كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : نووية١

المحاضرة : السادسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

تفاعلات الانشطار النووي

مقدمة:

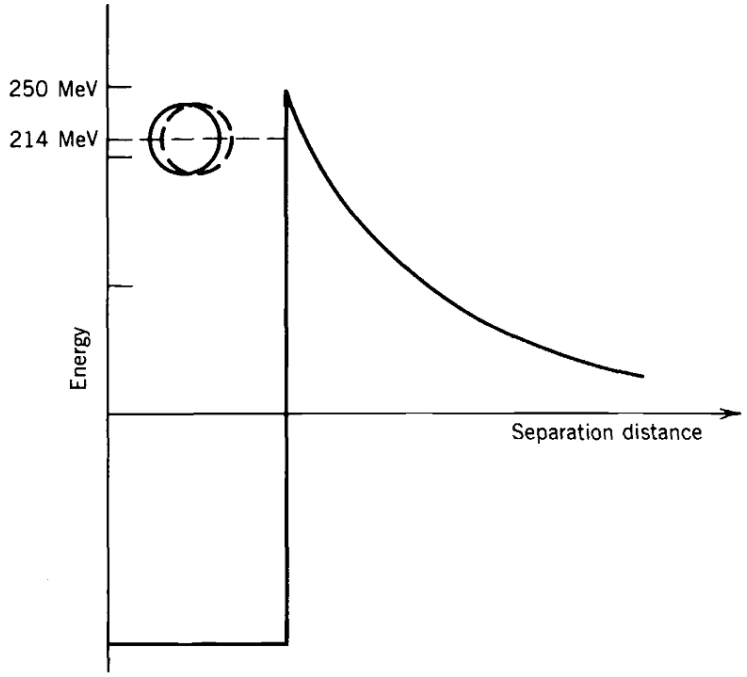
حدث التطور في الفيزياء النووية بعد 1930. بعدما اكتشف العالم الإنجليزي Chadwick النيوترون تجريبياً في 1932، ومن ثم استخدمه العالم الإيطالي Fermi كقذيفة واستطاع بواسطته قذف أهداف وحصل بالنتيجة على عدة نوى مشعة. حيث تم ملاحظة أن النوى تتفكك بإصدار بيتا السالب بعد أسرها للنيوترون، كما لو أن النواة تُحاول تعويض النيوترون الزائد عن طريق تحول نيوترون الى بروتون. والنتيجة هي نواة متبقية بعدد ذري أعلى بوحدة واحدة. (حصل فيرمي على جائزة نوبل في عام 1938 عن هذا العمل). كانت الخطوة الطبيعية التالية هي استخدام هذه التقنية لزيادة العدد الذري لإنتاج عناصر ما بعد اليورانيوم، وهي تلك العناصر الأثقل من اليورانيوم الذي يوجد بشكل طبيعي.

في عام 1939 اقترح Meitner and Frisch أن نوى اليورانيوم بعد امتصاص النيوترون تكون غير مستقرة للغاية وتنقسم تقريباً إلى نصفين أو تنشطر (مصطلح مقتبس من وصف علماء الأحياء لانقسام الخلايا).

ينشأ الانشطار النووي بشكل أساسي من التنافس بين القوى النووية وقوى كولون الكهربائية في النوى الثقيلة. تزداد طاقة الربط النووية الإجمالية تقريباً بما يتناسب مع العدد الكتلي A ، بينما تزداد طاقة التنافر الكهربائية للبروتونات بشكل أسرع مع Z^2 : إذا اعتبرنا أن انبعاث جسيم ثقيل هو عملية تفكك مشابهة لتفكك ألفا، فيمكننا اعتبار النوى الثقيلة قريبة جداً من قمة البئر الكموني في الشكل 1، حيث يكون حاجز كولون رقيقاً ويمكن اختراقه بسهولة. وبالتالي، يمكن أن يحدث الانشطار تلقائياً كعملية تحلل طبيعية، أو يمكن تحفيزه من خلال امتصاص جسيم منخفض الطاقة نسبياً، مثل النيوترون أو الفوتون (مما ينتج عنه حالات مثارة أو حالات نواة مركبة تكون عالية بما يكفي لتجاوز الحاجز أو اختراقه بسهولة أكبر).

على الرغم من أن أي نواة يمكن أن تنشطر إذا زودناها بطاقة إثارة كافية، إلا أن العملية مهمة عملياً فقط للنوى الثقيلة (الثوريوم وما بعده). أدرك العلماء إمكانية تطبيق الانشطار للحصول على كميات كبيرة من الطاقة بعد وقت قصير من اكتشافه، لأن صفة أخرى تترافق مع العملية، هي أن كل حدث انشطار ناتج عن النيوترونات ينتج، بالإضافة إلى الشظيتين الثقيلتين، عدة نيوترونات يمكن أن تُحفز أحداث انشطار جديدة. يمكن أن يحدث هذا التفاعل المتسلسل من الانشطارات بسرعة كبيرة ودون سيطرة، كما في الأسلحة الانشطارية، أو ببطء وبتحكم دقيق،

كما في المفاعلات النووية. بسبب هذه التطبيقات المذهلة والخطيرة، يلعب الانشطار النووي دوراً رئيسياً في عدد من العمليات التقنية والقرارات السياسية.



الشكل 1 في داخل البئر الكموني النووي فأن اليورانيوم ^{238}U يمكن أن يتواجد على شكل جزئين من نواة ^{119}Pd، ولكن الحاجز الكولوني يمنعهم من الانفصال.

1- النيوترون (النترون)

هو جسيم من دون شحنة كهربائية لذلك يصعب الكشف عليه مباشرةً. يكون النيوترون في النواة مستقراً، ولكن عمر النصف للنيوترون الحر هو حوالي 12 دقيقة، وهو يتفكك كمايلي: $^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e^- + \bar{\nu}$. ويرجع اكتشافه تاريخياً الى التفاعل النووي التالي:

$$^9_4Be + \alpha \longrightarrow {}^{12}_6C + {}^1_0n$$

حيث يكفي مزج بودرة من البيريليوم مع نوى مصدرة لجسيمات ألفا (مثل البولونيوم ^{210}Po والراديوم ^{226}Ra) من أجل الحصول على مصدر للنيوترونات.

ويُعتبر النيوترون جسيم مثالي لاستخدامه كقذيفة لأنه:

- غير مشحون فلا يتأثر بالشحنات الكهربائية بعكس البروتونات وجسيمات ألفا التي يمكن أن تُبطئ بسبب التجاذب الكهربائي مع الالكترونات في الذرة.

- النيوترون لا يغير مساره إذا اصطدم بالإلكترون لأن كتلة الالكترون أصغر ب 2000 مرة من كتلة النيوترون.

2- الظواهر الناتجة عن اصطدام النيوترون بالنواة

يمكن أن يصدر عن اصطام النيوترون بالنواة ثلاث ظواهر:

a) **اصطدام مرن:** في هذا النوع من التصادم يمكن أن نعتبر أن النواة والنيوترون كرتين مرنتين ترتدان عن بعضها البعض. لا يوجد هنا تفاعل نووي، ولكن هذا الاصطدام يؤثر على سير النيوترون الذي ينحرف مساره ومن ثم يُبطئ. وهذا التباطؤ للنيوترون يُستخدم في المفاعلات النووية.

b) **الأسر (الامتصاص):** يوجد في هذه الحالة تفاعل نووي حقيقي حيث أن النواة تأسر (تمتص) النيوترون، وبعدها توجد النواة في حالة مثارة حيث تُصدر اما بروتون أو جسيم ألفا أو في معظم الأحيان أشعة غاما. ويُعتبر الأسر (n,γ) تفاعل نووي كثير الحدوث وينتج عنه نظير جديد للنواة الهدف المصدومة من قبل النيوترون. مثال: اصطدام نيوترون بنواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ فيتولد النظير $^{239}_{92}U$ وينتج أشعة غاما.

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U + \gamma; \quad ^{238}_{92}U(n,\gamma)^{239}_{92}U$$

ان احتمال حدوث أسر للنيوترون من قبل النواة يتعلق بطبيعة النوى ومدى شراهتها للنيوترونات. على سبيل المثال احتمال أسر نيوترون من قبل نواة الكادميوم ^{113}Cd أكبر بكثير من احتمال أسر الهيدروجين له. ويتعلق تفاعل الأسر أيضاً بسرعة النيوترون حيث يكون احتمال حدوث التفاعل أكبر كلما كان النترون أكثر بطئاً عندما يمر بالقرب من النواة.

c) **الانشطار:** ظاهرة نادرة الحدوث، و لا يمكن أن يحدث الا من أجل النوى الثقيلة والتي تكون دائماً هشة (ضعيفة- قابلة للتجزئة). عند امتصاص النواة للنيوترون تُصبح في حالة اثارة وهذا يولد قوى هائلة في النواة الثقيلة وتحت تأثير هذه القوى تنقسم النواة الى نواتين بوزن ذري متوسط وتُطلق كمية هائلة من الطاقة بالإضافة الى عدة نيوترونات. يوجد من بين النوى الطبيعية، نواة واحدة فقط يمكن أن تنشطر بواسطة نيوترونات بطيئة وهي ^{235}U. النيوترونات المنطلقة عن انشطار ^{235}U يمكن أن تُحدث بدورها انشطارات أخرى وهو مايُسمى بالتفاعلات المتسلسلة.

بعض النوى الاصطناعية أبرزها البلوتونيوم $^{239}_{94}Pu$ واليورانيوم $^{233}_{92}U$ يمكن لها أن تنشطر بالنترونات البطيئة وتُسمى مثل هذه النوى بالانشطارية.

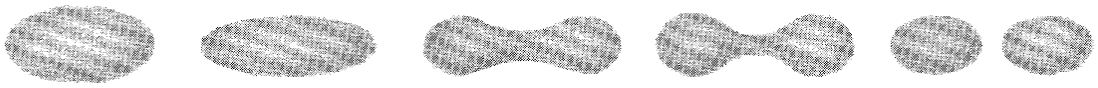
3- الانشطار:

a) **الانشطار المحرَّض:**

اكتشف بور انشطار نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$ وهو ما تم تأكيده عام 1940، فتتحول نوى اليورانيوم 235 بعد امتصاصها للنيوترون الى نوى اليورانيوم 236 (نوى مركبة) التي تتفكك في زمن قصير جداً الى قسمين.

يمكن تصور النواة الناتجة (المركبة) على شكل قطرة سائلة مشحونة بشحنة موجبة (وفقاً لنموذج القطرة السائلة). بعد امتصاص النواة الهدف

للنيوترون فأنها تُصبح في حالة اثارة (تهيج)، وتبدأ هذه النواة المهيجة بالاهتزاز مثل قطرة الزئبق وتُغير من شكلها (نواة مشوهة). عندما تكون طاقة الاثارة صغيرة، فأن قوى التوتر السطحي تستطيع إعادة النواة الى الشكل الكروي. أما إذا كانت طاقة الاثارة كبيرة فأن الاهتزاز يمكن أن يُشوه شكل النواة بشكل كبير، حيث تبدأ القوى الكولونية التنافرية بين قسمي النواة في لحظة محددة بالتغلب على قوى الترابط النووي بينها. وبالنتيجة تنقسم النواة المركبة المشوهة الى قسمين ينقذفان في جهتين متعاكستين، ونادراً ما تكون شظيتا الانشطار متساويتين وغالباً ما تكون احداهما أكبر من الثانية.



الشكل 2 سلوك النواة المهيجة (المشوهة)

b) حاجز الانشطار:

تُقدر الطاقة المحررة عن انشطار نواة واحدة من اليورانيوم $^{235}_{92}U$ ب 200 MeV، ويمكن حسابها عن طريق طاقة ربط النيكليونات في النواة التي تختلف من عنصر لآخر. فهي 7.5 MeV للنوى الثقيلة، 8.3 MeV للنوى المتوسطة، و 8.6 MeV للنوى الأخف.

مثال: لنفترض أنه يتم قذف نوى $^{235}_{92}U$ بالنترونات فتنشطر وفقاً للتفاعل التالي: $^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{140}X + {}^{93}Y + 3{}^{1}_{0}n$

فتكون طاقة الارتباط قبل التفاعل:

$$B = 1x0 + 7.5x235 = 1762.5\ MeV$$

وطاقة الارتباط بعد التفاعل:

$$B = 8.3x140 + 8.6x93 + 3x0 = 1961.8\ MeV$$

ويكون الفرق في طاقة الارتباط بعد وقبل التفاعل:

$$\Delta B = 1961.8 - 1762.5 = 199.3\ MeV$$

ونُشير الى أن انشطار غرام واحد من $^{235}_{92}U$ تُعادل الطاقة الناتجة عن احتراق 2.5 طن تقريباً من الفحم الحجري.

ان الانشطار التلقائي هو انشطار ملحوظ من أجل النوى ما بعد اليورانيوم لكن من أجل النوى الأخف فأن الزمن اللازم للانشطار كبير جداً، ويرجع ثبات هذه النوى الى القيمة الكبيرة للحاجز الكموني الذي يجب اجتيازه قبل الوصول الى حالة الانشطار.

حسب نموذج القطرة السائلة فأنه يُؤثر على النواة قوتين باتجاهين متعاكسين: التفاعل التجاذبي القوي الذي يُؤدي الى إنقاص مساحة القطرة، وبالتالي يُولد قوة توتر سطحي معاكسة للقوة الناتجة عن التدافع الكولوني. وتتعلق الأهمية النسبية لهاتين القوتين بتشوه النواة.

وفقاً لنموذج القطرة السائلة فأن طاقة الارتباط لنواة تحوي A نيكليون تُعطى بعلاقة نصف تجريبية:

$$\mathrm{B(A,Z)} = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_A \frac{(N-Z)^2}{A} - \delta a_P A^{-3/4}$$

حيث يُعبر $a_V A$ عن الحد الذي يؤثر على طاقة الارتباط نتيجة الحجم، و $a_S A^{2/3}$ عن الحد الذي يُؤثر على طاقة الارتباط نتيجة شكل السطح، و $a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$ عن الحد الذي يُؤثر على طاقة الارتباط نتيجة التدافع الكولوني، و $a_A \frac{(N-Z)^2}{A}$ عن الحد الذي يُؤثر على طاقة الارتباط نتيجة اللاتناظر، و $\delta a_P A^{-3/4}$ هو الحد الذي يؤثر على طاقة الارتباط نتيجة ظاهرة التزواج.

$$a_V = 15.56\ MeV, a_S = 17.23\ MeV, a_C = 0.7\ MeV,$$
$$a_A = 23.6\ MeV, a_P = 33.5\ MeV$$

$\delta = -1$في النوى زوجية-زوجية، و $\delta = +1$ من أجل النوى فردية-فردية.

ان الحدين المتعلقين بتشوه النواة هما الحد السطحي $a_S A^{2/3}$ و الحد الكولوني $a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$.

لنفترض أن النواة تخضع خلال تفاعل الانشطار الى عملية امتطاط من دون تغيير في حجمها فالحدود التي ستتأثر خلال الامتطاط هو الحد الذي يمثل تأثير السطح $a_S A^{2/3}$ (الحد السطحي) والحد الذي يمثل تأثير قوة كولون $a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$ (الحد الكولوني). سنفترض أن الامتطاط يؤدي الى تغير في شكل النواة من كروي الى اهليلجي حجمه $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ و $R^3 = ab^2$ ، وهذا ما يحافظ على الحجم ثابت خلال عملية الامتطاط، حيث يمثل a نصف المحور الكبير، و b يمثل نصف المحور الصغير.

$$a = R(1+\varepsilon)$$
$$b = R(1+\varepsilon)^{-1/2}$$

ε مقدار يرتبط بمعامل تشوه شكل النواة $\varepsilon = \beta\sqrt{\frac{5}{4}\pi}$ حيث β معامل تشوه النواة أي ابتعادها عن الشكل الكروي الى الشكل الاهليليجي

$$\beta = \frac{\Delta R}{R} = 2\frac{a-b}{a+b}$$

و $\varepsilon = 0$ في حال الشكل الكروي للنواة.

خلال الامتطاط فأن سطح النواة سيزداد كمايلي:

$$S = 4\pi R^2(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \cdots)$$

وفي العلاقة نصف التجريبية لطاقة الارتباط فأن الحد السطحي سيزداد بشكل مشابه$a_S A^{\frac{2}{3}}(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \cdots)$. أما الحد الكولوني فأنه سيتغير بمقدار $(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2 + \cdots)$.

لنحسب الفرق في طاقة الارتباط بعد الامتطاط (شكل اهليليجي) وقبل الامتطاط (شكل كروي):

$$\Delta E = B(\varepsilon) - B(\varepsilon = 0)$$

سنأخذ فقط الحدود التي تتأثر بعملية الامتطاط وهي الحد السطحي والحد الكولوني:

$$= -a_s A^{\frac{2}{3}}\left(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \cdots\right) - a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}}\left(1 - \frac{1}{5}\varepsilon^2 + \cdots\right) + a_s A^{\frac{2}{3}} + a_c Z^2 A^{-1/3}$$

$$\cong \left(-\frac{2}{5}a_s A^{\frac{2}{3}} + \frac{1}{5}a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}}\right)\varepsilon^2$$

إذا كان الحد الثاني أي الكولوني أكبر من الحد الأول أي السطحي فأن الفرق في الطاقة يكون موجب، أي يحدث ربح في الطاقة خلال عملية الامتطاط وكلما زاد الامتطاط زاد الربح في الطاقة. مثل هذه النوى فأنها ستكون غير مستقرة خلال الامتطاط فستخضع في النهاية الى الانشطار. لذلك يمكن أن نكتب أن شرط الانشطار التلقائي هو:

$$\frac{1}{5}a_c Z^2 A^{-\frac{1}{3}} > \frac{2}{5}a_s A^{\frac{2}{3}}$$

وبتعويض قيمة الثوابت a_c و a_s نجد:

$$\frac{Z^2}{A} > 47$$

أي بتحقق هذا الشرط فأن قوة التدافع الكولوني تُسيطر على قوة التوتر السطحي، مما يؤدي الى زيادة الامتطاط ومن ثم انشطار النواة.

ان الطاقة التي يجب صرفها لكي تتغلب قوة التدافع الكولوني على قوة التوتر السطحي تُسمى بحاجز الانشطار. وتتعلق قيمة حاجز الانشطار بشكل التوازن للنواة المدروسة. مثال: من أجل نواة البيزموت ^{209}Bi وهي ذات شكل كروي فأن حاجز الانشطار يُقدر ب *20 MeV*، بينما من أجل نواة اليورانيوم ^{236}U وهي نواة مشوهة الشكل (تنتج عن أسر نترون حراري من قبل اليورانيوم ^{235}U) فأن حاجز الانشطار يُقدر ب *6.2 MeV*.

عندما تلتقط نواة اليورانيوم ^{235}U نيوترون لتشكل النواة المركبة $^{236}U^*$ فأن طاقة الاثارة تساوي:

$$E_{ex} = \left[m\left(\,^{236}U^*\right) - m\left(^{236}U\right)\right]c^2$$

$$m\left(^{236}U^{*}\right) = m\left(^{235}U\right) + m_n \text{ حيث}$$

$$= (235.043924\,u + 1.008665\,u)$$

$$=236.052589\,u$$

$$E_{ex} = (236.052589\,u - 236.045563\,u) * 931.502 = 6.5\,MeV$$

اذن طاقة الاثارة الناتجة عن تشكل النواة المركبة $^{236}U^{*}$ هي *6.5 MeV*، بينما الطاقة اللازمة للتغلب على حاجز الانشطار (طاقة التنشيط) هي بحدود *6.2 MeV*، وهي قيمة أقل من طاقة الاثارة وهذا يعني أن ^{235}Uينشطر باستخدام نيوترونات بطاقة حركية مهملة وهذا يُفسر المقطع العرضي الكبير لتفاعل الانشطار في منطقة النيوترونات الحرارية (هي نيوترونات يتم تبطيئ سرعتها في درجة حرارة الغرفة).

لنقوم بحساب مماثل في حال امتصاص نواة اليورانيوم ^{238}U لنيوترون:

$$^{238}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}U^{*}$$

فنحصل على طاقة اثارة تساوي $E_{ex} = 4.8\,MeV$ ، بينما تبلغ طاقة التنشيط اللازمة للتغلب على حاجز الانشطار *6.6 MeV*. لذلك فأن نيوترون بطاقة حركية من مرتبة *MeV* على الأقل يكون مطلوباً من أجل أن يحدث انشطار للنواة ^{238}U.

4- التفاعل النووي المتسلسل:

يعود الفضل الأساسي لأحداث التفاعل المتسلسل الى النيوترونات المنطلقة أثناء تفاعل الانشطار. ويتراوح عدد النيوترونات التي تنطلق أثناء كل انشطار بين (1-5) نيوترون بالانشطار الواحد، وبشكل وسطي 2.5 نيوترون. يتزايد عدد الانشطارات بسرعة هائلة جداً، فمن أجل انشطار بدئي سيكون لدينا انشطارين جديدين في الجيل الأول (أي نيوترونين)، وفي الجيل الثاني سيتولد (*2x2=4*) نيوترون، وفي الجيل الثالث سيتولد ($2^3 = 8$) نيوترون،....و سيتولد ($2^{10} = 1025$) نيوترون في الجيل العاشر. وبما أن الزمن الفاصل بين جيلين متتاليين لا يتجاوز جزء من مئة مليون من الثانية فأن الطاقة التي يمكن أن تتحرر خلال جزء من ميكروثانية تكون هائلة وهذا هو مبدأ القنبلة النووية أو مجازاً القنبلة الذرية.

بالمقابل إذا استطعنا الحصول بعد كل انشطار على نترون واحد، يُحرض انشطاراً جديداً فأن معدل الانشطارات سيكون محافظاً على مستواه البدئي، أي أنه يمكننا السيطرة على التفاعل المتسلسل، وهذا هو مبدأ المفاعل النووي.

1-4 فما هو مصير النيوترونات الناتجة عن الانشطارات؟

هناك ثلاث إمكانيات لمصير النيوترونات الناتجة عن الانشطارات:

- اما أن تُحرض انشطارات جديدة.
- أو تُمتص من قبل نوى غير قابلة للانشطار.
- أو تتسرب الى خارج المفاعل.

2-4 عامل التكاثر النووي C_{eff}

لنفرض أنه لدينا نيوترون ناتج عن تفاعل انشطار، فالسؤال الذي يُطرح هو هل هذا النيوترون يُحرض انشطار جديد، أو يُمتص، أو يتسرب الى الخارج؟ والجواب هو أنه لا يمكننا التوقع بشكل مطلق.

أليس هناك من خطر في ترك النيوترونات تتجول بهذه الطريقة؟ هل هذه النيوترونات ستُحرض بشكل مفاجئ انشطارات جديدة؟ وإذا كان الأمر كذلك فأن المفاعل سوف يتحول الى قنبلة.

والجواب هو أنه لحسن الحظ، إذا لم نستطع توقع مصير نيوترون واحد على انفراد، فأن عدد النيوترونات الكبير جداً يسمح لنا أن نتوقع مصير مجموعة من هذه النيوترونات بدقة كبيرة. استناداً الى ماسبق، نستطيع أن نُقدر كيفية عمل المفاعل النووي ونحسب بشكل دقيق احتمالات الانشطار عند حقن عدد كبير من النيوترونات في مجموعة تحوي نوى قابلة للانشطار.

فعند بدء التفاعل المتسلسل يمكننا أن نقوم بمايلي:

a) اما إنقاص عدد الانشطارات التي تُحدثها الأجيال الجديدة من النيوترونات، وعندها يتلاشى التفاعل بسرعة في غياب مصدر خارجي للنيوترونات.
b) أو المحافظة ذاتياً على التفاعل المتسلسل.
c) أو زيادة عدد الانشطارات التي تُحدثها الأجيال الجديدة من النيوترونات، حيث ينمو التفاعل المتسلسل نمواً جارفاً.

وتتميز هذه الإمكانيات الثلاثة السابقة بمعامل يُدعى بمعامل التكاثر الفعال النيوتروني ونُرمز له ب C_{eff}.

- عندما يكون $C_{eff} < 1$ فأن عدد الانشطارات التي تُحدثها الأجيال الجديدة من النيوترونات يتناقص وبالتالي يتلاشى تفاعل الانشطار. ونقول عن التفاعل أنه في حالة "تحت الحرجة".
- عندما يكون $C_{eff} = 1$ فأن عدد الانشطارات يبقى في مستوى ثابت، ويُسمى مثل هذا النظام المحافظ ذاتياً على التفاعل المتسلسل "نظاماً حرجاً".
- عندما $C_{eff} > 1$ فأن عدد الانشطارات التي تُحدثها الأجيال الجديدة من النيوترونات تزداد، وينمو التفاعل المتسلسل نمواً جارفاً.

مكتبة A to Z