الانشطار النووي والاندماج النووي

Nuclear Fission and Nuclear Fusion

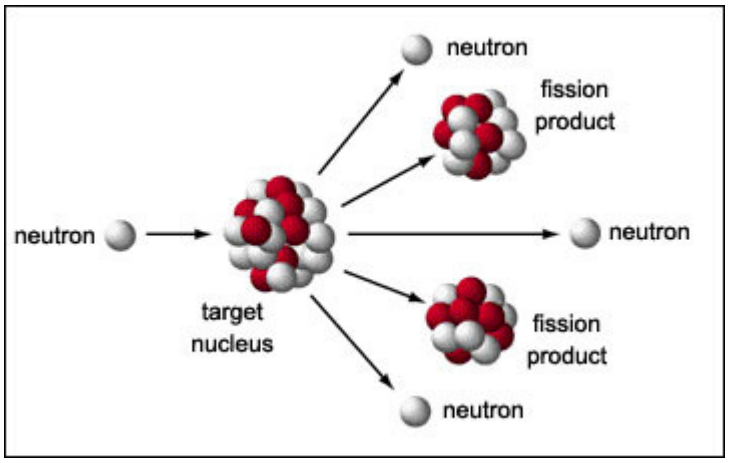
الانشطار النووي والاندماج النووي يمثلان نوعين مختلفين من التفاعلات المنتجة للطاقة، حيث تنطلق الطاقة نتيجة الروابط النووية القوية بين مكونات النواة. الفرق الأساسي بين هاتين العمليتين يتمثل في أن الانشطار يصاحبه تقسيم النواة الواحدة إلى نواتين أو أكثر أصغر من النواة الأصلية، في حين أن عملية الاندماج يصاحبها دمج نواتين أو أكثر للحصول على نواة أكبر من كل منهم.

وجه المقارنة	الانشطار النووي	الاندماج النووي
التعريف	الانشطار هو انقسام نواة كبيرة إلى نواتين أو أكثر أصغر من النواة الأصلية.	الاندماج هو دمج نواتين أو أكثر من الأنوية الخفيفة لتكوين نواة كبيرة.
الحدوث الطبيعي للعملية	لا يحدث تفاعل الانشطار عادة في الطبيعة.	الاندماج يحدث في النجوم مثل الشمس.
النواتج الجانبية للعملية	ينتج الانشطار العديد من الجسيمات عالية الكفاءة الاشعاعية.	عدد محدود من الجسيمات المشعة تنتج أثناء تفاعل الاندماج، ولكن إذا حدث واستخدم بادئ الاندماج فسوف ينتج جسيمات مشعة.
الشروط	كتلة حرجة من المادة ومطلوب نيوترونات عالية السرعة بكثافة	تتطلب كمية هائلة من الطاقة لاجبار اثنين أو أكثر من البروتونات لاقتراب بدرجة كافية تسمح بتغلب الطاقة النووية على طاقة التنافر.
الطاقة المنطلقة	الطاقة المنطلقة من الانشطار النووي تساوي ملايين المرات الطاقة المنطلقة من التفاعلات الكيميائية، ولكنها أقل الطاقة المنطلقة من الاندماج النووي.	الطاقة المنطلقة من الاندماج تكون ثلاثة أو أربعة أضعاف الطاقة المنطلقة من الانشطار.
الأسلحة النووية	تمثل القنبلة الانشطارية أحد فصائل الأسلحة النووية وتعرف أيضًا بالقنبلة الذرية وقنبلة الذرة.	تمثل القنبلة الهيدروجينية أحد فصائل الأسلحة النووية والتى تستخدم التفاعل الانشطاري لبدء تفاعل الاندماج. وتعرف أيضًا بالقنبلة الاندماجية.

أساسيات الانشطار النووي

عندما تنشطر نواة فإنها تنقسم إلى عدة شظايا. هذ الشظايا أو نواتج الانشطار ليسوا دائما متماثلين وإنما يقتربان من نصف كتلة النواة الأم والتأكيد على أن نواتج الانشطار ليست واحدة عند انشطار أنوية متماثلة. يصاحب عملية الانشطار انطلاق مجموعة من النيوترونات يتراوح عددها من اثنين حتى خمسة عشر نيوتروناً.

مجموع كتل الشظايا والنيوترونات أقل من كتلة النواة الأصلية. الفرق في الكتلة (حوالي ٠,١ ٪ من الكتلة الأصلية) تتحول إلى طاقة طبقًا لمعادلة أينشتين ($E = m\,c^2$). يمكن أن يحدث الانشطار عندما تقتنص أحد الأنوية الثقيلة نيوترون ذو طاقة حركة تتوافق مع حالة النواة (من زوجية عدد البروتونات والنيوترونات) ومن ثم يحدث رنين نووي بمقطع عرضي للتفاعل كبير. ويمكن أن يحدث الانشطار تلقائيًّا ، وهذا نادر الحدوث.



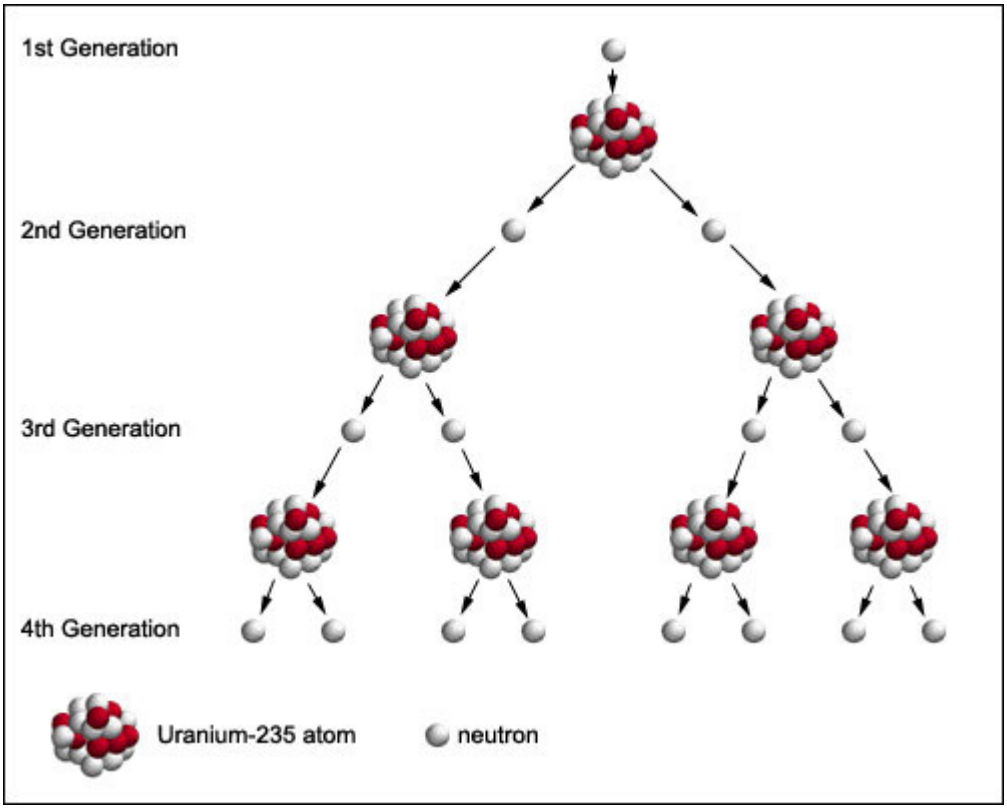
شكل رقم ( ) انشطار أحد الأنوية الثقيلة بعد اقتناصها نيوترون، فينتج نواتين صغيرتين ومجموعة من النيوترونات السريعة التى يمكن أن تسبب انشطارًا تالياً مباشرة، إذا كانت النواة مثل $^{238}_{92}U$ أو يتطلب تهدئة (خفض طاقة النيوترون) لتوافق شرط انشطار نواة مثل $^{235}_{92}U$.

التفاعلات النووية المتسلسلة

يشير التفاعل المتسلسل إلى عملية يحدث فيها اقتناص للنيوترونات المنطلقة مع نواتج انشطار نووي بواسطة أنوية جديدة. هذه النواة تنشطر وينطلق منها نيوترونات إضافية. وتتكرر هذه العملية مليارات المرات. يمكن التحكم في هذه العملية مثلما يحدث في محطات القوى الكهربية أو تترك كما هي مثلما يحدث في الأسلحة النووية.

الطاقة المنطلقة عند انشطار نواة اليورانيوم

مقدار الطاقة (MeV)	مصدر الطاقة
165	'طاقة حركة نواتج الانشطار
7	أشعة جاما
6	طاقة حركة النيترونات
7	طاقة من نواتج الانشطار
6	اشعة جاما من نواتج الانشطار
9	النيوترينو المضاد من نواتج الانشطار



شكل ( ) التفاعل المتسلسل: بفرض أن كل نيوترون يسبب انشطار نواة اليورانيوم ينتج عنه اثنين فقط من النيوترونات وهذه بدورها تسبب انشطار لاثنين من الأنوية (في الجيل الثاني) وهكذا فإن الجيل العاشر يحدث انشطار لـ ١٠٢٤ نواة من أنوية اليورانيوم. أما في الجيل ٨٠ يحدث انشطار لـ 6×10^{23} من أنوية اليورانيوم التي لم تنشطر بعد (وهذا العدد يكافئ مول واحد).

الكتلة الحرجة Critical Mass

على الرغم من انطلاق اثنين أو ثلاثة من النيوترونات على الأقل عند انشطار نواة اليورانيوم، فليس كل هذه النيوترونات قادرة على المساهمة فى عملية الانشطار. فمثلاً إذا حدث وفقدت النيوترونات بمعدل أسرع مما تنتج من عملية الانشطار ، فإن التفاعل

المتسلسل لن يكون ذاتى الاستمرار. الكتلة التى يصبح عندها التفاعل المتسلسل قادراً على الاستمرار ذاتيًّا تسمى " الكتلة الحرجة".

في حال القنبلة الذرية، تكون كتلة مادة السلاح أكبر كثيرًا من الكتلة الحرجة ويجب تركيبها لحظيًّا ويجب أن يتم جمعها معًا لمدة حوالى جزء من مليون جزء من الثانية وذلك للسماح للتفاعل المتسلسل أن يتطور قبل انفجار القنبلة.

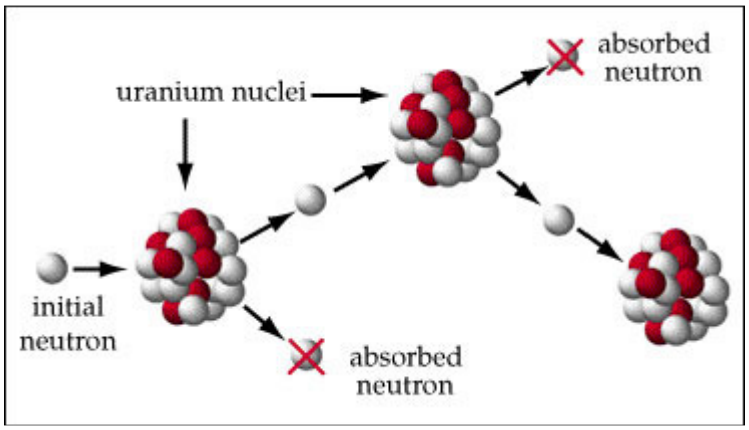
الكتلة الحرجة لكمية المادة القابلة للانشطار تعتمد على العديد من العوامل؛ مثل: شكل المادة، كثافتها وتركيبها الكيميائي ومستوى النقاوة.

الشكل الكروى يمتلك أقل قيمة ممكنة من مساحة السطح للكتلة لتى تشغل حيز الكرة. وبالتالي تعمل على تقليل تسريب النيوترونات. ويمكن اختزال الكتلة الحرجة عن طريق تغليف المادة الانشطارية بواسطة مادة مناسبة لانعكاس النيوترونات، ومن ثم يقل الفقد في عدد النيوترونات التى ستعطي شرارة البدء للجيل التالى من التفاعل المتسلسل.

باستخدام عاكس النيوترونات ، صارت الكتلة الحرجة أقل؛ مثل: حوالي ١١ باوند (خمسة كيلو جرامات) من المادة النقية تقريبًا من مواد الأسلحة مثل البلوتونيوم - ٢٣٩ ، و ٣٣ باوند (١٥ كيلوجرام) من اليورانيوم.

الانشطار النووي المسيطر عليه Controlled Nuclear Fission

للحفاظ على استمرارية التفاعل النووي المسيطر عليه، لكل اثنين أو ثلاثة نيوترونات ناتجة من انشطار نووي، لابد على الأقل أن يُسمح لأحدهم أن يصطدم بنواة يورانيوم أخرى. إذا كان هذا المعدل (النسبة) أقل من واحد، فهذا يعنى أن النيوترونات ستتناقص باستمرار ومن ثم يتوقف التفاعل المتسلسل. أما إذا كانت النسبة أكبر من واحد، فهذا يعني النمو المطرد في عدد النيوترونات ومن ثم ينمو عدم قدرة السيطرة على التفاعل، ويحدث في النهاية انفجار نووي. لهذا السبب تظهر ضرورة استخدام عناصر قادرة على امتصاص النيوترونات للمساعدة في التحكم بعدد النيوترونات الحرة المتاحة في فراغ التفاعل. معظم المفاعلات النووية يتم التحكم من خلالها بواسطة "قضبان التحكم" وهي مصنوعة من مواد ذات قدرة عالية على امتصاص النيوترونات مثل: البورون والكادميوم.

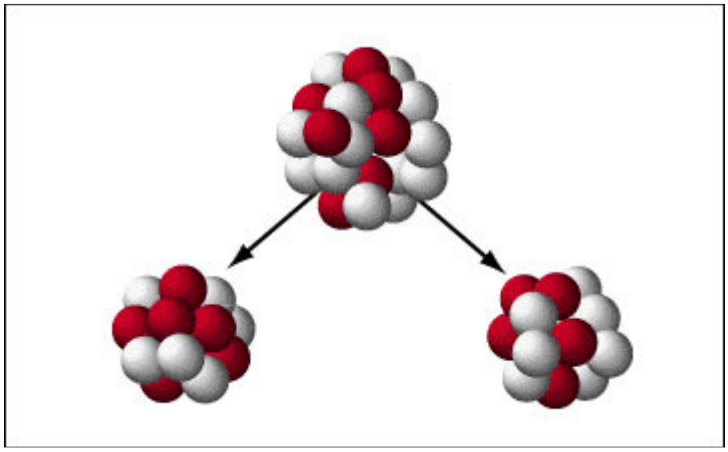


شكل رقم ( ) استخدام مواد ماصة للنيوترونات للتحكم في معدل التفاعلات النووية الانشطارية.

بالإضافة إلى الحاجة لاقتناص النيوترونات، فإن النيوترونات المنطلقة من معظم التفاعلات الانشطارية تكون ذات طاقة حركة عالية. مثل هذه النيوترونات السريعة يجب تبطئتها إلى طاقات تمكنها من التصادم غير المرن من أنوية المادة الانشطارية. تتم عملية التبطئة بواسطة مهدئات moderators مثل الماء الثقيل والماء العادي. بعض المفاعلات تستخدم الجرافيت كمادة مهدئة، ولكم هذا التصميم يواجهه العديد من المشاكل. بمجرد تبطئة النيوترون، إلى الطاقة المناسبة ويحدث تصادم مع النوية الانشطارية، فمن المحتمل حدوث مزيد من الانشطارات الجديدة ينتج عنه المزيد من النيوترونات التى قد تمتص أو تقتنص ويتحكم بها.

الانشطار النووي التلقائي Spontaneous Nuclear Fission

معدل الانشطار النووي المستمر هو احتمال انشطار نواة ما ذاتيًّا (بشكل عفوي / تلقائيًّا) في الثانية، وهذا يعني، حدوث الانشطار بدون أي تدخل خارجي. في حالة حدوث الانشطار النووي قبل الاستعداد التام للقنبلة ، يمكن أن يتبدد ولا يستمر. البلوتونيوم ٢٣٩ لديه معدل انشطار نووي عالي جدًّا مقارنة مع معدل الانشطار النووي لليورانيوم ٢٣٥. ويمثل معدل الانشطار للمواد أهمية خاصة للعلماء عند اختيار وتصميم الأسلحة النووية.



شكل رقم ( ) الانشطار التلقائي

المواد الانشطارية يورانيوم والبلوتونيوم Fissionable materials Uranium and Plutonium

المواد القابلة للانشطار هى المواد الأثقل من نظير الحديد - ٥٦ وكلما زاد الوزن الذري للنواة، زاد احتمال انشطارها ذاتيًّا من حيث المبدأ. ومن المعروف للعلماء والمختصين أن نظير اليورانيوم الأوسع انتشارًا (يورانيوم- ٢٣٨) ليس مناسبًا للأسلحة النووية. وذلك بسبب الاحتمالية العالية لأن يقتنص هذا النظير النيوترون الساقط عليه ويكوِّن اليورانيون- ٢٣٩ بدلاً من حدوث انشطار. ومع ذلك فإن اليورانيوم- ٢٣٥ ذو احتمالية عالية على الانشطار وخاصة مع النيوترونات الحرارية (ذات طاقة حركة منخفضة تصل إلى ٠,٠٢٥ إلكترون فولت.

تتوفر نسبة ٠,٧٪ لليورانيوم- ٢٣٥ من اليورانيوم الطبيعي. وهذا يعني أن كمية كبيرة جدا من اليورانيوم تكون مطلوبة للحصول على الكميات الضرورية من اليورانيوم- ٢٣٥. بالإضافة لذلك، لا يمكن فصل اليورانيوم- ٢٣٥ كيميائيًّا من اليورانيوم- ٢٣٨، وذلك لأن النظار متماثلة كيميائيًّا.

تم تطوير العديد من الطرق المختلفة لفصل النظائر. وهذه كانت من المشاكل التي واجهت العلماء في مشروع مانهاتن ووجب حلها قبل بناء القنبلة النووية.

وقد توقعت البحوث بالاحتمالية العالية للانشطار لنظير البلوترونيوم- ٢٣٩. ومع ذلك، فإن البلوتونيوم- ٢٣٩ ليس نظيرًا طبيعيًّا ويصنَّع في الفاعلات النووية التى بُنيت لهذا الغرض مثل مفاعلات هانفورد Hanford وواشنطن Washington.

زمن التفاعل Time of Reaction

النيوترونات المنطلقة من الانشطار النووي ذات سرعة حوالي عشرة مليون متر في الثانية، أي حوالي ٣٪ من سرعة الضوء. الزمن المستغرق لاتمام جيل واحد من التفاعلات يساوي من حيث المبدأ الزمن المطلوب لعبور قطر كرة من المادة الانشطارية.

الكتلة الحرجة من اليورانيوم تكون حوالي حجم كرة البيسبول baseball أي حوالي ٠,١ متر. وذلك فإن الزمن الذي يستغرقه النيوترون في عبور هذه الكرة يساوى

$$t = \frac{Diametre\ (m)}{speed\ (m/s)} = \frac{0.1}{1 \times 10^7} = 10^{-8}\ s.$$

عملية الانفجار الكلية للقنبلة تستغرق حوالي ٨٠ ضعف هذه الفترة الزمنية. أي حوالي ميكرو ثانية. هذه الفترة الزمنية كانت تعرف لدى علماء لوس ألاموس Los Alamos بـ "الهزة" وهي سريعة مثل هزة ذيل الخروف.

تطبيقات الانشطار النووي Applications of Nuclear Fission

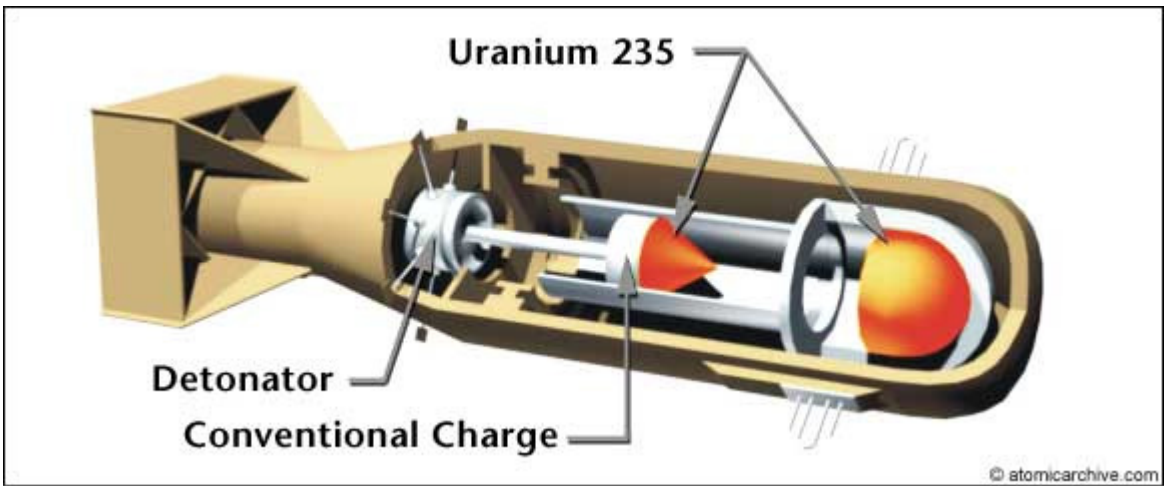
تتعدد التطبيقات التي تعتمد على ظاهرة الانشطار النووي، وتختلف تلك التطبيقات في التصميم والهدف، سواء أكانت للغراض السلمية أو الأغراض العسكرية والحربية. نعرف الأن أن تفاعلات الانشطار ممكن أن تندرج تحت فصيلتين، هما:

- تفاعلات لا يمكن التحكم فيها (وهذه خاصة بالأسلحة النووية)
- تفاعلات يمكن التحكم وفيها (وهذه خاصة بالأغراض السلمية مثل إنتاج الطاقة الكهربية أو الغواصات النووية أو . . .(. .

فيما يلي سنتناول بعض أفكار الأسلحة النووية لأنها كانت الأسبق في الظهور تاريخيًّا.

١. الولد الصغير أو النحيف: بندقية من نوع القنبلة Little Boy: A Gun-Type Bomb

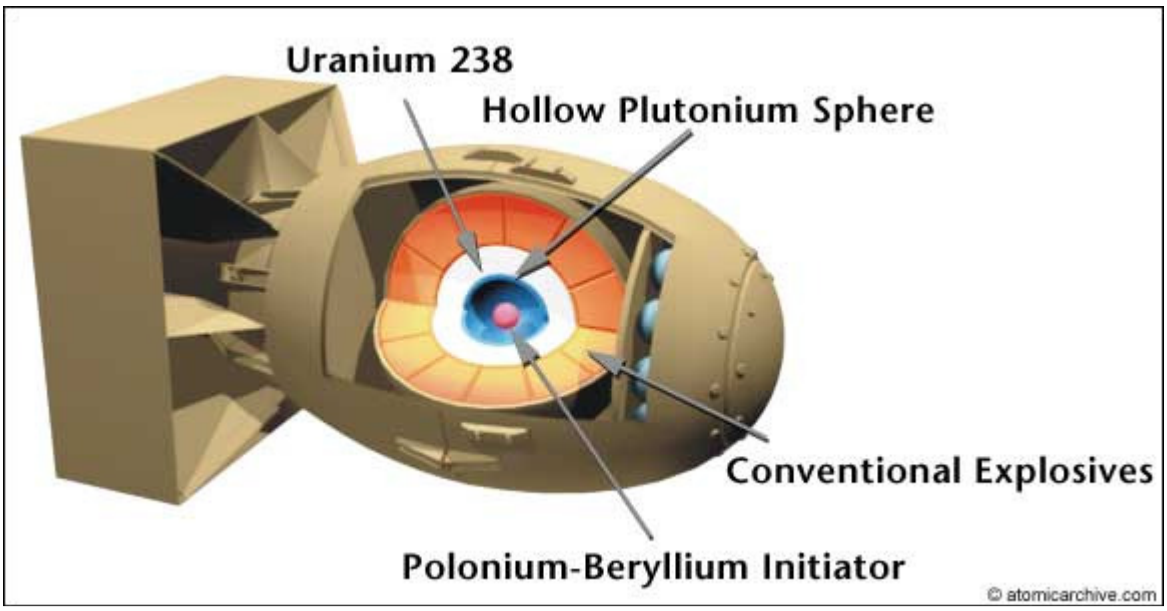
تصميم قنبلة الولد النحيف كان في جوهره يتكون من بندقية تطلق كتلة واحدة من اليورانيوم ٢٣٥ في كتلة أخرى من اليورانيوم ٢٣٥، وبالتالي تكوين كتلة أثقل من الكتلة الحرجة.. ويشترط لضمان نجاح هذه العملية أن تصطدم الكتلتان في زمن أقل من الزمن بين انشطارين متتاليين. وبمجرد التحام هاتين القطعتين من اليورانيوم معاً ، يبدأ البادئ بإدخال زابلاً من النيوترونات وتبدأ سلسلة التفاعل المتسلسل، الذي يستمر حتى تصبح الطاقة المنطلقة من الضخامة بحيث أن القنبلة ببساطة تتمزق قطعًا صغيرة متناثرة. وهذا يعني أن جزء من المادة الانشطارية المكونة للقنابل النووية هو الذي ينشطر فقط أما الجزء الآخر، فينتشر كما هو كقطع متطايرة في موقع الانفجار.



شكل رقم ( ) رسم تخطيطي لمكونات القنبلة النووية التي ألقين على هيروشيما باليابان في نهاية الحرب العالمية الأولى.

٢. الرجل: الانفجار الداخلي من نوع قنبلة Fat Man: Implosion-Type Bomb

لقد استند التصميم الأوّلي لقنبلة البلوتونيوم أيضا على استخدام تصميم بندقية بسيطة (تعرف باسم "رجل رفيع") مثل قنبلة اليورانيوم.. يُنتج البلوتونيوم في المفاعلات النووية في هانفورد، واشنطن، واُكتشف أن البلوتونيوم لم يكن نقيًّا مثل العينات الأولية من مختبر لورنس الإشعاع. حيث يحتوي البلوتونيوم على كميات من البلوتونيوم ٢٤٠، وهو النظير ذو معدل انشطار نووي سريع. هذه الملاحظة تطلبت تصميم نوع مختلف من القنابل النووية.. القنبلة من نوع البندقية لا تكون سريعة بما يكفي للعمل. قبل تجميع القنبلة، وقد تنبعث النيوترونات القليلة الشاردة الناتجة من الانشطارات التلقائية، وهذه النيوترونات قد تبدأ تفاعل متسلسل سابق لأوانه، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في الطاقة المنطلقة. ولذلك فقد طور عالم في لوس ألاموس يدعى سيث نيدرماير Seth Neddermeyer، هذه الفكرة باستخدام شحنة متفجرة (عبوات ناسفة) لضغط كرة البلوتونيوم بسرعة كبيرة جداً لتصل إلى كثافة كافية تجعلها ذات كتلة حرجة ومن ثم تُحدث انفجار نووي.



شكل رقم ( ) تصميم قنبلة الرجل السمين التي ألقيت على مدينة ناجازاكي باليابان.

انهيار من نوع القنبلة: تفجير تسلسلImplosion-Type Bomb: Detonation Sequence

١. يتم اشعال المادة شديدة الانفجار التي تحيط بالمواد الانشطارية.

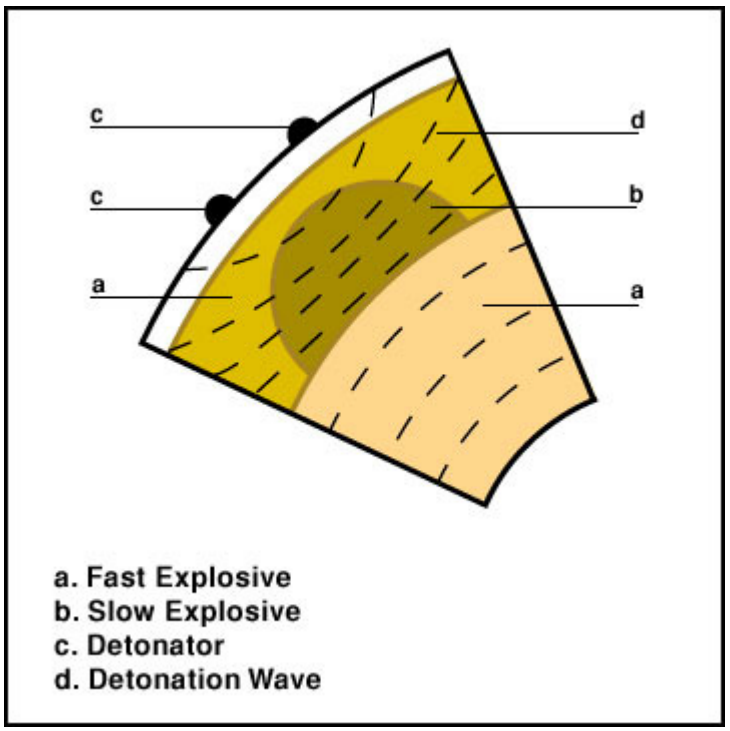
٢. تبدأ موجة الصدمة الانضغاطية في الانتقال إلى الداخل. تتحرك موجة الصدمة أسرع من سرعة الصوت، وتسبب زيادة كبيرة في الضغط. مما تعمل على هجوم موجة الصدمة على جميع النقاط على سطح كرة المواد الانشطارية الموجودة في قلب القنبلة في نفس اللحظة. ومن ثم تبدأ عملية الضغط.

٣. يترتب على ذلك زيادة كثافة النواة، وتصبح الكتلة حرجة، ثم تصل إلى فوق الحرجة (حيث ينمو التفاعل المتسلسل أسيًّا (يمكن وصفه عن طريق دالة أسية).

٤. الآن يتم تحرير البادئ، منتجًا العديد من النيوترونات، بحيث يتم تجاوز العديد من الأجيال في وقت قصير جدًّا.

٥. يستمر التفاعل المتسلسل حتى تصبح الطاقة المتولدة داخل القنبلة من الضخامة بحيث أن الضغط الداخلي بسبب الطاقة المنبعثة من شظايا الانشطار يتجاوز ضغط انهيار بسبب موجة الصدمة.

٦. عند تفكيك القنبلة، يتم نقل الطاقة المنطلقة في عملية الانشطار إلى المناطق المحيطة بها.



شكل رقم ( ) رسم تخطيطي يوضح توزيع الضغط داخل القنبلة بسبب المادة شديدة الانفجار.

References

http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml