الباب السابع
معجلات الجسيمات

obeikandl.com

obeikandl.com

الباب السابع

معجلات الجسيمات Particle Accelerators

تلعب المعجلات النووية دوراً حيوياً في الفيزياء النووية ، ولقد أدى تطور هذه الأجهزة إلى فهم بعض خصائص النواة وفتح الباب لفرعين جديدين من فروع الفيزياء ، يعرف أولهما بفيزياء الجسيمات الأولية Elementary Particle Physics ويعرف الآخر بفيزياء الطاقات العالية High Energy Physics .

ويستخدم المعجل بصورة عامة لتسريع (تعجيل) الجسيمات المشحونة إلى طاقات عالية حيث توجه هذه الجسيمات في اتجاه النواة وبدراسة تفاعلها معها يمكن استخدامها كمجس للمادة النووية. والهدف من المعجل هو توجيه الأجسام المشحونة في شكل شعاع بإكسابه طاقة حركة باتجاه الهدف من خلال تطبيق مجالات كهربية ومغناطيسية وهناك عدة أنواع من هذه المعجلات

ويتكون المعجل بصفة عامة من مصدر للجسيمات المشحونة مثل الكترونات منبعثة من فتيلة ساخنة أو من ذرات متأينة حيث تنطلق هذه الجسيمات المشحونة تحت تأثير فرق جهد كهربي يتراوح من ١إلى ١٠ مليون فولت ويتم تحديد مسار هذه الجسيمات المعجلة لتكون شعاع ينطلق باتجاه الهدف، ويكون داخل المعجل مفرغ من الهواء (تحت ضغط منخفض) لتفادي تشتت الجسيمات المعجلة عند تصادمها مع ذرات الهواء. وتصنف المعجلات إلى ثلاثة أقسام بناء على الطاقة المستخدمة للتعجيل وهي على النحو التالي:

(١) المعجلات المنخفضة الطاقة: حيث تنتج جسيمات معجلة بطاقة تصل تتراوح بين ١٠ إلى ١٠٠ مليون إلكترون فولت وفي اغلب الأحيان تستخدم هذه المعجلات لدراسة تشتت الجسيمات المعجلة بتفاعلها مع مادة الهدف

obeikandl.com

(٢) المعجلات ذات الطاقة المتوسطة: حيث تنتج شعاع من الجسيمات المعجلة بطاقة تفوق ١٠٠ مليون إلكترون فولت لتصل ١٠٠٠ مليون إلكترون فولت. وعند هذه الطاقة يتم دراسة تصادم النيوكليونات مع أنويه العناصر وقد ينتج عن هذه التصادمات توليد جسيمات أخرى مثل المايونات وفي هذا المعجلات يتم دراسة القوى النووية والتحقق من تركيب النواة.

(٣) المعجلات ذات الطاقة العالية: وهي تنتج شعاع من الجسيمات المعجلة بطاقة تفوق ١٠٠٠ مليون إلكترون فولت. ويكون الغرض من هذه المعجلات هو إنتاج جسيمات جديدة من خلال اصطدام هذه الجسيمات المعجلة بأنوية العناصر ومن ثم دراسة خصائص الجسيمات الناتجة

وقد تم تصميم معجلات نووية تصل طاقة التعجيل فيها إلى عدة ملايين من الإلكترون فولت. ولإعطاء فكرة عن قيمة الطاقة التي يجب أن تصل إليها هذه الجسيمات المعجلة فإننا نبين هنا أن الطول الموجي المرافق لهذه الجسيمات يجب أن يقارن مع نصف قطر النواة (في حدود الفيرمي ويساوي 10^{-15} m) هذا يعني أن تقع طاقة هذه الجسيمات في حدود GeV (جيجا إلكترون فولت). ولقد أدى تطور هذه الأجهزة إلى مقدرتها على إنتاج جسيمات جديدة . كالميزونات (وهي جسيمات تتراوح كتلها بين كتلة الإلكترون وكتلة النيوكليون) و الهايبرونات Hyperons (وهي جسيمات تفوق كتلتها كتلة النيوكليون) وضديدات البروتونات Antiprotons وضديدات النيوترونات Antineutrons والكثير من الجسيمات الأولية .

١-٧ أنواع المعجلات

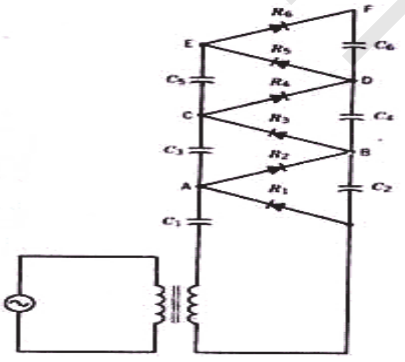
(١) المعجل الكهروستاتيكي Electrostatic accelerator
(٢) المعجل الدائري السيكلوترون Cyclotron accelerator
(٣) معجل السينكروسيكلوترون Synchrotrons

(٤) المعجل الخطي Linear accelerator

(٥) المعجل التصادمي Colliding-Beam accelerator

٧-٢ المعجل الكهروستاتيكي Electrostatic accelerator

ابسط أنواع المعجلات التي تستخدم لتعجيل الجسيمات المشحونة خلال فرق جهد ثابت من خلال العلاقة $E = qV$ حيث V فرق جهد التعجيل ويصل إلى١٠ مليون إلكترون فولت،qشحنة الجسيمات المعجلة، E طاقة الحركة للجسيمات. وهذا يعني أن الطاقة التي يمكن أن يكتسبها الجسيم المعجل تصل إلى ١٠ مليون إلكترون فولت لكل وحدة شحنة وهذه الطاقة كافية لدراسة التركيب النووي للنواة. وأول معجل تم تصميمه على هذا الأساس كان في ١٩٣٢ بواسطة العالمان كوكورفت والتون Cockcroft and Walton حيث وصل فرق جهد التعجيل إلى ٨٠٠ ألف فولت واعتمد مبدأ عمله على شحن مكثفات على التوازي ومن ثم تحويلها إلى توصيل على التوالي من خلال الدائرة الموضحة في شكل(١-٧). وتسمى هذه الطريقة بمضاعفة فرق الجهد voltage multiplication واستخدم في أول تجربة نووية في التفاعل التالي $^{1}_{1}P + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$



شكل (١-٧) معجل كوكورفت والتون

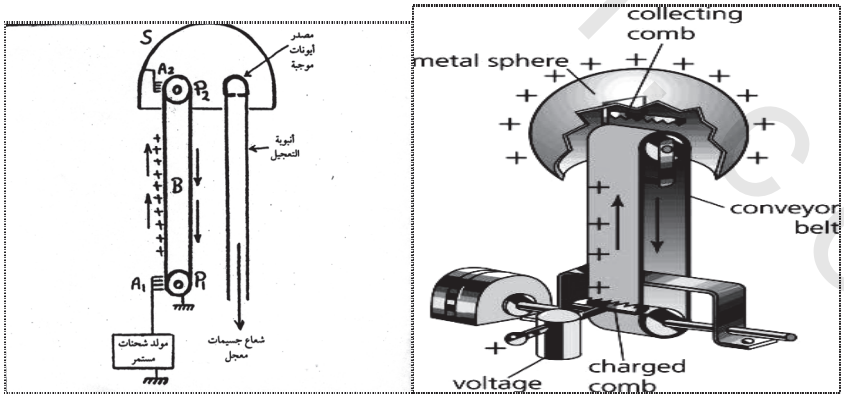
٣-٧ معجل الفاندي جراف (Van de Graff accelerator):

يعتبر معجل فان دي جراف الذي أخترعه عام ١٩٣١م من أنجح المعجلات الخطية. وهو أول جهاز تصل الطاقة فيه إلى عدة ملايين من الفولتات. وتعتمد فكرة عمل مولد فان دي جراف على مبادئ الكهربية الساكنة حيث نعلم أن الشحنة الكهربية تستقر على سطح الموصل في الحالة الكهروستاتيكية وتنقل الشحنة الكهربية من خلال حزام من مادة عازلة وفي اغلب الأحيان من الحرير ويحصل الحزام على الشحنة الكهربية من جهاز corona discharge وهو رأس مدبب من مادة موصلة مطبق عليه فرق جهد عالي يصل إلى ٢٠ ألف إلكترون فولت وعند الرأس المدببة حيث تزداد كثافة الشحنة علية يحدث تفريغ كهربي يعمل على تأين الهواء فتندفع الايونات الموجبة بقوة التنافر في اتجاه الحزام المتحرك حاملاً شحنة موجبة إلى القشرة الكروية التي تشكل مكثف كهربي من مع الأرض. وهذه فكرة عمل هذا المولد فعندما يتم شحن الموصل الداخلي تنتقل الشحنة إلى القشرة الكروية المتصلة مع الموصل الداخلي كما في الشكل وتستقر الشحنة على السطح الخارجي للقشرة وتعتمد قيمة الشحنة على العلاقة $V = Q/C$ حيث C سعة المكثف، Q الشحنة، V فرق الجهد الناتج ومن الناحية النظرية فإنه يمكن أن يزداد الجهد الكهربي إلى ما لانهاية لان سعة المكثف لانهائية وكلما زادت قيمة الشحنة زادت قيمة الجهد ولكن من الناحية العملية فإن قيمة عالة للجهد الكهربي يؤدي إلى تأين الهواء ويصبح موصل مما يؤدي إلى وضع حد لزيادة فرق الجهد الكهربي الممكن الحصول عليه. وللتغلب على هذه المشكلة يتم وضع مولد الفان دي جراف في أسطوانة تحتوي على غاز عازل كهربيا مثل غاز $SF6$ عند ضغط ١٠ إلى ٢٠ ضغط جوي.

ويتكون هذا النوع من المعجلات أساسا من سير مصنوع من بعض المواد العازلة مثل المطاط أو الألياف الصناعية يمر علي بكرتين $P1,P2$

كما مبين بشكل (٢-٧)، والبكرة السفلي متصلة بالأرض وتدار بواسطة موتور. والبكرة الثانية P2 موضوعة داخل كرة معدنية مفرغة لها قطر كبير. عند بدء العمل توزع الشحنات الكهربية عن طريق مولد مستمر علي جانب السير الذي يتحرك إلي أعلي ويكون المولد قادر علي أعطاء فرق جهد حوالي (١٠-١٠٠) كيلو إلكترون فولت. وتوزع الشحنات علي السير عن طريق مجموعة من الرؤوس الحادة تسمي النقط الإبرية أو الفرشاة (A1) وينقله السير إلي أعلي حيث تزال من علي السير عندما يصعد إلي أعلي عن طريق مجموعة أخري من النقاط البرية A2 وتنتقل إلي الكرة الموصلة. وباستمرار دوران السير تزداد الشحنة الموجبة علي الكرة حتى تصل إلي قيم كبيرة جداً وبالتالي يزداد جهد المعجل. ويحد من الشحنة والجهد النهائيين اللذين يمكن للموصل الأجوف أن يرفع إليهما تسرب الشحنة الكهربية إلي الهواء وخلال العوازل المقام عليها. ولكي نعمل علي الإقلال من هذا التسرب توضع المجموعة كلها عادة في إناء محكم يحتوي علي غاز خامل تحت ضغط عالي ليزيد من قوة عزل المجموعة. ويعطي المجال الكهربي (E) عند سطح كرة نصف قطرها (R) مشحونة بشحنة (q) في وسط ثابت بالعلاقة :

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon R^2}$$



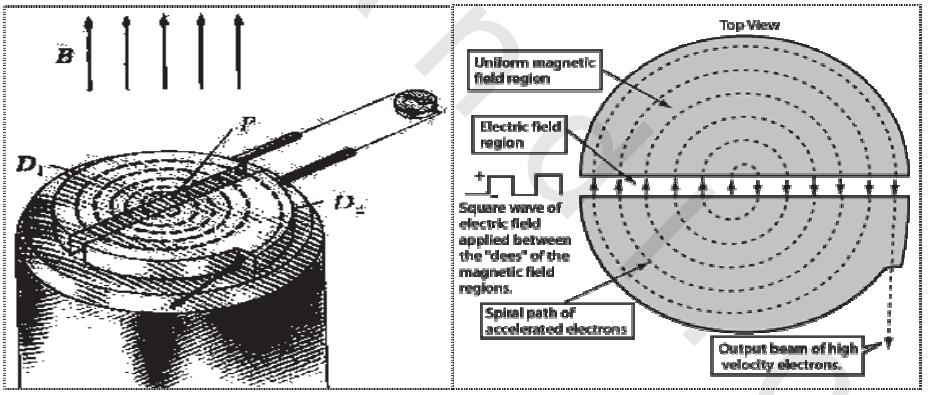
شكل (٢-٧) معجل الفاندي جراف

وتبين هذه المعادلة أنه كلما قل نصف قطر الكرة فإن المجال الناتج حولها يزداد. فإذا كانت هذه الكرة الآن عبارة عن رأس مدبب (يقترب نصف قطره من الصفر) فإن شدة المجال تبلغ قيمة كبيرة تستطيع تأمين الهواء المحيط بها. فإذا كان الرأس مشحونا بشحنة موجبة فإن ذلك ينتج عنه فيض من الأيونات الموجبة تتجه بعيداً عن الرأس، وهذا ما يعرف بتفريغ الهالة. يوضع مصدر الأيونات داخل التجويف الكروي. ويمكن الحصول على الأيونات الموجبة بقذف غاز مناسب بإلكترونات ذات طاقة منخفضة . يحدث تنافر بين الأيونات الموجبة و الموصل المجوف ذي الجهد الموجب العالي ومن ثم تتسارع هذه الأيونات داخل أنبوبة الشعاع في طريقها إلى الهدف وذلك بتوجيهها صوبه باستخدام مغنطيسات توجبه مناسبة. ويمتاز هذا المعجل عن المعجلات الأخرى بمزايا كثيرة منها الحصول على حزمة عالية الشدة من البروتونات أو الديوترونات، ويمكن معرفة طاقة الجسيم بالضبط بمعرفة قيمة الجهد المعجل، والاستقرار عالي، وسهولة التحكم ، وعدم وجود تموج الجهد). ولقد أمكن استخدام معجل الفان دي جراف في تسريع البروتونات إلى طاقة تساوي مليون إلكترون فولت وبلغت شدة التيار (100μA) . ومثال علي التعجيل إذا كانت شحنة البروتون تساوي 1.6×10^{-19} فإننا نجد أن تياراً من البروتونات شدته (1μA) يحتوي علي عدد من البروتونات قدره $\frac{10^{-6}}{1.6\times10^{-19}}$ أي يساوي 6.25×10^{12} بروتوناً في الثانية تسقط علي الهدف. وتصنع مولدات فان دي جراف في الوقت الحاضر لتمدنا بجهد معجل من $6-8MeV$ وتياراً من البروتونات حوالي (٦-٨μA).

٧-٤ المعجل الرنيني السيكلوترون Cyclotron

يعتبر السيكلوترون من أنجح الوسائل في تعجيل البروتونات والديوترونات وجسيمات ألفا، ولقد تم اختراع أول سيكلوترون علي يد

لورانس عام ١٩٣٢م. ومن أهم مزايا هذا المعجل هو قدرته علي جعل الجسم المراد تعجيله يتعرض لفرق جهد صغير عدة مرات مجمعاً بذلك طاقة تعادل فرق جهد كبير جداً. ويستخدم لذلك مجال مغناطيسي ليجعل الجسيمات تدور في دوائر ويعيد هذه الجسيمات مرة ثانية إلي منطقة فرق الجهد لتحصل علي المزيد من الطاقة. ولذلك سمي بالمعجل الدائري. يتركب السيكلوترون كما بالشكل(٣-٧) حيث يوضع مصدر الأيونات الموجبة (S) بين قطبين مجوفين مفرغين علي شكل حرف (D1,D2) ويوصل هذان القطبين إلى مصدر جهد عالي متردد ذي تردد عالي وبالتالي سيتغير جهدي القطبين بالنسبة لبعضهما البعض بطريقة جيبيه. فعندما يكون جهد أحدهما موجبا فإن جهد الآخر يكون سالباً، وهكذا ويوضع القطبان في مجال مغناطيسي متعامد على مستوييهما بحيث يكون منتظما خلال وجهي القطبين ويوضع الجهاز داخل إناء مفرغ.



شكل (٣-٧) تركيب السيكلوترون

بفرض انبعاث الأيونات الموجبة من مصدر كتلته m وشحنته q ونفترض أن في اللحظة التي يكون فيها (D_1) موجباً، تعجل الأيونات الموجبة بالمجال الكهربي في الفجوة بين D1,D2 ويدخل الأيون إلي D2 بسرعة V1 . وحيث أن حركته تكون عمودية علي المجال المغناطيسي فإن الأيون سوف يسير في مسار دائري نصف قطرة يعطي من:

$$Bqv_1 = \frac{mv_1^2}{r_1} \quad r_1 = \frac{mv_1}{Bq} \qquad (٧-١)$$

حيث B شدة المجال المغناطيسي. ويستمر الأيون في حركته الدائرية حتى يخرج من (D2) متحركا نحو الفجوة بين (D1,D2) فتصبح (D٢) موجباً وتصبح (D1) سالباً ومن ثم فإن ذلك يعمل على استمرار تعجيل الايون مرة ثانية بفعل المجال الكهربي أثناء اجتيازه الفجوة متحركا نحو (D١) حيث يدخل إلى داخلها ويدور في مسار دائري نصف قطره أكبر. وتكرر العمليات السابقة عدة مرات حتى يصبح نصف قطره مساوياً لنصف قطر السيكلوترون (R)، وبالتالي تصبح سرعته في هذه اللحظة نهاية عظمي V_m وعند ذلك يتم إخراج الشعاع المعجل من فتحة خاصة حيث يمكن استخدامه.

$$V_m = \frac{BqR}{m} \qquad (٧-٢)$$

$$E_m = \frac{1}{2}mv_m^2 = \frac{1}{2}m(\frac{BqR}{m})^2 \qquad (٧-٣)$$

$$E_m = \frac{1}{2}\{\frac{(BqR)^2}{m}\} \qquad (٧-٤)$$

$$\omega = \frac{V_m}{R} = \frac{Bq}{m} = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \qquad (٧-٥)$$

حيث f هو التردد، T هو الزمن الدوري

$$T = \frac{2\pi m}{qB}, f = \frac{Bq}{2\pi m} \qquad (٧-٦)$$

وبالتالي يكون زمن نصف دورة هو:

$$T = \frac{\pi m}{qB} \qquad (٧-٧)$$

وتعني هذه المعادلة أن الزمن الذي يمضي بين عبورين متتاليين للفتحة بين قطبي D لا يتوقف علي نصف قطر المسار ولا علي سرعة الجسيم المعجل. ولكي نحصل علي جسيمات عالية الطاقة فيلزم ذلك مجال

openkandil.com

مغناطيسيي قوي لتغطية حرفي D1,D2 وهذا يوضح كبر حجم السيكلوترونات المنتجة للطاقة العالية. وعند النظر إلي المعادلة (٦-٧) نجد أن تردد الجهد المتبدل الموضوع علي حرفي D1,D2 يتوقف علي كتلة الجسيم المعجل. وبالتالي يكون التردد الثابت فعالاً فقط في حالة ثبات كتلة الجسيم المعجل أثناء اكتسابه للسرعة. ولذلك السبب لا يستخدم السيكلوترون في تعجيل الإلكترونات إلي الطاقات العالية. والجسيمات الثقيلة مثل البروتونات أو الديوترونات وجسيمات ألفا تظهر لها بعض المشاكل عندما تزيد الطاقة وتصل إلي ١٠٠ م.أ.ف. وهذا يؤدي إلي وجود حد أعلي للطاقة يمكن الحصول علية من السيكلوترون لأن الجسيم يحتاج إلي تردد مختلف عند حافة D عن ترددة عندما يكون في المركز. ولقد تم النجاح في تعجيل البروتونات والديوترونات بطاقة تصل إلي ١٦ م.أ.ف ، والحصول علي جسيمات ألفا بطاقة تساوي ضعف تلك الطاقة.

٧-٥ السينكروسيكلوترون Synchrocyclotron

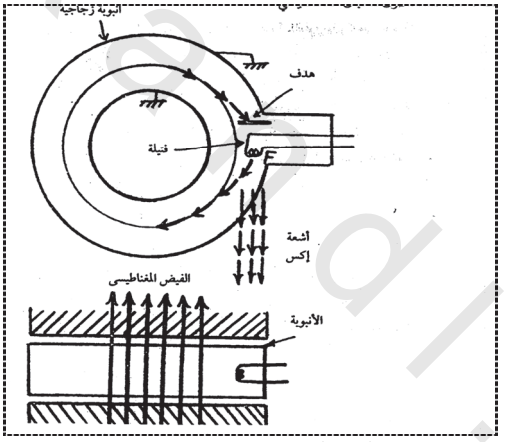
من المعروف أنه لا يمكن منع زيادة الكتلة طبقاً للنظرية النسبية، ولذلك تتجه المحاولات للتعويض عنها. ومن معادلة التردد $f = \frac{Bq}{2\pi m}$ يمكن أن يزيد المجال المغناطيسي بنفس معدل تزايد الكتلة وبالتالي يتم تعجيل الجسيمات بتردد ثابت. وكذلك يمكن تغيير تردد السيكلوترون مع إبقاء المجال المغناطيسي ثابتاً . وهذا ما يعرف بالسيكلوترون ذي التعديل الترددي(بالسينكروسايكلوترون) .حيث يتغير التردد بتغير الكتلة. لاحظ أن التغير المستمر في التردد يؤدي إلى استمرار مجموعة من الجسيمات في التسارع حتى تصل إلى الطاقة القصوى . ومن ثم فإنه أثناء عملية التعجيل هذه لا يمكن لجسيمات جديدة – تبدأ من مصدر الأيونات وعندما تصل مجموعة الجسيمات السابقة إلى الطاقة القصوى ، يتم تعديل تردد السيكلوترون إلى قيمته العظمى الابتدائية لتبدأ مجموعة أخرى من

obeikandl.com

الجسيمات في التسارع بدءاً من مصدر الأيونات. ولقد بني أول معجل من هذا النوع في جامعة كاليفورنيا وتعمل هذه الأجهزة في حدود منطقة الطاقة النسبية للديوترونات وجسيمات ألفا باستخدام مجال مغناطيسي ثابت وجهد متغير التردد، ومغناطيس مثل نوع السيكلوترون. ولقد تم الحصول علي ديوترونات وصلت طاقتها إلي ٢٠٠ م.ا.ف وجسيمات ألفا بطاقة ٤٠٠ م.ا.ف.

٧-٦ البيتاترون Betatron

أول من استخدم ظاهرة الحث الكهرومغناطيسية للحصول علي إلكترونات عالية الطاقة هو كيرست D. Kerst وذلك في عام ١٩٤٠ م وسمي الجهاز الذي استخدم في التعجيل بالبيتاترون كما في شكل (٣-٧).



شكل (٤-٧) تركيب البيتاترون

يتركب البيتاترون من أنبوبة زجاجية علي شكل دائرة مفرغة من الهواء وتوضع بين قطبي مغناطيس كهربي كبير. وتدخل الإلكترونات الصادرة من فتيل متوهج إي هذه الحلقة، ويتغير المجال المغناطيسي بصورة مترددة بين السالب والموجب. وعندما تزيد شدة المجال المغناطيسي تحدث قوة دافعة كهربية في نفس مسار الإلكترون بسبب تغير الفيض المغناطيسي وتزيد هذه القوة الدافعة طاقة الإلكترونات.

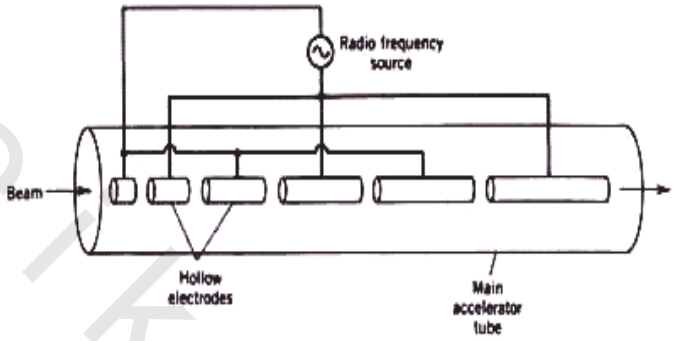
وبسبب تأثير المجال المغناطيسي أيضاً توجد قوة محورية متعامدة علي اتجاه سرعة الإلكترون تجعل الإلكترون يتحرك في مسار دائري. ويكون الفيض المغناطيسي أثناء حركة الإلكترون الدائرية له قيمة معينة بحيث يدور الإلكترون في مدار ثابت نصف قطره R. وتعمل الإلكترونات الكثير من الدورات في هذا المسار الدائري بينما يزيد المجال المغناطيس من إلي قيمة عظمي خلال ربع الدورة الأولي للمجال. وأثناء حركة الإلكترونات الدائرية تكتسب المزيد من الطاقة، وعند الوصول للطاقة العظمي يخرج الشعاع الإلكتروني من الدائرة الزجاجية إلي الخارج ليصطدم بالهدف. وقد تمكن العلماء الحصول علي إلكترونات معجلة من هذا الجهاز تصل طاقتها إلي ١٠٠ م.أ.ف، ويمكن استخدام هذه الإلكترونات كقذائف نووية. ويمكن الحصول علي أن الفيض المغناطيسي أثناء المدار الذي نصف قطره R في حالة أن المجال المغناطيسي متغيراً تساوي ضعف قيمتها إذا ما فرضنا أن المجال ثابت ومنتظم وقيمته تساوي B أي أن: $\Phi = 2\pi R^2 B$. وكذلك يمكن الحصول علي قيمة طاقة الإلكترون التي يحصل عليها من البيتاترون وهي : $E = ec\Phi_0 = 2\pi R$.

ولقد لوحظ نتيجة من تشغيل البيتاترون والحصول علي الإلكترونات المعجلة منه أن الإلكترونات عالية الطاقة المعجلة تشع موجات كهرومغناطيسية يقع بعضها في منطقة الضوء المرئي وهذه النتيجة تؤكد نظرية ماكسويل للإشعاع الكهرومغناطيسي والتي تنص علي أن الإلكترون المعجل يجب أن يشع إشعاعاً كهرومغناطيسيا.

٧-١٧المعجل الخطي Linear accelerator

يسمي هذا المعجل باسم لينك Linac وفيه يتم تعجيل الجسيمات المشحونة على مراحل بواسطة فرق جهد متردد كما في السيكلوترون ولكن الفرق هنا أن مسار الجسيمات المشحونة يكون في خط مستقيم حيث

لا نحتاج الى المغناطيس الباهظ التكلفة. يتكون المعجل الخطي كما في الشكل التوضيحي التالي من عدة سلسلة من الالكترود ذات الشكل الاسطواني والتي ترتبط مع بعضها البعض من خلال مصدر فرق جهد متردد.



شكل (٥-٧) المعجل الخطي

تكتسب الجسيمات المعجلة طاقتها من الفجوة بين الاسطوانات نتيجة لفرق الجهد المطبق عليها وفي داخل الاسطوانة حيث لا يوجد مجال تندفع الجسيمات تحت تأثير قوة اندفاعها لفترة من الزمن تساوي نصف الزمن الدوري لفرق الجهد المتردد لحين تغير قطبية فرق الجهد المطبق على الاسطوانة التي تليها. وتعتمد فكرة عمل المعجل الخطي على التزامن بين الطاقة التي يكتسبها الجسيم المشحون بين الاسطوانات مع المجال الكهربي المتردد المطبق على الاسطوانات ولضبط هذا التزامن فإن طول الاسطوانة يصمم بناء على سرعة الجسيمات المعجلة بعد كل مرحلة، فإذا كان نصف الزمن الدوري للجهد المطبق هو $t/2$ فإن طول الاسطوانة رقم n يعطى من المعادلة:

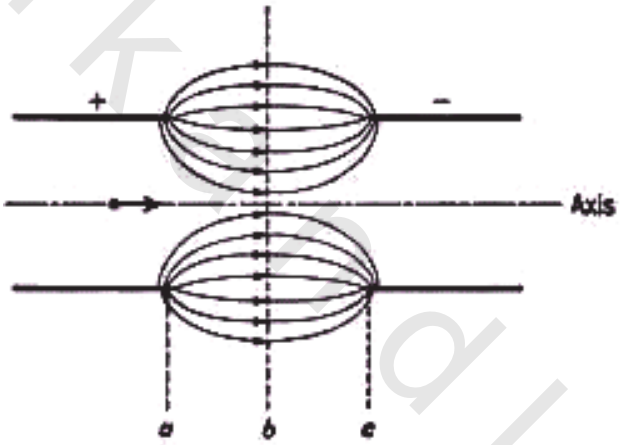
$$L_n = \frac{v_n t}{2} \qquad (٧-٨)$$

وطاقة الحركة المكتسبة بعد مرورها من الاسطوانة رقم n يعطى بالعلاقة

$$\frac{1}{2} m v_n^2 = nev_0 \qquad (٧-٩)$$

ومن المعادلتين السابقتين يكون طول الاسطوانة n

وعند خروج الجسيمات المعجلة من الاسطوانة تتعرض إلى مجال كهربي كما في شكل (٦-٧). ومثال على المعجل الخطي هو المعجل الموجود في جامعة ستانفورد في الولايات المتحدة والذي أنتج في ١٩٦٧ ضمن برنامج أبحاث فيزياء الطاقة العالية وهذا المعجل يعطي الالكترونات المعجلة طاقة تصل إلى 1.2 جيجا إلكترون فولت $1.2x10^9$ eV والتجارب التي عملت بواسطة هذا المعجل على تشتت الالكترونات المعجلة لتحديد نصف قطر النواة.



شكل (٦-٧) المعجل الخطي