محاضرات في

الفيزياء النووية

اعداد

خالد صلاح الدين

أستاذ الفيزياء الإشعاعية المساعد

2023

الكلية: التربية (تعليم عام)

المستوي: الثالث

القسم:الفيزياء

تاريخ النشر:2023

عدد الصفحات:61

اعداد:د. خالد صلاح الدين

الفصل الأول

المفاهيم الأساسية في الفيزياء النووية

الفيزياء النووية : هي ذلك الفرع من الفيزياء الذي يهتم بدراسة مجال النواة تفاعلاتها والاشياء المرتبطة بالنواة من تفاعلات وتفككات وجسيمات وغير ذلك ان النواة هي ذلك الشئ الذي يوجد داخل الذرة ويحتوي بداخله نيترون متعادل وبروتون موجب الشحنة والكترون سالب يدور في الذرة حول هذه النواة هذه النواة عند تفككها يمكن ان تبعث اشعاعات مثل الفا بيتا جاما حسب الطاقة.

ان دراسة الفيزياء النووية تتركز حول مشكلتين رئيسيتين:-

الاولى : هي محاولة فهم خواص القوة التي تربط اجزاء النواة ببعضها.

الثانية : هي محاولة فهم تصرف المجموعات متعددة الاجسام كالنواة.

ان هاتين المشكلتين مرتبطتلان ببعضهما البعض . وذلك لان دراسة المجموعات متعددة الاجسام لها علاقة بمعرفة طبيعة القوة التي تربط اجزاء هذه المجموعات ببعضها ولكن بعض خصائص هذه المجموعات يمكن اشتقاقها بمجرد افتراض ان مكونات المجموعات تتجاذب مع بعضها البعض.

بعض الاكتشافات التي حدثت خلال التطور التاريخي للفيزياء النووية

1. اكتشاف النشاط الاشعاعي بيكرل **Bq** عام 1896
2. نموذج رذردفورد الذري 1911
3. اكتشاف النظائر طومسون 1912
4. تحولات النووية الصناعية رذرد فورد 1919
5. تطبيق الكم النشاط الاشعاعي 1928
6. اكتشاف النيترون من قبل العالم جادويك عام 1932
7. فرضية n-p (نيترون – بروتون) هيزنبرك عام 1932
8. اكتشاف البوزترون من قبل العالم اندرسون 1932
9. دور الميزون من قبل العالم يوكاوا عام 1935
11. اكتشاف ميزون من قبل اندرسون عام 1936
11. اكتشاف ميزون باي π من قبل العالم باول عام 1946
12. اكتشاف عدم حفظ التناظر في انحلال بيتا.

1.الصفات النووية الاساسية:

ان للنوى خواص ثابتة لا تتغير بتغير الزمن مثل الكتلة والحجم والشحنة والزخم الزاوي الذي يسمى احيانا بالبرم النووي . كما ان هناك خواص اخرى للنوى تتتغير مع الزمن مثل الانحلال الاشعاعي والتحويل الصناعي للعناصر(التفاعلات النووية) .

لذا تقسم الصفات النووية من حيث إعتمادها على الزمن الى قسمين:

1-الصفات النووية غير المعتمدة على الزمن :وهي الخواص الثابتة التي لا تتغير بتغير الزمن مثل الكتلة والحجم والشحنة والزخم الزاوي الذاتي والذي يسمى بالبرم النووي (Nuclear spin) .

2-الصفات النووية المعتمدة على الزمن :وهي خواص غير ثابتة تتغير بتغير الزمن مثل الانحلال الاشعاعي و التفاعلات النووية وتوجد ايضا للنوى حالات متهيجة (exited states) تعتبر طاقاتها من صفات النوع الاول ولكن عملية تحلل هذه الحالات المتهيجة تعتبر من صفات النوع الثاني.

الكتلة النووية *(Nuclear Mass)*:

إن أفترض العالم الكيميائي براوت(Prout) عام 1815 ان كتلة اي ذرة M تعطى بالعلاقة:

$$M = integer * M_H$$

حيث (MH) كتلة ذرة الهيدروجين . وقد استخدمت هذه العلاقة لغرض مقارنة الكتل الذرية , أما العدد الكامل (integer) فهو ما يطلق عليه الان بالعدد الكتلي(mass number) ويرمز له بالرمز(A) وعليه يمكن كتابة المعادلة اعلاه بالصيغة التالية:

$$M = A\, M_H$$

لذا اطلق على فرضية براوت بفرضية الاعداد الصحيحة وإن هذه العلاقة تعني إن نواة الذرة تحتوي على جسيمات مشحونة بشحنة موجبة فقط ولما كانت ذرة الهيدروجين هي أبسط ذرة في الطبيعة فقد أفترض إن كتلة أي ذرة متكونة من مجموعة من ذرات الهيدروجين. مثلا ذرة الاوكسجين مكونة من 16 ذرة هيدروجين والليثيوم 7 -مكونة من7 ذرات هيدروجين.

ألا إن **باركلا** لاحظ بواسطة استطارة الاشعة السينية (X- ray) ان العدد الذري(Z) والذي يمثل عدد الالكترونات في الذرة وكذلك عدد الشحنات النووية الموجبة(البروتونات) لا يساوي العدد الكتلي وهذه النتيجة قد أدت إلى ظهور **الفرضية الأولى** حول التركيب النووي والتي تنص على إن **((النوى مكونة من *(A)* من الالكترونات و *(A- Z)*من البروتونات المقيدة داخل النواة))** ولما كانت كتلة الالكترونات صغيرة نسبيا فهي لاتؤثر على المعادلة السابقة وتبقى نافذة المفعول.وتسمى هذه الفرضية بفرضية براوت او فرضية

الالكترون – بروتون.ان انبعاث اشعة الفا واشعة بيتا(ذات الطبيعة الجسيمية) من بعض الذرات المشعة قد ادى الى الاعتقاد بان الذرات مكونة من اجزاء اساسية في حين كان يعتقد بان الذرات هي اصغر اجزاء المادة والتي تشترك في التفاعلات الكيمياوية.

لقد نجحت هذه الفرضية في تفسير انبعاث جسيمات بيتا السالبة β^- باعتبار كل منها الكترون نووي فمتى ماجهز هذا الالكترون بطاقة كافية تمكنه من الافلات من النواة فانه سيتحرر منها، كما نجحت هذه الفرضية في تفسير انبعاث جسيمات الفا (α) باعتبار ان كلا منها مكون من اربعة بروتونات والكترونين نووبين الا انها فشلت في تفسير النتائج الاتية:

1-طاقة وزخم جسيمات بيتا السالبة: لو كانت جسيمات β^- المنبعثة من بعض النوى موجوده اصلا داخل تلك النوى بشكل الكترونات نووية كما تنص الفرضية لوجب ان تكون طاقتها بحدود 60 MeV وفق ما جاء به هيزنبرج بينما عمليا نجد ان طاقتها لا تزيد عن 4 MeV مما يدل على ان انبعاثها يكون انيا لحظة خلقها او تكوينها حيث انها ناتجة من تحول: $n \rightarrow p$ وفق التفاعل

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$$

من ناحية الزخم الخطي لو كانت β^- موجودة اصلا داخل النواة كالكترون نووي لوجب ان يكون ارتداد النواة بعكس اتجاه انبعاث β^- بينما عمليا لا يحدث هذا.

2-حفظ الزخم الزاوي: لقد اثبتت التجارب بان النوى التي لها اعداد كتلية زوجية تمتلك زخما زاويا مساويا لعدد صحيح اي ان

$$I = 0,1,2,3,\ldots \text{ for } A = \text{even}$$

اما الفردية العدد الكتلي فانها تمتلك زخما يساوي نصف عدد فردي اي ان

$$I = \tfrac{1}{2},3/2,5/2,\ldots . \; For\ A = odd$$

في حين وفقا لفرضية براوت يجب ان يكون للنوى الزوجية(الفردية-الفردية)مثل $_5B^{10}$ زخما زاويا مساويا لعدد فردي مضروبا بنصف وللنوى االفردية لكنها زوجية العدد الذري z وفردية n مثل $_4Be^9$ زخم زاوي يساوي عدد صحيح بينما الواقع والتجربة اثبتت عكس ذلك.فوفقا لفرضية براوت فان نواة النتروجين - 14مكونة من 14 بروتونا و 7 الكترونات نووية اي ان عدد الجسيمات التي بداخلها هو 21 فهذا يعني ان الزخم البرمي لها يساوي عدد صحيح مضروبا بنصف$\hbar$.

ولما جاء هايزنبرج بمبدأ عدم التحديد (اللادقة) في التعيين فقد أثبت انه لا يمكن للالكترون أن يتواجد في النواة حيث إن :

$$\Delta P\ \Delta X \geq \hbar$$

حيث (ΔX) هي ابعاد النواة وتساوي 2×10^{-12} cm لذلك نجد :

$\Delta P = \hbar/\Delta x = 6.6\times10^{-27}$ erg.sec/ 2×10^{-12}cm= 3.3×10^{-15} erg.sec/cm

$E^2= P^2c^2+ m_0{}^2c^4 = 10^{-8}+10^{-12}$

$E = 10^{-4}$erg = $10^{-4}/1.6\times10^{-12} = 6\times 10^7$ eV = ***60 MeV***

أي إن طاقة الربط للالكترون هي 60 MeV وهي طاقة كبيرة لا يمكن للإلكترون أن يستقر في النواة اذا كان يمتلكها لان أقل طاقة لتواجد الالكترون داخل النواة هي(8MeV)

وبعد اكتشاف النيوترون من قبل شادويك عام 1932 قد ادى بهايزنبرج في نفس العام لافتراض **فرضية البروتون– نيوترون** التي تنص على ان**((البروتونات والنيوترونات هي المكونات الاساسية لجميع النوى))**.اي إن النواة تتكون من البروتونات (Z) ومن النيوترونات (N) وإن كتلة النواة تعطى بصورة تقريبية حسب الصيغة التالية :

$$\boldsymbol{M \approx Z\, M_P + N\, M_n}$$

حيث (MP) كتلة البروتون، (Mn) كتلة النيوترون . ونلاحظ إن هنالك فرقا بين طرفي هذه المعادلة وهذا الفرق يمثل طاقة الترابط النووية.

شحنة النواة (*Nuclear charge*):

تعزى شحنة النواة الى شحنة بروتوناتها (Z) حيث ان النيوترونات عديمة الشحنة لذا فهي تساوي العدد الذري مضروبا بشحنة البروتون وهي($q_p = -e = +1.6\times10^{-19}$C)

اي ان:

$$\boldsymbol{Q_{Nu} = Z\ _{qp} = +1.6\times10^{-19}\ Z}$$

اي ان الشحنة النووية هي مجموع شحنات البروتونات في النواة.

الحجم النووي *(Nuclear size)* :

من اولى النظريات التي وضعت حول تركيب الذرة هي نظرية طومسون(Thomson theory). لقد كان من المعتقد ان الالكترونات تسبح في وسط كثيف من الشحنات الموجبة داخل الحجوم الذريةcm 10^{-8}. واستنادا الى هذا النموذج فان اختراق الجسيمات السريعة للمواد انما يتم عن طريق الانتشار فقط الا ان تجارب استطارة جسيمات الفا بواسطة صفائح الذهب الرقيقة التي قام بها(جايجر ومارسيدن1909). قد

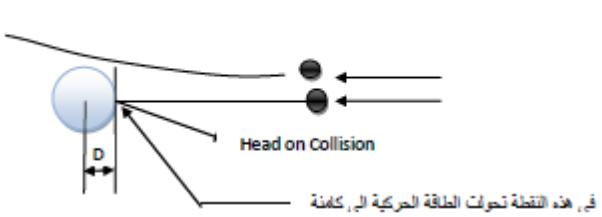
اظهرت ان الجسيمات المرتدة الى الوراء يكون اكبر مما يمكن ان تسمح به نظرية طومسون حيث كان يعتقد بناءا على هذا المفهوم ان جسيمات الفا يجب ان تنفذ بشكل مباشر مع انتشار بسيط في شدة الحزمة ، الا إنهما لاحظا ان حزمة اشعة الفا قد انتشرت انتشارا واسعا بعد خروجها من الصفيحة وان قسما من هذه الاشعة قد ارتد خلفا بزاوية $180°$ مع الحزمة الساقطة ولما **كان مفهوم طومسون لا يستطيع تفسير هذه الظاهرة فقد افترض رذرفورد ان هذه الظاهرة ناتجة عن وجود نواة ذرية صغيرة ابعادها اقل من10^{-8} cm تؤثر بقوة كهربائية بسيطة (قوة كولوم) على جسيم الفا** وقد تمكن بذلك ان يستخرج قانون الاستطارة .او(بمعنى اخر ان **رذرفورد** افترض ان الذرة تتكون من جسم صلب صغير مشحون بالشحنة الموجبة ويحتوي على اغلب كتلة الذرة وتشكل ابعاده جزءا صغيرا يعادل10^{-12} cm من ابعاد الذرة الكلية البالغة10^{-8} cm وقد سمي هذا الجزء بالنواة وتحاط النواة بعدد من الالكترونات يساوي عدد الشحنات الموجبة فيها وتكون الالكترونات على مسافة من النواة.

ان قياسات لاحقة اظهرت ان قانون رذرفورد لا ينطبق(يفشل) في الحالات الأتية: -

1-أذا كانت جسيمات الفا ذات طاقة عالية جدا

2-عندما يكون العدد الذري للمادة المستخدمة كهدف صغير جدا.

كان اول محاولة لتحديد قطر النواة قد تم من دراسة المسافة التي يبطل عندها قانون رذرفورد في الاستطارة حيث عند اقتراب جسيمة الفا من النواة بمسافة (اقل من نصف القطر) تبدأ عندها القوة النووية بالتأثير والتي هي اقوى من قوة كولوم ولم يعد تأثير الاستطارة مرتبطا فقط مع قوة كولوم وان جسيم الفا البعيد عن النواة يمتلك طاقة حركية مقدارها ($T\alpha$) فقط ولكن عند اقترابه من نواة العنصر في التصادم الرأسي لاقرب مسافة ممكنة D قبل الشذوذ عن قانون رذرفورد للاستطارة فان جسيم الفا ستتباطا نتيجة للتنافر الكولومي بينهما الى ان تصل الى نقطة تكون فيها اقرب مايمكن من النواة وعندما تتوقف عن الحركة تتحول الطاقة الحركية لجسيم الفا الى طاقة كامنة فقط وباهمال طاقة ارتداد النواة وبأستخدام قانون حفظ الطاقة يمكن الحصول عمليا على نصف قطر النواة من خلال تجربة الاستطارة لرذرفورد.



في التصادم الرأسي(تصادم جسيم الفا مع جدار النواة) نلاحظ ان الجسيمة الاولى تنحرف مبتعدة عن النواة اما اذا زادت طاقة الفا فأنها سوف تقترب من جدار النواة والطاقة الكامنة (P.E) تساوي :

$$P.E = \frac{q_1 q_2}{r}$$

وعند التعويض عن (r = D) و(q_1=2e) هي شحنة جسيم الفا و(q_2=Ze) شحنة النواة المستطيرة نحصل على :

$$T_\alpha = P.E = \frac{(2e)(Ze)}{D}$$

$$T_\alpha = \frac{2eZe}{D} \quad \text{(in e.s.u)}$$

حيث ان ($e=4.80\times10^{-10}$esu) و(D) اصغر مسافة يصلها جسيم الفا , مما تقدم نستطيع إيجاد معادلة لقياس نصف قطر النواة وهي:

$$D = \frac{2Ze^2}{T_\alpha}$$

مثال: جسيم الفا طاقته 25MeV يسقط على نواة اليورانيوم جد اقرب مسافة يصلها الجسيم قبل ان تبدا تاثيرات القوة النووية ؟

الحل:

$1MeV = 1.6\times10^{-6}$ erg , $Z = 92$

$$D = \frac{2Ze^2}{T_\alpha} = \frac{2\times92(4.8\times10^{-10})^2}{25\times1.6\times10^{-6}} \approx 10^{-12}cm = 10F$$

$$1F = 10^{-13}cm$$

الا ان التجارب العملية اللاحقة وجدت ان نصف قطر النواة لاي عنصر يرتبط بالعلاقة التقريبية التالية مع العدد الكتلي(A) وهي

$$R = R_O A^{1/3} \quad *$$

حيث(R_O) هو ثابت نصف القطر ويأخذ القيم (R_O=1.4F)لاستطارة الجسيمات النووية التي تتنافر مع النواة و(R_O=1.2F) لاستطارة الالكترونات التي تنجذب نحو النوى.**ان الاختلاف بين هاتين القيمتين يمكن تفسيره كما يلي:**

في حالة استطارة الالكترونات نعني قياس موقع الشحنات الموجبة للبروتونات في النواة وان تأثير الاستطارة ناتجا عن تنافر قوة كولوم فقط ، اما عندما تكون الجسيمات المستخدمة للاستطارة جسيمات مادية فأننا نقوم بقياس حجم المنطقة التي تؤثر فيها القوة النووية والتي تمتد لمسافة اكبر من الوجود المادي للنواة وهذا يعطي النواة حجما اكبر من حجمها الطبيعي.

واذا فرضنا ان حجم البروتون يساوي حجم النيوترون وان النواة عبارة عن كرة صلدة تحتوي على (A) من الجسيمات الصلبة فأن حجم النواة ($V_{nucleus}$) يتناسب طرديا مع العدد الكتلي (A) أي إن:

$V_{nucleus} \propto A$

$4/3\ \pi R^3 \propto A \Rightarrow R \propto A^{1/3}$

$R = R_o\ A^{1/3}$

where $R_o \simeq 1.25\ F = 1.25\times10^{-13}$cm

$V_{nucleus= ¾}\ \pi R^3 = ¾\ \pi\ R_o^{\ 3}\ A = ¾\ (1.25\times10^{-13})^3 A = 7.25\times10^{-39}\ A\ cm^3$

وعليه لما كان قطر الذرة 2×10^{-8}cm فأنه اكبر من نصف قطر النواة بمقدار (10^5) مرة ، أي إن النواة تشغل حجما مقداره 10^{-15} من حجم الذرة.

وتدل المعادلة * على ان نوى العناصر المختلفة ليست متساوية الحجوم وانما يزداد حجم النواة بزيادة عددها الكتلي A وهذا يعني ان المادة النووية غير قابلة للانضغاط وهذه خاصية نابعة عن طبيعة القوة النووية فالقوة النووية قوى جذب اذا كانت المسافة بين اي نيوكليونين اكبر من نصف فيرمي والا فانها تتحول الى قوة تنافرية تعمل على تباعدالنيوكليونين.

الكثافة النووية *(Nuclear Density)*:

من المعلوم ان كتلة النيوكليون (بروتون او نيوترون) اكبر من كتلة الالكترون($m_n=1837m_e$) لذا فأن الكثافة النووية($\rho_{nucleus}$) ستكون عالية

.

$1u = 1\ a.m.u = 1.66\times10^{-27}\ kg = 931\ MeV$

$M_{nucleus} = A\times1.66\times10^{-27}\ kg$

$$\rho_{nucleus} = \frac{Mnucleus}{Vnucleus} = \frac{A*1.66*10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} = \frac{1.66*10^{-27}}{(3.14)(1.25*10^{-15})^3} \times \frac{3}{4} \cong 1.49*10^{18}\ kg/m^3$$

$$\text{or } \rho_{nucleus} \cong 2.4*10^{14}\ gm/cm^3$$

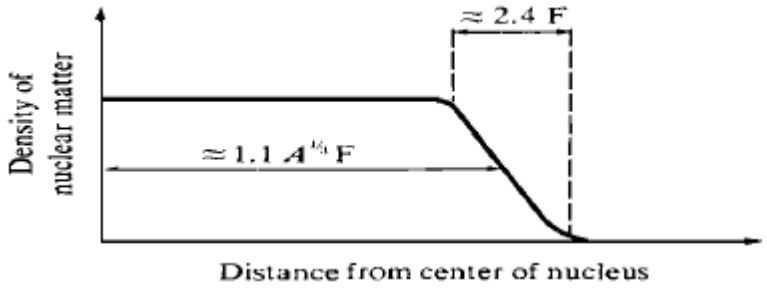
وهذه الكثافة مساوية لكثافة الأرض اذا ضغطت الى قطر 200 m.

ان تجارب اكثر دقة لاستطارة الالكترونات قام بها (هوفستر وجماعته Hofstatter et al) عام 1965 اظهرت ان النواة ليست كروية الشكل وليس لتوزيع الكثافة النووية قطع حاد على بعد يساوي نصف قطر النواة اي ليس هناك قطع حاد على سطحها والمقصود بالكثافة النووية ρ هو عدد النيوكليونات لكل وحدة حجم من النواة كدالة للبعد عن مركز النواة فلو كانت النواة كروية لكانت الكثافة النووية ثابتة المقدار داخل النواة وتساوي صفر خارجها اي لكان لتوزيع الكثافة النووية قطع حاد على سطحها اي:

$$\rho = \rho_0 \quad \text{For} \quad r \leq\ ,\ \rho = 0\ for\ r > R$$

ان علاقة اعم للتعبير عن كثافة المادة النووية(r) ρ بدلالة نصف القطر r يمكن ان تعطى بالعلاقة التي اقترحها Saxon-Wood :

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1+e^{(r-R)/a}} \quad \text{..... (Saxon-Wood formula)}$$



الشكل اعلاه يبين ان شكل النواة ليس كرويا انما دائم التغيير وغير منتظم.

من الواضح ان نصف قطر النواة R ليس ثابتا لكل النوى انما يزداد بزيادة العدد الكتلي للنواة تبعا للعلاقة $R=1.07A^{1/3}$.

اما a والذي يسمى بالسمك النصفي فهو عامل له علاقة بما يسمى بالمنطقة السطحية surface region وتعرف بانها المنطقة المحصورة بيم سطحين كرويين الكثافة النووية على الاول تساويρ_0 0.9 ونصف قطر$r_{0.9}$ والكثافة النووية على الثاني تساوي ρ_0 0.1 ونصف قطر$r_{0.1}$. أي ان سمك المنطقة السطحي هو

$$r_{0.1} - r_{0.9} = a = 2.4f$$

الزخم الزاوي للنواة (Angular momentum of the nucleus) :

ان الزخم الزاوي النووي يعتبر من الكميات المهمة في التركيب النووي والذي يؤثر على جميع الخواص النووية الحركية (Dynamic properties). ولقد وجد تجريبيا ان البروتونات والنيوترونات تمتلك زخما زاويا ذاتيا مقداره ($1/2\ \hbar$) كما هي الحال بالنسبة للالكترونات كما انها تمتلك زخما زاويا مداريا (Orbital angular momentum) نتيجة حركتها داخل النواة ولما كان الزخم الزاوي هو مقدار اتجاهي لذا فأن الزخم الزاوي الكلي للنواة (Total angular momentum) هو عبارة عن المجموع ألاتجاهي للزخوم الزاوية الذاتية والمدارية للنيوكليونات بطريقة مناسبة. وان الزخم الزاوي للنواة يعين بدلالة العدد الكمي J . وقد وجد عمليا ايضا ان النوى المعقدة تمتلك زخما زاويا يساوي($I\hbar$) حيث(I) عدد صحيح يشمل الصفر للنوى التي فيها(A) زوجية اي ان هناك J+ 1 احتمالا لاتجاه الزخم الزاوي اي ان:

$$I = 0\hbar\ ,\ 1\hbar\ ,\ 2\hbar\ ,\ 3\hbar\ ,\ \text{.....}$$

ان قوانين مكانيك الكم تنص على ان ((الزخم الزاوي الكلي لمجموعة متعددة الاجسام مكونة من(P) من الجسيمات حول مركز الكتلة يساوي عدد صحيح مضروبا في ($\hbar$) اذا كان عددا زوجيا ويساوي (عدد صحيح+½)مضروبا في($\hbar$) اذا كان(P) عددا فرديا كما يلي :

$$I = ½\ \hbar,\ 3/2\ \hbar,\ 5/2\ \hbar,\ldots\ldots$$

وهذه القاعدة تنطبق ايضا على الالكترونات فلو اخذنا مثلا نواة H^2 الديتريوم كما كان يعتقد سابقا انها مكونة من بروتونين والكترون واحد فأن ($I = ½$ or 3/2)ولكن اذا كانت مكونة من بروتون ونيوترون فأن ($I = 0$ or 1) وهذا ماثبتته التجارب العملية وبهذا الأسلوب نثبت بأن النوى لا يمكن ان تكون مبنية من البروتونات والالكترونات ولكنها تتكون من البروتونات والنيوترونات.

لقد لوحظ ان النوى الزوجية-الزوجية يكون لها$J=0$ حيث تتجه النيوكليونات لازدواج زخومها الزاوية باتجاهات متعاكسة. اما النوى الفردية -الزوجية او الزوجية– الفردية فيكون لها مضاعفات النصف لقيمةJ لذلك فمن المعقول في اغلب الحالات ان نعتبر ان الزخم الزاوي في هذه النوى يعطى بدلالة النيوكليون الاخير غير المزدوج Unpaired nucleon .

الخواص الحركية للنوى (Dynamic properties of nuclei):

كما في حالة الفيزياء الذرية فأن النوى يمكن تهيجها إلى حالات محددة من الطاقة كما ان الانتقال بين حالات الطاقة هذه يتم عن طريق انبعاث الاشعة النووية مثل الاشعة الكهرومغناطيسية (اشعة جاما) كما هو في عملية انبعاث الضوء من الذرات الا ان الاختلاف بين الحالتين هو ان المسافات التي تفصل بين طاقات الحالات الذرية هو بحدود 1eV بينما تكون المسافات بين الحالات النووية هي بحدود 10^4- 10^6 eV . ان دراسة حالات الطاقة الذرية ساعد على تحديد المستويات الذرية للطاقة والذي ادى الى ظهور النماذج الذرية اما دراسة طيف اشعة جاما في النواة ادى الى تحديد مستويات الطاقة النووية والتي ادت بدورها الى ظهور النماذج النووية (Nuclear models).ان النوى تتحول من نوع الى أخر اما تلقائيا او عن طريق القصف النووي (nuclear bombardment) وفي جميع الحالات يبقى العدد الكلي للنيوكليونات وقوانين حفظ الطاقة والكتلة والزخم الخطي والزاوي ثابتا.

الاستطارة الخلفية Back scattering :

عند سقوط حزمة من الالكترونات على صفيحة رقيقة فان قسما منها يرتد الى نفس الجهة التي اتت منها فيقال عنها قد استطارت خلفيا وتسمى الظاهرة بالاستطارة الخلفية. فعند مرور الالكترونات بالقرب من النواة

ستتاثر بقوة جذب كولومية تتتجعلها تغير اتجاهها اما سرعتها فتجعلها تستمر بحركتها عائده الى جهة قدومها علما ان الالكترونات ليست جسيمات نووية ولا يمكنها اطلاقا اختراق النواة.

مصطلحات نووية :

1- النويدة (Nuclide) : عنصر نووي معين يحتوي على (Z) من البروتونات و(N) من النيوترونات والرمز الاكثر شيوعا لتمثيل النويدة هو $({}^{A}_{Z}X)$.

2- النظائر (Isotopes) : عناصر نووية متساوية في العدد الذري (Z) وتختلف في عدد النيوترونات (N) وتبعا لذلك تختلف عن بعضها بالعدد الكتلي (A) مثل :

1- نظائر الصوديوم $\quad {}^{22}_{11}Na_{11}\ ,\ {}^{23}_{11}Na_{12}\ ,\ {}^{24}_{11}Na_{13}$

2- نظائر الهيدروجين $\quad {}^{1}_{1}H_{0} \qquad {}^{2}_{1}H_{1} \qquad {}^{3}_{1}H_{2}$

Hydrogen 1 proton	Hydrogen 2 deuterium	Hydrogen 3 tritium

للنظائر نفس الصفات الكيمياوية لان لها نفس التركيب الالكتروني وبسبب اختلاف تركيبها النووي نجد ان لها صفات فيزياوية مختلفة مثل اختلاف طاقة الربط النووية ومعدلها وبعض النظائر مشع والبعض الاخر مستقر :

e.g :${}^{14}_{8}O_{6}$, ${}^{15}_{8}O_{7}$, ${}^{16}_{8}O_{8}$, ${}^{17}_{8}O_{9}$, ${}^{18}_{8}O_{10}$, ${}^{19}_{8}O_{11}$

e.g : ${}^{14}_{8}O_{6}$ (B^{+}) , ${}^{15}_{8}O_{7}$ (B^{+}) , ${}^{19}_{8}O_{11}$ (B^{-})

3- ***الايزوتونات (Isotones) :*** عناصر نووية متساوية في عدد النيوترونات (N) وتختلف في العدد الذري (Z) مثل:

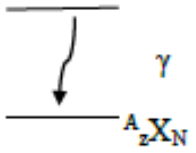
${}^{4}_{2}He_{2} \quad {}^{5}_{3}Li_{2} \quad {}^{7}_{3}Li_{4} \quad {}^{8}_{4}Be_{4} \quad {}^{8}_{5}B_{4} \quad {}^{10}_{6}C_{4}$

4-***الايزوبارات (Isobars) :*** عناصر نووية متساوية في العدد الكتلي (A) وتختلف في عدد النيوترونات (N) والعدد الذري (Z) مثل :

${}^{5}_{2}He_{3} \quad {}^{5}_{3}Li_{2}$

5- ***الايزومير (Isomer) :*** عناصر نووية في حالة متهيجة وذات عمر طويل نسبيا يمكن قياسه ويشار لها بالرمز :

${}^{A}_{Z}X^{*}_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z}X_{N} + \gamma \qquad {}^{A}_{Z}X^{*}_{N}$



النواة تبقى نفسها عندما تنتقل من المستوى *المتهيج* الى المستوى المستقر فقط في انبعاث كاما.

6-النيوكليون*(Nucleon):* هو اسم يطلق على البروتون او النيوترون.

7- **الميزونات** ***(Mesons)*** **:** جسيمات متوسطة الكتلة كتلتها تقع بين كتلة الالكترون (m_e) وكتلة البروتون (m_p) ومن انواعها هي ميزونات (π) وتعادل ($270m_e$) تقريبا والتي تلعب دورا مهما في القوى النووية وكذلك ميزونات (μ) وتعادل ($207m_e$) تقريبا والتي هي إحدى مكونات الاشعة الكونية , وقد افترض يوكاوا عام 1935 وجود الميزونات باعتبارها المسؤولة عن التجاذب النووي بين البروتون والنيوترون او بين نيوترون – نيوترون او بين بروتون – بروترون مثلما يعتبر الفوتون مسؤولا عن التجاذب او التنافر الكولومي بين الشحنات الكهربائية وقد تم الكشف عن العديد منها في المختبرات ومنها البايونات (pions) (π^+,π^0,π^-) والكايونات(Kaions) (k^+,k^0,k^-) وغيرها.

8- **البوزترون** ***(Positron)*** :هو ضديد الالكترون وله نفس خواص الالكترون ولكن شحنته موجبة

9- **الفوتون** ***(Photon)*** **:** هو وحدة الكم في الاشعاع الكهرومغناطيسي ويظهر على شكل ضوء او اشعة سينية او اشعة كاما وله زخم خطي كهرومغناطيسي معين حيث لايوجد فوتون ساكن (كيف نثبت ذلك ؟) وترتبط طاقة الفوتون (E_γ) بكتلته (m_γ) كجسيمة وفقا لمعادلة تكافؤ الكتلة والطاقة لانشتاين : ($E_\gamma = m_\gamma c^2$) كما وترتبط طاقته (E_γ) بتردد الاشعة الكهرومغناطيسية (f) وفقا لفرضية بلانك ($E_\gamma = hf$) وعليه فأن :

$$E_\gamma = m_\gamma c^2 = hf = hc/\lambda$$

ويرتبط زخم الفوتون (P_γ) بكتلته كجسيمة ($P_\gamma = m_\gamma c$) كما ويرتبط بطول موجة الاشعة الكهرومغناطيسية وفقا لفرضية كوميتن : $P_\gamma = h/\lambda = hf/c$

النوى المرآة : (Mirror Nuclei)

عندما يكون لنواتين نفس العدد من النيوكليونات ويكون عدد البروتونات في احدهما مساويا لعدد النيوترونات في الاخرى فأن هاتين النواتين تكونان ما يسمى بزوج المرآة (mirror pair) مثل

$$_6C^{13}—_7N^{13} \quad , \quad _5B^{11}—_6C^{11} \quad , \quad _4Be^9 – _5B^9 \quad , \quad _3Li^7 – _4Be^7$$

وقد وجد عمليا ان مستويات الطاقة للنواتين في كل زوج مرآة تكون متشابهة تماما وان هذا التشابه بين رسوم مستويات الطاقة في النوى المرآتية هو من الشواهد التي تدعم حقيقة ان القوى النووية لا تعتمد على الشحنة.

التماثل والتناظر(Parity and Symmetry):

ان اصطلاح (parity) هو من الاصطلاحات المهمة جدا في الفيزياء الذرية والنووية ولكن ليس ما يشابهه التماثل في الفيزياء الكلاسيكية، ان التماثل هو خاصية لدالة الموجة التي تصف المجموعة الكمية. ان دالة الموجة التي تمثل جسيما واحدا يقال ان لها تماثلا موجبا(زوجيا even) اذا كانت إشارتها لاتتغير عند انعكاسها على نقطة الاصل. ويقال عنها بان لها تماثلا سالبا (فرديا odd) اذا كانت إشارتها تتغير ولهذا فأن:

$$\Psi(x,y,z) = \psi(-x,-y.-z) \text{ for positive parity}$$

$$\psi\ (x,y,z) = -\ \psi(-x,-y.-z) \text{ for negative parity}$$

أن دالة موجة عدد من الجسيمات يمكن كتابتها على انها حاصل ضرب دوال موجات الجسيمات المنفصلة او مجموع حواصل الضرب هذه، ان تماثل المجموعة ككل في هذه الحالة هو حاصل ضرب تماثلات دوال

موجات الجسيمات المنفردة وان كثافة الشحنة للنوى سوف تكون متناظرة دائما وذلك لان $|\psi|^2$ هي متناظرة دائما بغض النظر عن كون التماثل موجبا او سالبا . ان الطاقة الكلية والزخم الزاوي في العمليات النووية وكما هي الحالة في الفيزياء الكلاسيكية هي كميات محفوظة ، اضافة الى ذلك فأن التماثل هو محفوظ عادة . ان تماثل حالة نووية ما يعرف في كثير من الاحيان بالرمز (+) أو (-)على الزخم الزاوي(J).

وهنالك مصطلحا أخر في الفيزياء الذرية والنووية هو التناظر(Symmetry) ان حل معادلة شرودنجر لجسمين متطابقين وغير متفاعلين متحركين خلال نفس الجهد هو:

$$\Psi_{nk} = \psi_n (1)\ \psi_k (2)$$

حيث (ψ_n) و (ψ_k)هما حلان لنفس دالة موجة جسيم واحد والارقام (1) و (2) تمثل احداثيات الجسمين 2,1 ولكن دالة الموجة (ψ_{nk}) هي ليست دالة مقبولة لجسمين متطابقين لانها تعني ان من الممكن تأشير الجسيمات وملاحظة اي منها يكون في الحالة(n) وايهما في الحالة(k) وللتغلب على هذة الصعوبة يمكن كتابة دالة الموجة بالشكل التالي :

$$\Psi s = 1/\sqrt{2}[\psi n(1)\ \psi k(2) + \psi n(2)\ \psi k(1)]$$

$$\Psi A = 1/\sqrt{2}[\psi n(1)\ \psi k(2) - \psi n(2)\ \psi k(1)]$$

اما كثافة الاحتمالية فأنها تكون متناظرة عندما تكون الاشارات 1 و 2 قابلة للتبادل في كلتا المعادلتين.

الفصل الثاني

التركيب النووي *(Nuclear structure)*

ان النواة تشمل على مجموعتين من الجسيمات المتشابهة هي البروتونات والنيوترونات وان كل واحدة من هاتين المجموعتين موزعة بصورة منفصلة عن الاخرى على مستويات طاقة محددة حسب قاعدة الانفراد لباولي ، وان لكل نيوكليون زخما زاويا ذاتيا يسمى (بالبرم الذاتي(S)) وتوجد هنالك علاقة بين الحركة المدارية (L) وبين البرم الذاتي (S) لكل نيوكليون بحيث ان الزخم الزاوي الكلي للنيوكليون هو ***(J = L + S)*** وان القوة النووية بين اي نيوكلونين تعتمد بشدة ***على*** الاتجاهات النسبية لبرميهما.

طاقة الربط النووية *(Nuclear Binding energy)*:

ان الفرق بين الكتلة الحقيقية للنواة وبين مجموع كتل مكوناتها من النيوكليونات كل على انفراد يسمى بطاقة الربط النووية وهي مقدرة بوحدة الكتلة الذرية a.m.u او **هي مقدار الشغل اللازم لتحلل النواة(A,Z) الى النيوكليونات وبالعكس فهي الطاقة التي تتحرر عند دمج النيوكليونات لتكوين نواة متماسكة** اي:

$$M(A,Z) = ZM_p + NM_n - B.E$$

لذلك يجب تحويل الطاقة الى كتلة كي نطرح كتلة من كتلة

$E = Mc^2$ (علاقة انشتاين)

$M(A,Z) = ZM_p + NM_n - B.E/c^2$

$B.E = [(ZM_p + NM_n) - M(A,Z)]c^2$

ففي النيوكليونات تسمى طاقة الربط باسم (طاقة الارتباط الكلية Total binding energy) وتكتب:

$$B_{tot}(A,Z) = [ZM_p + NM_n - M(A,Z)]c^2$$

من هذه العلاقة نرى ان كتلة النواة الكلية اقل من كتل مكونات النواة بمقدار طاقة الربط.وتعزى طاقة الربط النووية هذه الى ان مجموع كتل النيوكليونات وهي منفصلة عن بعضها اكبر من كتلة النواة الناتجة من تجمعها **وفرق الكتلة هذا قد تحول الى طاقة مبعثرة مما سبب تماسك النيوكليونات مع بعضها** والحاجة الى تجهيز النواة بالطاقة لبعثرة او فصل نيوكليوناتها.

وتقاس طاقة الربط بوحدة الجول وهذه الوحدة كبيرة جدا بالنسبة لعالم الذرة والنواة لان الكتل الذرية صغيرة جدا لذا فلا يعبر عنها بالكجم او جم وانما يعبر عنها بوحدة ملائمة وهي وحده الكتلة الذري (u) وهي :

$$u = \frac{1}{12} \times \text{mass of } {}^{12}C \text{ atom} = \frac{1}{12}(12\text{kg/kmole}/N_A)$$

$$u = \frac{1}{12}\frac{12\text{kg/kmole}}{6.02\times10^{26}\text{/kmole}} = 1.66\times10^{-27}\text{ kg}$$

$$\text{or } 1u = 1.66\times10^{-27}\text{kg} = 931.5\text{ MeV}$$

طاقة الفصل النووية*(Nuclear separation energy (S)):*

لايقتصر التأثير المزدوج على استقرارية ووفرة النوى وانما يتعداه الى التأثير على طاقة فصل الجسيمة النووية (البروتون p , النيوترون n , الديترون ${}^{2}_{1}H_{1}^{+}$, التريتون ${}^{3}_{1}H_{2}^{+}$ وجسيمة α (${}^{4}_{2}He_{2}^{+}$) **وتعرف بأنها الشغل اللازم (الطاقة اللازمة) لفصل جسيمة او مجموعة جسيمات من نواة او اكثر** او **تعرف بأنها مقدار الشغل اللازم لفصل بروتون او نيوترون او ديترون او جسيم الفا عن النواة** وبالعكس فأن هذا المقدار من الطاقة سوف يتحرر عندما تقوم النواة بأقتناص احد هذه الجسيمات ويعبر عن طاقة فصل النيوترون (S_n) بالعلاقة:

$$S_n = [M(A-1,Z) + M_n - M(A,Z)]c^2 \quad \text{----------(1)}$$

حيث $M(A-1,Z)$ كتلة النواة الجديدة و M_n كتلة الجسم المفصول و $M(A,Z)$ كتلة النواة الاصلية

وان طاقة الفصل يمكن التعبير عنها بدلالة طاقة الربط الكلية او بدلالة الكتل فطاقة فصل النيوترون (S_n) تكتب بدلالة طاقة الربط بالصيغة:

$$S_n = B_{tot}(A,Z) - B_{tot}(A-1,Z) \quad \text{--------(2)}$$

$$S_{2n} = [M(A-2,Z) + 2Mn - M(A,Z)c^2 \quad \text{---------(3)}$$

$$\textbf{Or } S_{2n} = B_{tot}(A,Z) - B_{tot}(A-2,Z) \quad \text{---------(4)}$$

وطاقة الفصل للبروتون S_p هي:

$$S_p = [M(A-1,Z-1) + M_p - M(A,Z)]c^2 \quad \text{---------(5)}$$

$$S_p = B_{tot}(A,Z) - B_{tot}(A-1,Z-1) \quad \text{----------(6)}$$

وطاقة الفصل لجسيم الفا S_α هي:

$$S_\alpha = [M(A-4,Z-2) + M_\alpha - M(A,Z)]c^2 \quad \text{-------(7)}$$

$$S_\alpha = B_{tot}(A,Z) - B_{tot}(A-4,Z-2) - B(4,2) \quad \text{----(8)}$$

حيث $B(4,2)$ طاقة ربط جسيم الفا

ان كل زوج من هذه المعادلات يمثل معادلتين متكافئتين على سبيل المثال لبرهنة المعادلة (1) و(2) يكون كالاتي : لدينا من التعريف

$$B(A,Z) = [ZM_p + NM_n - M(A,Z)]c^2 \text{ -------(a)} \quad \text{also:}$$

$$B(A-1,Z) = [ZM_p + (N-1)M_n - M(A-1,Z)]c^2 \text{ --------(b)}$$

من هاتين المعادلتين نحصل على:

$$M(A,Z)c^2 = (ZM_p + NM_n)c^2 - B(A,Z)$$

$$M(A-1,Z)c^2 = [ZM_p + (N-1)M_n]c^2 - B(A-1,Z)$$

نعوض هاتين المعادلتين بالمعادلة (1) وبعد فك القوس نحصل على:

$$S_n = [ZM_p + (N-1)M_n]c^2 - B(A-1,Z) + M_n c^2 - [(ZM_p + NM_n)c^2 - B(A,Z)]$$

$$S_n = NM_nc^2 - M_nc^2 - B(A-1,Z) + M_nc^2 - NM_nc^2 + B(A,Z)$$

$$S_n = B(A,Z) - B(A-1,Z)$$

معدل طاقة ارتباط النيوكليون:

هي معدل ربط اي من النيوكليونات داخل النواة سواء كانت بروتونات ام نيوترونات اوتعرف ايضا بأنها (معدل الطاقة اللازمة لتحرير احد نيوكليونات النواة).

ان طاقة الربط الكلية B_{tot} يمكن حسابها عمليا من القياسات الدقيقة للكتلة M بواسطة مطياف الكتلة (Mass spectrometer) او من حساب طاقة الفصل S من دراسة التفاعلات النووية ،من الخواص العامة لمقدار معدل طاقة الربط B_{ave} ان هناك مسألة مهمة وهي عدم اعتمادها تقريبا على العدد الكتلي ماعدا في النوى الخفيفة . واذا فرضنا ان طاقة الربط بين كل نيوكليون وآخر هي مقدار ثابت تقريبا C فأن النواة التي تحتوي على A من النيوكليونات سوف تحتوي على A(A-1)/2)من الازواج المتفاعلة اي ان

$$B_{tot}(A,Z) \simeq \frac{1}{2} CA(A-1)$$

$$B_{ave} = \frac{B_{tot}(A,Z)}{A} = \frac{1}{2} C(A-1)$$

من هذه النتيجة نلاحظ ان معدل طاقة الترابط لكل نيوكليونB_{ave} تتناسب طرديا مع العدد الكتلي A ولكن الدراسات العملية لا تؤيد ذلك بحيث ان B_{ave} ثابتة تقريبا ماعدا في النوى الخفيفة جدا . وتعلل هذه الظاهرة بأن القوى النووية قابلة للاشباع كما في الاواصر الكيمياوية وان تأثيرها يكون على النيوكليونات المتجاورة ويتم الاشباع تقريبا عند اربعة نيوكليونات فأكثر ولما كانت القوة النووية قابلة للاشعاع وان تفاعل النيوكليونات يكون مقصورا على النيوكليونات المجاورة فأن القوة النووية قصيرة المدى (Short range) اذن يكون تأثيرها أقصر من نصف قطر اي نواة بأستثناء النوى الخفيفة وهو بحدود2 F وهذا ما حصلنا عليه من معرفة طاقة ارتباط الديترون.

الاشباع :يعني الاشباع ان طاقة الارتباط او التآصر بين نيوكليون وباقي النيوكليونات تصل الى حد ثابت عندما يصل العدد الكلي للنيوكليونات المجمعة الى حد معين.

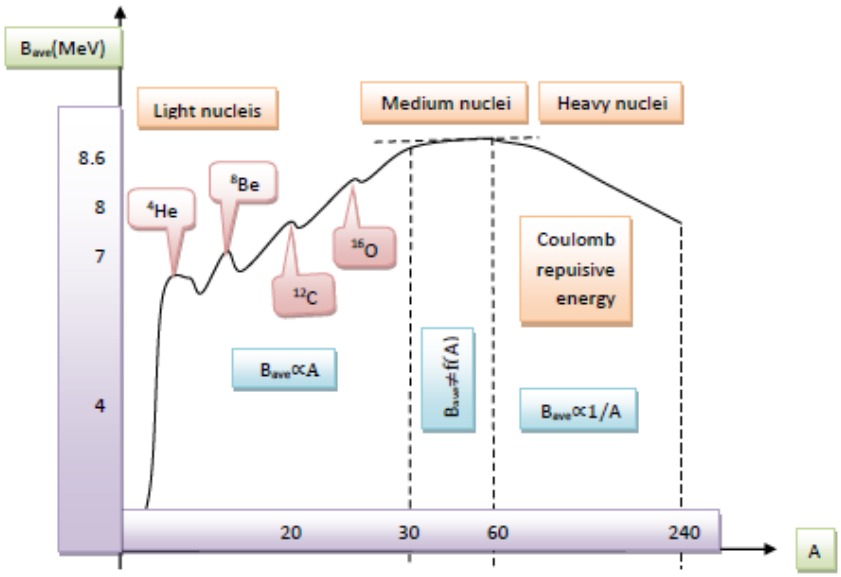
ان النظريات الحديثة تعزو عملية الاشباع الى تأثيرين هما:

الاول:هو الاثبات العملي :ان القوة بين نيوكلونين تصبح ذات طبيعة تنافرية شديدة(repulsive)عند مسافة في حدود ½ F حيث يعبر عن ذلك بالقول ان للنيوكليونات قلبا صلبا

الثاني :قاعدة الانفراد لباولي التي لاتسمح لنيوكليونين من نفس النوع ان يحتلا حالات لها نفس الاعداد الكمية .نعلم دائما ان ارتباط نيوكليون داخل النواة هو اكبر بكثير من ارتباط نيوكليون على سطح النواة.

وعند رسم معدل طاقة الارتباطB_{ave} كدالة للعدد الكتلي A للنوى :

سنحصل على المنحني التالي:



من الشكل البياني نلاحظ مايلي:

1- ان معدل طاقة الترابط لكل نيوكلونين يتناسب طرديا مع العدد الكتلي A في النوى الخفيفة جدا

2- عندما يكون العدد الكتلي A≥30 فأن B_{ave} ستبقى ثابتة تقريبا اي لاتعتمد على A في الانوية المتوسطة .

3- هنالك قمم حادة على المنحني وان للمقدار B_{ave} قيمة عظمى عندما (A=4,8,12,16) وقمم ذات قيمة دنيا عندما تكون A فردية. وان سبب ظهور القمم الحادة على المنحني لان من خواص القوة النووية هي اعتمادها على الزخم البرمي والذي يسمى بتأثير الازدواج ,أي ان كل من النيوكليونات المتشابهة (P,P) او (n,n) يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساوي ومعاكس بالاتجاه الاخر.

4- ان اعظم قيمة للمقدار B_{ave} هي A=60 وبعدها تبدأ قيمتها بالنقصان تدريجيا ويمكن تفسير هذا النقصان التدريجي الى كونه ناتج عن التنافر الكولومي بين البروتونات الذي يزداد تأثيره بزيادة العدد الذري Z الناتجة من زيادة العدد الكتلي A

مثال: أفرض ان النواة تحتوي على عدد من البروتونات والنيوترونات فما هو تأثير التنافر الشحني Coulomb force بين البروتونات على القوة النووية علما ان $e=4.8*10^{-10}$ esu $r=3*10^{-13}$cm ؟

الحل: ان مقدار قوة التنافر بين بروتونين تتناسب مع $\frac{e^2}{r}$

$$E_c = \frac{e^2}{r} = \frac{(4.8\times10^{-10})^2}{3\times10^{-13}\times1.6\times10^{-6}} \approx 0.5 \text{ MeV}$$

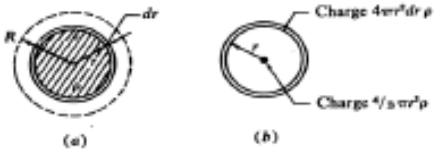
وهذا يعني ان تأثير قوة التنافر بين بروتونين قليلا اذا ما قورن مع القوة النووية بينهما والتي تقارب 8MeV ولكن هذا التأثير يزداد مع زيادة العدد الكتلي (في النواة الثقيلة) نتيجة للاتساع الذي يحصل للقوة النووية بينما لايحصل ذلك مع القوة الناتجة من التنافر الشحني فهي تساوي $\frac{3}{5}\frac{Z(Z-1)e^2}{R}$ حيث يمكن اشتقاق هذه العلاقة :

ان قوة كولوم تعمل بين ازواج البروتونات الا انه يمكن اعتبار النواة كرة متجانسة الشحنة وشحنتها هي Ze وكثافة الشحنة فيها هي ρ وتساوي:

$$\rho = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

فالشحنة داخل الكرة التي نصف قطرها r هي:

$$q = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$$



وبأعتبار ان الشحنة الاصلية للكرة $(4/3)\pi r^3\rho$ متمركزة في مركز الكرة , والشحنة في القشرة التي سمكها dr ونصف قطرها r هي:

$$dq = 4\pi r^2 \rho\, dr$$

واذا فرضنا ان الشحنة q موجودة في الكرة التي نصف قطرها r واريد اضافة شحنة dq في القشرة الكروية فأن الجهد الكهربائي للنواة (طاقة كولوم) هو:

$$dV_c = \frac{Q}{r} = \frac{q\, dq}{r} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho(4\pi r^2\, \rho\, dr)}{r}$$

وبالتكامل خلال حجم الكرة الكلي نحصل على:

$$V_c = {}_0\int^R \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho(4\pi r^2\, \rho\, dr)}{r} = \int_0^R \frac{16}{3}\pi^2 r^4 \rho^2 dr$$

$$V_c = \frac{16}{15}\pi^2\rho^2 R^5 = \frac{16}{15}\pi^2\left(\frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3}\right)^2 R^5 = \frac{3}{5}\frac{Z^2e^2}{R}$$

وبهذا يكون قد حسبنا تأثير الشحنة الكلية بضمنها شحنة كل بروتون على نفسه وبأختزال هذا التأثير نحصل على:

$$V_c = \frac{3}{5}Z(Z-1)\left(\frac{e^2}{R}\right)$$

ويمكن التعبير عن كتل النوى بكميات أخرى مثل الزيادة في الكتلة(Δ)Mass excess وتعرف بانها الفرق بين كتلة النواة والعدد الكتلي ,اي Mass excess $(\Delta) = M - A$

Ex.1:lit M = 4.0026u ,A = 4

Mass excess = M – A = 4.0026u – 4 = 0.0026u

Ex.2:- ^{40}Ca, Mass excess = - 0.003

M = A + Mass excess =40 – 0.003= 39.997u

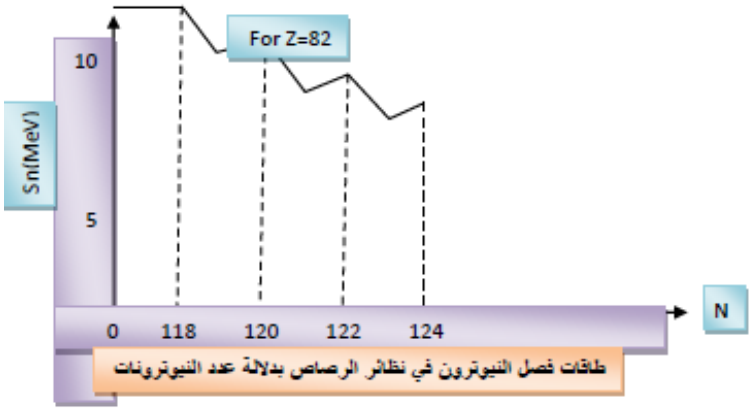
نظاميات طاقة الفصل : (Separation energy)

ان النظاميات المتالية لطاقات فصل النيوترون S_n كدالة لعدد النيوترونات والمبينة في الشكل ادناه نجد انه (عند قيمة معينة من العدد الذري Z لنواة تكون طاقة الفصل S_n اكبر في النوى التي تكون فيها N زوجية مما عليه في النوى التي تكون فيها N فردية) , وان طاقة الفصل تقل بازدياد عدد النيوترونات وكذلك لقيمة معينة لعدد النيوترونات N فان S_p تكون اكبر في النوى التي تكون فيها Z زوجية مما هي عليه في النوى ذات Z الفردية ومثل هذه الملاحظات شوهدت وشخصت عمليا بالنسبة لطاقة فصل البروتون S_p.

ان هذا ناتج عن احدى خواص القوى النووية التي ينتج عنها ارتباط اضافي بين كل زوج من النيوكليونات المتشابهة (n,n)(p,p) الموجودة في الحالة نفسها والتي يكون لها زخوم زاوية كلية تعمل من اتجاهين متعاكسين ويسمى بتأثير الازدواج (pairing effect)وهذا هو ايضا السبب في الاستقرار العالي لتركيب جسيمات الفا

ان الفرق S_n (A,Z,evenN) –S_n (A-1,Z,N-1) يسمى طاقة ازدواج النيوترون Neutron pairing energy وتتراوح قيمتها بين (2-4MeV) مع زيادة A وتظهر قيم مشابه لذلك بالنسبة للبروتونات

ان تأثير الازدواج يؤدي الى ان تكون النوى الزوجية – الزوجية (even- even) اكثر استقرارا ووفرة من النوى الزوجية الفردية والنوى الفردية – الزوجية وهذه بدورها اكثر استقرارا ووفرة من النوى الفردية – الفردية وهذا يتضح ايضا من ملاحظة نظاميات الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة



ان من بين 1400 نظير الموجودة في الطبيعة هنالك ما يقارب 280 نظير مستقر واكثر من نصف هذا العدد (160 نوية) زوجية – زوجية وهنالك حوالي 49 نوية زوجية - فردية و53 نوية فردية – زوجية كما في الجدول .

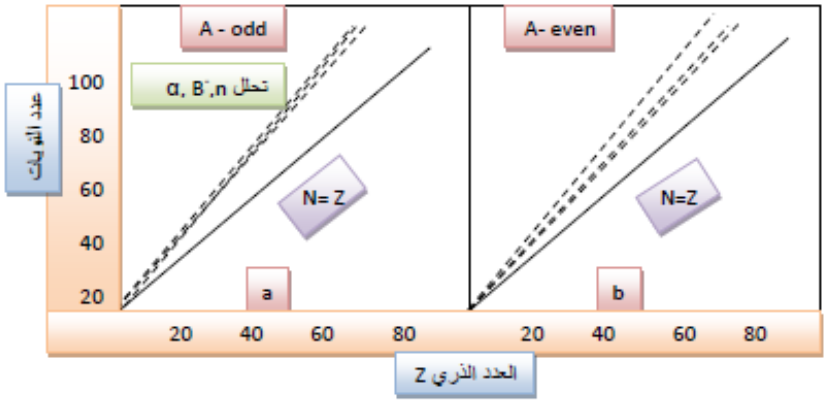
N	even	odd	even	odd
Z	even	even	odd	odd
Number of Nuclides	160	53	49	4

استقرارية النواة والقوة النووية: Abundance of stable nuclei

الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة : تتواجد نظائر العناصر في الطبيعة بنسب تعتمد على استقراريتها ويرسم N كدالة ل Z والموضحة في الشكل التالي والذي يبين ان منطقة الاستقرار تتمركز حول خط الاستقرار N = Z بالنسبة للنوى الخفيفة . اما بالنسبة للنوى الثقيلة فأن منطقة الاستقرار ستنحرف عن هذا الخط مقتربة من محور N لان النوى الثقيلة تحتوي على نيوترونات اكثر من البروتونات .

ان النوى غير المستقرة والواقعة على يمين منطقة الاستقرار تتحلل غالبا عن طريق تحلل B^+ او تأسير الالكترون وذلك لان فيها فائض من البروتونات على نقيض النوى غير المستقرة الواقعة على يسار منطقة الاستقرار التي تحتوي على فائض من النيوترونات فنراها تتحلل عن طريق تحلل بيتا السالبة (B^-) او تحلل n او تحلل α .

حيث يبين الشكل (a) النوى الفردية العدد الكتلي ويبين الشكل (b) النوى الزوجية العدد الكتلي ومن الملاحظ من الشكلين ان في النوى الخفيفة لحد تقريبا(N=Z=20) يكون عدد النيوترونات مساويا لعدد البروتونات فأن الاستقرار يتطابق مع الخط المستقيم .



اما في النوى الثقيلة فأن الاستقرار يشذ عن ذلك فنلاحظ انها تميل لان يكون عدد النيوترونات فيها اكبر من عدد البروتونات بسبب زيادة قوة كولوم ويمكننا ان نستنتج من ذلك انه بزيادة عدد النيوترونات تؤدي الى زيادة القوة النووية لكي تكافئ زيادة قوة كولوم التي تزداد بزيادة البروتونات.

ان القوة النووية بين n- p هي اكبر من القوة النووية بين n-n واكبر من القوة النووية بين p-p , كما يمكن ان نستنتج ان القوة بين p-p ≈n-n حيث لو كانت القوة بين n-n اكبر من القوة بين p-p لوجدنا ان النوى الخفيفة المستقرة تحتوي عددا من النيوترونات اكبر من عدد البروتونات ولو كان العكس لصح العكس ايضا .

اما لو كانت القوى p-p≈p-n≈n-n لاصبح من المنطق ان تحتوي النوى حتى الخفيفة على عدد من النيوترونات اكبر من البروتونات. اما سبب ميول النوى الثقيلة لان يكون فيها عدد النيوترونات اكبر من البروتونات فيمكن ان نعزيه لازدياد قوة تنافر كولوم بين البروتونات الكثيرة في النوى الثقيلة كما ذكرنا سابقا . ومن الدراسات التي اجريت على نوى العناصر والنظائر المختلفة وجدت هنالك بعض الملاحظات الجديرة بالاهتمام :

1- ان النوى الخفيفة التي يكون عدد نوياتها مساويا لعدد صحيح من جسيمات الفا تكون B_{ave} فيها عالية.

2- لقد وجد ان استقرارية بعض النوى عالية بالنسبة لما يجاورها من النوى اذا كان عدد البروتونات Z او النيوترونات N يساوي (2,8,20,28,50,82,126) وتسمى هذه الاعداد بالاعداد السحرية (magic number) .

3- ان طاقة فصل النيوترون S_n عند عدد ذري Z معين تكون اكبر في النوى ذات العدد الزوجي ل N منها في النوى الفردية العدد N مثلا $S_n(^{201}_{82}Pb_{119})$)) $S_n(^{202}_{82}Pb_{120}$ وكذلك S_n عند عدد معين من N اكبر في العدد الزوجي Z منها في العدد الفردي مثلا $S_n(^{11}_{5}B_6)$)) $S_n(^{12}_{6}C_6$ **والسبب في ذلك هو ان من خواص القوة النووية تكون قوة ربط عالية بين ازواج النويات المتشابهة والتي تكون في مستوي واحد او بسبب تاثير الازدواج على طاقة الفصل.** ان هذه الملاحظات وغيرها قد ساعد في اعطاء تصور ما عن تركيب النواة .

النظريات الاساسية حول طبيعة النواة:

في غياب المعلومات المفصلة حول القوة النووية فان وصف طبيعة وتركيب النواة يبقى في إطار النماذج (models) التي تحاول تفسير الظواهر التي لوحظت في النوى وحدتي الان لا توجد نماذج شاملة ودقيقة لوصف التركيب النووي والقوة النووية ومن الجدير بالذكر ان هنالك العديد من هذه النماذج منها:

1- نموذج قطرة السائلliquid- drop models

2-نموذج الاغلفة(القشرة)Shell model

3-النماذج التجميعيةCollective models

4-نموذج التشوه الحركي

5-نموذج البوزونات المتفاعلة Interacting boson model

6- النموذج الاحصائيstatistical model

7- النموذج البصريOptical model

-8 النموذج العنقودي وغيرها .

وتوجد نماذج عديدة لا مجال لذكرها ولكل من هذه النماذج نجاحا في بعض الجوانب واخفاقا في جوانب أخرى وسوف نتكلم عن النموذجين الاوليين لانهما اكثر النماذج نجاحا في تفسير الكثير من الخواص النووية.

نموذج قطرة السائل liquid drop model

لتفسير بعض الظواهر النووية و من أهمها الانشطار النووي و كذلك ظاهرة تغير طاقة ربط النيوكلون في النواة مع عدده الكتلي ، اقترح نيلزبور عام 1937 نموذج قطرة السائل و الذي ترتب عليه تطوير ما يسمى بالمعادلة شبه تجريبية للكتل النووية semi-empirical mass formula .

و الغرض الأساسي الذي بنى عليه نموذج قطرة السائل هو انه يمكن اعتبار النواة مشابهة في بعض خواصها و سلوكها لقطرة من السائل . و تمثل حركة النيوكلونات في النواة بحركة جزيئات السائل داخل القطرة . و من أوجه التشابه الأخرى ما يلي :

1) الكثافة الكتلية الداخلية للأنوية ثابتة ، (ماعدا الانوية الخفيفة) . و هو نفس الوضع بالنسبة لقطرة سائل حيث إن الكثافة الكتلية داخل قطرة سائل ثابتة .

2) طاقة الربط الكلية في النواة ، وهي الطاقة اللازمة لتفتيت النواة إلى مكوناتها ، تتناسب طرديا مع كتلة النواة ($\Delta E\alpha A$). وهذه الطاقة ممثلة للطاقة الحرارية الكامنة للتبخير ، وهى كمية الحرارة اللازمة لتبخير قطرة من السائل و تحرير جزيئاتها . و هذه الطاقة متناسبة مع كتلة القطرة .

3) النيوكلونات المكونة للنواة تتفاعل مع أقرب النيوكلونات المجاورة لها ، و هذا يأتي من قصر مدى القوى النووية ، و بطريقة مشابهة لتفاعل جزيئات قطرة السائل مع بعضها .

وقد كانت أول محاولة لتطوير معادلة تربط بين كتلة النواة و كتل مركباتها و كذلك الطاقات الموجودة فيها ، وهي التي أعلنها فون فايتساكر Von Veizsaker في عام 1935 ، حيث طورت هذه المعادلة مع مرور الزمن و أضيف اليها عدة حدود ، وسميت بالمعادلة شبه التجريبية للكتل النووية.

المعادلة شبه التجريبية للكتل النووية

Semi-empirical equation for nuclear masses

ولقد وضعت هذه المعادلة بناء على التشابه بين النواة و قطرة السائل وهي تتكون من ست حدود كل منها دالة في Z , A

$$M(Z,A) = \sum_{i=1}^{6} f_i(Z,A) \qquad (1)$$

حيث Z هو العدد الذري ، A هو العدد الكتلي للنواة .

وبما أن النواة تتكون من Z بروتون ، (A-Z) نيوترون فإن كتلة النواة تعتمد على كتلة مكوناتها من النيوكلونات ، و عليه يكون الحد الأول هو

$$f_1(Z,A) = Z\,M_P + (A-Z)\,M_N \qquad (2)$$

حيث M_P وزن البروتون ، M_N كتلة النيوترون و قيمتها مقدرة بوحدات الكتل الذرية وهى :

$$M_P = 1.008142 \text{ amu}$$

$$M_N = 1.008982 \text{ amu}$$

وهذا مناظر لأوزان الجزيئات في قطرة السائل .

وإذا فرضنا أن جميع النيوكلونات تقع داخل النواة ، فعندئذ تكون طاقة الربط الكلية للنواة متناسبة مع العدد الكتلي A كما ذكرنا سابقا .

و الحد الثاني هو ما يسمى بحد الحجم يعطي مقدار ما تضيفه الطاقة الناتجة عن ربط النيوكلونات داخل النواة إلى الكتلة الكلية ، وهو يكون حسب العلاقة :

$f_2(Z,A) = -a_2 A$ (3)

وهو مقدار سالب و ذلك يعني أن كتلة النواة تنقص مع زيادة طاقة الربط الكلية فيها .

لقد افترضنا في الجزء السابق أن جميع النيوكلونات تقع داخل النواة ، و في الحقيقة هناك نيوكلونات تقع على سطح النواة و تلامس عددا محدودا من النيوكلونات الداخلية ، و هذا يعني ان النيوكلونات الموجودة على السطح أقل ارتباطا من النيوكلونات الداخلية . و لذا فإنه يجب إدخال تصحيح على الحد (3) و يكون متناسبا مع المساحة السطحية للنواة المعطاة حسب العلاقة (3)

$4 \pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$

حيث r_0 ثابت تعطي قيمته في المعادلة (4) . و عليه يكون الحد الثالث هو

$f3 (Z,A) = a_3 A^{2/3}$ (4)

وفي حالة قطرة السائل فإن هذا الحد يمثل تأثير التوتر السطحي وهو نتيجة لتعرض الجزيئات على سطح قطرة السائل لقوى شد من جهة واحد فقط و ليس من جميع الجهات ، و عليه تكون طاقة ربط الجزئ الموجود على السطح أقل من طاقة ربط الجزئ داخل السائل .

أما الحد الرابع فهو يأخذ في الاعتبار طاقة التنافر الكولومي بين البروتونات ، وهى مساوية للطاقة الكامنة في حالة وجود Z من البروتونات داخل تركيب كروي متناظر، متوسط نصف قطره هو $R=r_0A^{1/3}$. و مع افتراض التوزيع المنتظم للشحنات الكهربائية Ze تكون هذه الطاقة هي :

$Ec =3/5 [Z (Z-1) e^2/4\pi \varepsilon_0 R] Z^2 A^{-1/3}$

حيث ε_0 ثابت العازلية الكهربائية للفراغ . و عليه يكون الحد الرابع على الصورة

$f_4 (Z,A) = a_4 Z^2 A^{-1/3}$ (5)

ويوجد حد مشابه لهذا الحد في حالة قطرة سائل مشحونة . أما الحدان الباقيان في المعادلة فهما يتعلقان بمواصفات خاصة بالنواة فقط .

ومن دراسة العلاقة بين عدد البروتونات Z ، وعدد النيوترونات N للأنوية المختلفة ، وجد أن الأنوية الخفيفة تكون عندها النسبة N/Z=1 تقريبا (أي Z - N = A =Z) . أما بالنسبة للأنوية المتوسطة و الثقيلة فإن هذه النسبة تزداد إلى أن تصل إلى أكثر من مرة و نصف . و الانحراف عن الشرط Z = N يؤدي إلى نقص طاقة الربط مع زيادة كتلة النواة . وهذا التصحيح لا يوجد له مثيل في قطرة السائل . و عليه يكون الحد الخامس

$$f_5 (Z,A) = a_5 (A/2 - Z)^2/A \qquad (6)$$

وهو مساو للصفر عندما تكون Z = N ، و يكون مقدار موجبا عند كل الحالات الأخرى ، و يزداد مع الزيادة في الفرق بين عدد النيوترونات و عدد البروتونات .

والحد السادس و الأخير يأخذ في الاعتبار ميل الانوية المستقرة إلى أن يكون عددها الذري Z زوجيا و عددها النيوتروني N زوجيا أيضا و الذي ينتج عنه ما يسمى طاقة الزوج paring energy فالانوية ذات التركيب (زوجي – زوجي) تمتلك أكبر طاقة ربط ، و الأنوية ذات التركيب (فردي – فردي) تملك أقل طاقة ربط ، أما الانوية الزوجية – الفردية ، أو الفردية– الزوجية فتحتل مكانا وسطا . و يتم إدخال التصحيح بحيث يساوي صفرا للأنوية الزوجية – الفردية أو الفردية– الزوجية ويكون سالبا في حالة الانوية ذات التركيب زوجي – زوجي وموجب في حالة الانوية الفردية – الفردية . وعليه يكون الحد السادس على النحو التالي :

$$f_6 (Z, A) = a_6 \delta A^{-1/2}$$

حيث δ تأخذ القيم صفر ، +1، -1 حسب الحالات الثلاث .

بإضافة هذه الحدود الستة نحصل على الكتلة الكلية للنواة التي عددها الذري Z وعددها الكتلي A كالتالي

$$M (Z,A) = 1.008142\, Z + 1.008982\, (A - Z) - a_2 A + a_3 A^{2/3} + a_4 Z^2 A^{-1/3} + a_5 (A/2 - Z)^2 A^{-1} + a_6 \delta A^{-1/2} \qquad (7)$$

وتسمى هذه العلاقة بالمعادلة شبه التجريبية للكتل النووية . وقد حددت المعاملات من a_2 حتى a_6 بمطابقة النتائج العملية و النظرية . وقد استطاع جرين Green في عام 1954 تحديد هذه المعاملات بدقة كبيرة بوحدات الكتل الذرية كالآتي :

a_2 = 0.01692 amu

a_3 = 0.01912 amu

(8)

a_4 = 0.00763 amu

a_5 = 0.101178 amu

a_6 = 0.012 amu

وقد أثبتت هذه المعادلة فائدة كبيرة في حساب كتل المئات من الأنوية المستقرة و غير المستقرة وذلك باستخدام خمس معاملات فقط ، وكان هناك تطابق كبير بين الانوية المحسوبة من هذه المعادلة و تلك المقيسة عمليا .

وتعطي المعادلة شبه التجريبية قيم الكتل النووية بدقة عالية تصل نسبة الخطأ فيها إلى نحو 0.01% أو أقل حيث تزيد الدقة كلما كانت الانوية أثقل ، وحيث يصلح نموذج قطرة السائل كتقريب أفضل للنواة . ويمكن مضاعفة دقة النتائج باعتبار بعض الخصائص الأخرى في بناء الأنوية .

2- نموذج الاغلفة: Shell model

وهذا النموذج هو احد اهم النظريات حول التركيب النووي ومن مبررات ظهوره :

أ- ان كثير من خواص النواة تبدو انها تتغير بشكل دوري او انها تشكل انقطاعا مفاجئا discontionty عند قيم زوجية معينة من البروتونات او النيوترونات وقد لوحظ تجريبيا ان النواة تكون مستقرة عندما يكون عدد البروتونات Z او النيوترونات N=A-Z مساويا لاحدى القيم (2,8,20,28,50,82,126) وقد فسر ذلك بأن هذه الاعداد تشكل اغلفة مشبعة (مغلقة) شبيهة بتلك التي تكونها الالكترونات في الذرة ويبدو ان اغلفة البروتونات مستقلة عن اغلفة النيوترونات وقد وجد فعلا بان الاغلفة المشبعة النيوترونية اوالبروتونية هي المسؤولة عن وجود الاعداد السحرية الغريبة (السحرية) المذكورة.

ب- ان مقطعالعرضي لامتصاص النيوترونات ذي طاقة 1Mev قليلا عادة في النوى التي تحمل (50,82,126) نيوترون بنسبة 50% مقارنة بالنوى المجاورة وهذا يدل على مدى الفاصل الكبير في المستويات في النواة المركبة المتكونة من امتصاص النيوترون ومن الجدير بالذكر ان مقطع الامتصاص هو كمية تتناسب مع احتمالية حصول الامتصاص وكلما كان الفاصل بين المستويات كبيرا قل احتمال التقاف capture النيوترون .

مبدأ نموذج الاغلفة:

يعتبر التفاعل بين النيوكليونات بالتفاعل الضعيف (التزاوج الضعيف) **ولهذا يسمى احيانا بنموذج الجسيمة المستقلة** ويعتمد هذا النموذج على الفرضية القائلة بأن النيوكليونات تدور في مدارات خاصة بها داخل النواة وان تفاعلها فيما بينها ضعيف جدا وبصورة مستقلة عن بقية النيوكليونات ويتحدد نصف قطر مداره بالطاقة الكامنة النووية التي تنتج عن تفاعل او تجاذب النيوكليون مع بقية النيوكليونات وعملية تحلل كاما (اي انبعاث اشعة كاما من النواة وبطاقات محددة)تدعم فكرة المدارات النووية للنيوكليونات لا بل هي خير دليل على متانة ورصانة نموذج القشرة

.ان وضع هذا الكلام بلغة معادلة شرودنكر يعني اننا يجب ان نتصور ان كل نيوكليون يتحرك داخل الجهد الكروي ولكن هنالك ادلة جيدة على ان النيوكليونات البعيدة عن القشرة المغلقة تكون تحت تأثير جهد بيضوي الشكل ،

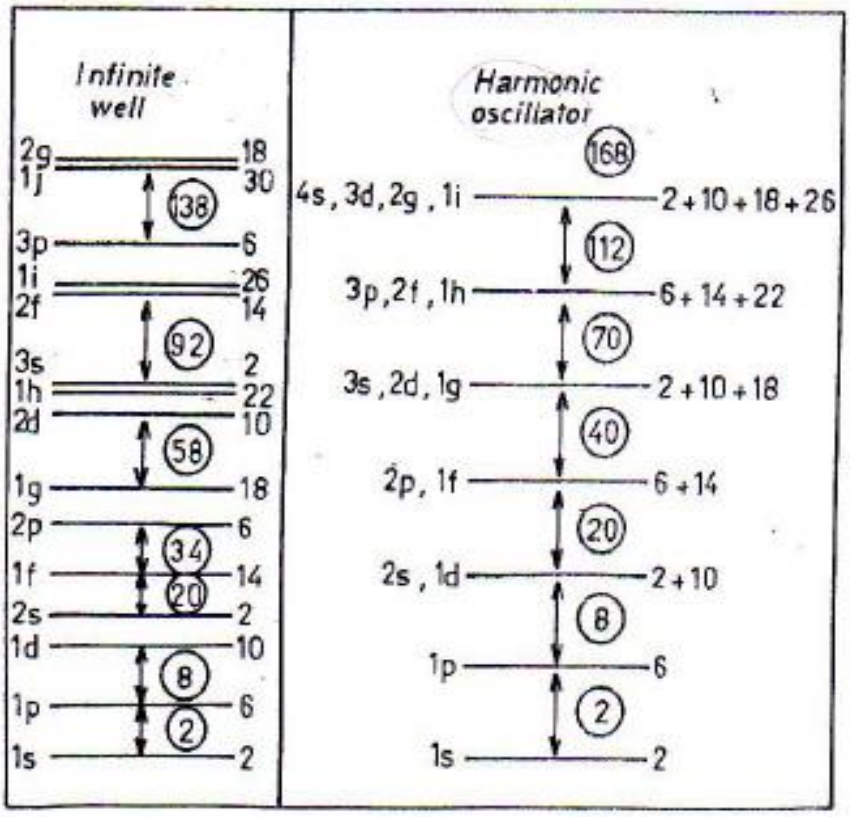
ان مستويات الطاقة لاي جهد متناظر كرويا V(r) يمكن حسابها من معادلة الموجة القطرية (radial wave equation) لاي زخم زاوي مداري l هي :

$$\frac{-h^2}{2m}\frac{d^2u(r)}{dr^2} + [\frac{l(l+1)h^2}{2m_0r^2} + V(r)]\,u(r) = Eu(r)$$

Where V(r) =spherical symmetric potential $= \frac{V_0}{1+e^{(r-R)/a}}$

V_0=57MeV , R=$1.25A^{1L3}F$, $a = 0.65F$

ومن ملاحظة الشروط الحدودية للحد u بالاخص عندما $r \to \infty$ افان u متعددة حدود محدود يعتمد على عددين كميين n,l حيث n هو العدد الكمي القطري و l هو العدد الكمي المداري ولتحديد مستويات الطاقة يجب معرفة هذين العددين الكميين فاذا كانت n=3 مثلا فان قيمة l=0,1,2 وتستخدم الحروف s,p,d بدل القيم العددية ولملئ المستويات المذكورة بالنيوكليونات يجب الاخذ بنظر الاعتبار قاعدة الاستثناء لباولي حيث لايمكن ان تتشابه الاعداد الكمية الاربعة n,l,m_l, m_s حيث $m_s = \pm\frac{1}{2}$ و $-l \leq m_l \leq l$ فاذا كانت l=2 فانm_l =2,1,0,-1,-2 وكل مستوي من هذه المستويات يمكن اشغاله بنيوكليونين ذو $m_s = \frac{1}{2}$ و $m_s = -\frac{1}{2}$ وبهذا يكون العدد الكلي للنيوكليونات هو10 اي ان عدد الاشغال $2(2l+1)$ فاذا كان المستوي مشبع تماما فأن النواة تكون ذات استقرارية عالية وكذلك اذا كان الفاصل بين المستوي المشغول والمستوي غير المشغول كبيرا فان تهيج النواة يتطلب طاقة عالية ولهذا ظهرت الاعداد السحرية الا ان هذه الاعداد لم تظهر جميعها كما يلاحظ ذلك من منخفض الجهد الرباعي ومنخفض الجهد المتذبذب التوافقي حيث ظهرت المستويات 2و8و20 الا ان المستويات 28و50و82و126 لم تظهر كما في الشكل(1)



الشكل (1): تركيب القشرات النووية التي تم الحصول عليها بوساطة جهد المتذبذب التوافقي وجهد البئر اللانهائي

والذي يعطي تركيب القشرات التي تم الحصول عليها بوساطة جهد المتذبذب التوافقي وجهد البئر اللانهائي.

نموذج القشرة بازدواج البرم والمدار: Shell model with spin-orbit coupling

لقد افترض ماير Mayer وجينيز Jensen, Haxel. Suess, (1949) بوجوب وجود تفاعل قوي بين الزخم الزاوي المداري وبين البرم الذاتي لكل نيوكليون لغرض تفسير ظاهرة ظهور المستويات المغلقة 2و8و20 في منخفض الجهد المتذبذب التوافقي والكروي المربع وعدم ظهور المستويات 28و50و82و 126 ونتيجة لهذا التفاعل يصبح الزخم الكلي J هو :

$J=l\mp S$ i.e $J=l+\frac{1}{2}$ or $J=l-\frac{1}{2}$

فينفصل كل مستوي الى مستويين ثانويين ويأخذ المستوي ذو الزخم الكبير المستوي الاوطأ للطاقة (قاعدة هوند) وبعد هذا الافتراض ظهرت المستويات المغلقة 2و8و20 و126.82.50.28 كما يتضح من الشكل (2).

ان اوطأ حالة في مستوي القشرة يجب ان تمتلئ الى حد **(2J+1)** من الجسيمات المتشابهة عدا الحالات التي تكون قريبة جدا من بعضها او في الحقيقة فأنها قد تتبادل المواقع وبهذا فأنه يحدث تنافس فيما بينها . لحد الان اخذنا بنظر الاعتبار **1- التجاذب بين احد النيوكليونات وبقية النيوكليونات الاخرى 2- تفاعل البرم والمدار لكل نيوكليون** . ان هذين العاملين يمثلان الجزء الاكبر من طاقة التفاعل وكما هي الحالة في الفيزياء الذرية فأن هنالك تفاعلات متبقية (residual interaction) بين الجسيمات في كل حالة (قشرة ثانوية) ونلاحظ في القشرة الثانوية الاخيرة فقط اذا كانت ممتلئة جزئيا . وبما ان جميع المستويات الممتلئة تماما تعطي زخما زاويا قيمته صفر فقط للنواة وتعطيها تماثلا موجبا فأن الزخم الزاوي والتماثل للحالة الارضية للنواة تحدد بواسطة التفاعلات المتبقية فقط .

ونلاحظ ايضا من دراسة الكتل الذرية ان طاقة فصل زوج من النيوترونات هي اكبر من ضعف طاقة الفصل لنيوترون منفرد واحد . ونفس الشئ ينطبق على البروتونات. ان الفرق وهو طاقة الازدواج يبلغ بحدود 2 MeV→1 ويمثل الجزء الاكبر من التفاعلات المتبقية ويظهر ان طاقة الازدواج تنتج من حقيقة انه عند وجود نيوكليونين من قشرة ثانوية لها قيم متعاكسة $l_z<m_j>$ فان دالتي موجتهما تتلاحمان ولما كان الجهد بينهما هو جهد تجاذبي فأن هذا يؤدي الى حالة اكثر ارتباطا للنواة **وبسبب طاقة الازدواج هذه فأن عددا زوجيا من النيوكليونات المتشابهة في قشرة ثانوية ممتلئة جزئيا تكون ازواجا يكون مقدار الزخم الزاوي الذي تعطية للحالة الارضية هو 0^+ اما اذا كان عدد النيوترونات او البروتونات في القشرة الثانوية هو فرديا فأن احد هذه الجسيمات سيبقى غير مزدوج ان هذه الاعتبارات** تؤدي الى القواعد الاتية في طريق حساب الزخوم الزاوية والتماثلات للحالات النووية الارضية :

1- ان النوى الزوجية – الزوجية يكون زخمها الزاوي الكلي للحالة الارضية هو $J=0^+$ ولا يوجد استثناء لهذه القاعدة .

2- النوى الفردية التي فيها N او Z فردية يكون زخمها الزاوي في الحالة الارضية مساويا لزخم النيوكليون (البروتون او النيوترون) غير المزدوج ويكون تماثلها هو $(-1)^{\ell}$.

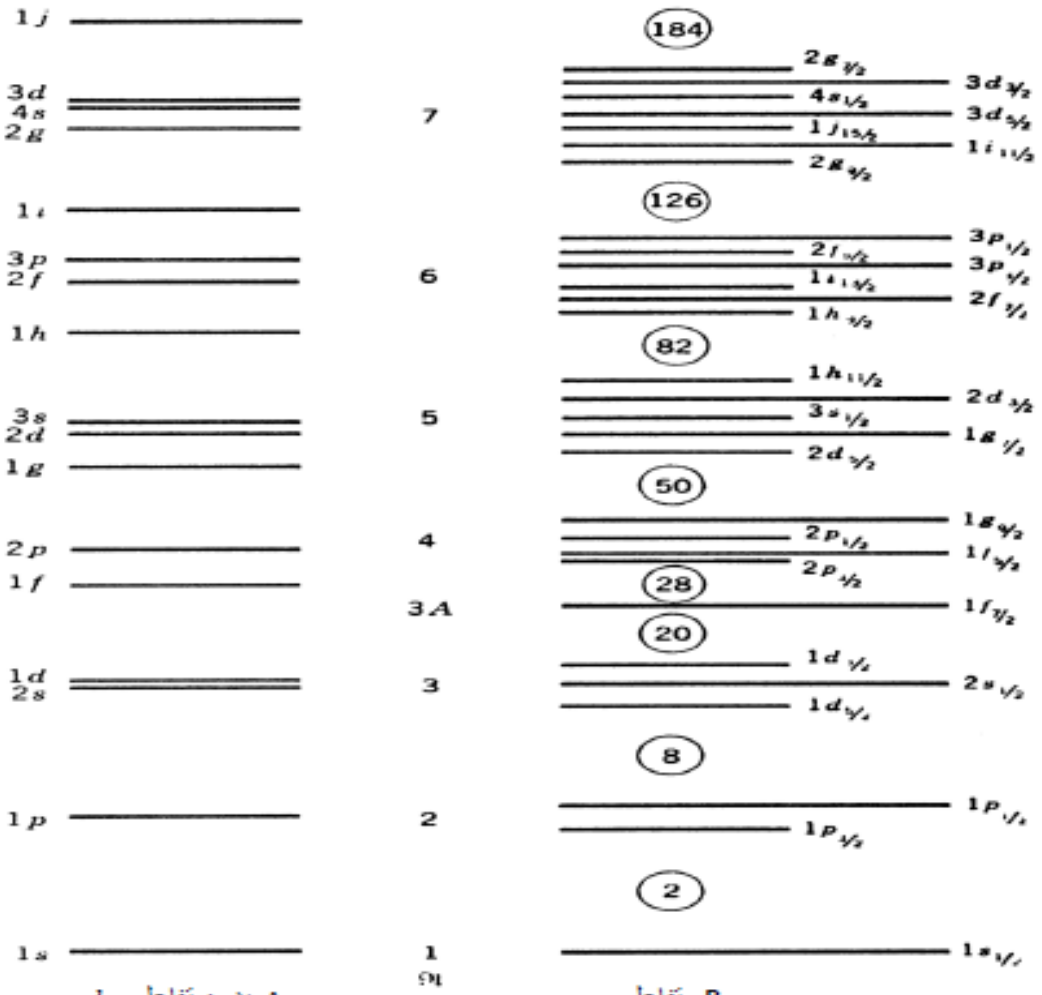
3- اما النوى الفردية – الفردية فيكون الزخم الزاوي لها يساوي احد قيم $Jp+Jn$ و$|Jp-Jn|$ وان زخمها الزاوي الكلي عبارة عن حاصل الجمع الاتجاهي لقيم J لكل من البروتون المنفرد والنيوترون المنفرد اي ان :

$$J=j_p+J_n$$

وبهذا فأن العدد الكمي J يكون عددا صحيحا محصورا بين :

$$|J_p-j_k| \leq J \leq j_p+j_n$$

كما ان التماثل في هذه الحالة سيكون حاصل ضرب تماثل كل من البروتون والنيوترون $\pi = (-1)^{Lp+Ln}$. وهنالك بعض الاستثناءات لهذة القاعدة .



مستويات الطاقة والأعداد السحرية في أنموذج القشرة

الشكل (A) يمثل عدم تفاعل البرم-المدار والشكل B يمثل تأثير البرم-المدار على انقسام المستويات ذات $L > 0$

ان القيم العملية المقاسة للزخوم الزاوية للحالات النووية الارضية توفر اختبار اكثر دقة لنموذج القشرة من ذلك الذي توفره الاعداد السحرية . ان النتائج العملية تدل على ان ترتيب مستويات الطاقة يكون كالاتي:- النوى الفردية البروتونات :

$(1S_{1/2})^{2}_{2}\ (1P_{3/2})^{4}\ (1P_{1/2})^{2}_{8}\ (1d_{5/2})^{6}\ (2S_{1/2})^{2}\ (1d_{3/2})^{4}_{20}\ (1f_{7/2})^{8}_{28}\ (2p_{3/2})^{4}$
$(1f_{5/2})^{6}\ (2p_{1/2})^{2}\ (1g_{9/2})^{10}_{50}\ \underline{(1g_{7/2})^{8}}\ (2d_{5/2})^{6}\ (1h_{11/2})^{12}\ (2d_{3/2})^{4}\ (3S_{1/2})^{2}_{82}$
$(1h_{9/2})^{10}\ (2f_{7/2})^{8}\ (3p_{3/2})^{4}$

2- النوى الفردية النيوترونات odd neutron nuclei :

$(1S_{1/2})^{2}_{2}\ (1p_{3/2})^{4}\ (1p_{1/2})^{2}{}_{8}\ (1d_{5/2})^{6}\ (2S_{1/2})^{2}\ (1d_{3/2})^{4}{}_{20}\ (1f^{7/2})^{8}{}_{28}\ (2p_{3/2})^{4}\ (1f_{5/2})^{6}$
$(2p_{1/2})^{2}\ (1g_{9/2})^{10}_{50}\ \underline{(2d_{5/2})^{6}}\ (1g_{7/2})^{8}\ (3S_{1/2})^{2}\ (2d_{3/2})^{4}\ (1h_{11/2})^{12}{}_{82}\ (2f_{7/2})^{8}$
$(1h_{9/2})^{10}\ (3p_{3/2})^{4}\ (2f_{5/2})^{6}\ (3p_{1/2})^{4}\ (1i_{13/2})^{14}{}_{126}\ (2g_{9/2})^{10}\ (3d_{5/2})^{6}\ (1i_{11/2})^{12}\ (2g_{7/2})^{8}$

ان أوطأ حالة في مستوي القشرة يجب ان تمتلئ الى حد (2j+1) من الجسيمات المتشابهة (أي ان كل مستوي يشغل ب (2J+1) من النيوكليونات) ووفق هذه العلاقة نحصل على $n^{L}J$ اما عدد الاشغال الكلي $2(2I+1)$ من النيوكليونات.

في حالة النوى الزوجية – الزوجية تكون البروتونات والنيوترونات على شكل ازواج لذلك فالزخوم البرمية والزخوم المدارية لهذه النويات تلغي بعضها البعض وهذه النتيجة تتفق مع المشاهدات العملية بأن الزخم الزاوي الكلي للنوى الزوجية - الزوجية = صفر .

تنبؤات نموذج القشرة: Prediction of shell model

بالرغم من فشل نموذج القشرة في حساب طاقة الربط النووية الا ان تنبؤاته وحساباته للزخم الزاوي الكلي للنوى وعزم رباعي الاقطاب لها وعمر النصف للحالات شبه المستقرة تتفق وبشكل جيد جدا مع النتائج العملية وكما يلي:

1- الزخم الزاوي الكلي للنوى : يتنبا النموذج بشكل جيد جدا الزخم الزاوي الكلي للنوى باعتبار ان النيوكليونات المتشابهة ترتبط مع بعضها ازواجا فالزخم الزاوي لنيوكليونين يساوي صفرا والزخم الزاوي الكلي لقشرة مغلقة يساوي صفر ايضا وهذه التنبؤات مفيدة بشكل خاص في تصنيف تحلل بيتا وتتفق مع النتائج العملية .

2- شبه الاستقرار Isomerism :شبه الاستقرار يعني وجود حالات تهيج عمر النصف لها كبيرا ويمكن قياسه وتسمى مثل هذه الحالات حالات شبه مستقرة حيث التحول او الانتقال الى الحالة الاقل تهيجا قليل الاحتمال فتبقى النواه متهيجة لمدة طويلة .يتنبا هذا النموذج بوجود حالات شبه مستقرة في النوى التي فيها قشرات غير ممتلئة اي النوى التي فيها Nاو Z او كلاهما قريب من الاعداد السحرية حيث ΔI يكون كبيرا ولا توجد حالات شبه مستقرة في النوى التي اها بضعة نيوكليونات خارج قشرة مغلقة حيث يتوقع ان يكون الفرق في الزخم الزاوي الكلي ΔI بين مستويات الطاقة المتجاورة قليلا وتتفق هذه التنبؤات مع النتائج العملية بشكل جيد.فمثلا نظائر الزينون $^{133}_{54}Xe_{79}$ $^{131}_{54}Xe_{77}$ $^{129}_{54}Xe_{75}$ $^{127}_{54}Xe_{73}$ $^{135}_{54}Xe_{81}$ فيها حالات شبه مستقرة بينما النظائر $^{139}_{54}Xe_{85}$ $^{137}_{54}Xe_{83}$فليس لها حالات شبه مستقرة

س\ كيف يفسر نموذج القشرة وجود حالات شبه مستقرة في بعض نظائر الزينون وعدم وجودها في النظائر الاخرى ؟

النماذج النووية الاخرى:

ان نموذج القشرة لم يأخذ بنظر الاعتبار خاصية التأثير الذي يشوه شكل النواة والناتج عن النيوكليونات الخارجية وتأثيرها على النيوكليونات الاخرى فلو تصورنا اننا قمنا باضافة نيوكليون واحد الى نواة ذات قشرة مغلقة فأن قيمة الزخم الزاوي المداري (l) لهذا النيوكليون ستكون كبيرة ولهذا فأن دالة موجته ستكون لها قيمة قصوى قريبا من نصف قطر النواة او بالمعنى الكلاسيكي فأننا نستطيع القول ان النيوكليون سيدور حول القلب الذي يكون القشرة المقفلة للنيوكليونات كما في الشكل:

التأثير المشوه للنيوكليون الاضافي على نواة مغلقة القشرة :

ان التفاعل القوي بين النيوكليونات والقلب سيؤدي الى تشويه شكل القلب حيث ان القلب سيؤثر بقوة مركزية على النيوكليون وكرد فعل لهذه القوة فأن قوة مركزية طاردة سوف تؤثر على القلب , اما اذا كان هنالك نيوكليونان خارج القشرة فأنهما سوف يتحركان في مدار واحد ولكن بأتجاهين متعاكسين بسبب تأثير الازدواج ولهذا فأن التشوه سوف يزداد وبإضافة عدد اكبر من النيوكليونات فأنه سوف يؤدي الى تشوه النواة بصورة دائمية مع ظهور تأثيرات مرافقة لذلك على المدارات ومناقشة هذا الموضوع يقع خارج نطاق المنهج الا انه من المفيد مناقشة نتيجة واحدة هي ان الجسيم الذي له محور تناظر في ميكانيك الكم كالبيضوي الدوار مثلا تكون له القابلية على الدوران حول محور عمودي على محور تناظره . ان طيف مستويات الطاقة لهذا الدوار هو ثابت الخواص وعلية فأن عددا كبيرا من النوى الزوجية – الزوجية قد اثبتت عمليا انها تعطي هذا الطيف فعلا وهذا يؤدي الى الاستنتاج ان النوى الدائمة التشوه موجودة بالتأكيد , ان من الممكن اشتقاق طيف الطاقة هذا بواسطة استخدام الحجج الكلاسيكية.

$$E=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m\omega^2R^2$$

اي ان الطاقة الحركية الدورانية هي :

$$E_{rot} = \frac{1}{2}\mathcal{J}\omega^2$$

حيث $\mathcal{J}$ هي عزم القصور الذاتي للجسيم حول محور الدوران و ω هي السرعة الزاوية للدوران ويمكن كتابة المعادلة اعلاه بدلالة الزخم :

$$L = \mathcal{J}\omega$$

$$E_{rot} = \frac{L^2}{2\mathcal{J}}$$

واذا انتقلنا من النموذج الكلاسيكي الى النموذج الكمي يجب ان نبدل L^2 ب:

$$L^2 = I(I+1)\hbar^2$$

حيث I هو عدد صحيح زوجي للنوى الزوجية الزوجية واقل قيمة لها هي الصفر

$$\therefore E_{rot} = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

ويمكننا مقارنة هذه العلاقة البسيطة مع النتائج العملية للطيف . ان الفرق يظهر عند طاقات تهيج عالية **ويعود السبب لان تردد الدوران الكلاسيكي (ω) يزداد بزيادة قيمة I** وبهذا فأن النواة سوف تتشوه قليلا بقوة طاردة مركزية اكبر وهذا سيؤدي الى زيادة عزم القصور الذاتي لها .

يظهر مما سبق ان نموذج القشرة ذات الجسيم الواحد يكون صحيحا بالقرب من القشرة المقفلة وكلما شذ عدد النيوكليونات عن الاعداد السحرية فأن تأثيرات تعاونية تبدأ بالظهور بين النيوكليونات وهذه يمكن اخذها بسهولة بنظر الاعتبار في النماذج التجميعية (Collective models) التي تحتوي في اساسها على الحركة الدورانية التي ذكرت وكذلك على الحركة الاهتزازية . ان التقدم النظري قد اثبت ان التأثيرات التجميعية يمكن الحصول عليها باجراء تحويرات على نموذج القشرة وفي هذه الحالة فان الجهد المستعمل في نموذج القشرة يجب ان يكون محتويا على الحدود التالية:

1- جهد كروي رئيسي

2- حد يمثل تفاعل البرم والمدار : وهو حد ذو مدى قصير جدا يحاول جعل النواة كروية ويعمل على ازدواج النيوكليونات .

3- حد طويل المدى يحاول تشويه النواة.

عزم رباعي القطب الكهربائي النووي: Nuclear Electric Quadrupole Moment

ينتج توزيع الشحنات والتيارات الكهربائية عزوما كهربائية ومغناطيسية متعددة القطبية تتحدد بواسطة (2^L). فعندما يكون (l=0) أي ان الحركة المدارية تساوي صفرا فان (2^0=1) وهذا يعني تكون مجال كهربائي أحادي القطبية (monopole) يعرف بالمجال الكولومي الناتج عن التوزيع الكروي المنتظم للشحنة الكهربائية في النواة. وعندما يكون (l=1) أي ان هناك حركة مدارية للشحنة الكهربائية في مدارات مغلقة ينتج عنها مجال مغناطيسي ثنائي القطبية (dipole). وعندما يكون (l=2) ينتج العزم الكهربائي رباعي القطب (Quadrupole) وهكذا.

ويعرف العزم الكهربائي رباعي القطب بانه الانحراف (Deviation) عن التوزيع الكروي المتناظر للشحنة الكهربائية داخل النواة (البروتونات) .

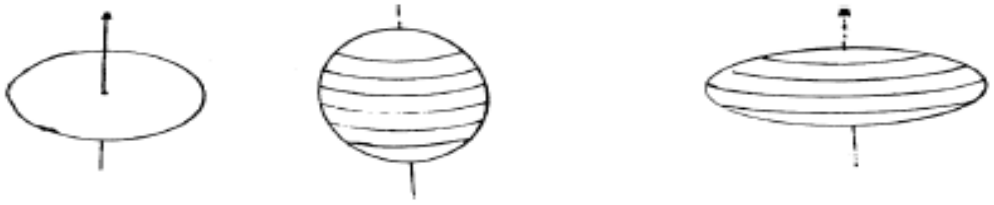
ان النوى المختلفة إما أن تكون نوى كروية (Spherical Nuclei) او نوى غير كروية وتسمى النوى المشوهة (Deformed Nuclei). ويكون توزيع الشحنة في النوى الكروية متناظراً كروياً، وتقع هذه النوى بالقرب من القشرات المغلقة التي تتحدد بالأعداد السحرية للبروتونات او النيوترونات (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126). لقد سميت هذه الأعداد بالأعداد السحرية لان النوى التي يكون فيها عدد البروتونات Z او عدد النيوترونات N مساويا لأحد هذه الأعداد تشكل قشرات مغلقة وتكون اكثر استقرارا وان طاقات الربط للنيوكليونات في هذه النوى تكون عالية وان هذه النوى يكون لها عدد كبير من النظائر المستقرة . ان العزم الكهربائي رباعي القطب في النوى الكروية يكون ذا قيمة صغيرة قد تصل إلى الصفر في النوى الزوجية – الزوجية ذات الأعداد السحرية . أما النوى المشوهة فتقع في وسط المسافة التي تتحدد بالقشرات المغلقة وتمتلك هذه النوى المشوهة عزوما كهربائية رباعية القطب ذوات قيم كبيرة وكلما ازداد التشوه ازدادت قيمة عزم رباعي القطب الكهربائي ويعطى العزم الكهربائي رباعي القطب بالعلاقة :

$$Q_0 = \frac{3}{\sqrt{5\pi}} R^2_{av}.Z\beta(1+0.16\beta)$$

اذ $R_{av} = R_0 A^{1/3}$ يمثل متوسط نصف قطر النواة و(R_0=1.4fm) وβ معلم التشوه ويعطى بالعلاقة:

$$\beta = \frac{4}{3}\sqrt{\frac{\pi}{5}}\left(\frac{\Delta R}{R_{av}}\right)$$

اذ ان ΔR=b-a ويمثل a شبه المحور الصغير (Semi-minor axis) في النواة المشوهة و b يمثل شبه المحور الكبير (Semi-major axis) .ففي النوى الكروية يكون a =b و عزم رباعي القطب الكهربائي مساويا للصفر(Q_0=0)، أما في النوى المشوهة فيكون العزم الكهربائي رباعي القطب موجبا (Q_0>0) إذا كان b>a وتأخذ النواة الشكل البيضوي المتطاول (Prolate Shape) . فيما يكون العزم الكهربائي رباعي القطب سالبا (Q_0<0) عندما يكون (b<a)



(Q_0<0) الشكل المفلطح (Q_0>0) الشكل المتطاول (Q_0=0)الشكل الكروي

(الشكل 3) : شكل النواة تبعا للعزم الكهربائي رباعي القطب

وعلية فالنوى التي تحتوي على N اوZ عدد سحري يكون لها عزم رباعي القطب يساوي صفر وعلية فأنها متناظرة . وظاهرة الاعداد السحرية لا يمكن تفسيرها الا بادخال تأثير التزاوج القوي بين (L,S) وعليه فأن نموذج القشرة يستطيع تفسير عدد كبير من الظواهر النووية بالإضافة الى الاعداد السحرية.

الفصل الثالث

التفاعلات النووية *(Nuclear interaction)*

التفاعلات النووية (Nuclear Reactions) :

في الفترة الواقعة بين 1919 عندما اعلن رذرفورد عن اكتشافه للتفاعل النووي الصناعي

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \longrightarrow ^{1}_{1}H + ^{17}_{8}O \quad ...(1)$$

وعام 1939 عندما اعلن نبأ اكتشاف الانشطار النووي من قبل(هان وستراسمان) من جهة ومايتنر وفريش من جهة اخرى (Hahn and strassman, Meitner and Frisch) تم التعرف على جميع العمليات النووية التي يمكن اثارتها بقصف نووي ذو طاقة بحدود (10 MeV) ومنذ ذلك التاريخ فأن طاقة المقذوفات قد زيدت الى حوالي (10 GeV) حيث تم اكتشاف عدد كبير من التفاعلات النووية.

من خلال دراسة النشاط الاشعاعي امكن الحصول على معلومات عديدة تتعلق بالبناء النووي وطريقة اخرى للحصول على هذه المعلومات بواسطة دراسة تأثير قصف هذف نووي بسيل من الجسيمات النووية او اشعة كاما ومن ثم دراسة تأثير القصف على تركيب النوى وتسمى هذه العملية (بالتفاعل النووي) ويعرف بأنه عملية يتغير خلالها تركيب او طاقة النواة الهدف وتتم بقصف النواة بجسيم نووي او اشعة كاما الهدف منها هو دراسة الاطياف النووية , ويكون على نوعين اندماج او انشطار نووي.

ان النظريات التفصيلية للتفاعلات النووية قد تم وضعها اعتمادا على نموذجين يبدوان متناقضين للتركيب النووي هما نموذج قطرة السائل ونموذج القشرة.

ان احدى النظريات تفترض ان المقذوفة النووية التي ترتطم بالنواة سوف تتفاعل بشدة مع جميع النيوكلونات الموجودة فيها وتتشارك معها في الطاقة التي تحملها بحيث تتم هذه العملية بسرعة وان النواة الجديدة المتكونة عن هذه العملية سوف تتحلل بطريقة لا تعتمد على الكيفية التي تم انتاجها بواسطتها.

اما النظريات التي تعتمد على نموذج القشرة فأنها تفترض بأن النيوكليون الساقط سوف يتفاعل مع النواة عن طريق تفاعله مع جهد نموذج القشرة وان احتمال امتصاصه لتكوين نواة مركبة هو قليل . ان هذين الاتجاهين في دراسة التفاعلات النووية يمكن توحيدها في نظرية واحدة ايضا هي ان اي تفاعل نووي حسب نظرية وايسكوف يمكن ان ينجز على مراحل عديدة متسلسلة .

افترض (Feshbach) ان الخطوة الاولى في عملية الامتصاص هي عبارة عن عملية تصادم جسمين ببعضهما او بمعنى اخر فأن الجسيم الساقط سوف يتفاعل مع نيوكليون واحد في

النواة ويؤدي الى رفعه الى مستوي طاقة خالي اعلى من مستواه الاصلي فيسبب خروج هذا النيوكلون خارج النواة ويسمى هذا التفاعل **بالتفاعل المباشر**.

ان الحالة الاكثر تعقيدا هي حالة عدم خروج النيوكليون المتصادم اعلاه خارج النواة . ان النيوكليون الساقط او النيوكليون المتصادم معه سوف يتفاعل مع نيوكليون اخر في النواة وبهذا يرفعه الى مستوي اخر خالي . ان هذه العملية تجعل النواة في حالة **تهيج جماعية**. ويمكن في هذه الحالة خروج احد النيوكليونات من النواة اما في حالة عدم خروج احد النيوكليونات الثلاث خارج النواة فان هذه النيوكليونات سوف تتفاعل مع بقية النيوكليونات الموجودة في النواة الى ان تصل النواة الى حالة يتم فيها اقتسام الطاقة بين جميع النيوكليونات الموجودة كما هي الحال في النواة المركبة.

تطبيق قوانين الحفظ:

نفرض ان نتيجة القصف هو دخول جسيم نووي (a) في النواة (X) وحصيلة التفاعل هو خروج جسيم نووي (b) تاركا النواة (Y) ويمكن كتابة هذا التفاعل كما يلي :

$$a + X \longrightarrow b + Y \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

حيث (a) هو الجسيم القاصف او القذيفة. و (X) تسمى نواة الهدف.

(b)هو ناتج التفاعل الخفيف ويكون اما بروتون او نيوترون او ديترون او جسيم الفا اوكاما

(Y)هو ناتج التفاعل الثقيل وهو النواة الناتجة بعد التفاعل ويمكن التعبير عن المعادلة (2) بطريقة مختصرة بالرمز :

$$X(a,b)Y) \quad \ldots\ldots(3)$$

حيث تكون احدى نواتج التفاعل جسيم خفيف عادة والاخر جسيم اثقل *وذلك لان طاقة ارتباط الجسيمات بالنواة تؤثر على سير التفاعل*. ان كتلة b و Y في بعض الاحيان تكونان متقاربتين كما هي الحالة في تفاعلات الانشطار النووي(Spallation reaction or fission) او قد تكونان متساويتين.اما اذا كانت b تمثل فوتون اشعة كاما فاننا في هذه الحالة نتحدث عما يسمى بتفاعل الاقتناص(Capture reaction)حيث تكون Y هي النواة المركبة.

وفي اغلب الاحيان التي يكون فيها عدد نواتج التفاعل اكثر من جسيمين يكون من الممكن وصف التفاعل بانه عبارة عن سلسلة سريعة لعدة تفاعلات ينتج عن كل منها جسيمان اي ان:

$$a+X \rightarrow b_1 + Y_1$$
$$Y_1 \rightarrow b_2 + Y_2$$
$$Y_2 \rightarrow b_3 + Y_3 \quad \ldots\ldots(4)$$

ان التفاعل في المعادلة (1)هو مثال واضح للتفاعل في المعادلة (2) ويمكن ملاحظة ان عدد البروتونات او النيوترونات يبقى ثابتا قبل وبعد التفاعل.وعليه يمكن تطبيق قانون حفظ الزخم الخطي لحساب طاقة التفاعل Q.

قانون حفظ الزخم الخطي_ وحساب طاقة التفاعل:

في اي تفاعل نووي يجب ان يحقق قانونا حفظ الكتلة والشحنة اي ان عدد البروتونات والنيوترونات يجب ان تكون متساوية في طرفي معادلة التفاعل .وبما ان عدد البروتونات يبقى ثابتا فان جميع الكتل يمكن ان تكتب على اساس انها تمثل الكتل الذرية وعلى اعتبار ان الفروق في طاقات ارتباط الالكترونات الذرية هي في حدود eV بحيث يمكن اهمالها وعليه فان تطبيق قانون حفظ الطاقة على التفاعل (a+X=b+Y) بدلالة الكتل الذرية يمكن كتابته بالشكل :

$$M_a c^2 + T_a + M_x c^2 = M_b c^2 + T_b + M_y c^2 + T_y \quad .....(5)$$

حيث T هي الطاقة الحركية لكل من a, b,Yبالنسبة لاحداثيات المختبر وكتل كل من a, X هي في الحالة الارضية و (Mc^2) تمثل مكافئ الطاقة الكلية للكتلة.

يعرف الفيض الطاقي للتفاعل النووي(Q)بانه الفرق في الطاقة الحركية قبل وبعد التفاعل ويكتب :

$$Q = T_b + T_y - T_a \quad .....(6)$$

$$Q = [M_a + M_x - (M_b + M_y)] c^2 \quad .....(7)$$

فأذا كانت قيمة Q موجبة فالتفاعل النووي ذو فيض طاقي اي يعطي طاقة ويسمى في هذه الحالة (exoergic) واذا كانت Q سالبة فيكون ذو امتصاص طاقي اي سوف ياخذ طاقة ويسمى(endoergic) ولايمكن حدوث تفاعل نووي الا عندما تنطلق كل من b, Y بطاقة موجبة اي ان:

$$T_b + T_y \geq 0$$

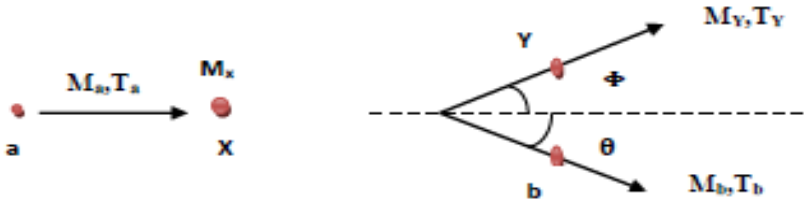
$$Q + T_a \geq 0 \quad .....(8)$$

ومع ان هذا الشرط هو ضروري لحدوث اي تفاعل الا انه يبقى غير كاف.ان قيمة Q بالنسبة لاي تفاعل هي كمية مهمة ويمكن ايجادها بواسطة الطيف الكتلي للجسيمات المشتركة في التفاعل كما في المعادلة(7) او بقياس الطاقات الحركية معادلة(6)وكالاتي:

في الحالة العامة للتفاعل النووي ينطلق الجسيم b بأتجاه يصنع زاوية θ مع اتجاه القذيفة a وبأستخدام قانوني حفظ الزخم والطاقة من الشكل ادناه نحصل :

$$M_a v_a = M_Y v_Y \cos\varphi + M_b v_b \cos\theta$$

$$0 = M_Y v_Y \sin\varphi - M_b v_b \sin\theta \quad .....(9)$$



شكل يمثل التفاعل النووي بالنظام المختبري

وللتخلص من الزاوية φ فاننا نعوض عن $Mv=(2MT)^{1/2}$ لكل من الجسيمات ونعيد كتابة المعادلات بالشكل:

$$(M_aT_a)^{1/2} - (M_bT_b)^{1/2}\cos\theta = (M_YT_Y)^{1/2}\cos\varphi$$

$$(M_bT_b)^{1/2}\sin\theta = (M_YT_Y)^{1/2}\sin\varphi \qquad \text{.....(10)}$$

وبتربيع المعادلتين وجمع النواتج نحصل على :

$$M_aT_a - 2(M_aT_a\,M_bT_b)^{1/2}\cos\theta + M_bT_b = M_YT_Y \quad \text{.....(11)}$$

وباستخدام المعادلة (6) فاننا يمكننا التخلص من T_Y لنحصل على قيمة Q:

$$Q = T_b\left(1+\frac{M_b}{M_Y}\right) - T_a\left(1-\frac{M_a}{M_Y}\right) - \frac{2}{M_Y}(M_aT_aM_bT_b)^{\frac{1}{2}}\cos\theta$$

وهذه المعادلة تسمى بمعادلة Q(Q equation).

ان الحالات خاصة المهمة لهذه المعادلة هي عندما θ=90 والحالة التي تكون فيها Ta=0(اي عندما تكون الطاقة الحركية للقذيفة =0). ان الحالة الاخيرة ممكنه فقط عند استخدام النيوترونات كقذائف لان *النيوترون لا يمتلك شحنة لذلك لايعترض مع جهد كولوم الكهروستاتيكي في النواة* . اما بالنسبة للقذائف المشحونة فلا يمكن ان يحدث تفاعل نووي في حالة (Ta = 0) لان حاجز كولوم يمنع دخول جسيمات مشحونة طاقتها الحركية مساوية للصفر الى النواة .

أنواع التفاعلات النووية (Types of nuclear Reactions) :

يمكن تصنيف التفاعلات النووية اعتمادا على الجسيم القاصف او طاقة القصف او نواة الهدف او نواتج التفاعل فيمكننا تصنيف التفاعل وفق الجسيم القاصف الى :

1 – تفاعلات الجسيمات المشحونة (charged – Particle reactions) والناتجة عن البروتونات (P) وديترونات (d) وجسيم الفا (α) و(C^{12}) و(O^{16}) .ويسمى التفاعل الثاني والثالث بتفاعل الايونات الثقيلة.

2 – تفاعلات النيوترونات (Neutron reaction) .

3 – التفاعلات النووية الضوئية (Photo nuclear reactions) الناتجة عن اشعة كاما.

4 – التفاعلات المحفزة بالالكترونات (Electron – induced reactions) .

كما يمكن تصنيف التفاعلات النووية بالاعتماد على طاقة القصف وكما يلي :

1 – الطاقات الحرارية (Thermal energies $\approx \frac{1}{40}$ eV).

2 – الطاقات فوق الحرارية (Epi Thermal energies ≈1eV) .

3 – طاقات النيوترونات البطيئة (Slow – neutron energies ≈ 1keV) .

4 – طاقات النيوترونات السريعة (Fast – neutron energies ≈ 0.1-10MeV).

5 – الطاقات الواطئة للجسيمات المشحونة (Low – energy charged Partiches ≈0.1 – 10MeV) .

6 – الطاقات العالية (High – energy ≈ 10 – 100 MeV) .

أما التصنيف وفق نواة الهدف :

1 – النواة الخفيفة (Light nuclei , if A ≤ 40) .

2 – النوى المتوسطة (Medium- weight nuclei , if 40<A <150).

3 – النوى الثقيلة (Heavy nuclei , if A ≥ 150).

اليات التفاعلات النووية:

يمكن تقسيم التفاعلات النووية من حيث كيفية(الية – ميكانيكية) الحدوث التفاعل الى قسمين رئيسين-:

تفاعلات النواة المركبة

التفاعلات النووية المباشرة

التفاعلات النووية ذات النواة المركبة:

من خلال مراقبة نواتج التفاعلات النووية المختلفة مع تغير مدخلاتها من انوية الهدف والجسيم الساقط وكذلك الطاقة الحركية وجد ان هناك العديد من التفاعلات المشتركة في المدخلات ولكن النواتج مختلفة مما جعل العالم(نيلز بور) يقترح في عام 1936 نظرية النواة المركبة لتفسير كيفية حدوث التفاعلات وتقديم تفسير للنواتج المتباينة للتفاعلات المشتركة في المدخلات.

$$X + a \longrightarrow Y + b$$

$$X(a,b)Y$$

وقد اعتمد نيلز بور على فرضيتين لتفسير مايحدث في التفاعل النووي

1-عندما يقترب المقذوف من نواة الهدف يندمج في مكوناتها لتكوين نواة مركبة غير مستقرة.

2-تضحمل النواة المركبة بعد فترة وجيزة من الزمن وذلك باصدار جسيم او جسيمات اواشعاعات وتتحول بعد ذلك الى النواة الناتجة في نهاية التفاعل.

س /كم تبلغ الفترة الزمنية بين تكوين النواة المركبة وعملية الاضمحلال ؟

متوسط الفترة الزمنية حوالي فيمتو ثانية

س /متى تكونت النواة المركبة ؟

الجواب : نفرض ان الجسيم الساقط هو النيوترون ذو طاقة 1 MeV وسقط على نواة كبيرة الحجم ذات نصف قطر 10^{-14} m أوجد الزمن المستغرق لعبور النيوترون للنواة؟

$$d = 2R = 2R_o A^{1/3} = 2 \times 10^{-14}$$

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \Rightarrow 1 \times 1.6 \times 10^{-13} = \frac{1}{2} \times 1.67 \times 10^{-27} \times v^2$$

$$V = 1.4 \times 10^7 m/sec$$

$$t = \frac{d}{V} = \frac{2 \times 10^{-14}}{1.4 \times 10^7} = 1.4 \times 10^{-21}\ sec$$ زمن عبور الجسيم للنواة

هذا هو الزمن المستغرق لعبور النواة يسمى الزمن النووي الطبيعي.

ملاحظة : نلاحظ ان زمن الاضمحلال يحدث بعد فترة صغيرة جدا في مقاييسنا ولكنها طويلة جدا اذا ما قورنت بزمن عبور الجسيم للنواة الهدف (الزمن النووي الطبيعي) وهكذا فأن النواة المتكونة بهذه الطريقة (النواة المركبة)وبعد هذه الفترة الزمنية الطويلة جدا قد نُسيت كيفية التكوين واصبحت ذات سمات اخرى طبقاً للظروف البيئية الفيزيائية المحيط بها ومن ثم فأن النواتج عن هذه النواة ليست بالضرورة ان تكون واحدة في جميع الحالات أي بغض النظر عن الطريقة التي تكونت بها تلك النواة المركبة.

مثال : عند قذف نواة الالمنيوم بالبروتونات المعجلة تكون نواة مركبة.

$$^{27}_{13}AL + ^{1}_{1}P \longrightarrow \begin{Bmatrix} ^{24}_{12}Mg + ^{4}_{2}He \\ ^{27}_{14}Si + ^{1}_{0}n \\ ^{27}_{13}li + \gamma \end{Bmatrix}$$

س /ما هو سبب اثارة نواة الهدف بعد دخول جسيم القذيفة ؟

الجواب : نفترض ان انوية الهدف جميعها مستقرة قبل اصطدام القذيفة بها , الاستقرار يعني ان طاقة الترابط النووي كافية وتمنع تحلل النواة في المستقبل القريب او البعيد يعني $\lambda = 0$ و$t_{1/2}=\infty$.

عند دخول القذيفة للنواة يتزايد مقدار الطاقة الداخلية للنواة المركبة الناتجة بمقدار يتكون من جزئيين:

- الطاقة الحركية للجسيم الساقط.
- طاقة ربط النواة للقذيفة.

هذا المقدار من الزيادة في الطاقة الداخلية للنواة كافي في جميع حالات الاثارة لنواة الجديدة وان كان هذا يحدث عند اندماج نيوترون مع نواة فأنه بالاحرى يحدث عند دخول بروتون اليها.

زمن العبور (زمن اختراقTransit Time)

زمن عبور النيوترون للنواة تقريبا حوالي 10^{-21} sec ويحدث اضمحلال لنواة بعد 10^{-15} sec أي ان الاضمحلال يحدث بعد فترة زمنية تكافئ مليون مرة من زمن اختراق النيوترون للنواة في هذه الزمنية الصغيرة جدا بمقاسينا والطويلة جدا بمقياس الزمن النووي الطبيعي.

حالة شبه الاستقرار لا تعني ان النواة المركبة مستقرة ولكن يحدث تحولات داخلية مستقرة من اعادة توزيع الطاقة الزائدة على مكوناتها وبتالي فأن نيكلونات النواة المركبة لا تمتلك جميعها نفس مقدار الطاقة ولذلك تسمى مستويات الطاقة التي تؤدي الى اصدار(انبعاث) نيكلون او اكثر من النواة المركبة **بمستويات الطاقة الافتراضية**. وتسمى مستويات الطاقة التي تؤدي الى انبعاث اشعة جاما **بالمستويات المرتبطة**. اشعة جاما لا تنطلق الا بعد انبعاث الجسيمات أي انها تكون المرحلة الاخيرة من عمر النواة المركبة وهكذا نستنتج ان-:

1- عدد المستويات الافتراضية كبير جداً.

2- احتمال حدوث التفاعل النووي بين الجسيم القذيفة والنواة الهدف يعتمد على مجموع طاقتي القذيفة والنواة المركبة علاوة على طبيعتهما الفيزيائية وحيث ان قيمة احتمالية لها حد ادنى وحد اقصى من الطاقة فأن اقصى حدوث التفاعل النووي يكافئ حدوث الرنين النووي.

3- احتمال تكون النواة المركبة يتزايد كلما اقترب مجموع طاقتي القذيفة والنواة الهدف من طاقة الاثارة لاحد المستويات الافتراضية فأذا تساوى مجموع الطاقة مع مقدار طاقة المستوى الافتراضي يحدث رنين نووي ويصل احتمال تكون النواة المركبة الى ذروتهِ أي ان المقطع العرضي للتفاعل يكون اكبر مايمكن وعلى خلاف ذلك كلما ابتعد مجموع الطاقة عن طاقة احد المستويات الافتراضية أي كلما انخفض وتضائل احتمال حدوث التفاعل وتكون النواة المركبة.

4- سواء كانت النواة المثارة عند مستوى الطاقة الافتراضي او مرتبطة فأنها سوف تضمحل بعد فترة زمنية.

التفاعلات النووية المباشرة:

الزمن النووي : هو زمن عبور القذيفة نواة الهدف , لاحظنا ان عمر النواة المركبة اطول بكثير من الزمن النووي الطبيعي ولذلك تختلف نتائج التفاعل المختلفة اذا كانت طاقة القذيفة عالية جدا فأن زمن حدوث التفاعل مع مكونات النواة يتضائل وهذا يؤثر على طبيعة نتائج التفاعل . من ناحية اخرى اذا كانت القذيفة مكونة من عدة نيكلونات وان طاقة الترابط النووي لها صغيرة فأن احتمال تفكك القذيفة نتيجة التفاعل تتزايد مما يؤثر ايضا على نواتج التفاعل.

ويمكن تقسيم التفاعلات النووية المباشرة

(1) التشتت غير المرن .

(2) تشتت تبادل الشحنات .

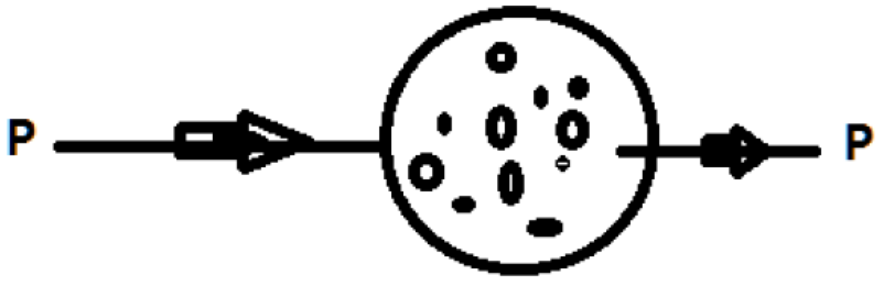
(3) تفاعلات الالتقاط .

(4) تفاعلات الانخلاع .

(5) تفاعلات تنتج عن دوران وتذبذب نواة الهدف .

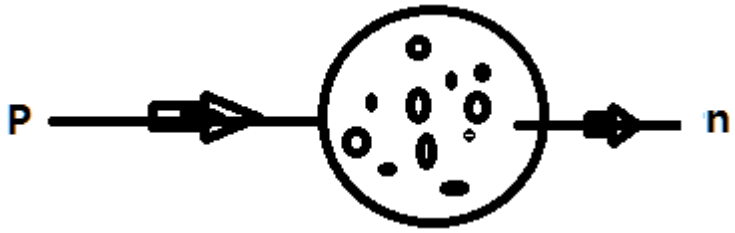
التشتت غير المرن(P,P) ، (n,n)

يحدث هذا النوع من التشتت اذا كانت قذيفة النيكلون ذو طاقة عالية جدا وعند اصطدامه لاحد مكونات النواة يفقد جزء من طاقته وينطلق بالجزء المتبقي . احتمال حدوث هذا النوع من التفاعلات النووية يتزايد كلما زادت طاقة القذيفة عن 50MeV والشكل التالي يوضح التفاعل.



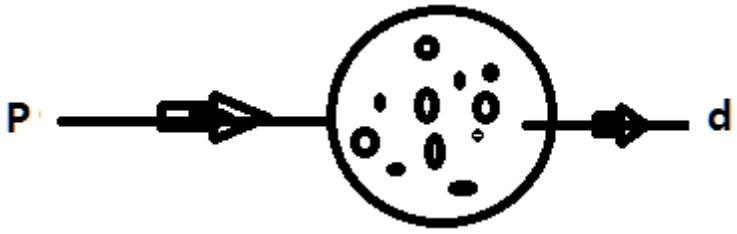
تشتت تبادل الشحنات(تطاير تبادل الشحنات) (n,P) (P,n)

في هذا النوع من التفاعلات لا يخرج الجسيم الساقط ولكن بدلا من ذلك يخرج جسيم اخر من النواة فأذا سقط نيوترون خرج بروتون واذا سقط بروتون خرج نيوترون وكأن النيكلون الساقط قد تبادل احد الميزونات مع النواة وخرج بخصائص جديدة.



تفاعلات الالتقاط (P,d) ، (n,d)

في هذا النوع من التفاعلات يلتقط النيكلون الساقط على النواة نيكلون مغاير له من سطح النواة ويخرجان معاً كنواة ديوترون . تحدث عملية الالتقاط غالبا على سطح النواة طاقة ترابط النيكلون الملتقط اقل من 2.226 MeV



تفاعلات الانخلاع (d,n) (d,P)

على نقيض (عكس) تفاعلات الالتقاط فأن الجسيم الساقط الديوترون وحيث ان طاقة الترابط النووي له ضعيفة فأن اصطدام الديوترون بنواة الهدف يجعله يفقد احد مكوناته بينما يستمرالنيكلون الاخر في طريقة كناتج للتفاعل وهذا يعني ان طاقة ترابط احد نيكلونات الديوترون مع نواة الهدف تكون 2.226MeV وهي طاقة الترابط في نواة القذيفة.

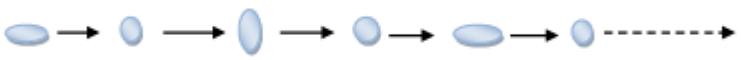
تفاعلات تذبذب ودوران نواة الهدف

في هذا النوع من التفاعلات لا يخترق الجسيم الساقط النواة بل يقترب منها فقط ونتيجة لذلك يحدث رد فعل في نواة الهدف كحدوث ذبذبة او دوران، فمثلا عندما يقترب بروتون او جسيم الفا من النواة ولكن معامل التصادم اكبر من نصف قطر نواة الهدف او ان البروتون ذو طاقة قليلة ومعامل التصادم اقل من نصف قطر نواة الهدف في هذه الحالات يتفاعل المجال الكهربائي للجسيم الساقط مع المجال الكهربائي لنواة الهدف مما يدفعها بعيدا عن موضعها الاصلي ثم تعود اليه بعد ابتعاد القذيفة او يحدث للنواة الهدف دوران تحت تأثير عدم تجانس المجال الكهربائي في المسافة الفاصلة بينهما وبين القذ يفة مع تغير الموضع الفراغي لعدم التجانس هذا مع تحرك القذيفة في طريقها مبتعدة عن نواة الهدف.

الانشطار النووي Nuclear fission :

في سنة 1939 اكتشف هان وسترا سمانHahn and strassman طريقة جديدة لانتاج العناصر القلوية بواسطة تشعيع اليورانيوم بالنيوترونات. ولتفسير هذه الظاهرة اقترح ماينزMaines وفريشFresh بأن عملية امتصاص النيوترونات من قبل اليورانيوم تجعل نواة اليورانيوم بحالة متهيجة جدا تؤدي الى شطرها الى شظيتين لهما كتلتين متقا ربتين.

يعتبر الانشطار النووي نوع اخر من انواع التفاعلات النووية ويمكن تحليله بموجب نظرية قطرة السائل ، ففي هذا التفاعل تنشطر نواة ثقيلة الى نواتين خفيفتين وللمقارنة نجد انه عند تهيج قطرة سائل الى درجة كافية فأنها تتذبذب بأشكال مختلفة حيث تتقل وتنبسط وتأخذ الاشكال التالية بالتتابع وهي الشكل البيضاوي الافقي ثم الكروي ثم البيضاوي العمودي ثم الكروي ثم البيضاوي الافقي مرة اخرى وهكذا:

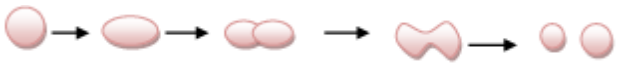


ان القوة المحافظة للشد السطحي تحاول دائما اعادة الشكل الكروي للقطرة ولكن استمرا رية حركة الجزيئة تجعلها تجتاز الشكل الكروي المنتظم وتتخذ الشكل المشوه المعاكس .عند اعتبار النوى تتصرف كالقطرة السائلة لها شد سطحي فأنها سوف تتذبذب في حالة التهيج مثل القطرة السائلة وكذلك فأن هذه النوى تتعرض

الى قوة ممزقة بعيدة المدى ناتجة من قوة التنافرالكهروستاتيكي بين البروتونات داخل النواة تحاول تمزيق النواة.

عندما تتشوه النواة عن الشكل الكروي فأن القوة المحافظة ذات المدى القصير للشد السطحي يجب ان تتصدى للقوة التنافرية ذات المدى البعيد وكذلك للعزم القصوري لمادة النواة فأذا كانت درجة التشوه صغيرة فأن قوة الشد السطحي ستكون قادرة على الاثتنين وبهذه الحالة تتذبذب النواة رأسياً وافقيا وتفقد اخيراً طاقتها المتهيجة على شكل اشعة جاما.

اما اذا كانت درجة التشويه عالية جدا فسوف لايكون بمقدور قوة الشد السطحي ان تعيد المجموعات البروتونية المنفصلة عن بعضها بمدى بعيد الى وضعها الاصلي وتكون النتيجة انقسام النواة لشطرين وتدعى النواتين الجديدتين الناتجتين من الانشطار بالشظايا . ان الشظيتين تكون على العموم غير متساويتين.



الانشطار النووي استنادا الى نموذج القطرة السائلة

تمتلك النوى الثقيلة نسبة النيوترونات الى البروتونات اكبر من النوى الخفيفة , اي انها تحتوي على زيادة في عدد النيوترونات ولاجل تخفيض هذه النسبة فأن نوى الانشطار تبعث3→2 نيوترون حال تكوينها وتعقبها انطلاق جسيمات بيتا حتى تصل الى درجة الاستقرار. ان الانشطار النو وي يحدث عندما تمتص النواة الثقيلة طاقة تهيج كافية بحدود5 MeV تجعلها تتذبذب بعنف. ان بعض نوى معينة بالاخص $_{92}U^{235}$ بمجرد امتصاصها نيوترون اضافي واحد فأنها تتذبذب بشدة الى درجة تؤدي الى انقسامها الى شطرين ونوى اخرى مثل ($_{92}U^{238}$) تحتاج الى طاقة تهيج اكبر من الطاقة الرابطة المتحررة عند عملية امتصاص نيوترون اضافي واحد لاجل الانقسام ويحدث الانقسام فقط عندما تقصف بنيوترونات سريعة تزيد طاقتها الحركية على (1MeV) .

الفصل الرابع

المعجلات النووية

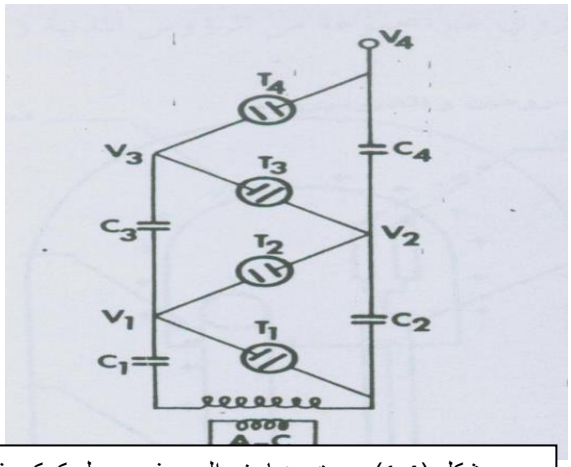
المعجلات النووية (المسرعات النووية) هي الأجهزة التي تستخدم لتسريع الجسيمات النووية المشحونة لإكسابها الطاقة الكافية لإجراء العمليات أو التفاعلات النووية المطلوبة . وقد كان لاختراع المعجلات النووية أثر كبير في تقدم الفيزياء النووية ، حيث مكنت هذه المعجلات الباحثين من إجراء تفاعلات نووية تحتاج إلى جسيمات متسارعة بطاقة عالية لاستخدامها كقذائف في تلك التفاعلات . وقد كان التحكم في طاقة الجسيم القذيفية قبل ذلك محدوداً، إذ كانت العناصر المشعة طبيعيا هي المصدر الوحيد لهذه القذائف كما هو الحال في أول تفاعل نووي أجراه رذرفورد ، حيث عرض أنوية الهدف إلى جسيمات ألفا المنبعثة من مادة مشعة طبيعيا . و برغم أن كثير من الاكتشافات الهامة تم الوصول إليها عن طريق تفاعلات قذائفها ناتجةعن النشاط النووي ، فإن الحاجة إلى وسيلة صناعية لتسريع الجسيمات النووية المشحونة للتحكم في طاقتها و شدتها واتجاهها بقيت ماسة من أجل التوسع في الأبحاث النووية التي كشفت فيما بعد الكثير من الغموض الذي كان يحيط بهذا العلم ، و سنتعرض في هذا الباب إن شاء الله إلى أهم هذه المعجلات ، و أشهرها .

معجل كو كروفت - والتون Cockroft- Walton accelerator

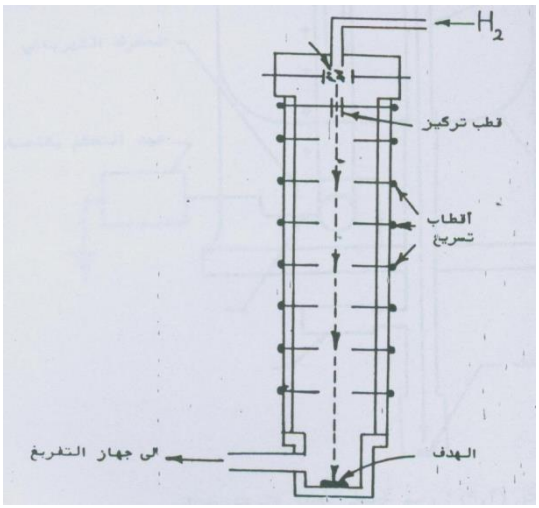
من أشهر طرق تسريع الجسيمات المشحونة تطبيق فرق جهد عال بين مصدر الشحنات وبين قطب مناسب بحيث يكون اشارة الجهد عند ذلك القطب مخالفة لشحنة الجسيم . و يعتبر السلك الساخن مصدر للإلكترونات ، فى حين تعتبر أنبوبة التفريغ الغازي التي تحوي الهيدروجين أو الديوتيريوم أو الهيليوم مصدرا للبروتونات أو الديوترونات أو أشعة الفا على الترتيب ، حيث تخرج هذه الجسيمات من ثقب صغير لتتسارع نحو القطب الآخر ، وبرغم أن مبدأ تسريع الجسيمات المشحونة بهذه الطريقة كان معروفا منذ فترة طويلة ، إلا أن العقبة الكبرى كانت في الحصول على فرق جهد عال جدا (أكثر من 500 كيلو فولت مثلا) لتسريع الجسيمات حتى الدرجة الكافية لاحداث التفاعل . هذا ، وقد تمكن كو كروفت ووالتون من تصميم دائرة كهربائية باستخدام الصممات الثنائية (الوصلات الثنائية) و المكثفات .و تتكون الدائرة التي استخداماها من عدة وحدات مماثلة للشكل (4.1) حيث تقوم كل وحدة من هذه الوحدات من مضاعفة فرق الجهد المطبق على المدخل. وقد تمكن هذا العالمان من الحصول على فرق جهد قيمته 700 كيلو فولت بهذه الطريقة لإستخدامه لتسريع شعاع من البروتونات شدته 10 ميكرو أمبير. وقد كان الأنبوب المستخدمه في هذه التجربة هو أنبوب التسريع المبين في الشكل (4.2) . وكما هو واضح في الشكل فإن غاز الهيدروجين ينبعث من فتحة ثقب صغير في أعلى أنبوب التسريع بعد تفريغ الأنبوب بدرجة كافية عن طريق مفرغة

الهواء في قعر الأنبوب . و يتم تأيين ذرات الهيدروجين و توليد أيونات الهيدروجين الموجبة (بروتونات) عن طريق التفريغ الكهربائي ، وبتطبيق فرق الجهد الكهربائي العالي على الأقطاب الكهربائية المحيطة بالأنبوب بحيث يتزايد الجهد على القطاب تدريجيا كلما كلما أقتربت من الهدف ، ونتيجة لوجود أقطاب التركيز focus electrodes فمن الممكن تسريع تيار من البروتونات باتجاه الهدف ، و إجراء التفاعل النووي المطلوب . ولقد كان أول تفاعلا نوويا تم إجراؤه لهذه الطريقة هو التفاعل :

$$^{7}_{4}Li+^{1}_{1}H\rightarrow^{4}_{2}He+^{4}_{2}He+Q$$



شكل (1.4) وحدة مضاعف الجهد فى معجل كوكروفت



شكل (2.4) انبوب التسريع لمعجل والتون
صمامات ثنائيةT مكثفات,Cحيث

وقد وجد عند حساب فرق الكتل لهذا التفاعل أن قيمة Qتساوي 17.347م أف . وقد قاس كو كروفت ووالتون طاقة جسيمات ألفا عندما كانت طاقة البروتونات 440 كيلو الكترون فولت فوجدها تساوي 8.8MeV ، و هذا يوافق القيمة المتوقعة من هذا التفاعل و التي يمكن الحصول عليها من المعادلة .

$$E_{\alpha}=(Q+E_{p})/2=(17.35+0.44)/2=8.8MeV \qquad (4.2)$$

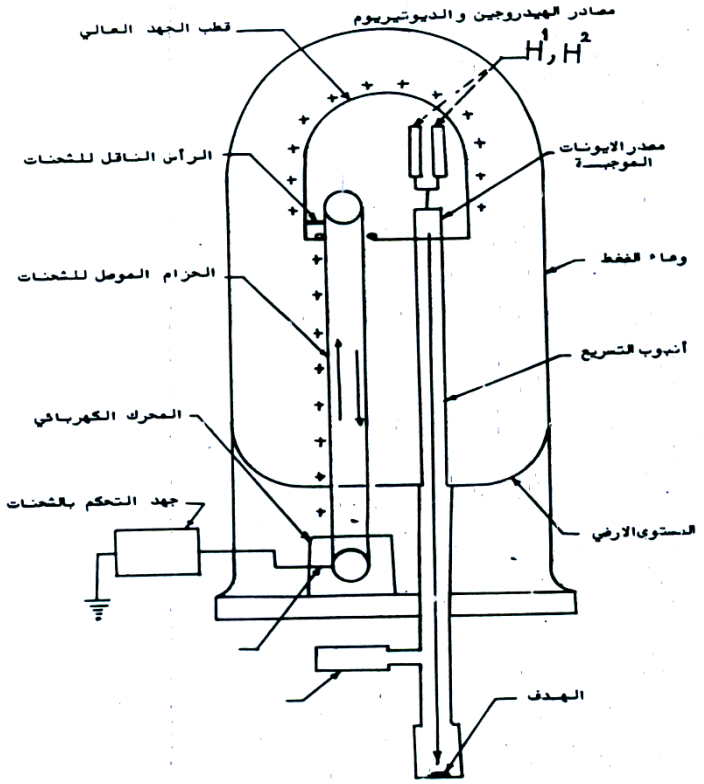
وقد كان نجاح كو كروفت ووالتونفي إجراء هذا التفاعل عن طريق تسريع الجسيم القذيفة صناعيا نقطة البداية للبحث و التطوير في مجال المسرعات النووية .

معجل فان دي جراف Van de Graff accelerator

يعتمد تصميم معجل فان دي جراف على المبدأ الفزيائي في أن الشحنة الكهربائية الساكنة لجسيم معدني مجوف تستقر دائما على السطح الخارجي للجسيم . فإذا وضع جسم مشحون في تماس مع المقطع الداخلي لجسم مجوف معدني فإن جميع الشحنة تنتقل الي السطح الخارجي بغض النظر عن جهة كل منهما . لذلك فانه باستثناء الصعوبات الناشئة عن تسرب الشحنات السطوح العالية الجهد نتيجة العازلية المحدودة للوسط المحيط بالجسم المشحون ، فإنه من الممكن نظريا رفع جهد السطح الخارجي إلى أية قيمة مطلوبة إذا تم تزويد السطح الخارجي بالشحنات باستمرار . ولكن يلاحظ عمليا أن أعلى قيمة يمكن رفع جهد السطح الخارجي إليها هي التي يصبح عندها معدل تسرب الشحنات مساويا لمعدل زيادة الشحنات على السطح .

ويمثل الشكل (4.3) رسما تخطيطيا لمعجل فان دي جراف لتسريع جسيمات نووية موجبة ، ويمكن شرح عمل هذا المعجل كالتالي : تتولد الشحنات اللكهربائية الموجبة نتيجة التأين الذي يحدث على مقربة من بعض الرؤوس المدببة ذات الجهد الكهربائي العالي (10 آلاف فولت تقريبا) والتي تقع مقربة من البكرة الدنيا التي تحرك الحزام العازل . و نتيجة لذلك ، فإن الشحنات الموجبة تعلق بالحزام المتحرك إلى الأعلى .

و عند البكرة العليا تنتقل الشحنات الموجبة العالقة بالحزام العازل إلى القطب المعدني نصف الكروي عبر مجموعة من الرؤوس المدببة (مثل الفرشاة المعدنية) ثم تتجمع علىالسطح الخارجي لذلك القطب اعتمادا على المبدأ الفيزيائي الذي سبق ذكره . و باستمرار حركة الحزام فإن تجمع الشحنات على لاسطح الخارجي يبقى مستمرا على أن يصل جهد القطب إلى القيمة المطلوبة ضمن الحدود التي تفرضها عازلية الوسط . ويمكن تقليل تسرب الشحنات و بالتالي رفع الحد الأعلى للجهد سالذي يمكن الوصول إليه ، وذلك بوضع الجهاز جميعه في غرفة فولاذية غير مسربة للغاز وتشغيل الجهاز تحت 15 ضغطاً جوياً تقريبا . ويمكن أن يكون الغاز في هذه الحالة هواء أو نيتروجياً أو فريونا ، ويقع أنبوب التفريغ الغازي ، الذي يعتبر مصدرا للأيونات الموجبة التي يراد تسريعها ، في داخل الجهاز ، حيث تتسارع الجسيمات الموجبة متباعدة عن القطب الموجب ذي الجهد العالي ، باتجاه الهدف في الطرف الثاني للأنبوب حيث الجهد المنخفض . و يتكون أنبوب التسارع من عدة مقاطع من الزجاج أو الخزف أو بعض المواد العازلة ، ويجب أن يكون الأنبوب طويلا بدرجة كافية لتجنب الشرر الكهربائي ، وتفصل بين هذه المقاطع الحلقات المتساوية الجهد .

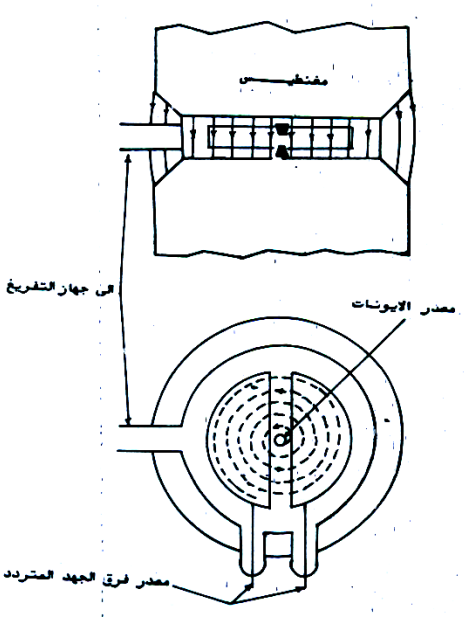


شكل(4.3) رسم تخطيطي لمعجل فان دي جراف

إن أعلى طاقة تم الوصول إليها باستخدام معجل فان دي جراف ذي المرحلة الواحدة بلغت 5م أف ، و لكن وجد أنه بالإمكان مضاعف هذا الرقم باستخدام معجل التاندم فان دي جراف Tandem Van de Geraaf accelerator . و تتلخص فكرة هذا الجهاز في أن الأيون السالب المراد تسريعه يعبر فرق جهد مرتين أو أكثر حيث تتضاعف طاقته في كل مرة . ويتم ذلك بسلخ إلكترونين عن الأيون السالب عندما يصل إلى القطب المعدني الموجب الأمر الذي يجعلة موجبا ، و يؤدي ذلك إلى تسريعه باتجاه الأرض بعيداً عن القطب الموجب . وينتج عن ذلك تضاعف سرعته و طاقته . ومن الممكن تكرار ذلك أكثر من مرة ، وقد تم في معجل التاندم فان دي جراف تسريع أيونات الهيدروجين إلى 20 م أف . ويمكن حفظ الجهد ثابتاً في المعجل فان دي جراف و التاندم ضمن حدوده 0.1% ، و يمكن استخدام معجل فان دي جراف لتسريع الجسيمات الموجبة و الجسيمات السالبة على السواء .

السيكلوترون the cyclotron

أن المعجلات التى تم شرحها سابقا تعتمد على الاستخدام المباشر للجهد العالي الذي يصاحب استخدامه الكثير من المشاكل العملية ، وذلك بسبب محدودية العزل للوسط المحيط ، و بسبب مشاكل التفريغ الكهربائي . لذلك ، فقد نتوصل العالمان لورنتز وليفنجستون Lorantz and Livingston إلى طريقة لتسريع الجسيمات المشحونة تتجنب هذه المشاكل عن طريق تكرار تسريع الجسيمات باستخدام جهد صغير نسبياً ، وقد أطلق على المعجل الأول الذي صمم على ذها المبدأ ، معجل الطنين المغناطيسي أو السيكلوترون وهو من أكثر المعجلات استخداماً حتى الآن.



شكل (4.4) رسم تخطيطي لمعجل السيكلوترون

و يتكون السيكلوترون من حجرتين معدنيتين بشكل نصف دائرتين يطلق عليهما ديز dees لشيه كل منهما بالحرف D ، و يكون وضع الحجرتين المجوفتين متباعدة أحدهما عن الأخرى ، بينهما فجوة ضيقة تقع بين قطري الحجرتين المتوازيتين كما يبين الشكل (4.4) . و يقع مصدر الأيونات الموجبة في مركز الفجوة الفاصلة بين الحجرتين حيث يطبق عليهما فرق جهد متوسط (نحو100 كيلو فولت) و لكنه متردد بتذبذب عال قد يصل إلى بضعه ملايين هرتز . و توضع الحجرتان في صندوق كبير مفرغ من الهواء تقريبا وتكونان معزولتين عنه . ويضع الصندوق الكبير بين قطبي مغنطيس كهربائي قوي بحيث يتولد مجال

مغناطيسي عمودي على مستوى الحجرتين ، إلا أن هذا المجال يكون صفر داخل الحجرتين نتيجة لتأثير المعدن الذي يحجب المجال ، في حين تكون للمجال قيمة غير الصفر في الفجوة الموجودة بين الحجرتين .

وعند انبعاث جسيم موجب من مصدر الأيونات ، فانه يتسارع عبر الفجوة الفاصلة بين الحجرتين باتجاه الحجرة التي تكون سالبة ، و عندما يدخل الجسيم الحجرة فإن المجال المؤثر عليه يصبح صفرا و بذلك تبقى سرعته ثابتة $v=v_1$ ، ويبقى فقط تأثيرالمجال المغناطيسي الذي يجعله يترك بشكل دائري في مستوي عمودي علي اتجاه المجال المغناطيسي و بنصف قطر $r=r_1$ حسب العلاقة :

$$r=mv/Hq \qquad (4.3)$$

حيث q هى شحنه الجسيم المتسارع ، m كتلته ، H قيمة المجال المغناطيسي . وبعد أن يدور الجسيم المشحون نصف دائرة ويخرج الى الفجوة ، فإن اتجاه المجال الكهربائي في الفجوة يكون قد تغير بحيث يبجذب الجسيم الى الحجرة المقابلة ويكتسب تسارعاً جديدا ، الأمر الذي جعله يدخل الحجرة الثانية بسرعة أكبر v_2 و بالتالي يدور نصف دائرة ذات قطر أكبر r_2. ويتم اختيار التردد الكهربائي f بين الحجرتين بحيث إن اتجاه المجال الكهربائي ينعكس كلما قطع الجسيم مسافة نصف دائرة (أي كلما ينقي زمن نصف دورة من الموجة الكهربائية $\tau/2$ وبذلك يكون :

$\tau/2=$ السرعة/المسافةالمقطوعة في نصف دورة $=\pi r/v$

و يكون تردد المجال الذي يسمى تردد السيكلوترون ، هو :

$$f=1/\tau=v/2\pi r \qquad (4.4)$$

ومن المعادلتين (4.3)، (4.4) ينتج :

$$f=(H/2\pi)(q/m) \qquad (4.5)$$

وفي هذه الحالة تزداد سرعة الجسيم في كل دورة يدورها و بالتالي يزداد نصف قطر دورانه إلى أن يبلغ أقصى نصف قطر ممكن R وهو نصف قطر الحجرة تقريباً ، ثم يجذب إلى خارج الحجرة وهو في أقصى سرعة له عن طريق جهد سالب عند إحدى النقاط على سطح إحدى الحجرتين . ويمكن حساب طاقة الجسيم المتسارع بالسيكلوترون من العلاقة :

$$T=1/2mv^2 \qquad (4.6)$$

وحيث أن v يمكن حسابها من العلاقة (4.3) ، فعندما تكون r=R تصبح السرعة نهائية للجسيم عند خروجه :

$$v=qHR/m \qquad (4.7)$$

ومن المعادلتين (4.6) ، (4.7) تنتج علاقة الطاقة الحركية للجسيم :

$$T=q^2H^2R^2/2m \qquad (4.8)$$

مثال (4.1) : احسب الطاقة التي يخرج بها الديوترون المتسارع بسيكلوترون تردد جهده الكهربائي 12 ميجا هيرتز و نصف قطر حجرته 53 سم .

الحل : من العلاقة (4.5)

$$H=2\pi\, f\, m/q= (2\pi\times12\times10^{6}\times3.3\times10^{-27})/1.6\times10^{-19} = 1.6 \text{ Tesla}$$

وبذلك يمكن حساب طاقة الديوترون من العلاقة (4.8)

$$T=q^2H^2R^2/2m= (1.6\times10^{-19} \text{ c})^{2} (1.6 \text{ Tesla})^{2} (0.53)^{2}/ 2(3.3\times10^{-27}\text{kg}) =17 \text{ MeV}$$

ومن الملاحظ هنا أن الطاقة النهائية للجسيم المشحون المتسارع بالسيكلوترون لا تعتمد على مقدار فرق الجهد المطبق بين حجرتيه كما يتضح من العلاقتين (4.5) ،(4.8) . ويمكن تفسير ذلك بأنه عندما يكون فرق الجهد صغير فإن الجسيم يدور عددا كبير من الدورات ، حتى يصل الى طاقته العظمى عندما يصبح نصف قطر دورانه يساوي R ، حيث يكتسب في كل دورة مقدار قليلا من الطاقة ، ولكن عندما يكون فرق الجهد بين الحجرات كبيرا فإن عددا أقل من الدورات يحتاجها الجسيم المشحون حتى يصل الى طاقته العظمى عندما يصبح نصف قطر دورانه R، وهو نفسه في الحالتين .

ومن الممكن تسريع البروتونات بالسيكلوترون الى طاقة تصل الى 50 م أف . ولكن السيكلوترون التقليدي يصبح غير مناسب لطاقات أعلى من ذلك وهذا يرجع الى سببين :

1) لقد افترضنا عند شرح عمل السيكلوترون أن الزمن الذي يجتاج اليه الجسيم المشحون حتى يقطع نصف دورة يكون ثابتاً, مهما كان نصف قطر هذه الدورة ، وذلك لأن هذا الزمن مكافئ لنصف فترة الذبذبة الكهربائية التى هى بطبيعة الحال ثابتة . وهذا الافتراض صحيح جدا عندما تكون سرعة الجسيم المتسارع

أقل بكثير من سرعة الضوء ، لأنه بالإمكان اعتبار كتلة الجسيم ثابتة أو أن تغيرها يمكن اهماله بدرجة كبيرة من الدقة . وفى هذه الحالة يكون افتراضنا صحيحاً وذلك لأن سرعة الجسيم تتناسب طردياً مع r كما في العلاقة (4.3). فعندما تتضاعف r مثلا ، فإن v تتضاعف بحيث يبقى الزمن الذي يستغرقه الجسيم المشحون ليقطع نصف دورة ثابتا . و لكن عند سرعات قريبة من سرعة الضوء فإن m تتغير حسب العلاقة $m = m_0/ (1-v^2/c^2)^{1/2}$

لذلك فإن العلاقة بين r وv تصبح غير خطية ، ويصبح تضاعف r لا يقابلة تضاعف v ، وهذا يؤدي الى أن الزمن الذي يستغرقه الجسيم لقطع نصف دورة كبيرة يختلف عنه في قطع نصف دورة صغيرة . وبذلك فإنه لايمكن أن يوجد تردد واحد يتفق مع كل هذه الأزمنة ، ويصبح تسريع الجسيم في الفجوة الفاصلة بين الحجرتين غير منتظم .

2) هناك صعوبة آخرى تمنع من تسريع الجسيمات المشحونة الى طاقات عالية جدا ، ذلك هو حجم المغنطيس الكهربائي . فمن أجل تسريع بروتون الى 500 جيجا إلكترون فولت (جيجا = 10^9) بمجال مقداره (1.5) تسلا ، فإن هذا يستوجب أن تكون R مساوية 1.1كم !! ويذلك نحتاج الى مغنطيس ينصف قطر 2 كم تقريبا !! ، وهذا شبه مستحيل عمليا .

السينكروسيكلوترون synchrocyclotron

يعتبر السينكروسيكلوترون صورة مطورة لمعجل السيكلوترون . فبالنسبة لضياع الرنين نتيجة التغير النسبي في كتلة الجسيم المشحون عند سرعات عالية ، فإنه يمكن من حيث المبدأ اعادة الرنين بطريقتين تتضحان من المعادلة (4.5) عند إدخال التغيرالنسبي للكتلة حيث تصبح

$$f= (H q/2m_0) (1-(v^2/c^2))^{1/2} \qquad (4.9)$$

فالطريقة الأولى تتسم بتغيير المجال المغناطيسي مع السرعة ليصبح H`v حيث :

$$H`v=H/(1-(v^2/c^2))^{1/2} \qquad (4.10)$$

أما لطريقة الثانية تتسم بتغيير تردد الجهد الكهربائي ليصبح f `(v)

$$f `(v)=f (1-(v^2/c^2))^{1/2} \qquad (4.11)$$

وفي كلتا الطريقتين ينتج التغير النسبي للمجال المغنطيسي أو التردد الجهد و الذي يلغي تأثير التغيير النسبي لكتلة الجسيم . و تسمى هذه الطرق بتثبيت الطور phase stabilization.

و في حالة استخدام الطريقة الأولى حيث يكون التردد ثابتا و المجال المغناطيسي متغيرا فإن المعجل يسمى حينئذ السينكروترون synchrotron . وإذا استخدمت الطريقة الثانية بحيث يكون المجال المغنطيسي ثابتا و التردد متغير فإن المعجل في تلك الحالة يسمى السيكلوترون ذا التردد المعدل frequency modulated cyclotron أو السينكروسيكلوترون synchrocyclotron . وقد استخدم أول السينكروسيكلوترون في جامعة كاليفورنيا حيث تم تسريع جسيمات ألفا إلى طاقة مقدارها 40 م أف ، وفي تلك الحالة كان التردد المعدل يتراوح بين 11.5 ميجاهيرتز عند انبعاث جسيم ألفا من المصدر إلى 9.8 ميجاهيرتز عندما يقترب الجسيم من طاقته العظمى عند $r = R$.

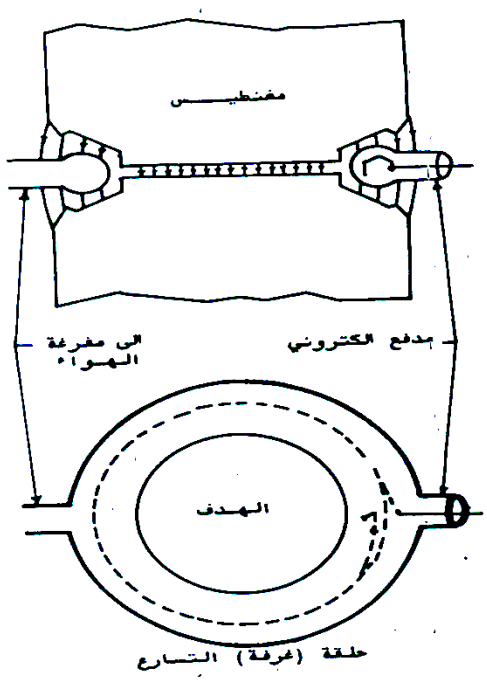
ولقد تم فيما بعد تطوير سينكروسيكلوترونات يمكنها تسريع الجسيمات إلى طاقات أعلى بكثير .

معجلات الالكترونات electron accelerators

لقد تم التركيز فيما سبق على معجلات الجسيمات الموجبة ، فالسيكلوترون و السينكروسيلكوترون لايمكن استخدامهمامتعذرا . أما بالنسبة لمعجل كوكروفت ووالتون و معجل فان دي جراف فإنه يمكن استخدامهما و لكن لطاقات لا تزيد عن 20م أف تقريبا . و نظرا لأهمية تسريع الالكترونات في توليد الأشعة السينية للأغراض المختلفة و خاصة لأغراض التفاعلات النووية ، لذلك فإننا سنناقش في هذا الباب معجلين هامين يستخدمان في تسريع الإلكترونات ، و هما البيتاترون betatron و سينكروترون الإلكترون electron synchrocyclotron .

البيتاترون betatron

يشبه البيتاترون في مبدأ عمله المحول الكهربائي الذي يولد فيه التيار الكهربائي المتذبذب في الملف الابتدائي مجالا مغناطيسيا متذبذبا ، يؤدي عند تقاطعه مع الملف الثانوي ، إلى توليد تيار كهربائي له نفس تردد التيار في الملف الابتدائي . و في حالة البيتاترون ، فإن الملف الثانوي تستبدل به حجرة مفرغة من الهواء يشكل حلقة أو كعكة doughnut ، تدور فيها الإلكترونات التي يراد تسريعها ، حيث تتعرض للمجال المغناطيسي المحيط بها و الذي يولده التيار المتردد في الملف الابتدائي .



شكل (4.5) رسم تخطيطي لمعجل البيستاترون

و تكتسب الالكترونات في الحجرة الحلقية طاقتها نتيجة سرعتها بالمجال الكهربائي المتولد من الحث ، فيؤدي ذلك إلى حركتها في مدارات دائرية ثابته داخل الفجوة الحلقية كما يبين الشكل (4.5).

و يكون الجهد الحثي V لكل لفة مساويا ، حسب قانون فارادي ، لمعدل تغير التدفق المغناطيسي $d\Phi/dt$ ، و ذلك يكون المجال الكهربائي E لكل لفة من لفات المحول حسب العلاقة

$$E= V/\ell=(1/2\pi R)\, d\Phi/dt \qquad (4.12)$$

حيث R هو نصف قطر المدار الذي تتحرك فيه الإلكترونات . و تكون القوة المؤثر في الالكترون F كما في العلاقة

$$F=eE \qquad (4.13)$$

ومن العلاقتين (4.12) ، (4.13) يمكن أن نكتب حسب قانون نيوتن الثاني:

$$d/dt(mv)=eE= (e/2\pi R)\, d\Phi/dt \qquad (4.14)$$

و للمحافظة على نصف قطر المدار R ثابتا ينبغي زيادة المجال المغناطيسي H كلما زادت طاقة الالكترون . بمساواة قوة الطرد المركزية بالقوة المغناطيسية نجد :

$$He\ v = mv^2/R \qquad (4.15)$$

ويمكن من هذه المعادلة كتابة الزخم

$$mv = e\ R\ H \qquad (4.16)$$

و بالمفاضلة بالنسبة للزمن ينتج :

$$d/dt\ (mv) = (e\ R)dH/dt \qquad (4.17)$$

و من الممكن تسريع الإلكترونات مع لإبقاء نصف قطر دورانها ثابتا إذا كان معدل تغير الزخم نتيجة تغير التدفق المغنطيسي حسب المعادلة (4.14) ، هو نفس معدل تغير الزخم نتيجة تغير المجال المغنطيسي حسب المعادلة (4.17) . وبعبارة أخرى لإبقاء R ثابتاً لابد أن يكون الطرفان الايمنان للمعادلتين (4.14) ، (4.17) متساويين أي أن :

$$(e/2\pi R)\ d\Phi/dt = (e\ R)dH/dt \qquad (4.18)$$

$$d\Phi/dt = (2\pi R^2)\ dH/dt = 2d/dt\ (\pi R^2 H) \qquad (4.19)$$

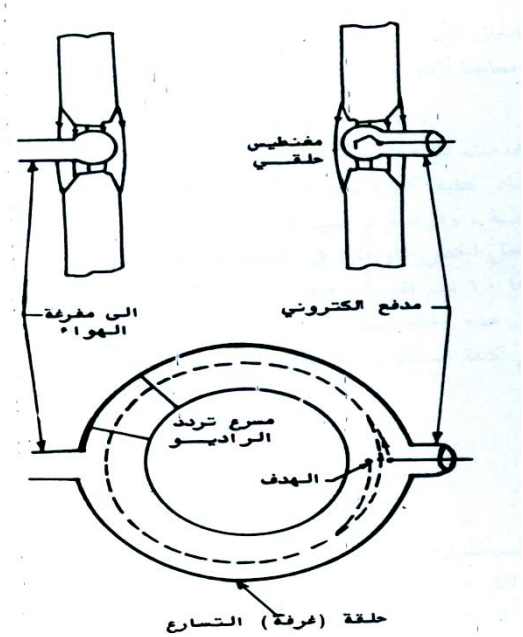
وتسمى العلاقة (4.19) شرط البيتاترون betatron condition ، وهى تنص على أنه في فترة زمنية يجب أن يكون معدل تغير التدفق Φ ضعف معدل تغير التدفق الذي من الممكن أن ينتج لو كان المجال المغنطيسي المركزي منتظما و مساويا للمجال المداري . وهذه العلاقة صحيحة لجميع السرعات ، نسبية وغير نسبية ، حيث إن العلاقات (4.14) ، (4.17) تصلح للسرعة النسبية. ويستوجب شرط البيتاترونوجود قلب حديدي مركزي له كثافة تدفق عالية في مدار الالكترون ، و يكون القلب مصفحا كقلب المحول العادي و يعمل على تردد كهربائي 60أو 180 هرتز . وعندما تقذف الالكترونات إلأى الحجرة من قاذف الالكترونات (مدفع الكتروني) electron gun وهو عبارة عن عن سلك ساخن فإن الالكترونات تتتسارع بجهد كهربائي لا يزيد عن بضعة آلاف من الفولتات ، ويكون قذف الإلكترونات في اللحظة التي يبدأ فيها المجال المغنطيسي ازيادة عن الصفر في الربع الأول من الذبذبة . و تؤدي زيادة المجال المغناطيسي إلى توليد جهد حثي داخل الحلقة المعدنية التي يدور فيها الالكترون الأمر الذي يسبب زيادة طاقة الالكترونات المتحركة بمسار دائري .

. وعندما يبدأ المجال المغنطيسي في النقصان بعد الربع الأول من الذبذبة فإن ذلك يسبب تقليل سرعة الإلكترونات تسحب من مداراتها عندما يصل المجال المغنطيسي إلى قيمته العظمى في الذبذة و يتم توجيهها إلى الهدف أو إخراجها من الجهاز.

إن البيتاترون المستخدم في مختبرات البحوث الكهربائية العامة في شركة جنرال إلكتريك بأمريكا. General Electric Research ينتج إلكترونات بطاقة 100م إف ، ويصل نصف قطر وجه القطب المغنطيسي الى 1.8م ، ويزن المغنطيس المستخدم أكثر من 130 طن ، وتدور الإلكترونات التى تبلغ طاقتها عند الانطلاق 30–70 كيلو الكترون فولت نحو مليون دورة داخل الحلقة المعدنية قبل أن تكتسب طاقتها النهائية ، ويخرج بسرعة عالية جدا تصل الى 0.9999 من سرعة الضوء تصبح معها كتلة الالكترون أكبر بنحو 200مرة من كتلته السكونية.

سينكروترون الالكترون electron synchrotron

تعتبر ضخامة حجم البيتاترون و ثقل وزن قلبه الحديدي من أكبر عيوب هذا الجهاز . وقد وجد أنه بالإمكان التقليل من حجم الجهاز ووزن قلبه الحديدي إذا ما استبدل بالتردد المنخفض المستخدم في البيتاترون



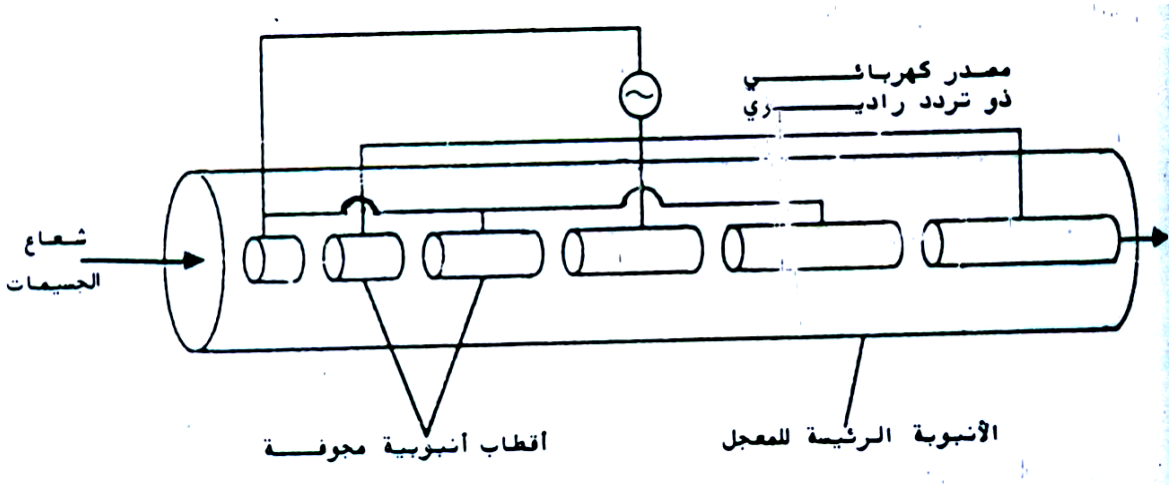
شكل (4.6) رسم تخطيي لمعجل الالكترون سينكرترون

تردد عال radio frequency ، و عند استخدام التردد الراديوي فإن هذه التردد يجب أن يبقي مساويا تقريبا لتردد الإلكترون المسرع في المدار . و هذا الشرط لايمكن تحقيقه الإ إذا كانت الطاقة الابتدائية للإلكترون المتسارعة عالية (نحو 2م أف) حيث يكون التغير في سرعة الالكترون و بالتالي في ترددها محدود جداً . ويمكن اعتبار التردد المستخدم في هذه الحالة ثابتا . و بزيادة طاقة الإلكترون يمكن الابقاء على الإلكترون في مدارة بزيادة المجال المغناطيسي بصورة متتناسب مع كتلة السكون للإلكترون . وقد أثبت فكسلر و مكميلان Veksler and Mcmillan حركة الإلكترون في هذه الحالة يكون لها نفس استقرار الطور كما هو الحال في السينكرترون المستخدم لتسريع الجسيمات الموجبة الشحنة ، ولقد سمى هذا الجهاز سينكرترون الإلكترون ، نظراً لأنه لا حاجه إلى تحقيق شرط البيتاترون في هذا الجهاز فإنه بالإمكان استخدام مغناطيسي على شكل حلقة . ويبين الشكل (4.6) رسما تخطيطا لهذا الجهاز.

وقد وجد علميا أنه لابد من استخدام مسرع ابتدائي الإلكترونات كالبيتاترون مثلاً لتسريع الإلكترونات إلى طاقة ابتدائية بحدود 2 م أف ولكن في هذه الحالة يكون حجم البيتاترون صغيرا. وكمثال على سينكروترون للإلكترون المستخدم عملياً ، الجهاز المستخدم في الـ (MIT) بأمريكا ، حيث يصل وزن مغنطيسية إلى 50 طناً و ترده 49.5 ميجا هرتز ، وتكون الطاقة الابتدائية للالكترونات المتسارعة فيه 7ملأف نتيجة تسريعها فى الالبيتاترون . وتصل طاقة الالكترونات بعد تسريعها فى السنكروترون إلى نحو 330م أف.

المعجل الخطى linear accelerator

يقوم المعجل الخطى على نفس مبدأ العمل الذي يقوم علية السنكروترون تقريبا ، من حيث أن التعجيل النهائي الذي يكتسبه الجسيم المشحون يتم على مراحل متتالية بواسطة فرق جهد متردد قليل نسبيا . غير أن الاختلاف الرئيسي بين هذا المعجل السنكروترون يكمن في كون إتجاة حركة وتعجيل الجسيم خطية في الأول ، في حين هي دائرية في الثانية . ويمثل هذا الفرق ميزة لصالح المعجل الخطى ، إذ تنتفى الحاجة إلى استخدام المغنطيسيات الكبيرة ، كما هو الحال في معجل السنكروترون .



شكل (4.7) رسم تخطيي للمعجل الخطي

ويبين الشكل (4.7) طريقة عمل المعجل الخطى في شعاع الجسيمات التي يراد تعجيلها ينطلق من الطرف الأيسر للمعجل على خط المحور المركزي لأقطاب أنبوبية معدنية مجوفة مربوطة على التوالي بفرق جهد متردد . وبما أن الجسيمات المشحونة تسارع فقد في المسلفة الواقعة بين كل أنبوبتين متتاليتين ، لوجود مجال كهربائي في تلك المنطقة . في حين تحافظ على نفس سرعتها أثناء مرورها في الأنبوبة ، لانعدام المجال الكهربائي داخل أي جسيم معدني سواء كان مصمتا أو مجوفا . فإذا تم اختيار التردد و طول الأنابيب المتتابعة بحيث تنقضي نصف فترة كاملة للموجه المترددة أثناء مرور الجسيم داخل الأنبوبة ، فيخرج الجسيم وقد انعكست قطبية الأنبوبة التالية ، و يكون المجال الكهربائي بين الأنبوبتين بالإتجاه الذي يكسب الجسيم تسارعا جديدا ، ليدخل الأنبوبة التالية وقد أصبح بسرعة أعلى . وهكذا تستمر العملية بحيث يصبح الجسيم في داخل كل أنبوبة بسرعة جديدة أعلى من سابقتها ، إلا أن التردد يبقى ثابتا ، لذلك فمنم الضروري عمل الأنابيب بحيث تتزايد أطوالها بشكل تدريجي .

و لوافترضنا أن الفترة الزمنية لنصف الموجة المترددة هي $\tau/2$ ، وبافتراض أن سرعة الجسيم في الأنبوبة التي ترتيبها n من جهة اليسار هي v_n ، فيكون الطول اللازم لهذه الأنبوبة هو L_n حيث

$$L_n=v_n \tau /2=v_n/2f \qquad (4.20)$$

وعند حساب T_n التي تمثل الطاقة الحركية للجسيم بعد تجاوزه الفجوة التي ترتيبها n من جهة اليسار ، و بإهمال التأثير النسبي نجد أن الطاقة الحركية يمكن كتابتها على النحو :

$$T_n = nqV_0 = 1/2\ mv_n^2 \qquad (4.21)$$

حيثV_0 فرق الجهد بين كل أنبوبتين متتاليتين ، q شحنة الجسيم ، m كتلته . و من العلاقتين السابقتين يمكن إيجاد L_n

$$Ln = \tau\ (nqV_0/2m)^{1/2} \qquad (4.22)$$

وبطبيعة الحال فإن الشرح يمثل المبدأ الأساسي لعمل المعجل الخطي ، غير أن هناك جوانب كثيرة تحتاج إلى معالجة أكثر عمقا مثل تبئير (تركيز) الشعاع و التأثير النسبي عند الجسيمات عالية الطاقة. وقد استخدمت المعجلات الخطية في إنتاج عناصر ما بعد اليورانيوم ، وذلك بقصف أهداف لعناصر ذات أعداد كتليه كبيرة بأيونات ثقيلة . كما استخدمت المعجلات الخطية الكبيرة لدراسة الجسيمات الأساسية ، و دراسة تركيب النواة وخواصها مثل توزيع الشحنات داخلها . و من أكبر هذه الأنواع المعجل الخطي الموجود في جامعة ستانفورد في كالفورنيا الذي يبلغ طول أنبوبته 3آلاف متر وقطرها 10 سم تقريبا . وهو يسرع الإلكترونات إلى طاقة 20 جيجا إلكترون فولت ، وتكون سرعتها في هذه الحالة مساوية 0.9999999997 من سرعة الضوء وكتلتها أكبر بحوالي 40 ألف مرة من كتلة السكون (مكافئة تقريبا كتلة ذرة الصوديوم).

المراجع

1- مبادئ الفيزياء النووية وتقنيتها أ.د. أحمد القاضى و بسام محمد داخل و احمد شريف عودة

2- الفيزياء النووية د. أحمد الناغى

3- الفيزياء النووية والمفاعلات النووية د. مجدى مصطفى امام