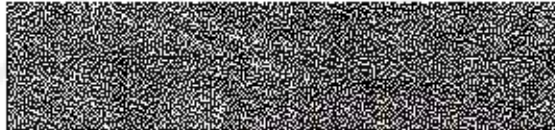
وحيث ان أكبر قيمة للـ Gain تكون عند التردد ν_0

$$\gamma_o(\nu_0) = C g(\nu_0)$$

وبتقسيم المعادلتين السابقتين :



ومن أجل الاتساع المتجانس Homogenous Broadening $g(\nu)$ يعطى بالشكل :



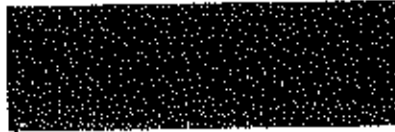
وبالتعويض $g(\nu)$ و $g(\omega)$ في ***



وهذه المعادلة تعطي الـ Gain عند أي تردد بدلالة الـ Gain عند التردد ν_0 .

سنقوم في الخطوات التالية بإيجاد المدى الترددي Bandwidth for the laser الذي يتحقق فيه شرط الحصول على الليزر وعلاقته باتساع منحنى الـ $\Delta \nu$ Gain

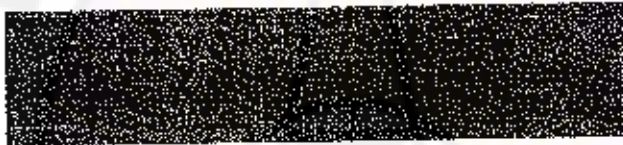




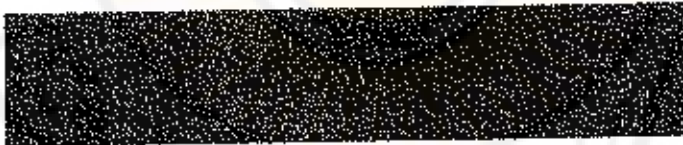
حيث أن N عدد صحيح يعبر عن النسبة بين مقدار الحصيد إلى الخسارة، ويكون مقدار الخسارة losses هو :



ومن الشكل $\alpha = \gamma_o(v_1)$:



$$\alpha = \gamma_o(v_1) = \frac{1}{N} \gamma_o(v_o)$$



كما هو موضح في الشكل السابق



كلما كبرت قيمة N كلما كانت الحصىلة أكبر من الخسارة وهذا افضل لكفاءة الليزر
وعندما تكون $N=2$ يكون المدى الترددي لليزر مساوياً لاتساع منحني Δv Gain
وعندها تكون الحصىلة ضعف قيمة الخسارة، وعندما تكون $N=1$ تكون الحصىلة
تساوي الخسارة ويكون المدى الترددي في هذه الحالة مساوياً للصفر $0 = v_2 - v_1$

عندما تكون N اقل من 1 فإن المقدار تحت الجذر يصبح سالباً وهذا ليس له معنى
فيزيائي ولا يمكن على الاطلاق الحصول على ليزر في هذه الحالة حيث تصبح الخسارة
أكبر من الربح.

I-12 - أنماط الليزر Laser Modes

علمنا مما سبق أنه للحصول على الليزر نستخدم التغذية العكسية بواسطة المرايا
وذلك لتكبير الشعاع الضوئي خلال مروره بالوسط المشع لليزر، لهذه المرايا دور في
التأثير على الاشعاع الكهرومغناطيسي داخل المكبر حيث ينتج نوعين من الانماط
تعرف بالانماط الطولية **longitudinal modes** والانماط المستعرضة
transverse modes.

1- الانماط الطولية

وتتشكل عند تواترات خاصة داخل المجاوب الليزري والمحققة لشرط الأمواج المستقرة.
باستخدام مداخل فابري - بيرو ، نلاحظ أن حزمة الليزر تتألف من عدد من
مدروجات التواترات المنقطعة .

إن السبب في تكون هذه الأنماط يعود إلى تكون أمواج (مستقرة) **standing wave** بين المرآتين. وكما نعلم أن الأمواج المستقرة تتكون نتيجة لتداخل موجتين هما نفس التردد وتنتشران في اتجاهين متعاكسين في المسافة بين المرآتين. وكما نعلم على هذه الأمواج الوتر الموسيقي في الجيتار. وشروط الأمواج المستقرة هو :

$$m = 2L/\lambda$$

L هو طول التجارب الليزري

m هو عدد الأنماط

λ طول الموجة في تجارب الليزر

مثال : ان طول تجارب ليزري هو 25 cm . احسب التواترات والأطوال الموجية الموافقة ل :

1. $m = 1$
2. $m = 10$
3. $m = 100$
4. $m = 10^6$

الحل :

$\nu = mc/2L$	$\lambda = 2L/m$	
$\nu_1 = 6 \times 10^8 \text{ [Hz]}$ Radio Wave	$\lambda_1 = 2 \cdot \frac{0.25}{1} = 0.5$	1
$\nu_2 = 6 \times 10^9 \text{ [Hz]}$ Short Wave Communication	$\lambda_{10} = 2 \cdot \frac{0.25}{10} = 0.05$	2
$\nu_3 = 6 \times 10^{10} \text{ [Hz]}$ Microwaves	$\lambda_{100} = 2 \cdot \frac{0.25}{100} = 5 \cdot 10^{-3}$	3
$\nu_4 = 6 \times 10^{14} \text{ [Hz]}$ Green Color	$\lambda_{10^6} = 2 \cdot \frac{0.25}{10^7} = 0.5 \cdot 10^{-6}$	4

الفرق بين نمطين طوليين متتاليين :

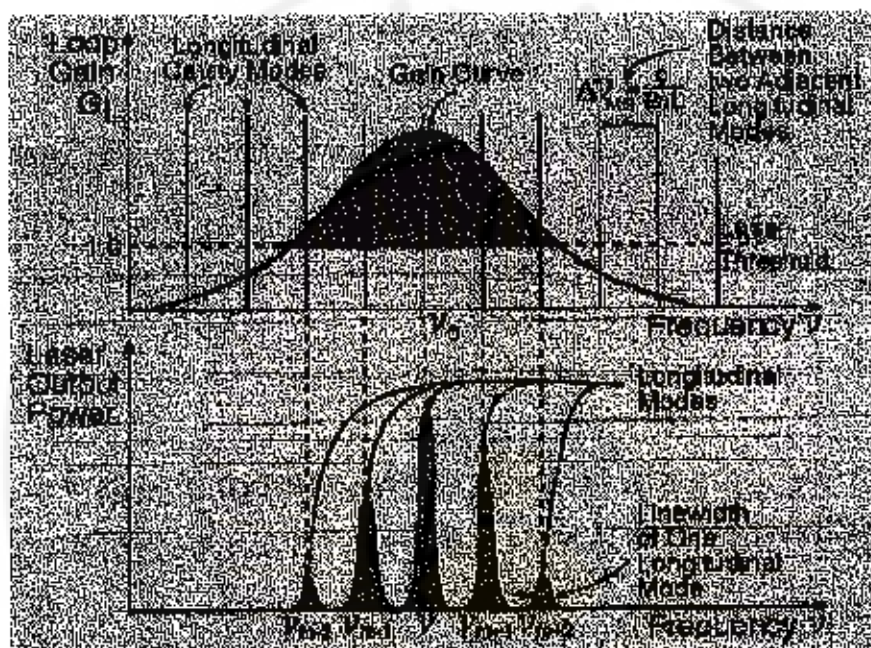


وبالتالي الفرق بين نمطين طوليين متتاليين :

$$\Delta \nu = c/2L$$

وبالتالي المسافة التواترية بين نمطين متجاورين يعتمد فقط على المسافة الفاصلة بين المرآتين.

من أجل $L = 25\text{cm}$ ، الفرق بين تواترين مختلفين هو $6 \times 10^8 \text{sec}^{-1}$



ملاحظات

- تزداد عدد الأنماط تحت منحنى الربح كلما زاد طول مكبر الليزر L وذلك لأن الفاصل بين الأنماط يقل بزيادة L .

- عدد الأنماط التي يمكن أن تنتج ليزر تلك التي يتحقق عندها شرط الربح أكبر من أو يساوي الخسارة كما هو واضح في المنطقة الملونة في الشكل أعلاه.

– للحصول على عدد الأنماط التي يمكن أن تكبر تحت منحني الربح نقسم **Laser** bandwidth على المسافة بين نمطين. $C/2L$

مثال : ان طول مجاوب ليزر **He-Ne** هو ٣٠ cm . ويفرض طول موجة الاصدار هو

$0.6328 \mu\text{m}$ والمطلوب حساب :

- ١- الفرق بين نمطين طوليين متتاليين
- ٢- عدد الأنماط الطولية عند طول موجة الاصدار
- ٣- تواتر الليزر

الحل :

$$1- (\Delta \nu) = C/(2L) = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} / (2 \times 0.3 \text{ [m]}) = 0.5 \times 10^9 \text{ [Hz]} = 0.5 \text{ [GHz]}$$

$$2- \lambda_q = 2L/m$$

$$m = 2L / \lambda_q = 2 \times 0.3 \text{ [m]} / 0.6328 \times 10^{-6} \text{ [m]} = 0.948 \times 10^6$$

٣- بطريقتين :

$$- \nu = q \times (\Delta \nu) = (0.948 \times 10^6)(0.5 \times 10^9 \text{ [Hz]}) = 4.74 \times 10^{14} \text{ [Hz]}$$

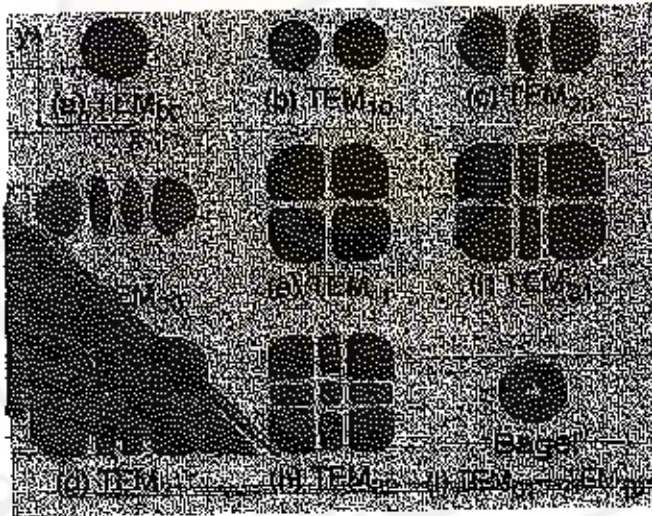
$$- \nu = c/\lambda = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} / 0.6328 \times 10^{-6} \text{ [m]} = 4.74 \times 10^{14} \text{ [Hz]}$$

2- الانماط العرضية :

وتتشكل في المقطع العرضي للحزمة الليزرية، معتمدة للمحور الضوئي لليزر.

بدراسة توزيع شدة اشعة الليزر على مساحة المقطع عمودياً على المحور الضوئي لليزر **Optical axis laser** وجد أنها تأخذ أشكال مختلفة تعتمد على دقة موقع المرايا وأي تغير طفيف يؤدي إلى تغير هذه الاشكال والتي تعرف بالانماط المستعرضة **Transversal Mode**.

باسقاط شعاع ليزر على شاشة بيضاء بعد تكبيره بواسطة عدسة مفرقة يمكن فحص الانماط المستعرضة لشعاع الليزر. والشكل التالي يوضح مجموعة من هذه الأشكال حيث يبين اللون الأخضر اكبر شدة لليزر والمناطق البيضاء ينعدم فيها الليزر.



يعبر عن كل نمط عرضي ب TEM_{mn} ، حيث m, n ، أعداد صحيحة. تصف الحزمة وفق المحور Z :

m عدد أصفار الاضاءة (بين اضائتين، ظلمة) على طول المحور Y.

n عدد أصفار الاضاءة (بين اضائتين، ظلمة) على طول المحور X.

مسألة :

ان طول مجاوب ليزر He-Ne هو 55 cm . وبفرض عرض العصاة هو 1.5 [GHz]

والمطلوب حساب : عدد الأنماط الطولية

الفصل الثاني

أنظمة الليزر وتطبيقاتها

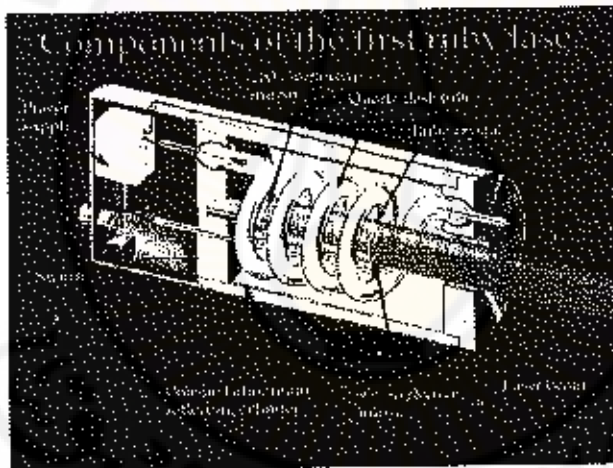
Laser Systems and Applications



فيما سبق درسنا الليزر، فكرة عمل الليزر بشكل عام مع التركيز على العوامل المؤثرة على الليزر. والآن سوف نخصص دراستنا على أنظمة الليزر، حيث تختلف باختلاف المادة **Active medium** ويمكن تقسيم أنظمة الليزر إلى خمسة أقسام هي على النحو التالي:-

١. ليزر المواد الصلبة

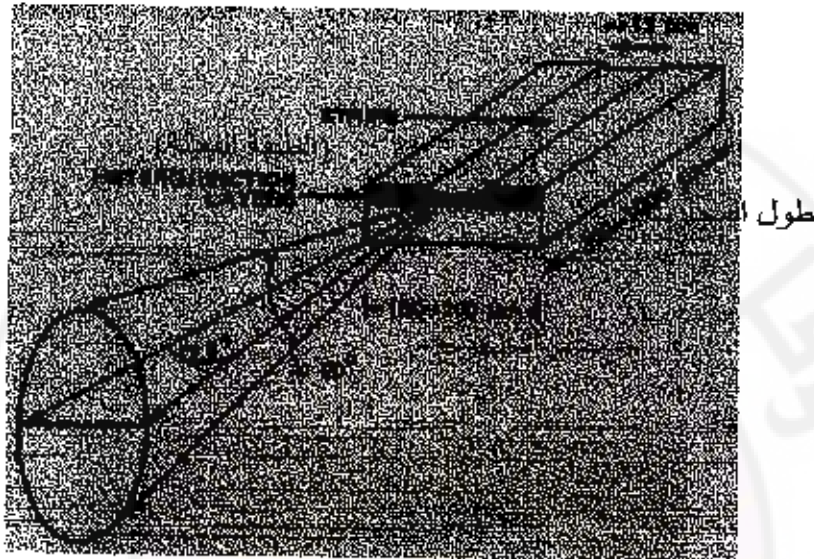
ومنها ليزر الياج، وليزر الياقوت، ويستخدمان بدرجة كبيرة في المجالات الطبية والصناعية. وتنتج أجهزة ليزر المواد الصلبة أشعة ليزر بأطوال موجية مختلفة، تتراوح بين الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء



٢. ليزر أنصاف النواقل

وتستخدم فيه مجموعة خاصة رقيقة من أشباه الموصلات **Semiconductors** تسمى "الدايود الباعث للضوء" **(LED) Light Emitted Diode**، وقد عد هذا النوع منفصلاً عن ليزر المواد الصلبة؛ لأنه يعمل بنظرية مختلفة عنه. ومن مميزاته

انخفاض كل من الجهد والطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيله، وصغر الحجم والوزن. ولكن من عيوبه انخفاض طاقة الليزر الناتج.



المواد المستخدمة :

أنصاف النواقل من المجموعة III-V و II-VI

Si و Ge مستبعد (نصف ناقل بفجوة غير مباشرة)

تستخدم المركبات الثنائية GaAs والثلاثية GaAlAs والرابعة GaInPAs

سبب أن رئيسيان لتنوع المواد: طيف الإصدار، وتوافق ثابت البنية البلورية

المركب	طاقة الفجوة المحظورة eV	ثابت الشبكة Å
AlP	2.45 indirect	5.451
AlAs	2.163 i	5.6605
AlSb	1.58 i	6.1355

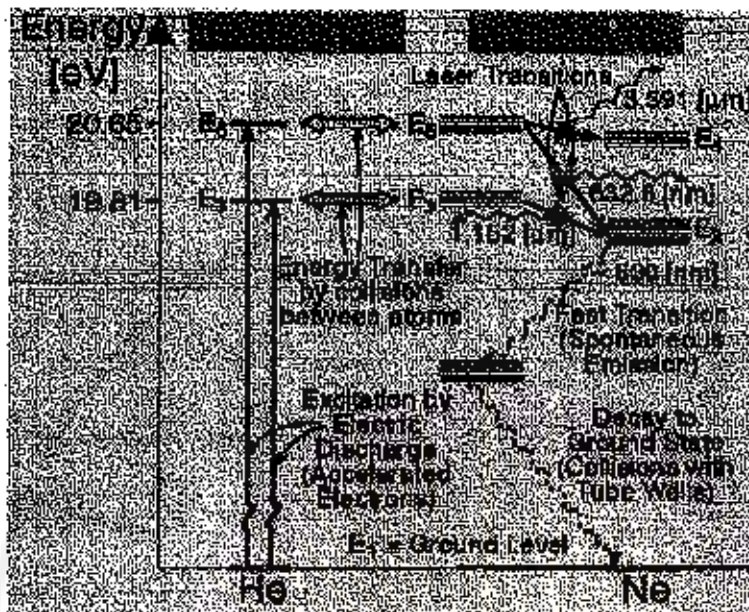
5.451	2.261 i	GaP
5.653	1.424 direct	GaAs
6.096	0.726 d	GaSb
5.869	1.351 d	InP
6.058	0.360 d	InAs
6.479	0.172 d	InSb

٣. الليزر الغازي

وتعد الأشعة الصادرة من أجهزة الليزر الغازي أفضل بكثير من تلك التي تصدر من أجهزة ليزر المواد الصلبة، وذلك لشدة تماسك ضوئها، سواء على الأرض، أو في الفضاء، وأيضاً، لمداها الكبير وطاقتها العالية. وتستخدم أشعة ليزر الغاز في البحوث العلمية، وفي الأغراض الصناعية

وتركز الأبحاث على إنتاج نوع جديد من ليزر الهليوم - نيون قادر على إنتاج شعاع ليزر أحمر بدلاً من الأحمر التقليدي، مع زيادة فاعلية أنابيب الليزر وتقليل أسعارها، مما يسمح بمنافسة بعض الأنواع الرخيصة الأخرى. وقد أنتج ليزر هليوم - نيون وهو قادر على توليد ثلاثة خطوط طيفية مختلفة، يمكن اختيار أي منها بواسطة منشور ثلاثي. وليزر الهليوم - نيون له استخدام رئيسي في مجال التصوير المجسم وتشفير الصور :

$$\lambda_1 = (632.8 \text{ [nm]}), \lambda_2 = 1.152 \text{ [\mu m]}, \lambda_3 = 3.3913 \text{ [\mu m]},$$



Energy Level Diagram of He-Ne Laser

ويحتل ثاني أكسيد الكربون الأهمية التالية لليزر الهليوم - نيون، إذ يستخدم على نطاق واسع في الصناعة، وقد توصلت البحوث إلى إنتاج ليزر ثاني أكسيد الكربون له طاقة عرج حوالى ١٠٠ وات، لاستخدامه في الأغراض الطبية، مع توفير ألياف ضوئية تعمل عند الطول الموجي ١٠,٦ ميكرون.

مواصفات He-Ne Lasers

Wavelength:	632.8 [nm]
Output Power:	0.5-50 [mW]

Beam Diameter:	0.5-2.0 [mm]
Beam Divergence:	0.5-3 [mRad]
Coherence Length:	0.1-2 [m]
Power Stability:	5 [%/Hr]
Lifetime:	>20,000 [Hours]

٤. ليزر "الأكزيمر"

وهو يتبع فصيلة الليزر الغازي، واسمه مشتق من المصطلح الإنجليزي **Excited Dimer**. وهو نوع وسط بين الليزر الغازي الذي يعمل بالطاقة.

إن أقصى شدة إضاءة تتحملها عين الإنسان دون أن تصاب بأضرار تلسف حسالي ميكروحول على السنتيمتر المربع.

إن مسافة الأمان هي أقل مسافة بين العين وجهاز الليزر، بحيث إذا تعرضت العين لنبضة ليزر مباشرة فلا تصاب بضرر. وتختلف هذه المسافة حسب العوامل الآتية:

١. حالة الجو.

٢. أجهزة التكبير الضوئية المستخدمة في أجهزة الرؤية.

٣. الانعكاسات الضارة.

٤. درجة تركيز شعاع الليزر.

٥. نوع مادة الليزر

٦. نوع شعاع الليزر، نبضي أو مستمر.

ولتوضيح خطورة الليزر، فإن مقدرات المسافة التي تستخدم الياج لها قدرة أكبر من ١ ميحاوات، ومن ثم، فإن أقل مسافة للتعرض المباشر لمصدر ليزر الياج تكون حوالي ٥٠٠ متر، بينما مقدرات المسافة التي تستخدم ليزر ثاني أكسيد الكربون تصل مسافة الأمان بالنسبة لها إلى حوالي ٢ — ٣ ستمترات. أي أنها في الواقع مأمونة تماماً.

الوقاية من أشعة الليزر

يمكن تحقيق الوقاية من أشعة الليزر بثلاث طرق رئيسية وهي:

١. استخدام المرشحات **Filters** الامتصاصية

وفيه يمكن امتصاص الضوء باستخدام صبغات ملونة، توضع بداخل المواد المكونة للأجهزة البصرية، مثل الزجاج أو البلاستيك، والتي تمتص أطوالاً موجية معينة. فالبلاستيك جيد في امتصاص أطوال موجات ليزر ثاني أكسيد الكربون، بينما يسمح لباقي الطيف الكهرومغناطيسي بالمرور خلاله. والمرشح الملون أزرق/ أخضر يمنع الأطوال الموجية لليزرات الياقوت الأحمر من المرور.

ومن عيب هذه المرشحات أنها تقلل الضوء المرئي فيها، فمرشح الياقوت يقلل كمية الضوء المرئي فيه بنسبة ٢٠% إلى ٤٠%. وهذا يعني أن النظر يصبح داكناً، أو أكثر إظلاماً، كلما زادت درجة الوقاية من أشعة الليزر، ويكون لهذا تأثير سلبي أثناء العمل في ظروف الإضاءة الضعيفة.

وتعمل المرشحات على تلوين الصورة، وبالتالي تقل درجة التباين **contrast** بسين الهدف المراد رؤيته والخلفية المحيطة به، كما أن بعض المرشحات تنتج إزاحات لونية بسيطة، كأن تجعل اللون الأخضر يميل إلى الاصفرار، وأيضاً، ترفع المرشحات الامتصاصية من درجة حرارة العدسات، وقد يسبب ذلك بعض المشكلات عندما تواجه المرشحات بأشعة ليزر ذات قدرة عالية.

٢. استخدام المرشحات الانعكاسية:

وهي تتكون من طبقات رقيقة من مواد خاصة، ذات معاملات انعكاس ضوئي مختلفة، يتم ترسيبها على الزجاج.

٣. استخدام مرشحات "روجيت" **Rugate Filters**:

ويتم فيها وضع خليط من الفلوريدات والأكاسيد في طبقات لها أحرف خشنة، أو أحرف متمازجة مع بعضها. وهذه الطبقات لها تغير تدريجي في معاملات الانعكاس الضوئية، مما يزيد من فعاليتها، بحيث تجعل المرشح أفضل لإمرار الضوء، ويعمل بكفاءة أحسن في ظروف الرؤية الضعيفة.

• المفعولات الميكانيكية

• التصوير بالليزر

فالماء الذي يشكل نسبة كبيرة من الجسم يمتص بشدة في المجال فوق البنفسجي البعيد (طول موجي أصغر من 200nm) وفي مجال الإشعاع تحت الأحمر البعيد (أي بدءاً من 1300nm)

وأما الجزيئات العطرية الحلقية (البروتينات والحموض النووية) فتتميز بامتصاص أعظمي في المجال (الواقع بين 240nm و 80nm) ولهذا فإن عمق اختراق ضوئي الليزر فوق البنفسجي وتحت الأحمر في النسيج ضئيل جداً.

الهموغلوبين يمتص بشدة في مجالات الأزرق والأخضر والأصفر

الميلانين وهو الصباغ السائد في البشرة، يمتص الضوء في مجال واسع يمتد من فوق البنفسجي إلى تحت الأحمر القريب

آليات إتلاف الخلايا

ينجم عن امتصاص الجزيئات الحيوية للفوتونات الضوئية تفاعلات شديدة فيها منها:

١. التفاعل الحواري : وهو من وسائل العلاج الليزرية

عندما تثار جزيئات النسيج بحزمة ليزرية تفقد طاقة الإثارة على شكل حرارة تسودي إلى رفع درجة حرارة الجسم موضعياً

عندما يتعرض نسيج معين لحزمة ليزرية مبردة يشرع الماء فيه بالغليان ويتبخّر فيستفحم النسيج (عند نحو مئتي درجة مئوية)، في حين يتخثر الدم في المنطقة المحاورة

١-ليزرات المعالجة الحرارية :

- ليزر غاز الكربون $10.6 \mu m$ بالجراحة ويسهم في نزع بعض الناميات (الزوائد) في الأنف والحنجرة أو الكبد أو المناطق النسائية بفقدان الدم أقل بكثير منه في حالة التدخل الجراحي التقليدي بفضل قدرته التخثرية، فضلاً عن رقة المنطقة المتخثرة.
- ليزر ياغ $1 \mu m$ ، عمق احتراق كبير، وفق عدة ملمترات. وهو الأداة المفضلة في قطع جريان الدم في الأوعية، إذ أنه يؤدي دور المشرط، فضلاً عن فعله الإرقائي.
- يستخدم هذا الليزر في إيقاف إدماءات القرحة المعدية المعوية، و في نزع أورام المثانة والشجرة الرغامية القصبية و في تسليك الأوعية الدموية المسببة بلويحات التصلب العصيدي.
- طرائق المعالجة الجديدة، والتي تعتمد على الليزرات فوق البنفسجية يبدو أنها واعدة.
- ليزر الأرجون (الأزرق - الأخضر) يقوم بالتخثر وبخاصة الأزرق الذي يمتصه الهيموغلوبين يشده يستخدم هذا لليزر في العينية في إيقاف نمو الأوعية في قعر العين لدى المرضى السكريين، وفي كبح انفصالات الشبكية
- وليزر الكريبتون (الأحمر)

• الليزر الصباغي الذي يمكن تكييفه وفق مجال عريض من الأطوال الموجية ، معالجة الوعاؤومات (الأورام الوعائية _ تكتل الأوعية) والسمنش *wine stain*. حيث يسمح بتعريض المناطق المصابة للطول الموجي 580nm وهو الطول الموجي الموافق لنهاية امتصاص الهيموغلوبين الأخيرة، دون أن يؤثر في المناطق الأخرى المجاورة، على عكس الضوء الأزرق.

٢. التفاعلات الفوتوكيميائية : وهي من وسائل علاج الأورام بالليزر

تعتمد على امتصاص إحدى الركائز المكونة للخلية أو المتحسس الضوئي (الذي يحقن في الجسم ويتثبت على الورم) للضوء بشكل اصطفائي وهذا ما يحملها إلى حالات مثارة، ثم تعود بسرعة كبيرة نحو حالات طاقاتها أخفض مع تشكيل نواتج سامة تقتل الخلايا الحبيثة مباشرة أو على مراحل متعددة (المفعول الفوتودينميك)

حيث يعرض الورم إلى إشعاع ليزر صباغي (لبضع عشرات الدقائق) يتم اختيار طوله الموجي بحيث يقع ضمن مجال امتصاص الـ HPD دون أن يمتصه الهيموغلوبين مما يضمن عمق اختراق أكبر. تنتقل جزيئات الـ HPD إلى حالات مثارة نتيجة لامتصاصها فوتونات الليزر . يعتبر إتلاف الخلايا الحبيثة بالأكسجين الجزيئي المثار الناتج في داخل الورم أساس المعالجة الفوتودينمكية والتي تستخدم في مراكز عديدة في العالم لمعالجة سرطانات الجلد.

يمكن للمعالجة الفوتودينمكية أن تكون مفيدة أيضاً في إكمال طرائق العلاج الأخرى في تنظيف مكان الورم بعد العملية لإزالة آخر الخلايا الحبيثة.

٣. الفلورة : وهي من طرائق الكشف عن الأورام بالليزر و تقتصر بالمعالجة الفوتودينميكية. حيث يجري تعريض الورم عملياً بعد حقن الجسم بالـ HPD لإشعاع ليزر صباغي (يمكن تكييف طوله الموجي بحسب القيمة المناسبة)،

ويمكن لإشعاع الفلورة إظهار وجود أورام صغيرة في وقت مبكر جداً مقارنة بالطرائق التقليدية.

يمكن الاعتماد على خصائص إصدار الفلورة عند مختلف الأطوال الموجية كذلك لإعطاء الورم صورة ذات تباين شديد. ولهذا ابتكر في السنوات الأخيرة نظام يشكل عدة صور لمنطقة الورم، يوافق كل منها لوناً مختلفاً ثم تعالج مختلف الصور بالحاسب ويجمع فيما بينها للحصول على منظر نهائي تكون الحدود فيه بين الورم والنسيج السليم واضحة تماماً.

٤. القطع الضوئي : وهو مفعول فوتوكيميائي لاجراري، وينتج بخاصة باستخدام ليزر نبضي للإشعاع فوق البنفسجي (الإكسمر *Excimer*)، وتفيد هذه المعالجة بخاصة في حالة الشرابين التاجية نظراً لأن منابع الليزر التي تؤثر بالمفعول الجراحي تخرض تودماً شريانياً، لا يحصل في حالة القطع الليزري *photo-ablation* فوق البنفسجي. وقد جرت معالجة البثورات من المرضى بهذه الطريقة من أمراض الشرابين التاجية.

وهو يستخدم في المعالجة الجذرية لإصابات التصلب العصيدي. ويعتمد في هذه الحالة، كما في حالة الأورام على الدلالة الطيفية للمناطق المريضة في التعرف عليها. ويسهم الليف الضوئي نفسه حينئذ في حمل الحزمة التشخيصية (التي يصدرها ليزر الآزوت) وحزمة المعالجة (ليزر الإكسمر). وشدة الحزمة الأولى أخفض بكثير من شدة الثانية لتجنب الإضرار بالنسيج خلال مرحلة التشخيص.

وأهم الاستخدامات الطبية لأشعة الليزر هي:

١. المجهر الضوئي

في عام ١٩٨٦ صمم العالم الفيزيائي "آرثر أشكين" Arthur Ashkin المجهر الضوئي لمعالجة الجسيمات الصغيرة، إذ يمكن دمج المجهر الضوئي في المجهر التقليدي بإدخال ضوء الليزر إليه. وهكذا يمكن رؤية ومعالجة عينة موضوعة على صفيحة المجهر بتحريك حزمة الليزر، وقد جذب هذا الاستخدام للمجهر الضوئي اهتمام البيولوجيين الذين وجدوا أنه يمكن معالجة البكتيريا الحية بواسطة هذا المجهر، دون إلحاق أي ضرر بها، وكان ذلك مدهشاً؛ لأن شدة حزمة الليزر في بؤرة المجهر الضوئي تصل إلى نحو ١٠ ملايين وات في السنتيمتر المربع.

٢. المنظار الضوئي ذو الألياف البصرية

المنظار الضوئي Endoscope ذو الألياف البصرية عبارة عن أنبوب يسمح للطبيب بأن ينظر في داخل جسم المريض. وهو لم يصبح ذو قيمة عملية إلا بعد تطوير الألياف البصرية التي صُممت لنقل الضوء على طولها كلها، حتى إذا انحنى. وهذا المنظار من المرونة والصغر بحيث أن الطبيب يستطيع أن يدخل واحداً منها عبر حنجرة المريض لكي ينظر في داخل معدته، أو في الشرج لكي يفحص الأمعاء. ويستخدم الأطباء اليوم هذا المنظار بشكل روتيني لفحص الأعضاء الداخلية.

٣. الجراحة العامة

استخدم مؤسسو جراحة الليزر الحزم الضوئية بسبب الحرارة الكثيفة التي تولدها. واليوم، فإن أكثر جراحات الليزر يقوم على هذه الخاصية الحرارية بالدرجة الأولى، لمسا

تتمتع به من صفات انتقائية في تأثيراتها، ولسهولة التحكم فيها بدرجة كبيرة. فإذا توافقت طول موجة أشعة الليزر بدقة مع حزمة الامتصاص للنسيج الحيوي الذي توجه إليه، فإن هذا النسيج يمتص الأشعة وينتج عن ذلك تحريبه بالكامل.

وكمثال لذلك فإن أصباغ "الميلانين" **Melanin**، ذات اللون البني القاتم في شبكية العين، تمتص الأشعة الخضراء في ليزر الأرجون، وبالتالي، فإن ليزر الأرجون يخرب مناطق عديدة من الشبكية، دون أن يسبب الضرر بالمناطق الأخرى في العين، والتي تمتص أشعة ذات أطوال موجية أخرى. ولهذا فإن هذه الطريقة تستخدم بشكل فعال في معالجة المرض الشبكي السكري **Diabetic retinopathy**، وهو مرض يؤدي إلى تحلل الأنسجة المصابة، ويعد سبباً لنسبة كبيرة من حالات فقد البصر.

وفي ميدان الجراحة، بصفة عامة، يستخدم مشروط خاص من أشعة الليزر بفتح للجراح إحداث قطع في الأنسجة دون نزيف دموي، إذ تقوم تلك الأشعة بإحكام إغلاق الأوعية القابلة للتلف عن طريق الكي في الوقت نفسه الذي يتم فيه قطع الأنسجة، أي من أجل إجراء جراحة دون فقد الدم **Bloodless Surgery**.

وفي مجال علاج انسداد الشرايين، أصبح من الممكن إدخال قساطر دقيقة من فتحة في الجلد إلى داخل الأوردة والشرايين. وتلك القساطر عبارة عن ألياف زجاجية تحمل الأشعة المكثفة إلى مناطق الانسداد لإذابة الجلطات الدموية، وتوسيع بعض الشرايين الضيقة المتصلبة من الداخل، فيعود الدم للشريان الطبيعي فيها. وأصبحت أحلام مؤلفي قصص الخيال العلمي حقيقة، ولم يعد من الضروري، كما ورد في بعض الروايات، إجراء تصغير متناه لغواصة تحمل فريقاً من الأطباء كي تحقن مادة في وريد أحد المرضى لتسري هذه المادة مع الدم إلى شريان مسدود، فتذيب جلطة فيه.

ويستخدم ليزر ثاني أكسيد الكربون الذي يطلق ضوءاً ذا طاقة لافحة، والقادر على قص الأنسجة وسد الأوعية الدموية للإقلال من النزف. فقد استخدم هذا الليزر في الجراحة، مثلاً، لإزالة نمو السرطان، أو لكي الأنسجة السرطانية في الفم. ويقوم ليزر ثاني أكسيد الكربون بكبي ورم غير طبيعي في أنسجة الرحم ناشئ عن مرض نسوي يسمى "التهاب بطانة الرحم". وجدير بالذكر أن ليزر ثاني أكسيد الكربون قد استخدم مؤخراً في جراحات الأعصاب، وأمراض النساء والتوليد، وجراحة الأنف والأذن، وجراحات التجميل التكميلية.

ويقوم ليزر الياج بكبي ورم خبيث يسد الأمعاء، وسد الأوعية الدموية التي تسبب نزيف المعدة. وفي مرحلة التجارب أسلوب يستخدم أشعة الليزر لتحويل مركب -لا ضرر منه عادة- يسمى "هيموتبورفين" إلى مادة قاتلة للسرطان. ويتجمع هذا المركب في الأنسجة السرطانية، وعندما يصطدم به الليزر الأحمر، يحدث تفاعل سمي يدمر خلايا السرطان. ويستخدم ليزر "الياج"، من النوع النبضي في مجال جراحة العيون، وبالذات حالات الانفصال الشبكي، ويستخدم النوع المستمر "CW" في مناظير الجهاز الهضمي والمسالك البولية.

٤. علاج العيون

وفكرة استعمال الضوء في علاج العيون سبقت ظهور الليزر. ففي عام ١٩٤٩ قام طبيب ألماني باستعمال الشمس في معالجة انفصال الشبكية، وفي إتلاف بعض الأورام في عيون عدد من مرضاه. وفي عام ١٩٦١، بعد سنة واحدة فقط من تركيب "ميمان" أول جهاز ليزر، استعمل العالم الأمريكي "زاريت"، من كلية الطب بجامعة نيويورك، الليزر لعلاج إصابات عينية لدى بعض الحيوانات. وبعد ذلك بستين توالت التجارب على الإنسان، عندما بدأ الطبيب الأمريكي "زوينك" من مؤسسة "هالو التو" للأبحاث الطبية

بكاليفورنيا، في معالجة أمراض الشبكية بين مرضاه. وهكذا أصبحت أشعة الليزر وسيلة معتمدة من وسائل إجراء الجراحات العينية الروتينية.

وفي طب العيون، يستخدم الضوء الأزرق لليزر غاز الأرجون لسد ثقب في الشبكية، أو لعلاج زرق العين، المعروفة بالجلوكوما، التي قد تسبب العمى، ويتم ذلك بإحداث ثقب يسمح بخروج السوائل الزائدة. أو قد يستخدم لإنقاذ بصر شخص مصاب بمرض الشبكية الناتج عن السكري بتدمير الأوعية الدموية غير الطبيعية التي يسببها هذا المرض. فمن المعروف أن مرض السكري يؤثر على شبكية العين وشعيراتها الدموية الدقيقة فتصبح الشبكية قابلة للتلف والانفصال عن مهدها في قاع العين، وتصبح العين مهددة بالعمى. وبإطلاق شعاع الليزر بدقة، وبجرعات محسوبة في مناطق محددة من الشبكية، فإنه يحدث بها نوعاً من الكي **photocagulation** الذي يوقف التليف، ويمنع تشعب الشعيرات الدقيقة غير المرغوب فيها، ويحدث قدراً من التليف المحدود، يؤدي إلى لحم الشبكية بالمشيمية.

وفي مجال علاج قصر النظر، حيث تتجمع الأشعة الضوئية الساقطة على العين في بؤرة أمام الشبكية بعيداً عنها، مما يؤدي إلى قلة وضوح الرؤية، إلا مع استخدام عدسات خاصة تجمع الأشعة في بؤرة على الشبكية، أمكن استخدام أشعة الليزر من أجل تقليل سمك قرنية العين الشفافة بواسطة إزالة بعض الأنسجة الزائدة من سطحها، فتقل قدرة العين على إحداث انكسار في الضوء، وتتجمع الأشعة الضوئية على الشبكية، دون الحاجة إلى استخدام النظارة.

٥. علاج الجلد

وفي طب الأمراض الجلدية، يستخدم ليزر الأرجون لإزالة البقع التي تسببها زيادة غو الأوعية الدموية الموجودة في الجلد. وتمتص الوحمات الحمراء (الصباغية)، التي يطلق عليها

Port wine stain، أيضاً، أشعة ليزر الأرجون الزرقاء أو الخضراء، حسب أطوال موجاتها، فتعرب الأشعة الممتصة معات الأوعية الدموية الزائدة، والمتركة تحت الطبقة الخارجية للمجلد مباشرة، إذ تزيل لونها.

٦. علاج الأسنان

وتستخدم أشعة الليزر في علاج تسوس الأسنان، وذلك عن طريق توجيه الأشعة إلى مكان التسوس لحرقه، ومن ثم منعه من القضاء على السن تماماً. وفي هذه الحالة لا يستخدم تخدير موضعي. وكذلك فإن المناطق السوداء في الأسنان - التسوس - هي التي تمتص أشعة الليزر. أما المناطق البيضاء - السليمة - فتعكس الأشعة، ومن ثم فإنها لا تتأثر. وتستخدم أشعة الليزر أيضاً في تثقيب الأسنان لحشوها، ولتثبيت أطقم الأسنان الصناعية.

أطوال موجات الليزر المستعملة في طب الأسنان :

نقدم هنا وصفا مختصراً لأجهزة الليزر المتوفرة التي لها تطبيقات سنية وسيسمى الليزر طبقاً لوسطه الفعال وطول الموجة ونظام التوصيل ونظام التحريض وامتصاص النسيج والتطبيقات السريرية.

ليزر الأرجون: وهو ليزر وسطه الفعال هو غاز الأرجون ويتم نقل الموجة باللياف ضوئية بموجة مستمرة أو بنظام الموجة النابضة بواسطة البوابة وله طولان موجيان مرئيان بالعين البشرية ٤٨٨ نانومتر الأزرق و ٥١٤ نانومتر الأخضر المزرق.

إن الإصدار الليزري بموجة ٤٨٨ نانومتر هو بالضبط الطول الموجي المطلوب لتفعيل مادة الكامفوروكوينون والتي هي البادئ الضوئي الأكثر استعمالاً لإحداث التصلب الضوئي (التمائر) للراتنج في مواد ترميمات الكومبوزت، وإن استعمال ضوء الأرجون

بدون تماس من أجل هذا الهدف يعطي وقت تصلب أقصر كثيرا بالمقارنة مع الضوء السني التقليدي إضافة إلى فائدة الحصول على كمية مركزة من الفوتونات لتأكيد وضمان تصلب مناسب للمادة، وهناك دراسات تشير إلى بعض الزيادة في قوة الراتنج المصلب بالليزر بالمقارنة مع ذلك المصلب بالضوء المرئي، ويمكن لليزر الأرغون أن يستعمل أيضا مع المواد السنية الأخرى مثل معجون الطبعات المحرض ضوئيا ومادة هلام التبييض المحرض بالضوء.

يتميز الطول الموجي ٥١٤ نانومتر من ليزر الأرغون بامتصاصه الأعظمي في الحضاب الأحمر، وبالتالي فإن النسيج الحاوية على الهيموغلوبين والهيموسدرين والميلانين ستتفاعل بسرعة مع هذا الليزر وفي الواقع فإنه ليزر جراحي مفيد جدا مع إمكانيات إيقاف نزف ممتازة ويستعمل بالتماس مع النسيج.

معالجة أمراض النسيج الداعمة الالتهابية الحادة والآفات غزيرة التوعية الدموية مثل الورم الدموي **hemangioma** ستكون مناسبة جدا لليزر الأرغون.

إن كلا الطولين الموجيين لا يمتصان جيدا في النسيج السنية الصلبة وذات امتصاص ضعيف جدا في الماء وضعف امتصاصه في الميناء والعاج مفيد عندما يستعمل لقطع وتشكيل النسيج اللثوية لأنه لن يكون هناك تفاعل وبالتالي لن يحدث أذى لسطح السن خلال تلك الإجراءات، كما أن كلا الطولين الموجيين يمكن أيضا أن يستعملا كمساعد في تحري النحور عندما يسلط ضوء ليزر الأرغون على السن فإن المناطق المصابة بالتسوس تظهر بلون أحمر برتقالي مُسَوّد وبسهولة تصبح قابلة للتمييز عن البنى السنية السليمة المجاورة.

ليزر الديود : ذو وسط فعال صلب، وفي الحقيقة فإنه من ليزرات أشباه النواقل الصلبة والذي يستعمل تركيبا ما من الألمنيوم والغاليوم والأرسنايد لتحويل الطاقة

الكهربائية إلى طاقة ضوئية؛ الأطوال الموجية المتوفرة للاستعمال السني تتراوح من ٨٠٠ نانومتر إلى ٩٨٠ نانومتر متوضعة عند بداية طيف تحت الحمراء القريب غير المؤين واللامرئي.

إن كل جهاز يطلق طاقة الليزر عبر ألياف ضوئية كموجة مستمرة أو نظام النبض ذو البوابة يتم استعماله في العادة بالتماس مع النسيج؛ ويحتاج الليف الضوئي إلى أن يفتشق **cleaved** حيث يتم إعداده قبل الاستعمال البدئي وأحيانا أثناء العمل أو الإجراء لضمان عمل مرضي لليزر، وهناك رؤوس شبه زجاجية متوفرة يمكن أن توضع عند نهاية الليف من أجل تطبيقات محددة. إن معدل الطول الموجي لليزر الديود يضعه في قسم الإشعاع تحت الأحمر اللامرئي غير المؤين من الطيف الكهرومغناطيسي.

جميع الأطوال الموجية لليزر الديود تكون عالية الامتصاص كما هو مع الأرجون من قبل النسيج حاوية الحضاب **pigmented** بالرغم من أن الإرقاء لا يكسبون بنفس السرعة تماما التي مع ليزر الأرجون وهذه الليزرات ضعيفة الامتصاص نسبيا من السني السنية ولذا فإن جراحة النسيج اللينة (الرخوة) يمكن أن تجري بشكل آمن في الجوار القريب (الملاصق) للعلاج والميناء والملاط.

إن الديود هو ليزر جراحي ممتاز للنسيج الرخوة ويستطب لقطع وإرقاء العرق (تختير) في اللثة والمخاطية وفي تحريف النسيج الرخوة والمخراط اللثوي **sulcular debridement** ويجب أخذ الحذر عند استعمال نظام الإصدار المستمر بسبب الارتفاع الحراري السريع في النسيج المستهدفة.

الفائدة الرئيسية لليزرات الديود هي أنها واحدة من الأجهزة أو الأدوات الأصغر حجما وأجهزته سهلة الحمل ومدجة (مضغوطة **compact**) وقابلة للتحريك بسهولة مع وقت إعداد أو تعبئة أصغري وهي الليزرات الأقل سعرا المتوفرة حاليا.

ليزر Nd:YAG : ذو وسط فعال صلب من كريستال اليوتريوم ألومينيوم غارنيت معالجة بالنيوديميوم وينقل عبر ألياف ضوئية بنظام النبض حر التشغيل ويستعمل في الأغلب الأعم بالتماس مع النسيج، وهو أول ليزر يصمم بشكل خاص لطب الأسنان وهو الليزر الأكثر انتشارا أو توفرا في السوق، ويبلغ طول أمواج التحريض ١٠٦٤ نسانومتر بالقرب من الطيف غير المؤين اللامرئي لتحت الحمراء وذو امتصاص عال من النسيج ذات الخضاب وتقريبا عشرة آلاف مرة أكثر امتصاصا في الماء من ليزر الأرجون؛ وبالإستفادة من طاقة الذروة العليا للتحريض النبضي حر التشغيل مع وقت طويل نسبيا لتبريد النسيج فإن التطبيقات السريرية الشائعة هي في قطع وتخثير النسيج الرخوة السنية مع إمكانية إرقاء جيدة، كما يسمح نظام النبض حر التشغيل للمعالج أيضا بمعالجة نسيج رقيقة جدا أو قابلة للتقصيف (التأذي) وذلك بإنقاص التجمع الحراري في المنطقة المحيطة.

إن طاقة ليزر **Nd:YAG** تختص إلى حد ما من قبل النسيج السنية الصلبة وهناك تفاعل قليل مع بني السن السليمة مما يسمح لجراحة النسيج الملاصقة للسن بأن تكون آمنة ودقيقة، وهناك عدد كبير من الدراسات المنشورة لحالات سريرية تظهر تحكم فعال بالأمراض حول السنية باستعمال هذا الليزر لتجريف الميزاب اللثوي **debridement**، وله أيضا تطبيقات سريرية مفيدة في تبخير الآفات النخرية السطحية المتلونة بدون إزالة الميناء السليمة المجاورة.

تستعمل الألياف هنا عادة بنهاية مكشوفة وبالتماس مع النسيج، وخلال الاستعمال فإن نهاية الليف تحتاج لأن تحترق **cleaved** وتنظف وإلا فإن ضوء الليزر سيفقد فعاليته بسرعة وعندما يستعمل بدون تماس (النظام المركز أو الموجه **defocused**) فإن هذا الطول الموجي يمكن أن ينقل عدة ملمترات داخل النسيج الرخوة والذي يمكن أن يستعمل بشكل مفيد لإيصال طاقة الليزر إلى السطح الداخلي لآفة تقرحية على سبيل المثال.

Ho:YAG ليزر: ليزر الهوليوم ياغ ذو وسط فعال صلب هو كرسنال البوتريوم ألومينيوم غارنيت ممزوجا مع الهوليوم ويتم إصالة بالألياف الزجاجية بالتماس مع النسيج بنظام النبض حر التشغيل؛ والأطوال المنتجة من هذا الليزر هي ٢١٠٠ نانومتر وأيضا بالقرب من الطيف الإشعاعي غير المؤين اللامرئي لتحت الحمراء، امتصاصه في الماء أكثر عمائة مرة من ليزر **Nd:YAG** ويستعمل بشكل أساسي في جراحة النسيج الرخوة وبما أن النسيج الرخوة تحوي كمية كبيرة من الماء فإن هذا الليزر يمكن أن يزيل تلك النسيج بسرعة والليف البصري يقدم وصولا سهلا مع الدقة والإحكام والاسترجاعية الملموسة

Tactile feedback

إن هذا الليزر ونظرا لامتصاصه الجيد في الماء ولكونه ينتج على نبضات فإن إزالة واستئصال النسيج في منطقة الجراحة يمكن أن تتم بمعدل كاف والأذى الحراري المرافق يمكن تجنبه.

يكون معدل النبض أو كمية النبضات في طاقة الليزر هنا كل ثانية هي أقل بالمقارنة مع ليزر **Nd:YAG** والمقطع الناتج يمكن أن يكون بشكل ما ذو حواف مثلثة وسريريا فإن هذا يمكن فقط أن يتجلى على النسيج الأكثر ليفية ولكن الشفاء الناتج سيظل مقبولا جدا والليف البصري (الضوئي) والمشا به لما هو في الديود وفي ليزر **Nd:YAG** يحتاج إلى أن ينظف ويفتح أو يشق بشكل دوري أثناء الجراحة. إن ليزر الهوليوم ذو ألفة **affinity** ضعيفة للنسيج حاوية الحضا ب وأكثر من ذلك فإن قابليته لإيقاف النزف تصبح بالتالي أقل وذلك أيضا بسبب امتصاصيته الضعيفة في الهيموغلوبين والمواد المتلونة المشابهة الأخرى كما أن امتصاصه من بين السن منخفضة جدا مما يسمح لجراحة النسيج في الجوار الملاصق للميناء أو العاج أو الملاط بأن تتم بأمان ويستعمل الهوليوم في الغالب في جراحة المفصل الجهرية على المفصل الفكّي الصدغي.

ليزر الإريوم كروميوم واي ساغ Er,Cr.YSGG (٢٧٩٠ نانو) وهو ليزر ذو وسط فعال من كريستال الليثيوم السكانيديوم الغاليوم غارنيت الصلب والممزوج (المعامل بـ) كل من الإريوم والكروميوم.

ليزر Er:YAG : (٢٩٤٠ نانو) وهو ذو وسط فعال من كريستال الليثيوم الألومنيوم غارنيت الصلب المعامل بالإريوم؛ إن كلا هذين الطولين المسوحين هذا وسابقه يقع قريبا من منطقة حزمة وسط وجوار تحت الحمراء اللامرئي وغير المؤثر من الطيف وهذين الليزين سيناقشا معا لخصائصهما المتشابهة.

يقدم السوق العالمي أجهزة Er,YAG ذات طاقة ليزر منقولة (يستعمل توصيلها بواسطة) بموجة مجوف من خلال ذراع مفصلية (ذات مفصل) أو في حزمة ألياف ضوئية أما جهاز Er,Cr.YSGG فإن طاقته تقدم عبر ليف ضوئي؛ كلا الطولين الموجحين يتم إطلاقهما بنظام النبض حر التشغيل والتجدي التقني في بناء نظام الليف الضوئي يتولد من أن قياس الطول الموجي لا يمكن بسهولة أن يتقل عبر الجزئيات الزجاجية لذا فإن حزمة الليف الضوئي تكون مكلفة جدا ويمكن أن تُكسّر. تكون الألياف هنا مبردة بالهواء وأكبر قطرا مما ذكر في الليزرات الأخرى مما يجعل هذا النظام في التوصيل أقل مرونة بطريقة مما هو في الألياف الضوئية لأجهزة ليزر الأرغون والديود وليزر Nd:YAG وليزر Ho:YAG وتوجد هنا في نهاية الليف قبضة ونهاية زجاجية صغيرة القطر تركز طاقة الليزر للأسفل من أجل قياس جراحي ملائم وهو تقريبا نصف مكرون.

يكون هذين الطولين الموجحين نفس الامتصاص الأعلى في الماء من كل الأطوال الموجية السنية ولهما أيضا انجذاب وألفة عالية جدا للهيدروكسي أباتيت مع أن الإريوم أعلى بـ ٢٠% من الإريوم كروميوم من هذه الناحية.

ترتبط طاقة الليزر بين جذور الماءات (الهيدروكسي) في بلورات الأباتيت **apatite** و **crystal** والماء المرتبط بالبنى البلورية **crystalline** في السن والتي تمتص طاقة الليزر بسهولة وتقبل **readily**؛ ويسبب تبخر الماء في الأسس المعدنية (الطبقات الداخلية **mineral substrate**) تمددا حجميا كبيرا وهذا التمدد يجعل المادة السطحية تنفجر بعيدا باتجاه جانبي ويقدم نظام النبض حر التشغيل طاقة الذروة لتسهيل التمدد الانفجاري؛ وتشير الدراسات المخبرية إلى أن درجة حرارة اللب للسن المعالج يمكن أن تتناقص عمليا بمقدار خمس درجات مئوية خلال المعالجة بالليزر.

تعتبر هذه الليزرات مثالية لإزالة النخر وتحضير السن عندما تستعمل مع الإرداذ المائي وبالإضافة لذلك فإن بنى السن السليمة يمكن أن يحافظ عليها بشكل أفضل بينما المادة المتسوسة تزال (تستأصل **ablated**) ويسمح ازدياد المحتوى المائي للنخور السنية بأن يتفاعل الليزر تفضيلا مع النسيج المريضة.

ويمكن لسطح الميناء السليم أن يُكَيَّف **modified** بتعريضه لطاقة الليزر وذلك لزيادة التصاق المواد المرممة. إن الاستطابات الحالية لاستعمال هذه الليزرات عملي علينا أن هذه الليزرات لا تستعمل لإزالة الأملمم أو المعادن الأخرى وعلى كلٍ فإن عدم التفاعل مع المعدن الثمين والبورسلان الملتنح معه تسمح للمارس بإزالة التسوسات المحيطة بهذه الترميمات بدون ضرر.

يمكن لهذين النوعين من الليزر أن يستأصلا بسرعة النسيج اللينة بسبب محتواها المائي المرتفع وفي هذا النمط فإن الإرداذ المائي يستعمل بشكل عادي لإيقاف تفاعلات النسيج الصلبة ويتم استعمال إعدادات طاقة منخفضة وتكون قابلة لإيقاف الزف محدودة على أية حال لأن الماء على سطح الدم في الموقع الجراحي سيتم تبخيره وليس هناك نفوذ عميقة لتقليل الحرارة اللازمة من أجل انكماش الأوعية السريع.

إن فوائد هذه الليزرزات في طب الأسنان الترميمي هي أن الآفات التخريبية في الجسوار القريب للثة يمكن أن تعالج والنسج اللينة يمكن أن يعاد تشكيلها (رسم الخنءاقتها) بنفس الأدوات وأكثر من ذلك فإن إبعاد النسج لكشف الزرعزات آمن جدا بهذه الأطوال الموجية بما أن نقل الحرارة يكون أصغرياً أثناء العمل.

ليزر ثاني أكسيد الكربون: ليزر ذو وسط فعال غازي ويجب أن يتم نقله عبر موجة موجة مجوف كالأنبوب بنظام نبض مستمر أو نبض بالبوبة وطول الموجة ١٠٦٠٠ نانومتر (١٠,٦ ميكرون) ما يجعله في نهاية وسط القسم غير المؤيّن اللامرئي لتحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي.

يتم امتصاصه بشكل ممتاز من الماء تاليا فقط لسلسلة ليزررات الإرييوم وهو مزيل سريع جدا للنسج الرخوة وذو عمق نفوذ ضحل جدا في النسج وهذا له أهمية عند معالجة الآفات المخاطية كمثال، وبالإضافة لذلك فهو مفيد جدا في قطع النسج الليفية الكثيفة، ويتمتع بامتصاص أعظمي في الهيدروكسي أباتيت بين جميع الليزررات السنسية بحوالي ألف مرة أكثر من سلسلة الإرييوم، ونظرا لأن هذا الليزر كان واحدا من أول ما استعمل في الجراحة الطبية العامة فهناك الكثير من المواد المنشورة حول تقييم فعاليته.

إن ليزر ثاني أكسيد الكربون لا يمكن أن ينقل في ليف زجاجي وإنما ينقل في موجة موجة مجوف مع قبضة ليتم استعماله حيث تنتقل طاقة الليزر عبر موجة أو دليل الموجة وتسلط على الموقع الجراحي بنظام غير تماسي؛ ويشكل فقدان الإحساس اللموس أحد السيئات بالنسبة للجراح ولكن استئصال النسج يمكن أن يكون دقيقا جدا عند استعمال أسلوب حذر **careful technique**؛ كما يمكن أن تعالج الآفات الكبرى بسهولة باستعمال حركة بسيطة للخلف والأمام وتسير الإجراءات بسرعة بما أنه لا حاجة للامسة النسج.

إن تقنية نظام التوصيل الحالي تحد بطريقة ما من تطبيقاتها على النسيج الصلبة ولكن مع تقدم البحث تظهر نتائج مرغوبة جداً (مفضلة) لتكثيف السطح وتقوية ميناء السطح. لزيادة مقاومة النحر.

نوقشت هنا الأساسيات العلمية والتأثيرات السريرية للليزرات السنية ومن المهم جداً للممارس السني أن يصبح متألماً **familiar** مع هذه المبادئ وبعدها يختار الليزر المناسب للتطبيقات السريرية التي يريد (المطلوبة)، وبالرغم من أن هناك بعض التداخل في نموذج استجابة النسيج فإن كل طول موجي له خواص محددة تنحصر هدفاً علاجياً محدداً.

٧. علاج الجهاز الهضمي

ويمكن استخدام أشعة الليزر في علاج الأمراض التي تصيب المعدة، وخاصة قرحة المعدة، وهي عبارة عن شرابين تترك في داخل المعدة، وذلك عن طريق استخدام المنظار الضوئي "اندوسكوب" Endoscope. وتقوم أشعة الليزر بتسخين نهايات الشرايين التي تترك ولحامها. والميزة الحقيقية لليزر هنا، هي أنه يعطي شعاعاً ضوئياً مركزاً بسهولة داخل الألياف البصرية دون فقد فعلي في الطاقة.

ثانياً: في مجال الاتصالات

يمكن بث المعلومات عن طريق أشعة الليزر بتحويل هذه المعلومات إلى نبضات كهربية تعبر عنها تماماً، ثم يتم توجيهها إلى جهاز الليزر، فيصدر أشعة تتحول وتنطبق مع النبضات الكهربية، وتساويها، أيضاً، في الشدة، أي أن المعلومات قد تحولت إلى أشعة ليزر معدلة modulated يمكنها أن تطلق ومضاتها عبر الألياف البصرية. وعند المستقبل هناك أجهزة استقبال خاصة تحول أشعة الليزر إلى معلومات مرة أخرى، وهكذا يمكن لأشعة الليزر نقل المعلومات من مكان إلى آخر.

وهناك نوعان من قنوات الاتصال بين طرفي الاتصالات الضوئية، أولهما القنوات الموجهة، وهي عبارة عن ألياف بصرية ينتقل الضوء بداخلها من المرسل إلى المستقبل، والنوع الثاني هو القنوات غير الموجهة، وتكون غير الفضاء، وتتأثر بالعوامل الجوية، مثل الأمطار وقطرات الندى والغبار، واختلاف الكثافة بين طبقات الجو، وكذلك درجة التأين في كل طبقة. كما تتأثر بالضوضاء الناتجة من الإشعاعات الضوئية الطبيعية والدوامات الهوائية.

وكان للجمع بين الألياف البصرية والليزر أثر عظيم على الاتصالات، فمنذ عام ١٨٨٠م استخدم ألكسندر جراهام بيل شعاع ضوء عادي لنقل صوته عبر الغرفة. واليوم، تستخدم أشعة ليزر لنقل المكالمات التليفونية خلال كابلات الألياف البصرية، عبر القارات. وفي وقت قريب سيتم نقلها عبر المحيطات.

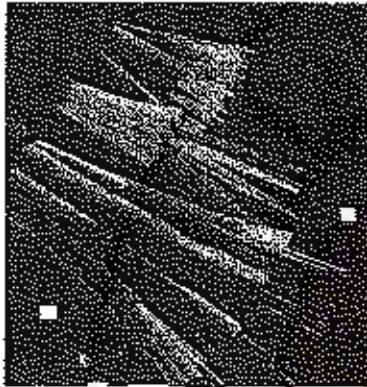
وتوفر الألياف البصرية مزايا أعظم من كابلات النحاس التي تستخدم عادة لخطوط التليفون. فموجات ومضات الضوء المتناهية القصر تعني أنها تستطيع أن تحمل من المعلومات أكثر مما تحمله الإشارات الكهربائية العادية، بأقل تشويه. ويستطيع المسلك النحاسي أن يحمل ٤٨ مكالمات تليفونية مترامنة، ولكن أحد الألياف البصرية يستطيع أن يحمل أكثر من ٨٠٠٠ مكالمات.

وهناك تطوران تكنولوجيان رئيسيان جعلتا الاتصالات بالألياف البصرية ممكنة. أحدهما هو تطوير ألياف فائقة النقاوة، قادرة على حمل إشارات الضوء على مدى العديد من الكيلومترات. والثاني، هو ابتكار ليزر دقيق، نصف ناقل، يلتقط الإشارات الضوئية ويضخمها لتبقل على مسافة طويلة.

وربما جاء أكثر الدلائل على قوة الألياف البصرية في عالم الاتصالات إثارة في أواخر عام ١٩٨٧م، عندما بدأ اتحاد من ٢٩ شركة أوروبية وأمريكية في مد أول كابل

للألياف البصرية عبر الأطلنطي. وتبلغ طاقة الكابل ٤٠ ألف مكالمات تليفونية متزامنة، بالمقارنة بتسعة آلاف مكالمات لأحدث كابل نحاسي كان قد تم مده عام ١٩٨٣ م.

سوف توفر كابلات الألياف البصرية، عبر المحيط، أيضاً قنوات معلومات فائقة السرعة، لنقل معلومات الكمبيوتر بأمان أكثر مما هو متاح عبر شبكة أقمار الاتصالات.



يوضح المخطط التالي نظام اتصالات ليفي بصري يحتوي على الآتي

١. دارات تشغيل تقوم بتحويل الإشارة الكهربائية ويحولها إلى تيار لتشغيل المنبع الضوئي
٢. منبع ضوئي يقوم بإيصال الإشارة الضوئية إلى الليف البصري

٣. الليف البصري هو القناة اللازمة لنقل الإشارات

٤. كاشف ضوئي يقوم بتحويل الإشارات البصرية إلى إشارات كهربائية
٥. مستقبل يتولى تضخيم الإشارة القادمة من الكاشف ويرسلها على المستخدم
٦. موصلات ومقارن ووصلات دائمة لربط العناصر المختلفة لنظام الاتصالات
٧. الليفي البصري

إذاً يتكون نظام الألياف الضوئية من أجزاء رئيسية هي :

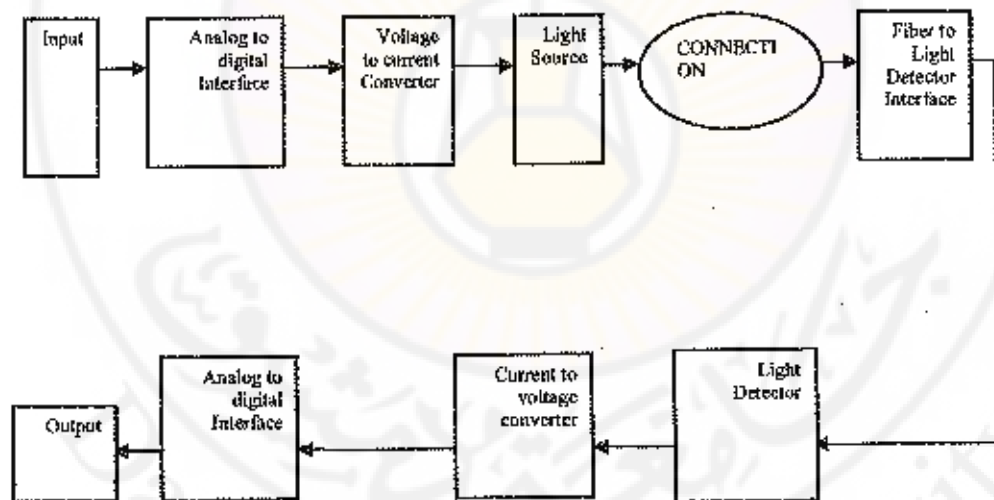
١- "المرسل" **transmitter** (مصادر المعلومات)

هو المنبع الضوئي الذي يتولى توليد الموجة الحاملة للمعلومات ويستعمل لهذا الغرض

نوعان من المنابع الضوئية هما ثنائي الليزر **laser diode (LD)** والثنائي

الباعث للضوء **Light Emitting Diode (LED)** وتتميز هذه الثنائيات

يصغر حجمها وخفة وزنها وتستهلك كميات صغيرة من القدرة وتتمتع بسهولة التشكيل أي تحميل المعلومات على شعاعاتها وهناك نظام برمجي يعمل على تحميل المعلومات . يعمل كل من هذين الجهازين بواسطة تمثيل تيار كهربائي وتكون كمية القدرة التي يشعها الجهاز متناسبة مع هذا التيار وهذا الشكل فإن القدرة البصرية الخارجة من الجهاز تأخذ شكل التيار الداخل فإذا كان التيار الداخل موجيا " فإن القدرة الخارجة من الثنائي تكون موجية وهذا ما يحدث في التشكيل التماثلي وإذا كان التيار الداخل متقطعاً " فإن القدرة الخارجة تكون متقطعة وبنفس الأسلوب وهو ما يحصل في التشكيل الرقمي وتقع ترددات الاتصال عبر الألياف البصرية وترددات الليزر ضمن مجال الترددات البصرية ($10^{16} \text{ GHz} \rightarrow 10^{12} \text{ GHz}$) وينقسم هذا المجال إلى ثلاثة أقسام الأشعة تحت الحمراء (Infrared) والضوء المرئي (Visible) والأشعة فوق البنفسجية (Ultraviolet)



٢- قناة الاتصال (الليف البصري)

تعرف قناة الاتصال بأنها المسار بين المرسل والمستقبل وفي نظام الاتصالات بالألياف البصرية يعتبر الليف البصري هو القناة، ولكي تكون هذه القناة فعالية فلا بد أن يكون التوهين ضعيفاً وزاوية القبول كبيرة حتى يتمكن الضوء من عبور مسافات طويلة دون أن يضعف وأن تجمع أكبر قدر من الضوء ليقترن بقناة الاتصال خاصة عند الإرسال لمسافات طويلة

٣- المضخم الضوئي :

عند إرسال إشارة لمسافات طويلة قد نحتاج لوضع المضخم من أجل تضخيم الإشارة التي قد تضعف نتيجة التوهين بعد مسافة معينة .

٤- الموصلات **connector** : تستعمل للربط ما بين الألياف البصرية والباعث أو المرسل وما بين المضخم والليف .

٥- المستقبل **Receiver** : الكاشف الضوئي : الذي يتولى تحويل القدرة البصرية

إلى تيار كهربائي ويتناسب التيار الكهربائي الخارج من الكاشف مع القدرة البصرية الساقطة عليه حيث أن تغيرات القدرة تحوي المعلومات المرسله وبالتالي فإن التيار الخارج أيضاً يحوي المعلومات وهذا التيار يمثل التيار المستخدم في تشغيل المنبع وتسمى هذه العملية بإزالة التشكيل **Demodulation** ومن أجل هذا الغرض نستخدم ثنائيات ضوئية مصنعة من أنصاف النواقل ولها عدة أنواع وتتميز بصغر حجمها وقلة وزنها وعمرها الطويل واقتصاديتها ويجب أن تكون حساسة جداً للإشارات البصرية والاستجابة السريعة للتغيرات السريعة للإشارة البصرية .

٢-١ مكونات الليف البصري :

الليف هو مادة شفافة للضوء أي تسمح بمرور الضوء في بحال محدد من الطيف الكهرومغناطيسي وفي معظم الحالات يكون من الزجاج فهي عبارة عن ألياف مصنوعة مسن

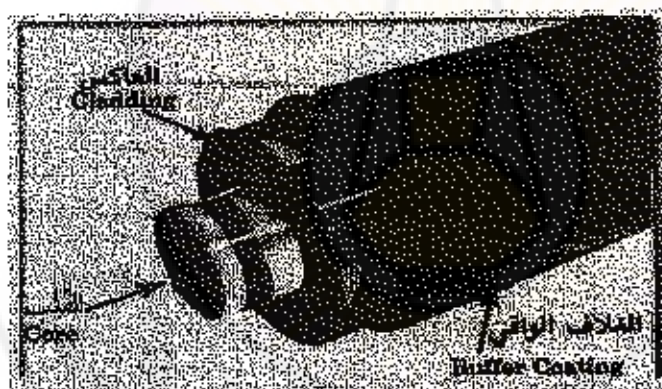
الزجاج النقي طويلة ورفيعة لا يتعدى سمكها سمك الشعرة يجمع العديد من هذه الألياف في حزم داخل الكيبلات البصرية وتستخدم في نقل الإشارات الضوئية إلى مسافات بعيدة ويتكون الليف البصري من :

القلب : (core) وهو قلب من الزجاج الفائق النقاء يمثل المسار الذي ينتقل خلاله الضوء

الغلاف (cladding) : "العاكس" وهو المادة الخارجية التي تحيط بالقلب الزجاجي وهي مصنوعة من زجاج يختلف معامل انكساره عن معامل انكسار الزجاج الذي يصنع منه القلب ويعكس الضوء باستمرار ليظل في داخل القلب الزجاجي

٣- الغطاء الواقى (buffer voting)

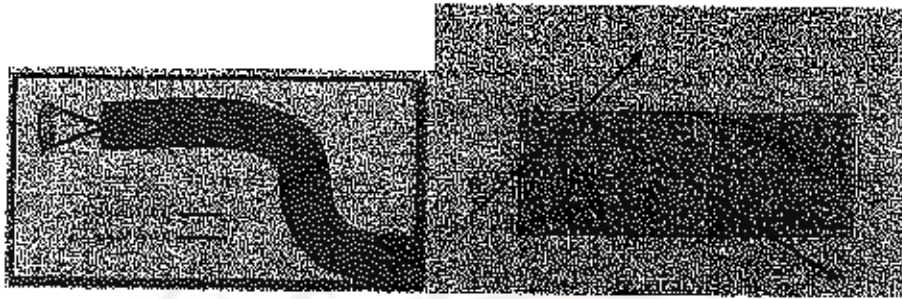
غلاف بلاستيكي يحمي القلب من الصدمات ويحمي الليف من الرطوبة أو التكسر



٣-١- كيف تعمل الألياف البصرية وكيف توصل الضوء :

بفرض أننا نريد أن نوصل ومضة ضوئية خلال مسار مستقيم كل ما علينا فعله هو أن نوجه الضوء خلال هذا المسار وحيث أن الضوء ينتقل في خطوط مستقيمة فإنه سوف يصل إلى الطرف الآخر من دون أية مشاكل أما إذا كان المسار له انحناء فإنه يمكن

التغلب على هذه المشكلة بوضع مرآة عند الانحناء لتعكس الضوء إلى داخل المسار مرة أخرى.



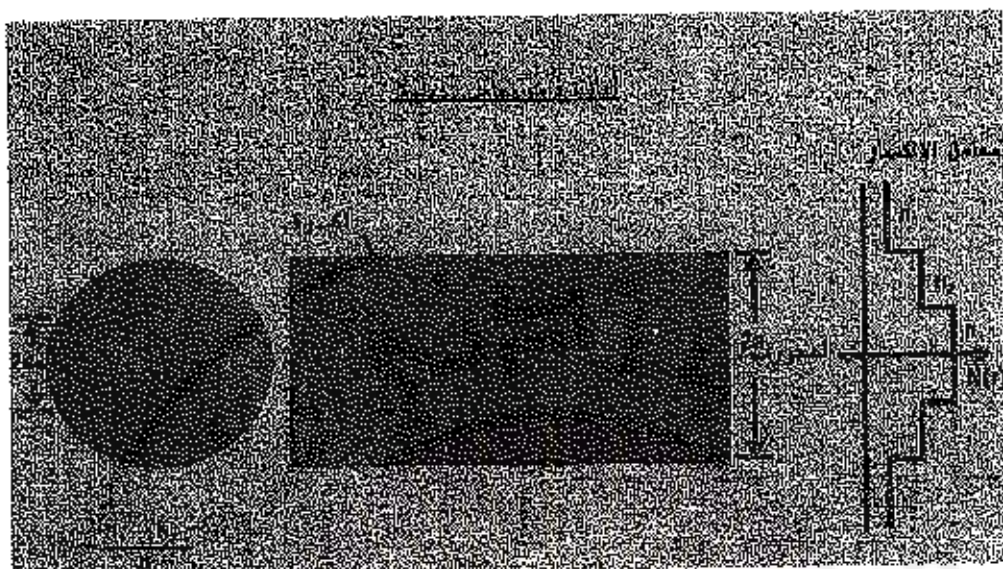
وبنفس الطريقة تحل المشاكل لو كان المسار كثير الانحناءات حيث تصف المرايا على طول المسار لتعكس الضوء باستمرار من جانب إلى آخر ليبقى في مساره هذه هي بالضبط فكرة عمل الألياف الضوئية حيث ينتقل الضوء بواسطة الانعكاس المستمر عن الجدار المخاذي للقلب الزجاجي (cladding) انعكاساً داخلياً كلياً ولأن هذا الجدار لا يمتص أي من الضوء الساقط عليه فإن الإشارة الضوئية يمكن أن تسافر مسافات طويلة ولكن يحدث أحياناً أن يفقد جزء من الضوء حيث تمتصه الشوائب الموجودة في القلب الزجاجي

-بنية الألياف البصرية:

تقسم الألياف البصرية إلى:

- ١ - الليف ذي الدليل التدريجي **Step-Index Fiber(SI)**
- ٢ - الليف ذي الدليل المتدرج **Grade-Index Fiber(Grin)**
- أ- الليف ذو الدليل التدريجي :

يتألف الليف ذو الدليل التدريجي من نواة مركزية ذات دليل انكسار n_1 ويتطلب التوجيه الكامل أن تكون زاوية الانكسار θ مساوية للزاوية الحرجة θ_c أو أكبر منها



تُعطي الزاوية الحرجة لليف SI بالعلاقة التالية $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ و $n_2 = n_1(1 - \Delta)$

يعطي التغير دليل الانكسار الجزئي Δ بالعلاقة التالية :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

إن Δ موجب دائماً وذلك لأن n_1 يجب أن تكون أكبر من n_2 حتى يكون هناك زاوية حرجة تؤدي إلى الانعكاس الداخلي وبالتالي حصر الضوء داخل لب الليف وقيمتها النموذجية بحلود ٠.٠١ .

يتطلب الإرسال الفعال (إرسال الشعاع لأطول مسافة ممكنة) أن تكون النواة والكساء عديمي الخسارة قدر الإمكان وعند انتشار الضوء ضمن النواة ينتشر بعض الضوء في الكساء بشكل موجة مضمحلة فإذا كان الكساء غير ماص فلن يفقد هذا الضوء بل سينتشر في الليف ولذلك فإن نواة من الزجاج محاطة بالهواء تحقق المطلب وهو $n_2 < n_1$ وستقوم بالفعل بتوجيه موجة ضوئية وأي مادة ملحقة بالنواة من أجل دعمها ستسبب خسارات في الموجة المنتشرة وإن النواة من غير كساء يمكن أن تشني أو تتخذش

بسهولة مما يسبب خسارات إضافية حيث أن الكساء يحمي النواة من التلوث ويساعد في الحفاظ على سلامتها ويستخدم الكساء للحصول على غقد قليل .

ب - الليف ذو الدليل المتدرج :

يملك الليف ذو الدليل المتدرج مادة نواة ذات دليل انكسار يتغير تبع للبعد عن محور الليف حيث يتغير دليل الانكسار تدريجياً داخل اللب حتى يبلغ أقصى قيمة له عند محور الليف ويوصف تغير دليل الانكسار بما يلي :

$$n(r) = n_1 \sqrt{\left[1 - \frac{2r}{a}\right]^\alpha \Delta} : r \leq a$$

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 : r > a$$

حيث n_1 : دليل الانكسار على طول محور الليف

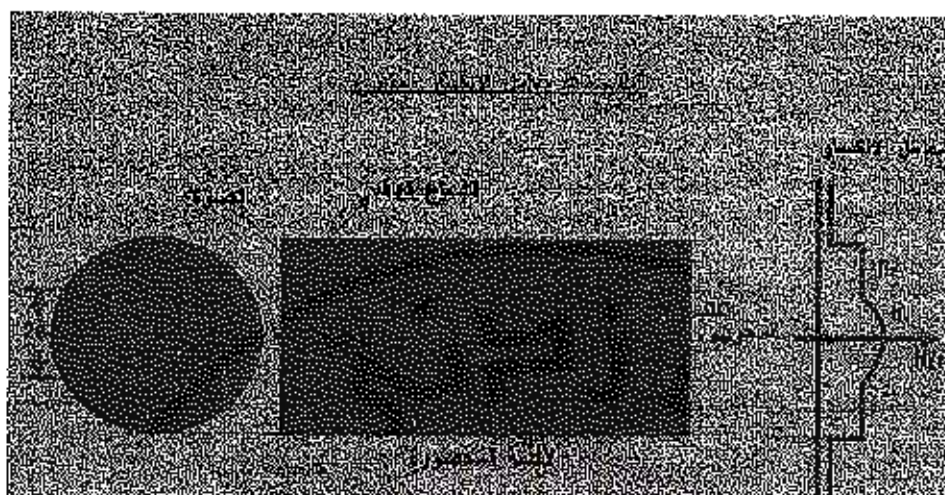
n_2 : دليل الانكسار خارج النواة (دليل انكسار الكساء)

a : نصف قطر النواة

α : عامل يصف تغير المظهر الجانبي للدليل الانكسار

Δ : عامل يحدد مقياس تغير المظهر الخارجي

r : متحول البعد



بحل للمعادلة الأخيرة من أجل معامل المقياس Δ ينتج :

$$n_2^2 = n_1^2(1 - 2\Delta)$$

$$n_2^2 = n_1^2 - 2n_1^2\Delta$$

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2}$$

من أجل الحالة العادية حيث $n_1 \approx n_2$ يؤدي هذا إلى النتيجة التقريبية التالية :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

تنتشر الأشعة الضوئية في الليف بطريقة التذبذب وبسبب دليل الانكسار المتغير أن تتوجه الأشعة من حديد وباستمرار نحو الليف ويتبع انحناء الأشعة عند كل درجة صغيرة قانون

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{سنيل}$$

وبذلك تنحني الأشعة بعيداً عن العمود عندما تنتشر من دليل انكسار عسالى إلى دليل انكسار أصغر وعندما يعبر شعاع محور الليف سيصدم مجموعة من حدود الفصل وفي كل مرة ينتشر إلى منطقة ذات دليل انكسار أصغر ينحني أكثر نحو المحور الأفقي . عند احد حدود الفصل بعيداً عن المحور تتجاوز زاوية الشعاع الزاوية الحرجة وينعكس

الشعاع كلياً عائداً نحو محور الليف وينتقل الشعاع الآن من منطقة ذات دليل انكسار منخفض إلى منطقة ذات دليل انكسار أعلى وهكذا ينحني نحو العمود إلى أن يعبر محور الليف عند هذه النقطة ستكرر العملية وهذه الطريقة يلتقط الليف شعاعاً مسبباً إياه أن يتذبذب ذهاباً وإياباً أثناء انتشاره في الليف وإن الأشعة التي تعبر محوراً أفقياً تقريباً تعود بعد انتشارها مسافة قصيرة فقط بعيداً عن المحور وتبتعد الأشعة ذات الميل الأكبر عن المحور وقد تنطلق بعض الأشعة بشكل عميق للدرجة أنها لن تعود مطلقاً ولن تسنحي بدرجة كافية لتعرض لانعكاسات الزاوية الحرجة وأن هذه الأشعة سوف لن تلتقط .

نلاحظ أن الأشعة الواقعة ضمن مجال زاوية محدد سوف تنتشر ضمن الليف بتغير α يتغير معامل الانكسار داخل اللب ويعبر عن فتحة النفوذ العددية لهذا النوع من

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} : \text{الإلياف}$$

تشير هذه المعادلة إلى تغير فتحة النفوذ العددية مع نصف القطر

$$r = 0 \Rightarrow NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}$$

$$r = a \Rightarrow NA = 0$$

من هنا نستنتج إن كفاءة الاقتران في الليف المتدرج تبلغ أشدها عند المحاور وتتناقص كلما ابتعدنا عنه على عكس الليف التدريجي الذي يحتفظ بقيمة فتحة نفوذ عددية واحدة بغض النظر عن نقطة دخول الضوء ولهذا السبب تكون كفاءة الاقتران في الليف التدريجي أكبر من كفاءة الاقتران في الليف المتدرج إذا كان حجم اللب فيهما متساوي

مميزات الألياف البصرية :

تتميز الألياف الضوئية بمزايا عديدة جعلتها تتفوق على النظم الأخرى المستخدمة في مجال الاتصالات ومن هذه المميزات ما يلي :

- إن الميزة الرئيسية للألياف الضوئية هي كفاءتها العالية في نظم الاتصالات عريضة النطاق **Broad band** مما يوفر إمكانية نقل كمية معلومات كبيرة جداً بواسطة

ليف ضوئي واحد وهذه المعلومات قد تكون صوراً تلفزيونية أو مكالمات هاتفية أو معلومات للحواسب أو مزيجاً منها وللمقارنة نجد أنه من أجل نظام اتصالات بالترددات العالية **frequency (vhf) very high** يعمل عند التردد **100 MHz** يكون عرض المجال المسموح به **10 MHz** ومن أجل نظام اتصالات ميكروي يعمل عند التردد **6GHz** يكون عرض المجال المسموح به **100 MHz** وهكذا فإن الزيادة في تردد الحامل تقابلها زيادة في عرض المجال المسموح به وبالتالي زيادة في كمية المعلومات المتبادلة إن تردد الضوء المستخدم في نظام الاتصالات بالألياف الضوئية يتراوح بين 10^{15} Hz ومن هنا نجد أن عرض المجال المسموح به كبير ويجدر الإشارة إلى أن هناك نظم اتصالات بالألياف الضوئية تعمل بعرض مجال للمعلومات يبلغ **2.5 Gbit/s** ويتجه التفكير نحو إيجاد نظم اتصالات بعرض مجال يبلغ **10 Gbit/s** مستقبلاً الأمر الذي يبين بوضوح مدى كفاءة نظم الاتصالات بالألياف الضوئية في تلبية متطلبات نظم الاتصالات الحديثة .

• المادة الأساسية لصناعة الألياف الضوئية هي ثاني أكسيد السيليكون المتوفرة بكثرة وتصنع بعض الألياف الضوئية من البلاستيك الشفاف وهي مادة أخرى متوفرة بسهولة وبالنسبة لتنفقات الإنشاء والتشغيل والصيانة نجد أنه تم أجل الخطوط الطويلة تعسير الكابلات الليفية أقل كلفة للنقل وأسهل للتركيب من الكابلات المعدنية فمن أجل ليف ضوئي قطره **125um** وبغلاف بلاستيكي ذي قطر **2.5mm** يبلغ وزن الكبل **6kg/km** كما يبلغ التخماد فيه **0.5Db/km** وبالمقارنة مع الكبل الحصري **19/URG** عندما ينقل إشارة بتردد **100MHz** كما يبلغ قطره الخارجي **28.4MM** ويبلغ وزنه **0.1110KG/KM** الأمر الذي يبين بوضوح أفضلية الليف الضوئي من حيث الحجم والوزن ونظراً لهذه الميزة تم استبدال الكابلات النحاسية في كثير من الطائرات والبواخر بألياف ضوئية .

إمكانات الألياف البصرية بالمقارنة مع الكوابل المعدنية (الأسلاك) :

١. لأنظمة الكبلات الليفية سعة أكبر بكثير بسبب عرض مجاها الترددي المتوافر في الترددات الضوئية ، بينما تعمل النواقل كمرشح تمرير للترددات المنخفضة مما يحدد عرض المجال الترددي
٢. لأنظمة الكبلات الليفية مناعة من انتقال المكالمات بين الكوابل الذي يسببه التحريض الكهرومغناطيسي وإن سبب التداخل بالكوابل المعدنية هو التحريض الكهرومغناطيسي بين النواقل المتوضعة قرب بعضها .
٣. لأنظمة الكبلات الليفية مناعة من التداخل للكهرباء كما أن الليفية لا تشع طاقة ولا تتداخل بأنظمة الاتصال الأخرى وهذا مفيد عسكرياً .
٤. الكبلات الليفية مقاومة أكثر لتغيرات البيئة حيث تعمل بمجال حراري أوسع
٥. الكبلات الليفية أكثر أمانة بالتركيب والصيانة حيث لا يوجد تيارات كهربائية وجهود كونها غير ناقلة . والألياف أصغر وأخف وأسهل بالتعامل وهي أصغر للتخزين وأرخص بالنقل .
٦. الكبلات الليفية أكثر أماناً فلا يمكن التجسس على المستخدم دون معرفته .
٧. الكبلات الليفية تعمر أكثر من الكوابل المعدنية وذلك بناء على تحمل الليف للتغيرات البيئية .
٨. الكلفة أقل وذلك على المدى البعيد . بالمقابل فإن السيئة الظاهرة الوحيدة هي الكلفة الابتدائية المرتفعة لتركيب النظام إضافة إلى عدم وجود أنظمة ليفية عاملة لمدة طويلة لتقوم أدائها .
٩. الألياف الضوئية أرفع من الأسلاك العادية فهي تستطيع حمل المعلومات بشكل أكبر حيث يمكن وضعه ضمن حزمة تتضمن عدد كبير من الألياف مما يعطى إمكانية زيادة عدد خطوط الهاتف وعدد قنوات التلفزيون في حبل واحد حيث يصل عرض هذا

الحبل إلى 50 تيرا هرتز ، بينما يصل عرض السلك الذي قد يحمل نطاق بث إذاعي إلى 6 ميغا هرتز .

١٠. تصنف قطر الألياف الضوئية أقل من نصف قطر الأسلاك العادية مما يجعلها أقل حجماً من سابقتها مما يشكل أهمية خاصة عند مد الأسلاك تحت الأرض ولهذا السبب نلاحظ أن الألياف الضوئية أخف وزناً من الأسلاك العادية

١١. تتميز الألياف الضوئية بقدرتها على الحفاظ على الإشارة من الضياع لفترة أطول من الأسلاك العادية

١٢. تؤمن الألياف الضوئية وضوح في الإشارة المرسل من خلال منع تداخل الإشارات بسبب تجاوز الألياف مع بعضها كما تضمن سرية الإشارات بسبب تجاوز الألياف مع بعضها كما تضمن سرية الإشارات المرسل والمستقبل لعدم تداخلها مع الإشارات الكهرومغناطيسية .

١٣. لا تحوي على مواد قابلة للاشتعال مما يقلل من خطر الحرائق .

١٤. لا تحتاج إلى طاقة كبيرة من المولدات لأن احتمال ضياع الإشارة أثناء التوصيل قليل.

استخدمت الألياف الضوئية في مجالات واسعة بسبب مزاياها التي ذكرتها سابقاً ، فاستخدمت في مجال الاتصالات والشبكات كما استخدمت في مجال التصوير الطبي بأنواعه ، وغيرها من الصناعات .
ملاحظة:

إن كلفة نقل وتركيب كابل متعدد الألياف ليس أكثر بكثير من كلفة نقل وتركيب كابل وحيد الليف

بالإضافة أنه في الكابل متعدد الألياف يستغل الحيز بشكل أكبر وذلك لأن الألياف تشترك بأعضاء تقوية عامة وبتزايد عدد الألياف في الكابل تناقص الكلفة لكل ليف

وفي حالة الاتصالات بواسطة الأقمار الصناعية باستخدام أشعة الليزر فإن هناك عدة اعتبارات أهمها:

١. الطاقة الكهربائية المحدودة على متن القمر الصناعي، وهي لا تزيد على ١٠٠ واط لنظام الاتصال بالكامل.

٢. الفراغ المحدود المتاح لوسائل الاتصال.

٣. أهمية الوزن الاقتصادي للمكونات.

٤. كفاءة توليد أشعة الليزر، والمقصود منها نسبة الطاقة الضوئية لشعاع الليزر المتولد في جهاز الإرسال إلى طاقة التغذية المستنفدة في توليده.

ويحقق استخدام الليزر في مجال الاتصالات العسكرية المزايا الآتية:

١. خفض درجة الاضمحلال في الإشارة الصوتية.

٢. نقل حجم كبير من المعلومات.

٣. مقاومة عالية للتداخل والشوشرة.

٤. الحماية من التصنت.

٥. قلة الحجم وخفة الوزن بالنسبة للأجهزة المستخدمة.

ثالثاً: الأقراص البصرية

يتكون القرص البصري Optical Disc من سطح معدني فضي كالمراة، يعكس الضوء في شكل ألوان الطيف، ويغطي بطبقة رقيقة من البلاستيك النقي. والقرص البصري في حجم اسطوانة الموسيقى العادية، وعلى سطحه العديد من الثقوب الدقيقة جداً، يطلق عليها "الحفر". أما المناطق المستوية التي بينها فيطلق عليها "المسطحات". ويطلق أحياناً على القرص البصري اسم "القرص المدمج" : Compact Disc CD، وقطره ١٢ سم، أو ٤,٧٢ بوصة. وأحدث ما وصلت إليه التكنولوجيا الآن هو نظم الأقراص المدمجة للقراءة فقط CD-ROM: Compact Disc Read Only Memory لتخزين المعلومات واسترجاعها ويتزايد الجمع بين أشعة الليزر وأجهزة الكمبيوتر في أحوال كثيرة. وأحدث شيء في هذا المجال هو إنتاج نظام لذاكرة الكمبيوتر memory باستخدام فكرة أقراص السمعيات المدمجة التي تستولي بسرعة على سوق تسجيل الموسيقى. وجوهر مشغل القرص السمعي عبارة عن ليزر دقيق، يترجم المعلومات الموجودة على حفر ميكروسكوبية على سطح القرص الفضوي إلى موسيقى. وحيث إن الضوء فقط هو الذي يلمس القرص، فإنه لا يتعرض للبلل والتدهور، كما يحدث في اسطوانات الفينيل. وتتضاعف مبيعات أقراص السمعيات ثلاث مرات كل عام، منذ طرحها في السوق عام ١٩٨٣ م.

وباستخدام أقراص السمعيات، جهاز ذاكرة للكمبيوتر، فإن قرصاً واحداً قطره ١٢ سم، مشابه للقرص المستخدم في تسجيل الموسيقى، يمكن أن يخزن ٥٥٠ ميغابايت، أي مليون وحدة عناصر ثنائية من معلومات الكمبيوتر، أي ما يوازي ١٠٠ ألف صفحة مطبوعة على الآلة الكاتبة.

وأكبر عيب لقرص السمعيات، عن استخدامها ذاكرةً للكمبيوتر في هذه المرحلة، هو أنه لا يمكن تغيير المعلومات المسجلة عليه. ومع ذلك فإن فكرة تسجيل دائرة معارف كاملة على قرص واحد، لها من الجاذبية ما يدفع العلماء إلى الاستمرار في تطوير هذه التقنية. وفي هذه الأثناء يحاول الباحثون إيجاد طريقة لتغيير المعلومات المسجلة على هذه الأقراص، مما سوف يجعلها أوسع استعمالاً.

وللتعرف على دور أشعة الليزر في عرض المعلومات نأخذ حالة أفلام الفيديو، وفيها يتم عرض المعلومات — فيلم الفيديو — عن طريق توجيه أشعة الليزر من جهاز الفيديو، بشكل عمودي على سطح القرص البصري المسجلة عليه المعلومات، وذلك أثناء دورانه. ويعكس السطح اللامع للقرص أشعة الليزر إلى جهاز الفيديو مرة أخرى، إذ يتم التقاطها بواسطة وحدة إلكترونية تقوم بإصدار نبضات كهربية مختلفة، بمجرد وصول أشعة الليزر إليها.

وحيث إن الحفر والمسطحات فوق سطح القرص البصري تعكس أشعة الليزر بشكل مختلف، فعند وصولها إلى الوحدة الإلكترونية بجهاز الفيديو تقوم هي، أيضاً، بإصدار نبضات كهربية مختلفة تماماً، مثل أشعة الليزر التي انعكست إليها، ثم يحول جهاز الفيديو هذه النبضات الكهربائية إلى صوت وصورة، أي فيلم فيديو.

ويُعد هذا التطبيق أسرع استخدامات الليزر تطوراً باستخدام اسطوانات للتسجيلات الصوتية أو المرئية، واستخدام أجهزة تشغيل الاسطوانات، أي الجرامافون، الضوئية التي يمكنها استعادة التسجيل من على الاسطوانة بواسطة شعاع ليزر، بدلاً من الإبرة التقليدية، مما تسببه من مشكلات نتيجة تآكل سطح الاسطوانة.

وأكثر أنواع الليزر شيوعاً لهذا الغرض هو ليزر الدايود، والذي حل محل ليزر الهليوم - نيون المستخدم في بعض الأنواع القديمة من أجهزة الاسطوانات الضوئية.

ويستخدم القرص البصري وسيطاً لتخزين المعلومات في الكمبيوتر، وتتم الكتابة على القرص بواسطة شعاع ليزر يؤدي إلى تكوين حفر دقيقة على القرص. ومعظم الأقراص البصرية المتوفرة في الأسواق يمكن الكتابة عليها مرة واحدة، ثم يمكن بعد ذلك قراءة ما تمت كتابته عدة مرات. ويطلق على الأنظمة التي يمكنها عمل ذلك " اكتب مرة واقراء مرات" Write Once Read Many. WORM :

رابعاً: الطباعة

واحتياج تكنولوجيا الليزر لصناعة الطباعة يُعد امتداداً منطقياً للاستخدامات الحارية. فالكثير من النسخات تستخدم أشعة الليزر التي يتحكم فيها الكمبيوتر لخلق أشكال على اسطوانة حساسة للضوء، تتحول بدورها إلى كلمات مطبوعة على الورق. وبالإضافة إلى السرعة الفائقة، يوفر الليزر، أيضاً، وضوحاً أفضل للنسخ. وجودة النوعية هي السبب في تحول وكالات الأنباء والمجلات إلى نسخ صورها بالليزر. وأحياناً تطبع الصحيفة أو المجلة لتوزع على القراء في عدة دول متباعدة، في الوقت نفسه، ويتم ذلك باستخدام تقنيات الليزر والكمبيوتر. وفي هذه الحالة تقوم أجهزة المسح التي تعمل بأشعة الليزر بتحويل الكلمات والصور إلى بيانات كمبيوترية يمكن إرسالها من خلال الأقمار الصناعية إلى آلات طباعة في هذه الدول المتباعدة خلال ثوان معدودة.

وفي الكثير من المكاتب الآن طابعات بالليزر، تأخذ إنتاج أجهزة الكمبيوتر الشخصي، وتعطي نسخاً مطبوعة بنوعية لم تكن ممكنة من قبل إلا بمعدلات الطباعة المخترقة فقط.

والفارق الوحيد بين ناسخة الليزر وطابعة الكمبيوتر العاملة بالليزر، هو أن الأنسيرة تستخدم الضوء للطباعة المباشرة على الورق، بدلاً من نقلها على اسطوانة تنقلها بدورها إلى الورق.

وأكثر النظم الليزرية المستخدمة في الطباعة هي ليزر الهليوم — النيون، وليزر الهليوم — كاديوم. والعقبة الرئيسية أمام تطوير هذه النظم زيادة فاعلية لمسات الليزر المستخدمة، إذ أنها قصيرة العمر نسبياً، أو تحتاج لتغيير كل حوالي ٥٠٠٠ ساعة تشغيل.

خامساً: الهولوجرافى

في محاولة من العالم الإنجليزي دنيس جابور Dennis Gabor لتحسين قوة التكبير في الميكروسكوب الإلكتروني، وتقليل الصورة المكونة فيه، توصل هذا العالم إلى ما يسمى الآن "الهولوجرافى" Holography، وتعني "فن التصوير المجسم". وفي هذه التكنولوجيا، يستخدم الليزر لخلق أشكال ثلاثية الأبعاد تجعل الصور كالمناظر الطبيعية.

ولتوضيح الفرق بين الصورة العادية والصورة ثلاثية الأبعاد، تخيل أن آلة تصوير عادية التقطت صورة لرجل يقف أمام سيارة، فإذا نظرت إلى هذه الصورة وحركت رأسك من جهة لأخرى، سيظهر الرجل دائماً وهو يحجب نفس الجزء من السيارة. أما إذا

أخذت صورة هولوغرافية للمنظر نفسه، فلو حركت رأسك من جهة لأخرى، لأتضح لك أن الرجل يتحرك بالنسبة إلى السيارة، ومن كل زاوية يبدو أن المشهد مختلف.

والهولوغرام **hologram** ببساطة عبارة عن عملية تحويل صورة الجسم المطلوب تسجيل صورته إلى معلومات مشفرة على لوح حساس، بحيث لا تظهر الصورة بالعين المجردة إطلاقاً، ولكن يمكن استرجاع الصورة ورؤيتها مجسمة، إذا تم تعريض الفيلم لضوء أشعة الليزر.

الهولوغرام، يتم إسقاط شعاع الليزر على عدسة مفرقة لتغطية مساحة كبيرة، ثم يسقط شعاع الليزر على مجزئ للشعاع **splitter** للحصول على شعاعين، أحدهما يستعمل لإضاءة الجسم، ويسمى "شعاع الجسم" **Objective beam**، والآخر يسقط مباشرة على اللوح الحساس، أو الفيلم، ويسمى "الشعاع المرجع" **Reference Beam**. وعند سطح اللوح الحساس، أو الفيلم، يلتقي كلا الشعاعين مرة أخرى، ويتداخلان معاً ليكونا حلقات التداخل، ويتم تسجيل ناتج التداخل على الطبقة الحساسة، إذ تحتوي هذب التداخل المتكونة على الفيلم على كسل المعلومات الخاصة بالجسم المراد تصويره. وبعد عملية التحميض والتثبيت التي تجري للفيلم، نحصل على الهولوغرام، وما هو إلا لوح زجاجي شفاف، أو فيلم شفاف، مغطى بطبقة شبه شفافة، أيضاً.

وإذا نظرنا إلى الهولوغرام، فلن يمكننا رؤية الجسم نفسه، ولكننا سوف نرى مجموعة من الخطوط والحلقات المضطربة والمظلمة مرتبة عشوائياً. فالصورة في الواقع يتم إخفاؤها، أو بمعنى آخر، يمكن تشفيرها.

ومن الضروري أن يكون الشعاع المستخدم في استخلاص الصورة يطابق تماماً شعاع المرجع المستخدم في تصوير الجسم.

دخل الهولوجرام الحياة اليومية في عدد من التطبيقات، فالكثير من آلات الفحص التي تقرأ الشفرة الخطية المطبوعة على علب الأغذية في السوبر ماركت تستخدم الليزر. وإذا كان العميل يدفع ثمن مشترياته ببطاقة ائتمان، فالأغلب أن بطاقته تحتوي على هولوغرام مطبوع على صفحتها، احتياطاً من التزوير، فيمكن للمزور أن يصنع بطاقة ائتمان بسرعة مذهلة، ولكنه يلاقي صعوبة كبيرة في إنتاج هولوغرام منمهم.

كما يستخدم الهولوجرام في الصناعة، أيضاً، لإجراء اختبارات مفصلة على كل شيء، بدءاً من قطع غيار الآلات، إلى مكبرات الصوت. والخطوة الأولى هي عمل هولوغرام لقطعة الغيار المراد اختبارها، وحينما يركب الهولوجرام على قطعة الغيار الفعلية، فإن التغيرات التي تحدث، تحت ظروف الحرارة والجهد والإدارة العادية، تظهر بأدق تفاصيلها.

والتصميم بالهولوجرام سوف يستغني عن الأسلوب الحالي لعمل نماذج لكل سيارة جديدة، والذي يستغرق الكثير من الوقت. وسوف يضع السيارات الجديدة في مرحلة الإنتاج في وقت أسرع؛ لأن المعلومات المخزنة في الكمبيوتر يمكن استخدامها لإعداد عملية الإنتاج بالكمبيوتر.

سادساً: فحص السلوح

بدأ العلماء في عام ١٩٨٠م، في البحث عن طريقة أفضل لفحص بعض السطوح الدقيقة، مثل شريط الفيديو، و شذرة الحاسب **chip**، حيث إن أدائها يكون هزئلاً إذا كانت غير ملساء، أو أشكالها غير مناسبة. ويقتضي صقل سطوح أشياء كهذه صقلًا متقنًا استخدام أساليب دقيقة لقياس بنية نسيجها. وبدا أن قياس التداخل الضوئي الذي يعتمد على طبيعة الضوء الموجية هو الأفضل. فالتداخل يتيح تحليلًا مثاليًا، ولا يتضمن تماسًا مع السطح الذي يراد دراسته، فلا يخلقه. ويمكن للتداخل — من حيث المبدأ — أن يحلل تضاريس السطح التي تبلغ ارتفاعاتها بضعة أنجسترومات

والمبدأ الأساسي في التداخل هو أنه عندما تلتقي موجتان ضوئيتان فإنهما تتداخلان، فإذا انطبقت ذروة إحداهما مع قاع الأخرى كان التداخل هدامًا. أما إذا تطابقت ذروة الموجتين فإن الموجتين تقوي إحداهما الأخرى. وقد طور الفيزيائي الأمريكي "ميكلسون" تقنيات استخدمت ظاهرة التداخل للقيام بقياسات غاية في الدقة. ويعرف الجهاز الذي صممه باسم "مقياس ميكلسون التداخلي". وفي هذا الجهاز تسقط حزمة ليزر على مرآة نصف عاكسة، تجزئ الحزمة إلى حزمتين في مسارين متعامسين، فتنعكس إحدى الحزمتين عن العينة المطلوب قياس سطحها، وتنعكس الأخرى عن المرآة المرجعية. وحين تلتقي الموجتان بعد انعكاسهما، تتولد من تداخلهما موجة تكون شدة ضوئها عظمى إذا كانت الموجتان متفقتين في الطور **phase**، وتكون شدتها صغرى إذا كانت الموجتان متعاكستان في الطور. وتغير تنوعات سطح العينة وأغواره يغير طول المسار الذي تقطعه الحزمة الأولى، فتتغير بذلك العلاقة المكانية بين الحزمتين وشكل الأهداف التي تظهر تضاريس سطح العينة.

وتقوم شركات صناعات الطيران باستخدام تقنية ليزيرية متقدمة لفحص الأجزاء المصنوعة من مواد مركبة في الطائرات، مثل الجرافيت والأيوكسي، المستخدمة في محركات الطائرات الحديثة، والتي يستغرق فحصها بالطرق التقليدية وقتاً طويلاً، وكلفة باهظة. والتقنية الجديدة تختصر زمن الفحص بنسبة ٩٠%، مما يختصر وقت التصنيع عدة أسابيع، كما أن دقة النظام المتناهية ترفع من مستوى التصنيع.

سابعاً: تشغيل المواد

ويستخدم لهذا الغرض ليزر ثاني أكسيد الكربون، أو ليزر اللياج، على نطاق واسع في صناعات الإلكترونيات والحواسيب والسيارات وهياكل الطائرات، وأكثر الاستخدامات شيوعاً لحام المعادن. ويمكن باستخدام عدسات ضوئية تركيز طاقة أشعة الليزر في نقطة البؤرة Focus على مساحة ضيقة جداً، فترفع درجة حرارتها أكثر من مائة ألف درجة مئوية، فتتبخر المادة، وهذا يؤدي إلى قطع ولحام وحفر الأجسام المعدنية المختلفة، كأجزاء السيارات والطائرات، والمواد الزجاجية والبلاستيك، والخزف. وفي هذه الحالات لا يبعد الحرارة وقتاً كافياً لتسري داخل المادة فتسبب التشققات أو تلفها. ويستخدم في هذه الأغراض الليزر النبضي الذي يوفر حزم ذات طاقة عالية من أشعة الليزر.

التلحيم هي طريقة أو عملية دمج أو تثبيت قطعتين مع بعضيهما. يتم ذلك عن طريق تسخينهما إلى درجة الانصهار مع استخدام قسوة ضغط أو لا. التلحيم يستخدم في عدة مجالات في الحياة الصناعية. كما في صناعة السفن و صناعة القطارات و السيارات. في السنين الأخيرة، طرق التلحيم تم تطويرها عن طريق القوس أو الليزر أو الحزمة الإلكترونية.

للحام الليزر : هي طريقة صهر و دمج عن طريق طاقة حرارية مبعثة من حزمة مركزة من الليزر. وأيضا يستطيع أن ينتقل خلال الهواء أو مواد ناقلة. حزمة الليزر تتميز بشدة عالية في القوة تصل الى ١٠٠٠٠ وات/سم مربع وأيضا بقلة في الدخول الحراري من ٠,١ جول الى ١٠ جول. اللحام الليزر يستخدم في تلحيم مستمر (continuous) أو نبضي (المقصود تقطي) (pulse).

أنواع الليزر للحام :

- ١- ليزر في حالة صلبة. مثل (Nd:YAG) يتميز بقوة عالية في تلحيم النبضي أو بقوة قليلة في تلحيم المستمر.
- ٢- ليزر الغاز. مثل (CO2) يتميز بقوة عالية في تلحيم المستمر أو بقوة قليلة في تلحيم النبضي.

تطبيقات اللحام بالحزمة الليزر:

- ١- في صناعة الذهب
- ٢- في صناعة البلاستيك
- ٣- في تطوير اللحام بالقوس
- ٤- في إصلاح القوالب

كما ذكرنا الليزر يستخدم في عدة مجالات في صناعة الطائرات والسيارات والسفن و الصناعات الحديثة. وأيضا الليزر يستخدم في تلحيم قطع إلكترونية سواء كبيرة أو صغيرة الحجم. وأيضا الليزر يستخدم في صناعة أدوات طبية. الليزر يستهلك كيلو وات في تلحيم نقطة (نبضة) في حجم أقل من ملليمتر مثلا في صناعة إلكترونية مع طاقة عالية و درجة حرارية مرتفعة. الليزر يستطيع أن يلحم

مسافات صغيرة مثلاً أقل من ٠,٠٥٤ ملليمتر (٠,٠٠١ أنش). وأيضا الليزر له القدرة في تلحيم المواد المعزولة من دون إزالة العازل كـ: لحيـم أسلاك الرصاص المعزولة بمادة بوليـريـثان (polyurethane). سوف أتحدث عن بعض التطبيقات التي يستخدم فيها التلحيم بحزمة الليزر.

في صناعة المجوهرات : الليزر يستخدم في صناعة المجوهرات. وأيضا يستخدم الليزر في إصلاح قطع المجوهرات التي تحوي على فراغات و تشققات غير مرئية بالعين المجردة. في الصناعة التقليدية بعد إصلاحها، قيمة المجوهرات تقل بسبب استخدام مادة إضافية لتكميل عملية اللحام ليست من المادة المصنعة منها القطعة وهذا يؤدي إلى تسرب آثار التصليح كـتغير اللون. بينما عند استخدام الليزر يتم استخدام مادة إضافية نفس المادة المصنعة منها القطعة وهذا يؤدي إلى عدم وجود آثار التصليح. ولهذا قيمة القطعة ترجع إلى سعرها الأولي.

في إصلاح قوالب التصنيع : صناعة القوالب المستخدمة في صب المعادن مكلفة الثمن. صناعة قالب حديد قد تكون مستحيلة أو غير منطقية أو غير مرغوب بها بسبب السعر أو الوقت. لهذا يستخدم الليزر في إصلاح ضرر بسيط أو صغير للقوالب مثل كسر حدود بسبب الحرارة العالية أو الضغط. وأيضا عند تضرر دقة مقاسات قالب يتم إصلاحها باستخدام التلحيم بالليزر.

في صناعة البلاستيك : من أهم تطبيقات الليزر استخدامه في تلحيم البلاستيك .
البلاستيك الملونة و الشفافة يتم تلحيمهم بدون مواد إضافية من خلال استخدام طريقة
التلحيم النظيف . هذه الطريقة تستخدم في تلحيم البلاستيك القاسي أو المرن المستخدم
في أدوات الإلكترونيات و السيارات .

وتستخدم أشعة الليزر في تثقيب المواد، مهما كانت درجة صلابتها، مثل المساس،
ويساعد ذلك في استخدامها في صناعة الساعات .

كما يمكن استخدام أشعة الليزر في الطلاء بالمعادن الثمينة، إذ يتم تسخين سطح
المعدن رخيص الثمن حتى يمكن وضع المعادن الأخرى الثمينة، كالفضة والكروم، فوقه .

ثامناً: في أعمال المساحة والخرائط

تستخدم أجهزة الليزر في القياس الدقيق للمسافات والزوايا، مما يمكن من تحديد
الهيئات الأرضية، ورسم التضاريس، عن طريق تركيب جهاز رادار ليدار في طائرة لرصد
المرتفعات والوديان بدقة عالية .

وتستخدم أشعة الليزر في تحديد استقامة المستويات بدقة، إذ يتم التأكد من استقامة
المباني العالية، وتحديد أماكن مد خطوط أنابيب الغاز والبتروول والماء والصرف الصحي،
وكوابل الاتصالات لمسافات بعيدة، وفي بناء الجسور وحفر الأنفاق . كما تستخدم أشعة
الليزر في قياس أعماق البحار والمحيطات ورسم خرائط للقاع، حيث إن هذا النوع من
الأشعة يمكنه اختراق الماء إلى عمق عدة مئات من الأمتار .

وتستخدم أجهزة الليزر في قياس التحركات - الصغيرة جداً - التي تحدث في القشرة الأرضية أثناء الزلازل، أو عندما تجرى تجارب نووية تحت الأرض. وفي عام ١٩٧٦ م، أطلقت وكالة الفضاء الأمريكية "ناسا" NASA القمر الصناعي "لاجيوس"، الذي يستخدم عدسات تعكس أشعة الليزر بحيث يمكن استخدامها في دراسة تحركات القشرة الأرضية، التي تحدث عادة قبل وقوع الزلازل أو الانفجارات البركانية، وأيضاً، في دراسة ظاهرة تحرك القارات ببطء شديد، بما يعادل عدة سنتيمترات سنوياً.

تاسعاً: في مجال البيئة

يستخدم التحليل الطيفي بواسطة أشعة الليزر لمراقبة تلوث الهواء والماء، وفي فحص تبصريف المواد الكيميائية من المصانع، وكذلك لقياس مستوى الغازات والجسيمات الدقيقة في عوادم السيارات، ومداعن المصانع، والتي تؤدي إلى تلوث البيئة. ومن أخطر هذه الجسيمات، الزنك، والخاصين، والكاديوم، والرصاص. ومن الغازات الخطرة أول أكسيد الكربون، وثاني أكسيد الكبريت. وتستخدم بعض أجهزة الوقاية من الحريق التحليل الطيفي بواسطة أشعة الليزر لمراقبة مستويات الأنجرة القابلة للاشتعال.

وقد قامت مجموعة من الشركات الأوروبية بتطوير نظام ليزري، لرسم خريطة عن

توزيع الأوزون في طبقات الجو العليا، وقياس نسبة كل من ثاني أكسيد الكربون

وأكسيد النيتروجين، وغاز كلوريد الهيدروجين الصادرة من أماكن جمع القمامة.

عاشراً: في مجال الفضاء

في عمليات استعادة الأقمار الصناعية التالفة بواسطة مكوك الفضاء، تستخدم منصات عاكسة فوق هذه الأقمار لتعكس أشعة الليزر إلى جهاز الكمبيوتر الموجود في المكوك، ليتمكن من تحديد قياسات دقيقة لموقع القمر المطلوب استعادته، ومن ثم يتم توجيه المكوك في الاتجاه الصحيح ليحد ذراعاً آلياً، ويجذب القمر إلى داخل المكوك.

وفي الفضاء تتم بعض التفاعلات الكيماوية بمساعدة أشعة الليزر في مركبات الفضاء، بطرق مغايرة تماماً للطرق التي تتم بها على سطح الأرض. فقد أثبتت البحوث التي تمت في الفضاء إمكانية تحديد لحظة التفاعل الكيماوي بين المواد باستخدام شعاع الليزر وكاميرا من نوع فريد، إذ تم تصوير لحظة ميلاد الجزيئات ولحظة التحامها بغيرها، في

ونظراً لأن أشعة الليزر تستطيع أن تكثف طاقة عظيمة تسافر إلى مسافات كبيرة، فقد قام الأمريكيون في عام ١٩٦٩م في إطار برنامج "أبوللو" بتجربة لقياس بعد القمر عن الأرض. وفي هذه التجربة وجهت أشعة الليزر من الأرض لقياس بعد القمر بدقة بالغة، على مدى استمر عشر سنوات. وكان الجهاز مكوناً من صندوق عليه مصفوفات تتكون من ١٠٠ مرآة صغيرة، قطر كل منها ٥ سم. ووضع الجهاز بزاوية ميل محددة فوق القمر، لتعكس على مرآياه أشعة الليزر، مرتدة إلى الأرض، لتسجل بعده عن الأرض بدرجة دقة لا تتجاوز ١٥ سم، بينما متوسط بعده عنا يبلغ ٣٨٣,٠٠٠ كم. وقد ظل الجهاز على سطح القمر طوال هذه السنوات، ليحسم خلافاً علمياً عن نظرية تمدد الكون أو انساخه، إذ تفترض هذه النظرية ابتعاد القمر عن الأرض بمقدار ٣ سم كل سنة.

حادي عشر: قياس سرعة الريح تستخدم الطائرات المدنية نظاماً لقياس سرعة الريح باستخدام أشعة الليزر أطلق عليه اسم ALEV-3 أنتجته شركة Sextant Avionique. وكان النموذج الأصلي لهذا النظام قد تم تصنيعه أصلاً لمعايرة أنظمة البيانات الجوية أثناء اختبارات الطائرات الجديدة.

ويعمل الجهاز اعتماداً على مبدأ العالم "دوبلر" Doppler الذي اكتشف ظاهرة اختلاف تردد الذبذبات الصادرة أو المنعكسة، حسب السرعة النسبية للمصدر الناشئة عنه، وبين جهاز القياس. ويقوم هذا الجهاز بإصدار حزمة من ضوء الليزر، ثم يقوم النظام الكهرو بصري باستقبال الأشعة المنعكسة التي تبعثرها ذرات الجو، وتقوم دوائر إلكترونية باستخراج الفرق بين تردد الشعاع الصادر وتردد الأشعة المنعكسة، والمتناسب مع سرعة الطائرة بالنسبة إلى سرعة الهواء المحيط الذي تمر فيه هذه اللحظة.

ثاني عشر: الاستخدامات العسكرية لليزر

انطلق الخيال العلمي لرسم صورة ل سلاح، تصوره الإنسان له قوة تدميرية تستطيع الانتقال بسرعة الضوء، وتحترق كل الحواجز والمسافات، بدلاً من القذائف. ومع التطور التكنولوجي أمكن بالفعل الحصول على عديد من أنواع الليزر، والتي تغطي النطاق الطيفي من الأشعة فوق البنفسجية حتى الموجات تحت الحمراء، إلا أن المستخدم منها في نظم التسليح محدود حتى الآن. وقد يرجع ذلك إلى عدم إمكان استخدام معظم أنواع الليزر الأخرى لأسباب تتعلق بمصدر الطاقة المطلوبة، والحجم، والوزن، بالإضافة إلى أهمية قدرة أشعة الليزر نفسها، وإمكانية التحكم فيها، وتعديلها أو تضمينها modulation.

وقد انتشر استخدام الليزر في نظم التسليح المختلفة خلال السنوات الأخيرة انتشاراً حثيثاً، وكان له أثر بالغ في زيادة فاعليتها، فأصبحت معدات الليزر تتداول من الجندي المشاة، حتى المقاتلات والقاذفات، بل وبدأت تدخل في نظم الحرب ضد السواريخ الباليستية.

وتقع أنواع الليزر المستخدمة حالياً في نظم التسليح في حيز الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء، وإن كان النوع الأول، الذي يقع في حيز الضوء المرئي، غير مستخدم حالياً على نطاق واسع؛ لأنه يقع في نطاق الضوء الأحمر، مما يجعله سهل الاكتشاف. وعلى الناحية الأخرى، فإن الليزر الذي يقع في حيز الأشعة تحت الحمراء حديث الاستخدام في التطبيقات العسكرية، ويمتاز بالعمل في حيز الأشعة تحت الحمراء البعيدة، مما يحقق له قدرة على اختراق الضباب والدخان والأمطار، ويفضل كذلك استخدامه مع نظم الرؤية السلبية بالاستشعار الحراري، نظراً لعمله في النطاق الموجي نفسه، فيمكنه بالتالي التعامل مع الأهداف نفسها التي ترى بالمنظار الحراري. وتتعدد مجالات الاستخدامات العسكرية لأشعة الليزر، ونلخص أهمها فيما يلي:

أولاً: جهاز رادار الليزر

تعرف أجهزة رادار الليزر باسم "ليدار" LADAR، وهي الحسروف الأولى مسن عبارة Laser Detection and Ranging، وتعني "الكشف وقياس المدى بواسطة الليزر". وهذا النوع من الرادار يتميز بدقته العالية في كشف ومتابعة وتعيين الأهداف. وهنا تستخدم أشعة الليزر في الإرسال، بدلاً من الأشعة الرادارية، ويكون جهاز الاستقبال كهروضوئياً بدلاً من المستقبل الإلكتروني التقليدي في الرادار، وتستخدم

لذلك أنابيب "فيديوكون" Videocon، بدلاً من أنابيب أشعة المهبط Cathode Ray Tube : CRT. مقارنة بين بعض خصائص جهاز الليدار، الذي يستخدم ليزر الياض، وجهاز الرادار التقليدي.

ويستخدم جهاز الليدار في قياس المدى من القواعد الأرضية، أو من السفن، أو من الطائرات والمركبات الفضائية. ويستخدم، أيضاً، في الاستشعار عن بعد، إذ تتم دراسة مكونات الغلاف الجوي وقياس بعض المكونات الكيميائية فيه.

ويتكون جهاز رادار الليدار بوجه عام من:

١. مرسل

٢. أجهزة ضوئية للإرسال.

٣. مستقبل، يتكون من أجهزة ضوئية لتجميع الأشعة المنعكسة من الهدف، ثم مرشح Filter ليقبل من تداخل الموجات الضوئية.

وفي نظام الدفاع الجوي البريطاني "ليزرفاير" LASERFIRE الذي يستخدم للتعامل مع الأهداف المنخفضة، يتكون نظام التتبع الآلي من نظام تتبع ليزري للأهداف، ونظام تتبع تليفزيوني للصاروخ. ويحقق شعاع الليزر الضيق دقة التتبع، وعسدم التساثر بأعمال الإعاقة.

ثانياً: قياس المسافة

وقد أدى تهديد الصواريخ الباليستية الحاملة للمواد الكيميائية والبيولوجية، إلى أن تقسوم الولايات المتحدة بالسير قدماً في مشروع اعتراض هذه الصواريخ، باستخدام نظم إطلاق لأشعة الليزر المحمولة جواً في قتل هذه الصواريخ، وهي في المراحل الأولى من المحموم. فقد وقعت الولايات المتحدة مع مجموعة من الشركات المتخصصة في إنتاج السلاح بقيادة شركة "بوينج" عقدا لتطوير نظام إنتاج وقذف الليزر الكيميائي عالي الطاقة، يستخدم من الطائرة "بوينج ٤٠٠-٧٤٧" لإطلاق قذائف شعاع ليزرية تقوم بقتل الصاروخ المهاجم في المراحل الأولى من انطلاقه، بحيث يتم مهاجمة الصاروخ بالشعاع القاتل للصواريخ الباليستية بعد إضاءة الهدف بالليزر والطائرة على ارتفاع ٤٠ ألف قدم. وتقدر قيمة الطلقة الإشعاعية بألف دولار. وكذلك يمكن للطائرة توجيه نظم اعتراض أخرى لمهاجمة الهدف، مثل الصاروخ "باتريوت" Patriot، أو الطائرة المقاتلة التكتيكية F-22، إذ يقوم النظام الليزري، المحمول جواً، باكتشاف الصواريخ المحمولة على وسائل نقل متحركة في أماكن تركزها في عمق العدو. والليزر الذي تقوم بتطويره الشركة المذكورة

الأمريكي هو من نوعية الليزر الكيميائي Chemical Oxygen Iodine Laser الذي ينتج عدة مئات من الكيلووات لمدة عدة ثوان بكفاءة، بحيث تستطيع الطائرة التي تحمل عدداً كافياً من المفاعلات تدمير العدد المطلوب من الصواريخ الباليستية، ويمكن للطائرة الاشتباك مع ٤٠ هدفاً في مدة ٣-٥ ثوان.

ثالثاً: التدريب على الرماية

تستخدم أشعة الليزر في تدريب الأفراد على رماية الأسلحة الصغيرة، أثناء التدريبات والمناورات. وتقوم هذه الفكرة على استخدام الأفراد، تحت التدريب، بنادق وأسلحة صغيرة، مجهزة بأجهزة ليزر صغيرة، تقوم بإطلاق أشعتها، بدلاً من الذخيرة الفعلية، على نماذج الأفراد المطلوب إصابتهم، والتي تزود ملابسهم بأجهزة اكتشاف صغيرة لأشعة الليزر، في مواضع مختلفة، مثل: الصدر، الرأس، البطن. وإذا تم التقاط هذه الأجهزة لشعاع الليزر الصادر من السلاح، فإن ذلك يكون دليلاً على إصابة الفرد، ويصدر الإنذار بذلك، مع إمكانية تسجيل لاحق لأعداد الإصابات.

ويحتاج استخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون في هذا المجال بعدم إضرار العين، بخلاف الأنواع الأخرى، مما يسهل استخداماته في عمليات التدريب، ولكنه يحتاج إلى مستشعرات متقدمة لاكتشافه ورصده وقياسه. وجميع هذه المعدات تعمل بالنظام النبضي بطاقة محدودة (عشرات الميلي جول)، ونبضات ذات أزمدة تتراوح من ١٠ إلى ١٠٠ نانو ثانية، بينما تعمل بنظام الموجة المستمرة إذا استخدمت لإضاءة الأهداف.

رابعاً: الإنذار من أشعة الليزر

كما سبق يتضح الانتشار الواسع لمعدات الليزر في الميدان، والخطورة التي تمثلها هذه النظم، مما استوجب بالتالي الاتجاه إلى توفير وسائل للإنذار من استخدام العدو لمثل هذه المعدات، لإمكان محاولة اتخاذ الإجراءات المناسبة. ويمكن مقارنة هذه السنظم بسنظم رادارات إضاءة الأهداف، التي يستتبعها بالضرورة تهديد نيران ضد أهداف مثل الرشاشات أو المدفعية المضادة للطائرات، أو الصواريخ أرض/جو، أو جو/أرض.

وفي مواجهة تهديد الأسلحة التي تستخدم أشعة الليزر كان البحث عن وسائل مبتكرة للحماية من معدات الليزر وتقليل فاعليتها، إن لم يمكن التغلب عليها. وبالطبع تكون أول خطوة في هذا الاتجاه اكتشاف نظم التسليح بالليزر. ونشأ عن هذا أنواع من معدات الإنذار للإنذار بأن الهدف قد أصيب بشعاع ليزر، وأن ذلك يعني إما أنه جارٍ تقدير مسافة الهدف بواسطة العدو، أو أن مقلوباً موجهاً بشعاع الليزر يتجه نحو الهدف.

والإنذار ضد تهديد الصواريخ الموجهة بالليزر قد تم تطوير مستقبلات إنذار ليزرية يمكن حملها على متن الطائرات الهليكوبتر القتالية، والطائرات الهجومية، ومركبات القتال المدرعة.

وتنتج شركة "هيوز" الأمريكية نظاماً للكشف والإنذار عن أشعة الليزر للاستخدام على مختلف أنواع الطائرات، ويطلق عليه AN-AVR-2، ويقوم بالكشف أي تهديد ليزري، من أي اتجاه حول الطائرة. ويتكون النظام من 4 مستشعرات لأشعة الليزر، تعمل على حيز واسع من الأطوال الموجية لتغطية أكثر من نوع من الليزر. وتستخدم الألياف البصرية للربط بين المستشعرات ووحدة التحكم لتقليل الفقد وزيادة الحساسية.

وقد عرضت شركة روسية نظاماً يزعم أنه يوفر الحماية للديابات من الصواريخ الموجهة ضدها ومن قذائف المدفعية الموجهة بالليزر. وقد أطلق على هذا النظام اسم Shtora-1.

كما تنتج شركة "سيلامس" الفرنسية التابعة لمجموعة "ايروسباسيال" جهازاً للكشف الليزري، والمسمى Sight Laser Detector SLD 400 لحماية الشخصيات المهمة وأفراد القوات المسلحة. ويستطيع هذا الجهاز الكشف عن أي نوع من المعدات البصرية التي تستخدم في ميدان المعركة، أو المناطق العسكرية الحساسة. وفي التطبيقات العسكرية، يوفر الجهاز القدرة على كشف القناصة المجهزين بتلسكوبات التصوير، وخصوصاً في المناطق المدنية.

وقد تم تصميم نظم الإنذار بحيث تعطى إنذاراً بمجرد وجود شعاع ليزر في مجال رؤيتها، وتعطى اتجاه شعاع الليزر.

ونظم الإنذار المتاحة حالياً تستخدم إحدى الوسائل التالية:

١. التمييز الطيفي

يُعد شعاع الليزر مصدراً كهرومغناطيسياً ذا تردد، أو طول موجي، يتوقف على نوع المادة المنتجة للشعاع ذاتها. وبالتالي فإن نظم الإنذار تستخدم مرشحات ضوئية Optical Filters دقيقة، لا تسمح إلا للأشعة ذات الطول الموجي المطلوب بالمرور من خلالها. فإذا كانت قدرة شعاع الليزر المستخدم لإضاءة الأهداف تصل إلى كيلو واط في النبضة، بينما تبلغ شدة إضاءة أشعة الشمس وقت الظهيرة حوالي ٢ وات على السنتيمتر المربع، موزعة على النطاق الطيفي الذي يمتد من الأشعة فوق البنفسجية وحتى الأشعة تحت الحمراء، فيكون نصيب الطول الموجي - المناظر لأشعة الليزر - لا يزيد على ميكرووات. ومن ثم فإن نظم الإنذار تستطيع، إذا سقط عليها إشعاع من نفس الطول

الموجي المتوقع من مصدر التهديد، أن تستخلص الإنذار دون أن تتأثر بأي إشعاعات خلفية. ويعيب هذه الطريقة أن الطول الموجي المتوقع يجب أن يكون معلوماً مسبقاً. فإذا استخدم العدو مصادر ليزر مختلفة عن نطاق عمل مرشحات جهاز الإنذار فلن يستم الإنذار المطلوب.

٢. التمييز الزمني

لما كانت معظم نظم الليزر الميدانية، المعروفة حالياً، تعمل بالنظام النبضي، فهناك إمكانية خداعها بواسطة مصدر إضاءة نبضي، وبالتالي لا يمكن تحديد المعلومات المطلوبة لتحديد مصدر التهديد، وهي: الطول الموجي الذي يعمل عليه التردد النبضي، وعرض النبضة. وهذه المعلومات ضرورية لتحديد هوية مصدر الليزر.

ومن هذا المنطلق، فقد كان لازماً استحداث نظم إنذار جديدة قادرة على استطلاع هذه المعلومات. وتقوم نظرية عمل هذه النظم الجديدة على استغلال خاصية شعاع الليزر التي يتميز بها عن أي إشعاعات كهرب ومغناطيسية أخرى، سواء الضوئية أو غيرها، وهي خاصية التقارب. فشعاع الليزر أحادي الطول الموجي، وذو زاوية طور **phase angle** محدودة، وبالتالي فإن شعاعين من الليزر، من الطول الموجي نفسه، سيكونان قادرين على التداخل معاً، وإنتاج ما يسمى بـ "هدب التداخل" **Interference Fringes**، والذي يتكون من حلقات مضيئة ومظلمة على التبادل. وبواسطة هذه الحلقات يمكن تحديد الطول الموجي للأشعة المتداخلة، وكذا زاوية سقوطها. وبينما تتداخل أشعة الليزر، فإن أي إشعاعات خلفية، أو ضوضاء، لن تكون قادرة على إنتاج هدب تداخل إطلاقاً بسبب طبيعتها غير التقاربية.

وتقوم بعض النظم الحديثة القائمة على استخدام أنواع متقدمة من أجهزة التداخل التي يمكنها تسجيل هذب التداخل على مصفوفة Array مكثفات، يتوقف نوعها على النطاق الطيفي للتهديد، إذ أن هذب التداخل لن تكون مرئية إلا إذا كان الليزر يعمل في نطاق الأشعة تحت الحمراء. وفي هذه الحالة فإن هذب التداخل ستحتاج إلى مصفوفة مكثفات حرارية لالتقاطها وتصويرها، ثمهيداً لاستنتاج البيانات المطلوبة بواسطة كمبيوتر مبرمج لهذا الغرض، يحتفظ في ذاكرته بمكتبة التهديدات المحتملة.

و هناك فكر طموح يهدف إلى استخدام معدات الرؤية التي تعتمد على تكسين صور تليفزيونية، سواء في الطيف المرئي أو بالاستشعار الحراري، وتوقع مصدر أشعة الليزر على شريحة التصوير الإلكترونية لتحديد الاتجاه بدقة كبيرة. وهذا الفكر الجديد يمثل أهمية خاصة للاستخدام في الدبابات، إذ قد يتيح فرصة للطاغم للتعامل بسائليران بسرعة مع مصدر الليزر.

ويمكن أن تعمل نظم الإنذار من الليزر منفصلة، أو أن تكون أحد مدخلات لنظام إنذار متعدد، يستقبل المعلومات من مجموعة متنوعة من المستشعرات، إذ يتم معالجتها وترتيب أولويات التهديد لاستخدام وسائل المقاومة. وقد تستخدم وسائل الإنذار من الليزر لتأكيد أي معلومات عن التهديد أو استكمالها.

ويؤكد فكر نظم الإنذار المشترك أن عديداً من نظم الليزر للإضاءة تستخدم مع نظم رادارات الإنذار، أو إدارة النيران، سواء للتتبع، أو لقياس المسافات في بعض حالات الإعاقة الرادارية، أو لتوجيه الصواريخ. ويساعد وجود الإنذار من الليزر النظام المشترك في التقاط التهديد وتحديدته.

وتختلف أساليب مقاومة التهديد الليزري اختلافاً كبيراً، فقد تكون مجرد مناورة سريعة للمعدة، كافية للخروج من دائرة التهديد المباشر. ويظهر ذلك غالباً في الطائرات الخفيفة. وقد يحتاج الموقف إلى اتخاذ إجراءات مقاومة يصعب تنفيذها خلال الزمن المحدود للغاية، والمتيسر من لحظة الإنذار، وحتى وصول المقذوف، مما يزيد العبء على النظام، إذ يحتاج بالتالي إلى ضرورة توفير قدرة لتحليل التهديد بسرعة بالغة، وتحديد نوعه واتجاهه بدقة مناسبة. وتظهر خطورة هذا الموقف بالنسبة للدبابات، إذ أن الزمن المتيسر من لحظة التقاط الإنذار إلى وصول المقذوف من الأسلحة المضادة للدبابات قد يقل كثيراً عن الوقت المطلوب للمناورة أو للرد بالنيران، ولا يبقى بالتالي إلا اتخاذ وسائل مقاومة سلبية سريعة ومناسبة.

وتطور شركة "لوكهيد" الأمريكية نظاماً فضائياً للجيل الثاني مسن منظومة الأقمار الصناعية للإنذار والتعقب التي تعتمد على أشعة الليزر والمعروفة باسم SPIRS، وسوف تقوم المنظومة بالإنذار عند بداية اكتشاف هجوم صاروخي باليستى على الولايات المتحدة، أو أحد حلفائها، أو على قواتها المنتشرة. ويقوم النظام بالإنذار والتحذير

في نفس وقت إطلاقها، ويمرر معلومات الإنذار إلى نظام إدارة المعارك والدفاع ضد الصواريخ، وسوف يحل نظام SPIRS الفضائي للإنذار محل برنامج الأقمار الصناعية للدعم الدفاعي، وسوف يبدأ البرنامج بإطلاق خمسة أقمار متزامنة في المرحلة الأولى لنشر النظام.

خامساً: الإعاقة على أشعة الليزر

وتقوم فكرة الإعاقة على أشعة الليزر، عموماً، على منع وصول شعاع الليزر المعادى إلى الهدف، وذلك باستخدام عديد من الأساليب الفنية التي تحول دون استمرار تقدم الشعاع وانعكاسه من الهدف، وهي تشبه بقدر كبير الإعاقة الإلكترونية السلبية التي تستخدم مع الرادارات. ومن أبسط الأساليب التي تستخدم لمنع وصول شعاع الليزر إلى الهدف، استخدام ستائر الدخان المختلفة، وهو أسلوب سهل وسريع الاستخدام، يقوم على إطلاق حرايطيش دخان من المعدة ذاتها، في اتجاه مصدر أشعة الليزر المعادية، فيعمل الدخان على امتصاص هذه الأشعة، أو على الأقل، امتصاص أكبر قدر منها، بما يمنع وصول الشعاع إلى الهدف. ويراعى أهمية التأكد من فاعلية هذه السواتر المختلفة في امتصاص الأشعة، في الحيز المحدد الذي تعمل خلاله أجهزة الليزر. وتجدر الإشارة هنا إلى قدرة أشعة ليزر ثاني أكسيد الكربون على احتراق ستائر الدخان والضباب، مما يستدعي عدم إمكانية الاعتماد على الدخان المستخدم لمواجهة هذا النوع من الليزر، وضرورة استخدام أنواع أخرى مختلفة من الدخان، ذات قدرة امتصاص أكبر خلال هذا الحيز من الترددات. وهناك أسلوب تشتت أشعة الليزر الذي يعتمد على استخدام ستائر من الأيروسولات التي تطلق في الجو، وهي عبارة عن جسيمات دقيقة ذات أحجام تتناسب مع الطول الموجي لأشعة الليزر التي تعمل على مقاومتها، فتسبب تشتت أشعة الليزر الساقطة عليها قبل وصولها للهدف، فتمنع بالتالي الوصول، بالإضافة إلى ما تسببه من امتصاص جزء من الأشعة الساقطة.

وتمتاز فكرة استخدام الأيروسولات كذلك بسهولة الاستخدام من حرايطيش أو دانات، مثل الدخان تماماً، كما قد تنثر من مستودعات في الطائرات. وتتميز كذلك بطول فترة عملها، إذ تبقى في الجو بطبيعتها لفترات زمنية قد تطول إلى ٨٠ ثانية.

هذا وتقوم عدة شركات بتطوير نظم تشويش ليزرية عالية الشدة، لإعاقة الجليل الجديد من الصواريخ، الذي يعمل على الموجة التي طولها ٤ - ٥ ميكرون، وهي موجة طويلة نسبياً، وتتطلب عملية حماية الطائرات من خطر الصواريخ الحديثة التي تعمل على هذه الموجة عدداً من نظم التشويش الليزرية. فمثلاً تحتاج طائرة النقل الأمريكية C-130 إلى وحدتين من النظام المذكور لحمايتها. كما أن حماية الطائرة المقاتلة F-15 يكون أكثر صعوبة نظراً لصغر حجمها.

اتجاهات التطور المستقبلية لتقنيات وتطبيقات الليزر

ومن الدراسة المستفيضة لاتجاهات التطوير المستقبلية لتقنيات وتطبيقات الليزر، فإن الواضح أن الاستخدامات الصناعية هي أكثر الاستخدامات شيوعاً، تتيح رخصتها ودقتها ومرونة استخدام الوسائل التقليدية. والأهم من هذا إمكانية التحكم فيها باستخدام وسائل التحكم الإلكترونية الآلية. وينتج عن التطوير العام نحو زيادة قدرة الليزر، وفي الوقت نفسه تقليل الحجم والوزن، مما يسمح باستخدام الأفضل.

وبالنسبة لليزر الدايمود، فإن المخرج الذي أمكن التوصل إليه في المعامل هو ٢,٦ وات، بينما لم تحقق الصناعة أكثر من ١٠٠ ميلي وات. وهذه هي مهمة التطوير الصناعي خلال السنوات القادمة.

وأهم مشكلات استخدامات الليزر وأخطرها العمر الافتراضي للمعدات وفعاليتها، فالمعروف أن عمر تشغيل عناصر توليد الليزر، سواء كانت غازية أو صلبة، لا تزيد على ٥٠٠٠ ساعة، والمطلوب زيادة هذا العمر إلى ١٠,٠٠٠ ساعة، على الأقل، وكذلك نوعيات المرايا المستخدمة في أجهزة الليزر، وبالذات الأنواع عالية القدرة، ومدى قدرة هذه المرايا على تحمل نبضات الليزر القوية.

وتتجه الصناعة إلى إدماج وحدات الليزر الصناعية مع "الروبوت" Robot لاستخدامها في خطوط إنتاج العديد من المنتجات، بحيث يمكن تحريك مصدر شعاع الليزر والتحكم فيه من على بعد.

ولا يقتصر الاستخدام الصناعي على الصناعات الثقيلة فقط، ولكن يشمل، أيضاً، الصناعات الإلكترونية، وعلى الأخص منها الصناعات التكنولوجية المتقدمة، كإنتاج أشباه الموصلات والدوائر المتكاملة Integrated Circuits: IC وغيرها. ويعمل هنا على التقدم في نظم الليزر التي تعمل في نطاق الأشعة فوق البنفسجية.

ولقد تميزت الأعوام الأخيرة بظواهر ومكتشفات جديدة في مجال الليزر يمكن تلخيصها فيما يلي:

١. أمكن لأول مرة تشغيل ليزر يعطى خرج "أشعة أكس" ذو طول موجي يصل إلى ٢٠٠ أنجستروم، وهذا حدث له دلالة على طريق استخدام أشعة الليزر في أسلحة الفضاء.
٢. إنتاج مرسل ليزر على نمط هوائيات "المصفوفة المترابطة" phased array " مما يسمح، لأول مرة، بتشكيل شعاع ليزر، والتحكم فيه إلكترونياً، وزيادة قدرة الخرج.

٣. إنتاج أول ليزر متغير التردد يعمل تحت الظروف الجوية العادية، وبدون تبريد.
٤. وصل المشروع القومي الياباني لإنتاج ليزر ثاني أكسيد الكربون الذي تبلغ قدرته ٢٠ كيلوات إلى مراحله النهائية، وقد استغرقت البحوث والتطوير مدة ٨ أعوام كاملة.
٥. إنتاج أنواع جديدة من الليزر تعمل بترددات لم يسبق استخدامها من قبل.
- وفيما يلي نعرض أهم اتجاهات التطور المستقبلية لتقنيات وتطبيقات الليزر.

أولاً: في مجال البحوث العلمية

وفي مجال البحوث العلمية والأكاديمية، سيتجه الطلب نحو نظم الليزر ذات النبضات القصيرة جداً، وكذا النظم التي يمكن توليفها في نطاق ترددي عريض، بحيث يمكن استخدامها في مجال بحوث الكيمياء الحيوية والهندسة الوراثية.

وقد أمكن الحصول على نبضات ليزرية قصيرة جداً، وأهمية هذا التطوير تكمن في قياس بعض الظواهر الطبيعية السريعة، أو قياس ورصد بعض العمليات الكيميائية التي تحدث داخل الخلية البشرية.

ثانياً: في مجال الكمبيوتر

وقمة التزاوج بين الليزر والكمبيوتر سيكون كمبيوتر بصري يستخدم أشعة الليزر لتخزين المعلومات ومعالجتها. ومثل هذا الكمبيوتر سيكون أسرع ألف مرة من أجهزة الكمبيوتر العادية التي بدأت تواجه القيود التي فرضتها عليها سرعة تحريك الإلكترونات

خلال الدوائر ذات الأساس السيليكوني. ويعمل العلماء في الولايات المتحدة وأوروبا واليابان على ابتكار نظائر بصرية لكمبيوتر اليوم الإلكتروني.

ثالثاً: في مجال الطب

وفي مجال الطب، استقرت أساليب جراحة الانفصال الشبكي باستخدام ليزر "الياج". ولكن استخدام الليزر في أغراض طبية أخرى ما زال رهن التجربة والاختبار، ومن ذلك، على سبيل المثال، استخدام بعض أنواع الليزر في علاج الأورام الخبيثة، واستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون في لحام الأوعية الدموية. وتحتاج التطبيقات الطبية إلى تطوير الليزر في اتجاه تقليل حجمها، وإمكانية تشغيلها ببطاريات، وزيادة فاعلية مكوناتها.

ومن الاستخدامات ذات الاهتمام البحثي حالياً، استخدام ليزر ثاني الطول الموجي، أحدهما يستخدم في الجراحة، والثاني يستخدم في إغلاق الشرايين. وعلى وجه العموم، فما زال تأثير الليزر على الأنسجة البشرية وتفاعلها معاً مادة خصبة للبحث بهدف فتح آفاق جديدة لاستخدام الليزر طبياً.

أما مجالات التطوير المستقبلية فتشمل استخدام ثاني أكسيد الكربون لإذابة الجلطات في الشرايين التاجية وتكسيدها، أو لإزالة الرواسب من جدران الأوعية الدموية، والتي قد تؤدي إلى الأزمات القلبية وتصلب الشرايين.

وتجرى الآن التجارب الطبية لاستخدام أحدث أنواع الليزر، والتي تستخدم الليزر الناتج من بخار الذهب أو النحاس، لعلاج بعض أنواع الأورام الخبيثة. وقد بلغت طاقة الخرج المستخدمة حوالي ١٠ وات.

رابعاً - وفي مجال الاتصالات،

فإن الأهداف بعيدة المدى للتطوير تتركز في زيادة مدى الاتصال، وزيادة معدل نقل البيانات باستحداث أنواع جديدة من الألياف البصرية، ومرسلات ليزر تعمل في أطوال موجية تسمح بالانتشار في الألياف بدون فاقد يذكر.

دايود diode لتغذية "الليزر"، بدلاً من مصدر التغذية الضوئي التقليدي. وعلى وجه التحديد فقد بدأ الإنتاج الكمي لأشباه موصلات تعطي ليزر ذا طول موجي ١,٥٥٠ ميكرون، لأهميته في الاتصالات باستخدام الألياف الضوئية. وهناك اهتمام كبير باستخدام الليزر في الاتصال بالغواصات، إذ ترسل الإشارات والمعلومات بمعدل إرسال سريع عن طريق الأقمار الصناعية، أو من خلال منظومة محمولة جواً، ويسوفر ذلك إمكانية استمرار الغواصات في الأعماق، والتحرك بسرعتها العادية، وفي الوقت نفسه يمكنها استقبال أوامر القيادة دون الظهور على السطح والتعرض لاحتمال الكشف. ومن المعروف أن مياه البحار والمحيطات تسبب اضمحلالاً وفقداناً للأشعة الكهرومغناطيسية، يزدادان بازدياد العمق، ومع ذلك، فإن حيز الأشعة الليزرية يقل داخله هذا الفقد عن أي حيز آخر.

خامساً: في مجال الهندسة الوراثية

ويتوقع العلماء أن يكشف المستقبل القريب عن المزيد من التطبيقات المفيدة لتقنية الليزر، مثل استخدامها في مجال الهندسة الوراثية، إذ تساعد في نقل المادة الوراثية في الخلايا، والمعروفة باسم "الحمض النووي" DNA: Deoxyribonucleic Acid من خلية إلى أخرى. فإذا وجهت أشعة الليزر إلى الخلية المطلوب نقل الـ DNA

إليها، فإنها تفتح ثقباً دقيقاً جداً في الغشاء الخارجي للخلية، ويستمر هذا لمدة كافية للسماح للـ DNA الجديدة بالدخول إلى الخلية. ويمكن استخدام هذه التقنية في التعرف على الجينات التي تسبب السرطان، وفي تطوير الأدوية.

سادساً: الليزر الشمسي

والليزر الشمسي، هو أحد التطبيقات المستقبلية للاستفادة من شدة الضوء العالية في توليد الليزر. وفي هذه الحالة يدخل الضوء الشمسي من أحد طرفي بلورة الليزر، فيحدث الذرات فيها على إصدار ضوء ذي ترددات معينة. وينتقل هذا الضوء ذهاباً وإياباً بين مرآتين موضوعتين خارج البلورة. وينفذ بعض الطاقة الضوئية عبر إحدى المرآتين مولداً حزمة الليزر التي تنطلق إلى خارج الجهاز.

سابعاً: الليزر عالي القدرة

ومع الحاجة إلى قدرات أعلى، فقد بدأت نظم الليزر التي تعمل بأسلوب المصفوفات المتراصة phased arrays في السطح، وهي تعطي قدرة خرج حوالي ٠,٢ وات، بدون الحاجة إلى تبريد النظام. وقد وصلت فاعلية هذه النظم إلى معدل أعطال مرة كل ٥٠,٠٠٠ ساعة تشغيل. أما ليزر الباج، فقد ظهرت منه أنواع جديدة ذات طاقة خرج أكبر وتردد نبضي يصل إلى ٢٠ نبضة/ ثانية، وهو من أعلى المعدلات المعروفة حالياً.

ويستخدم ثاني أكسيد الكربون في تغذية بعض الأنواع الأخرى من الليزر القادر على إنتاج طول موجي ١,٢٢ مم، أي في نطاق موجات الميكروويف microwaves.

وحيث إن الموجات الميثلومترية قيد البحث حالياً لاستخدامها في التوجيه الراداري الإيجابي للقتاتف، فإن هذا الكشف قد يكون فتحاً لأفاق جديدة في هذا المجال.

وتم إنتاج البصريات التوافقية **Adaptive optics**، وهي المرايا التي يمكن تشكيل سطحها حسب حالة الجو، مما يسمح بانتشار شعاع الليزر الصادر منها بدون تشوه، وبالتالي يمكن تركيزه على الأهداف بكفاءة أعلى.

ثامناً: إنتاج مصادر ليزر تعمل بالحث الإشعاعي من الثنائيات المشعة

وتمثل هذا الاتجاه في استبدال اللمبات الوامضة **Flash Lamps** التي تستخدم الأشعة الصادرة منها في إنتاج أشعة الليزر بمصادر أشعة بديلة، وهي الثنائيات **Diodes** المشعة؛ لأن استخدام اللمبات الوامضة في مصادر الليزر يحد من كفاءتها وعمرها الافتراضي، نظراً لأكبر حجمها وقلة كفاءتها. أما الثنائيات المشعة فتوفر كفاءة تشغيل لليزر تعادل عشرة مرات تلك التي يوفرها استخدام اللمبات، إضافة إلى خفض وزن مصدر الطاقة ونظام التبريد بدرجة كبيرة.

تاسعاً: إنتاج أشعة ليزر غير ضارة بالعين

أهم ما يحد من استخدامات أجهزة قياس المسافة بالليزر أنها تضر بالعين، ما لم تكن هناك مسافة أمان كافية، وهو ما يمثل عائقاً في استخدامها في التدريب. ولذلك تتجه البحوث نحو إنتاج أشعة ليزر غير ضارة بالعين.

عاشراً: وسائل وقاية متطورة

يُجرى العديد من البحوث لتطوير وسائل تحقق حماية كافية للأفراد من أخطار أشعة الليزر. وأحد الاحتمالات المستقبلية هو استخدام المواد المصنوعة من البوليمرات **Polymers** البصرية، التي يمكنها تغيير خصائصها البصرية عند تعرضها للضوء الشديد، وتصبح معتمة تقريباً عند تعرضها لشعاع الليزر، ثم تعود لحالتها الشفافة السابقة. وهكذا، فإن هذه المواد يمكنها حجب أشعة الليزر، ولكنها في الوقت نفسه تسمح للضوء العادي بالمرور، من دون تغيير.

حادي عشر: توليد الطاقة النووية

هناك نوع من التفاعلات النووية يعطي قدراً هائلاً من الطاقة عند حدوثه، وهو الاندماج النووي **Fusion**. ويتم ذلك باندماج بعض الذرات الخفيفة معاً لتكوين ذرات أثقل منها. والمصدر الرئيسي لهذه الطاقة هو غاز الهيدروجين. ويمكن تصور مقدار الطاقة الهائلة التي تنتج من اندماج الذرات إذا عرفنا أن حرارة الشمس الهائلة تنتج من اندماج ذرات الهيدروجين في مركزها.

وهناك بحوث لتحقيق الاندماج النووي بواسطة أشعة الليزر، وقد استخدم الباحثون عشرين مصدراً من مصادر الليزر لتركيز نحو ٢٦ مليون واط على قرص صغير مسن الزجاج، قطره نصف ملليمتر، ويحتوي على خليط من نظائر الهيدروجين، وذلك لسدة قدرت بجزء من عشرة ملايين جزء من الثانية.



جدول

بعض أنواع الليزر الشائعة

نوع الليزر	نوع الطيف	الوسط	الطول الموجي (نانومتر)	نوع الإشعاع
هليوم-كاديوم	فوق بنفسجي	غازي	٣٢٥	مستمر
نيتروجين	فوق بنفسجي	غازي	٣٣٧,١	نبضي
كريتون	فوق بنفسجي	غازي	٣٥٠,٧	مستمر
أرجون	فوق بنفسجي	غازي	٣٥١,١	مستمر-نبضي
هليوم-كاديوم	مرئي	غازي	٤٤١,٦	مستمر
أرجون	مرئي	غازي	٤٥٧,٩	مستمر-نبضي
كريتون	مرئي	غازي	٤٦١,٩	مستمر-نبضي

زيتون	مرئي	غازي	٤٦٠,٣	مستمر
ارجون-كربتون	مرئي	غازي	٤٦٧,٥	مستمر
هليوم-ليون	مرئي	غازي	٦٣٢,٨	مستمر
ياقوت	مرئي	صلب	٦٩٤,٣	نبضي
كربتون	تحت الحمراء	غازي	١,٧٥٣	مستمر
ارسنيد الجاليوم	تحت الحمراء	صلب	١,٩٠٤	مستمر
نيودينيوم neodymium	تحت الحمراء	صلب	نيودينيوم	نبضي
نيودينيوم	تحت الحمراء	صلب	نيودينيوم	مستمر-نبضي
هليوم-نيون	تحت الحمراء	غازي	١,١٥	مستمر
ثاني اكسيد الكربون	تحت الحمراء	غازي	١٠,٦	مستمر-نبضي

ماء	تحت الحمراء	غازي	١١,٨	مستمر-نبضي
-----	-------------	------	------	------------

جدول

مقارنة بين الليدار (يستخدم ليزر الهياج) والرادار

الرادار	الليدار	
١٠-٣ سم	١٠,٦ ميكرون	طول الموجة
في حدود الكيلووات	٢-١ ميغاوات	القدرة
في حدود الميكروثانية	٠,١-٠,٠١ ميكروثانية	عرض النبضة
وفقاً لتصميم الهوائي	بدون فصوص جانبية sidelopes	مجسم الإشعاع
٣-٢ درجة	أقل من ٠,٠٠٦ درجة	زاوية انفراج الشعاع
في حدود ١٠٠ م	حتى ٥ م	دقة قياس المدى

مراجع اللغة العربية :

١- اتصالات الألياف البصرية :محمد عبد الرحمن، ١٩٩٦

- ٢- الليزر وتطبيقاته الصناعية، د. فالح الأحمد، د. فائز البيرقدار، ١٩٨٥
- ٣- الدكتور أحمد الحصري والدكتور طاهر تريبدار، مسائل محلولة في الفيزياء، منشورات دار الرسالة، دمشق ١٩٨٣ .
- ٤- الفيزياء - ٢- د. بسام المغربي - منشورات جامعة دمشق - ١٩٨٨

مراجع اللغة الأجنبية :

- 1- Semiconductor Optoelectronics, Jasprit Singh, 1995 .
- 2- Semiconductor Physics and Devices, A. Neamen Donald, 2003.
- 3- Laser Engineering, Keln J. Kuhn, 1998.
- 4- Physics of Optoelectronic Devices-Shun Lien Chuany 1995
- 5- University physics – 11th edition – Young and Freedman- 2002

اللجنة العلمية

أ.د. يسام المغربي

أ.م.د. سهام طرابيشي

أ.م.د. محمد عبد الحفيظ

المدقق اللغوي

أ.د. سراب يازجي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والطبعات