المحاضرة 6 / مادة الفيزياء النووية

الفصل الثاني/ طاقة الربط والفصل للجسيمات النووية

كلية التربية للعلوم الصرفة – ابن الهيثم

قسم الفيزياء / العام الدراسي 2024-2025

المرحلة الرابعة / شعبة ج صباحي

أ.م.د. عدي طارق صبحي

الفصل الثانى

طاقة الربط والفصل للجسيمات النووية

اولا : طاقة الربط النووية : Nuclear Binding Energy

هي الطاقة اللازمة لربط مكونات النواة ببعضها او هي الطاقة اللازمة لفصل مكونات النواة عن بعضها البعض. **بمعنى اخر**

هي الطاقة التي تتحرر عندما تتجمع النيوكليونات لتكوين النواة ، او هي الطاقة اللازمة لفصل جميع نيوكليونات النواة بعضها عن البعض الاخر .

*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 ،

وعليه فطاقة الربط النووية B(A,Z) لنواة عددها الكتلي A وعددها الذري Z وباستخدام قانون تكافؤ الكتلة والطاقة (معادلة أينشتاين) فأن :

$$E = \Delta m\, C^2$$

$$\therefore B(A,Z)=[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)]C^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث Δm هي النقص في الكتلة وهي تساوي حاصل الطرح بين كتل مكونات النواة وكتلة النواة نفسها ، m_p كتلة البروتون ، m_n كتلة النيوترون ، N العدد النيوتروني ، M_N كتلة النواة ، c سرعة الضوء .

فاذا كانت الكتل مقدرة بـ kg فان الطاقة ستقدر بالجول ، ولكن هذه الوحدات غير ملائمة لذلك تستعمل وحدة الكتل الذرية ، فعليه ان كانت الكتل مقدرة بوحدة u ،

وبما ان :

$$1\ u = 931.5\ \frac{MeV}{C^2}$$

لذلك امكن اعادة كتابة المعادلة (1) لتصبح كالاتي :

$$B(A,Z)= [Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)].C^2 \times \frac{931.5}{C^2}\ MeV$$

$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n-M_N(A,Z)] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

طاقة الربط بدلالة الكتل النووية ، وبوحدات وحدة الكتل الذرية .

ولقد جرت العادة على استعمال الكتل الذرية بدلا من الكتل النووية فلدينا :

$$M(A,Z)=M_N+Zm_e-B_e \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

حيث M(A,Z) : كتلة الذرة ، M_N = كتلة النواة ، B_e = هي طاقة ترابط الالكترونات بالذرة وتكون قيمتها صغيرة جدا يمكن اهمالها .

نعوض المعادلة (3) في معادلة (2) فنحصل على :

$$B(A,Z)=931.5[Zm_p+Nm_n+Zme-M(A,Z)]$$

$$\therefore B(A,Z)=931.5[Zm_H+Nm_n-M(A,Z)] \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

*معدل طاقة الربط B_{ave}:

يرمز له بالرمز B_{ave} ، وهو يمثل حاصل قسمة طاقة الربط النووية B(A,Z) على العدد الكتلي (A) ، بمعنى اخر هو معدل ربط اي من النيوكليونات داخل النواة (p) او (n).

$$B_{ave}(A,Z)= \frac{B(A,Z)}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

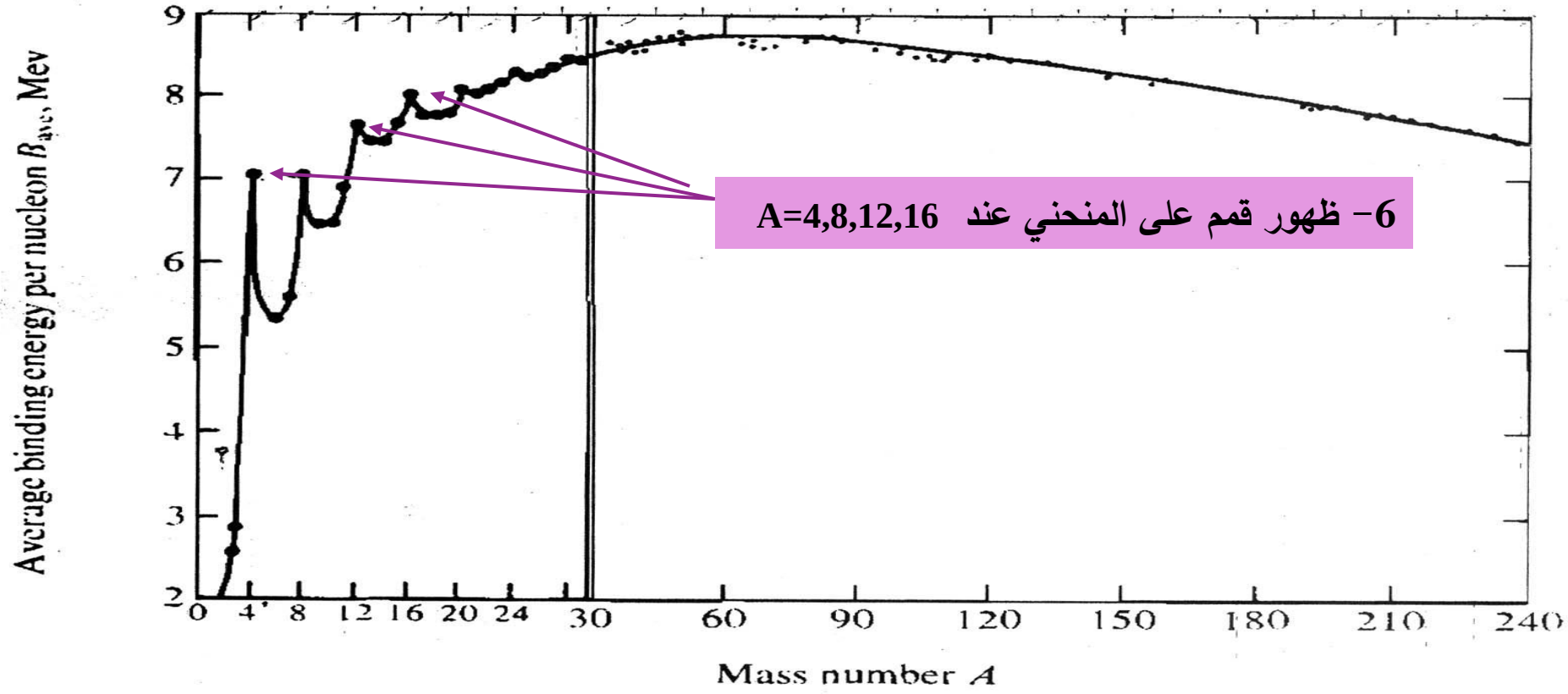
والشكل (1) يمثل العلاقة بين معدل طاقة الربط والعدد الكتلي (A) ،

1- يكون المنحنى ثابت نسبيا باستثناء النوى الخفيفة مثل نواة الديتيريوم $_1^2H$.

2- ان النوى المتوسطة تمتلك اكبر القيم لمعدل طاقة الربط النووية مثل نواة الحديد $(_{26}^{56}Fe)$ وبذلك تكون النوى المتوسطة عادة هي الاكثر استقرارا وتبلغ قيمة $(\frac{B(A,Z)}{A})$ بحدود 8.8 مليون الكترون فولت .

3- النوى الخفيفة والنوى الثقيلة تستطيع ان تصبح اكثر استقرارا إذا وجد تفاعلا نوويا معينا يستطيع ان ينقلها الى منطقة النوى المتوسطة.

4- النواة التي لها عدد كتلي يزيد او ينقص كثيرا عن (60) اقل ترابطا اما التي لها عدد كتلي قريب من (60) فهي العناصر الاكثر استقرار .



5- بعد قيمة العدد الكلي (60) تبدأ قيمة $(\frac{B(A,Z)}{A})$ بالنقصان التدريجي ويمكن تفسير هذا النقصان الى كونه ناتج عن التنافر الكولومي بين البروتونات الذي يزداد تأثيره بزيادة Z الناتجة عن زيادة A.

مثال /جد طاقة الربط النووية لنواة النيتروجين $(^{14}_{7}N)$ بوحدة MeV ، إذا علمت ان كتلة ذرة $^{14}_{7}N$ تساوي 14.003074 u ، وكتلة ذرة الهيدروجين تساوي 1.007825 u ، وكتلة النيوترون تساوي 1.008665 u ، وجد أيضاً معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون ؟

الحل /

$Z = 7$, N=7

$B(^{14}_{7}N)=931.5[Zm_H + Nm_n - M(^{14}_{7}N)]$

$B(^{14}_{7}N)=931.5[7\times1.007825 + 7\times1.008665 - 14.003074]$

$B(^{14}_{7}N)=104.603$ MeV

$B_{ave}= \frac{B(^{14}_{7}N)}{A} = \frac{104.603}{14} = 7.472 \left(\frac{MeV}{nucleon}\right)$

* زيادة (نقصان) الكتلة Mass Excess (defect) :

ان الكتل الذرية بوحدة الكتلة الذرية a.m.u عادة لا تختلف كثيرا عن عدد النيوكليونات A . لهذا السبب يكون من المناسب التعبير عن الكتل النووية بدلالة زيادة الكتلة mass excess $\Delta(Z,N)$ والتي تسمى احيانا بنقصان الكتلة mass defect ، التي تتحدد بوحدات الكتلة الذرية (u) على وفق المعادلة التالية :

$$\Delta(Z,N) = {}^{A}_{Z}M_{N} - A \longrightarrow {}^{A}_{Z}M_{N} = \Delta(Z,N) + A$$

يمكن ان تعطى زيادة الكتلة في اغلب الاحيان بوحدات MeV وفي احيان اخرى تعطى بوحدة a.m.u

وتسمى النسبة بين زيادة الكتلة $\Delta(Z,N)$ والعدد الكتلي A بنسبة الربط packing fraction :

$$P = \frac{\Delta(Z,N)}{A} = \frac{{}^{A}_{Z}M_N - A}{A}$$

بمعنى اخر ان P هو يمثل زيادة الكتلة لكل نيوكلون

$$P = \frac{{}^{A}_{Z}M_N}{A} - \frac{A}{A} = \frac{{}^{A}_{Z}M_N}{A} - 1 \quad \rightarrow$$

$$\therefore \ {}^{A}_{Z}M_N = A\,(P+1)$$

مثال / احسب كتلة الديتيريوم $_1^2H$ بوحدات الكتل الذرية u إذا علمت ان زيادة الكتلة تساوي 13135.82 Kev ؟

الحل/

$\Delta = 13135.82\ KeV = 13135.82 \times 10^{-3}\ MeV$

$\Delta = 13.13582\ MeV$

لكن $1u = 931.5\ MeV$

$$\Delta = \frac{13.13582}{931.5} = 0.015176\ u$$

$\therefore M = \Delta + A = 0.015176 + 2 = 2.015176\ u$

ثانياً : طاقة فصل الجسيمة النووية :

هي الطاقة اللازمة لتحرير الجسيمة النووية ، او انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير الجسيمة من قبل النواة فعليه فان طاقة فصل النيوترون S_n تعني الطاقة اللازمة لتحرير او فصل النيوترون عن النواة او انها الطاقة التي تتحرر عند تأسير النيوترون من قبل النواة وبالمثل طاقة فصل البروتون S_p وطاقة فصل جسيمة الفا S_α .

يمكن التعبير عن طاقة الفصل النووية اما بدلالة الكتل او بدلالة طاقات الربط .

فبدلالة الكتل يعبر عن طاقة فصل النيوترون S_n بالصيغة :

$$S_n=931.5[M(A-1,Z)+m_n- M(A,Z)] \quad .....(6)$$

$$S_n=B(A,Z)-B(A-1,Z) \quad .....(7)$$ وبدلالة طاقات الربط فان

وبالمثل فان طاقة فصل البروتون S_p بدلالة الكتل :

$$S_p(A,Z)=931.5[M(A-1,Z-1)+m_p-M(A,Z)] \quad .....(8)$$

بدلالة طاقات الربط

$$S_p(A,Z)=B(A,Z)-B(A-1,Z-1) \quad .....(9)$$

وكذا الحال بالنسبة لطاقة فصل جسيمة الفا ، فبدلالة الكتل :

$$S_{\alpha}(A,Z)=931.5[M(A-4,Z-2,N-2)+m_{\alpha}-M(A,Z)] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

$$S_{\alpha}(A,Z)=B(A,Z)-B(A-4,Z-2)-B(4,2) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(11)$$

وان كل زوج من هذه المعادلات يمثل معادلتين متكافئتين ولاثبات ذلك نأخذ المثال الاتي :

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

$$=931.5[Zm_H+Nm_n-M(A,Z)-Zm_H-(N-1)m_n+M(A-1,Z)]$$

$$=931.5[Nm_n-M(A,Z)-Nm_n+m_n+M(A-1,Z)]$$

$$=931.5[M(A-1,Z)+m_n-M(A,Z)]$$

وهي نفس معادلة فصل النيوترون بدلالة الكتل الذرية .

مثال / ما مقدار الطاقة اللازمة لازالة نيوترون من نواة $^{41}_{19}K$ التي كتلتها الذرية تساوي (40.974856 u) ، إذا علمت ان كتلة $^{40}_{19}K$ الذرية تساوي (39.976709 u) ، وان كتلة النيوترون هي (1.008665 u)؟

الحل /

$S_n=931.5[M(A-1,Z)+m_n-M(A,Z)]$

$S_n=931.5[M(^{40}_{19}K)+m_n-M(^{41}_{19}K)]$

$=931.5\ [39.976709 + 1.008665 – 40.974856]$

$=931.5\ [0.010518] = 9.797366\ MeV$

❖القوة النووية Nuclear Force :

هي القوة التي تربط مكونات النواة الى بعضها البعض وهي اقوى من القوى التنافرية الكهربائية بين البروتونات ولذا فبفعل القوة النووية تبقى البروتونات مجتمعة مع النيوترونات داخل النواة . وهناك اربع قوى في الطبيعة وهي مرتبة كالاتي من الاقوى الى الاضعف:

1-القوة النووية 2-القوة الكهرومغناطيسية

3-القوة الضعيفة 4-قوة الجاذبية

❖خصائص القوة النووية :

1.القوة النووية هي قوى تبادلية :

على غرار تبادل الفوتونات ما بين الشحنات الكهربائية افترض العالم الياباني يوكاوا تبادل جسيمات متوسطة الكتلة اسماها الميزونات ما بين النيوكليونات . بعبارة اخرى مثلما تعزى القوة الكهرومغناطيسية الى تبادل الفوتونات فان القوى النووية تعزى الى تبادل الميزونات .

2. القوة النووية لا تعتمد على الشحنة :

ان التنافر الكولومي بين البروتونات اصغر بكثير جدا من التجاذب النووي فيما بينها . ورغم زيادة تأثير التنافر الكولومي بزيادة العدد الكتلي للنوى الا ان تأثيره يبقى اضعف نسبيا ، فعليه يمكن القول ان القوة النووية بين بروتون وبروتون تساوي تقريبا القوة النووية بين البروتون والنيوترون وتساوي تقريبا القوة النووية بين النيوترون والنيوترون اي ان :

$$F_{pp} \cong F_{pn} \cong F_{nn}$$

ويمكن دعم هذا الاستنتاج من ان مستويات الطاقة ، وطاقات التهيج وطاقات الفصل والزخم الزاوي للنوى المرآتية تكون متقاربة .

3. القوى النووية قصيرة المدى :

اي ان النيوكليون (n or p) يتجاذب فقط مع النيوكليونات القريبة منه ولا يتجاذب مع تلك التي تبعد عنه باكثر من 2 fm اي ان :

$$F_{nuclear} = 0 \quad for \quad r > 2fm$$

لقد تم افتراض هذه الخاصية لتفسير ثبوتية B_{ave}، وعدم اعتمادها على العدد الكتلي A فتم افتراض ان مدى القوى النووية هي بحدود 2 fm .

4. القوى النووية قوى قابلة للاشباع :

اي ان النيوكليون يمكن ان يرتبط بعدد معين من النيوكليونات وهذا يعني ان طاقة ربط النيوكليون مع بقية النواة ستبلغ حدا اعلى لا تتجاوزه بعد تجمع عدد معين من النيوكليونات حوله .

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 .

5. القوى النووية قوى تنافرية :

بعد تشبع القوة النووية فانها ستعمل على ابعاد النيوكليونات بعضها عن البعض الاخر ، حيث تتحول القوة النووية الى قوة تنافرية عندما تقل المسافة بين نيوكليونين عن $(\frac{1}{2} f_m)$ اي ان :

$2fm > r > \frac{1}{2}$ fm قوى تجاذبية نووية

$r < \frac{1}{2}$ fm قوى تنافرية نووية

6. القوى النووية قوى تعتمد على الزخم البرمي :

ان القوة النووية بين نيوكليونين متشابهين n,n , p,p تكون اعظم ما يمكن عندما يكون الزخم الزاوي الكلي لاحدهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للزخم الزاوي الكلي للاخر . بحيث يكون الزخم الزاوي للاثنين يساوي صفر . يسمى هذا التأثير ، اي ظاهرة اعتماد القوى النووية على الزخم البرمي بتأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة n,n , p,p يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس بالاتجاه للاخر.

❖التأثير المزدوج واثره على طاقة الفصل النووية :

ان اعتماد القوة النووية على الزخم البرمي يسمى بالتأثير المزدوج pairing effect او تأثير الازدواج ، اي ان كل زوج من النيوكليونات المتشابهة n,n , p,p يتجاذبان بقوة كبيرة عندما يكون زخم كل منهما اعظم ما يمكن ومساو بالمقدار ومعاكس في الاتجاه للاخر. وتاثير الازدواج هو السبب في كون النوى الزوجية – الزوجية اكثر استقرارا ووفرة من النوى الزوجية – الفردية او النوى الفردية - الزوجية وهذه اكثر استقرارا ووفرة من النوى الفردية - الفردية .

اما كيف يؤثر تأثير الازدواج على طاقة فصل الجسيمة النووية ، فلقد وجد عمليا انه لقيمة معينة للعدد الذري (Z) ، فان طاقة فصل النيوترون S_n تكون اكبر عندما يكون عدد النيوترونات زوجيا عما هي عليها لو كان عددها فرديا فمثلا :

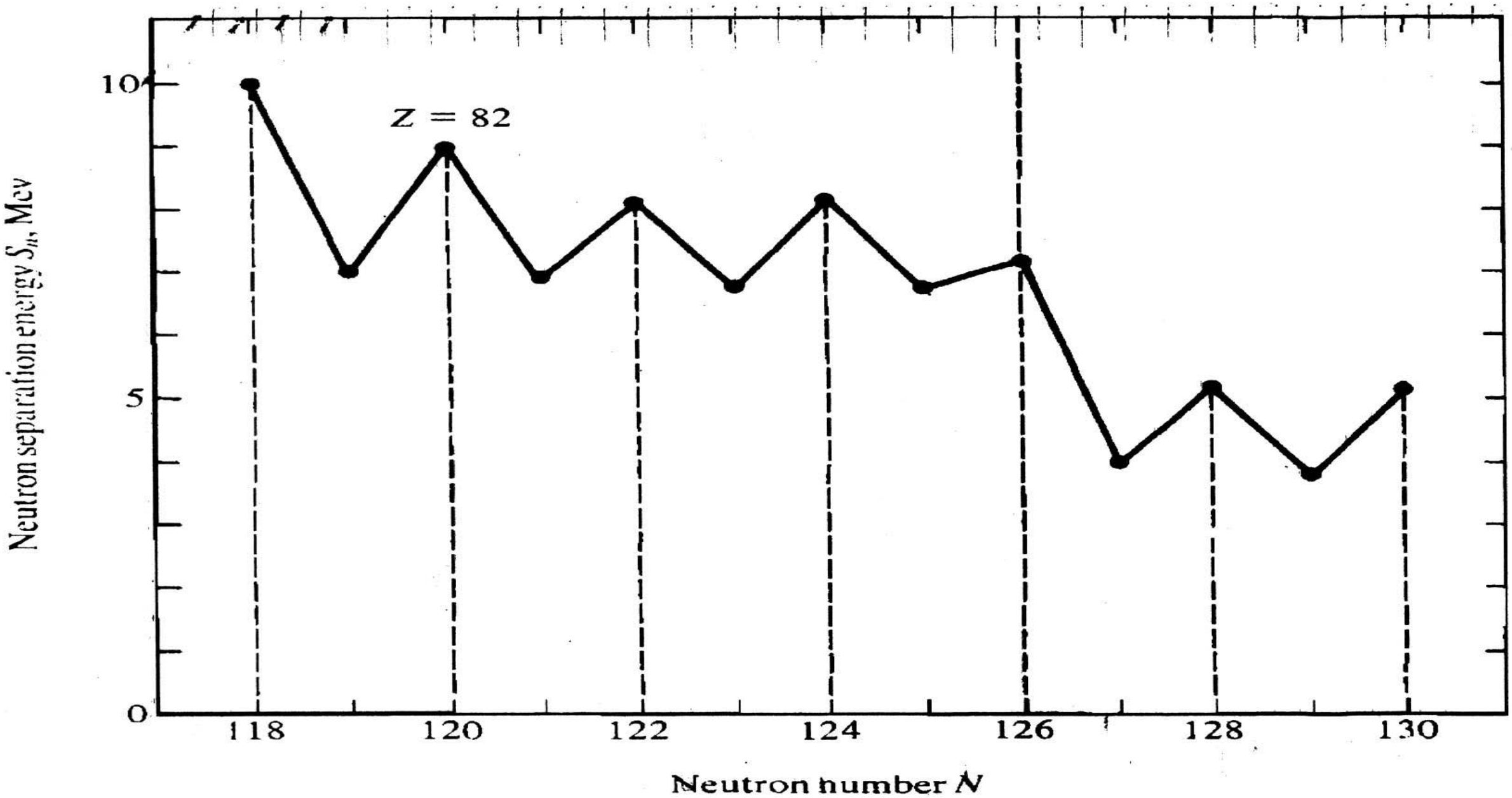
$$S_n(^{202}_{82}Pb_{120}) > S_n(^{201}_{82}Pb_{119})$$

كذلك وجد انه لقيمة معينة لـ (N) فان S_n تكون اكبر عندما يكون عدد البروتونات Z زوجيا عما هي عليها لو كان Z فرديا

$$S_n(^{12}_{6}C_6) > S_n(^{11}_{5}B_6)$$

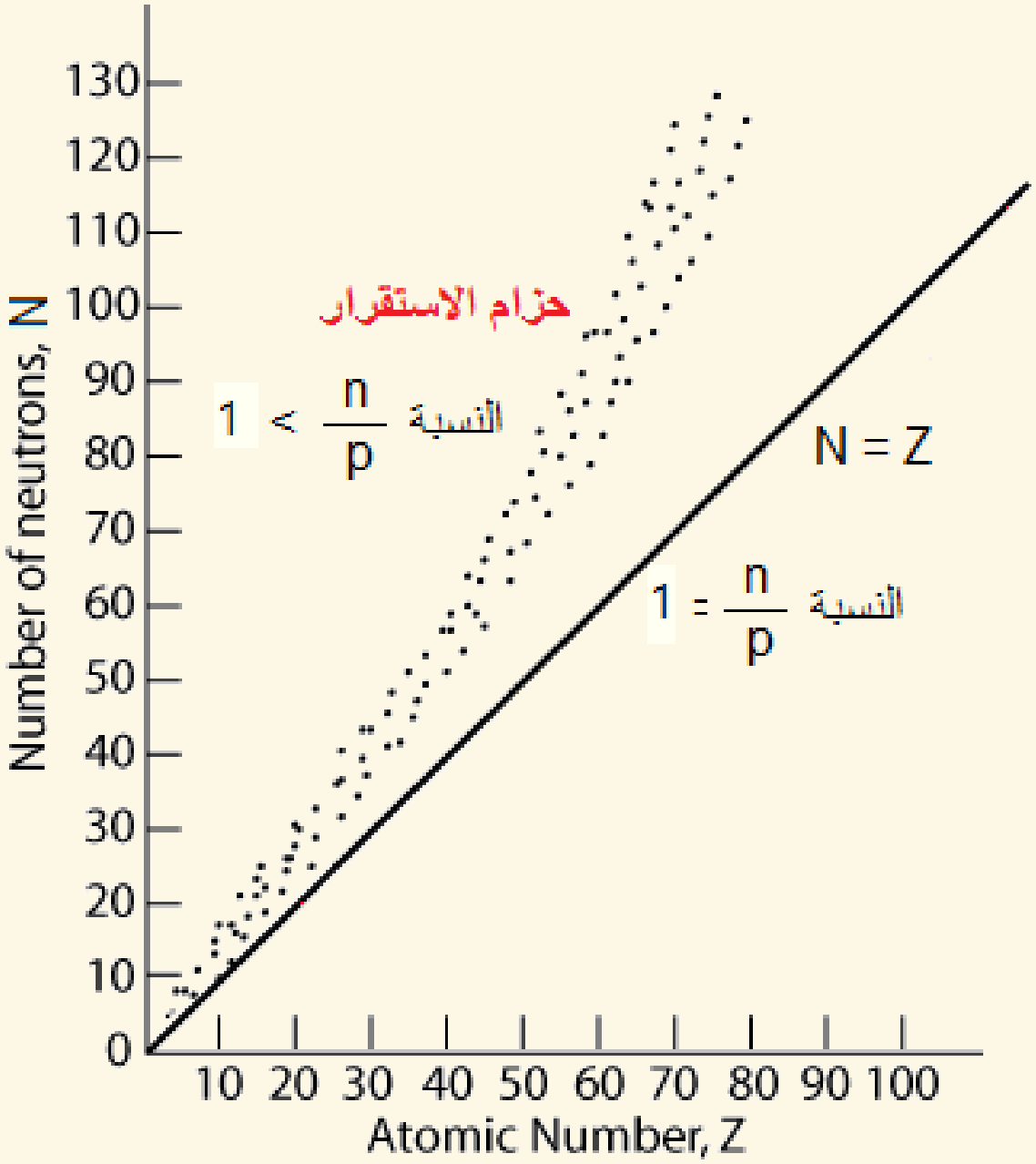
ويسمى الفرق $S_n(A,Z,N_{even})-S_n(A-1,Z,N_{odd})$ بـ طاقة ازدواج النيوترون ، ففي حالة الرصاص $_{82}Pb$ وعند رسم طاقة الفصل S_n كدالة لـ N نجد ان S_n تكون اكبر للنظائر التي تحتوي على عدد زوجي من النيوترونات . كما في الشكل .

حيث يكون هناك ارتباط اضافي بين كل زوج من النيوكليونات المتشابهة الموجودة في الحالة نفسها والتي تكون لها زخوم زاوية كلية تعمل باتجاهين متعاكسين ، وان طاقة الازدواج تعمل على زيادة طاقة الارتباط للنويات وبالتالي زيادة استقرارية هذه النوى.


Z = 82
10
5
0
118
120
122
124
126
128
130
Neutron separation energy S_n, Mev
Neutron number N

❖الوفرة الطبيعية للنوى المستقرة Abundance of stable nuclei :

النوى الموجودة والمعروفة اما تكون مستقرة stable او ذات نشاط اشعاعي Radioactive، فاذا تم رسم عدد النيوترونات N للنوى كدالة لعدد البروتونات Z ، فسنحصل على منحني الاستقرار المبين بالشكل :



تقسم الانوية

مستقرة Stable

متوسطة

$83 > Z > 20$

$N > Z$

$\frac{N}{Z} > 1$

خفيفة

$Z \leq 20$

$N = Z$

$\frac{N}{Z} = 1$

غير مستقرة Unstable

ثقيلة

$Z \geq 83$

$N > Z$

$\frac{N}{Z} > 1$

ومن هذا الشكل فان منطقة الاستقرار ستتمركز حول خط الاستقرار (N=Z) بالنسبة للنوى الخفيفة ، اما بالنسبة للنوى المتوسطة والثقيلة ، فان نقطة الاستقرار ستنحرف عن هذا الخط مقتربة من محور (N) وذلك لانها تحتوي على عدد نيوترونات اكثر من عدد البروتونات . (بسبب زيادة اهمية قوة كولوم) .

اما النوى غير المستقرة والتي يكون عددها الذري اكبر او يساوي 83 فنظرا لكبر حجم النواة وتباعد النيوكلونات بعضها عن بعض فهنا سوف تكون قوة التنافر الكهربائية كبيرة جدا بين بروتونات النواة وستكون القوة النووية ضعيفة امام القوة التنافرية بسبب تباعد النيوكلونات (لان القوة النووية قصيرة المدى ولاتكون فعالة في المديات الكبيرة) وبهذا ستتغلب قوة التنافر الكولومية على القوة النووية مهما بلغ عدد النيوترونات في النواة

ان النوى غير المستقرة والواقعة على يمين منطقة الاستقرار تتحلل غالبا عن طريق تحلل β^+ 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 $\bar{\beta}$.

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 و 53 نوية فردية – زوجية و 4 فردية - فردية كما في الجدول ادناه .

ويمكن تلخيص النتائج لوفرة تواجد النوى المستقرة بالجدول الاتي :

N	Even	Odd	Even	Odd
Z	Even	Even	Odd	Odd
Number of nuclides	160	53	49	4

حيث ان النوى الزوجية – الزوجية تظهر متواجدة بوفرة اكبر .

ملاحظة / الاستقرارية والوفرة تزداد في حالة النوى التي لها N او Z مساوية للاعداد (2,8,20,28,50,82,126) حيث تسمى هذه الاعداد بالاعداد السحرية حيث تجعل طاقة الربط كبيرة جدا ، كما هو الحال في نواة الهيليوم $^{4}_{2}He$ ونواة الاوكسجين $^{16}_{8}O_{8}$ الاكثر وفرة واستقرارا من بقية نظائره .

واجب رقم 5

س1/ احسب طاقة فصل البروتون في نواة $^{12}_{6}C$ اذا علمت ان

$M(^{11}_{5}B) = 11.009305\ u$ و $M(^{12}_{6}C) = 12\ u$ و $M_H = 1.007825\ u$

س2/ احسب طاقة الترابط النووية ومعدل طاقة الترابط لكل نيكليون في نواة ذرة الزئبق $(^{202}_{80}Hg)$ علماً ان :

$M(^{202}_{80}Hg) = 201.970642\ u\ , M(n) = 1.008665\ u\ , M(H) = 1.007825\ u$

س3/ فسر انحراف النوى عن خط الاستقرار N=Z والذي يميل الى ان يكون عدد النيوترونات اكبر من عدد البروتونات ؟

الى هنا ننتهي من محاضرة هذا

اليوم وان شاء الله التقيكم

بالمحاضرة القادمة