الفصل السابع
الأندماج النووي

مقدمة

علمت أن بعض الأنوية الثقيلة مثل $^{235}_{92}U$ تنشطر إلى نواتين متوسطتين إذا قذفت بنيوترون بطيء , وعلمت أن مثل هذا التفاعل يسمى "الإنشطار النووي" وعكس هذا التفاعل أي "دمج نواتين خفيفتين معاً لتكوين نواة أثقل يسمى الإندماج النووي" وتنطلق طاقة هائلة مصدرها نقص كتلة النواة الناتجة عن مجموع كتلتي النواتين المندمجتين معاً.

ومن الأمثلة على الإندماج النووي إندماج نواتي الديتريوم (هيدروجين . 2) لتكوين الهيليوم كما في المعادلة التالية:

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n + \text{طاقة}$$

ولحساب الطاقة الناتجة عن هذا التفاعل :

مجموع كتل الأنوية الداخلة في التفاعل = 2 ك ديتريوم

= 2 × 2.013 = 4.026 و .ك.ذ

مجموع كتلة الأنوية الخارجة عن التفاعل = ك هيليوم + ك النيوترون

= 3.015 + 1.009 = 4.024 و .ك.ذ

النقص في الكتلة = D ك = 4.026 . 4.024 = 0.002 و .ك.ذ

الطاقة الناتجة عن التفاعل = 0.002 × 931 = 1.862 مليون الكترون فولت

وبالرغم من أن الطاقة الناتجة (1.862 مليون الكترون فولت) لا تساوي أكثر من 10% من الطاقة الناتجة من الإنشطار النووي (200 مليون الكترون فولت) إلا أننا يجب أن نتذكر هنا أن كتلة نواة اليورانيوم تساوي تقريباً 235 و .ك .ذ في حين أن كتلة نواة الديتريوم = 2 و .ك.ذ ولذلك فإن الطاقة الناتجة لكل كيلوغرام من الوقود النووي الإندماجي أكبر كثيراً من الطاقة الناتجة لكل كيلوغرام من الوقود النووي الإنشطاري, كما أن الإندماج النووي لا يتطلب وجود الكتلة الحرجة اللازمة للإنشطار النووي.

تعريف الاندماج النووي

الاندماج النووي هو التفاعل الذي يتم فيه اندماج أنويه خفيفة لتكون أنويه أثقل. ويصاحب هذا الإندماج نقص في الكتلة يظهر علي شكل طاقة هائلة. ويتكون الوقود الاندماجي من نظائر الهيدروجين، وهي الديوتيريوم H21s، والتريتيوم H31s، وينتج عن اندماجهما نواة الهليوم He24a.

وبمعني أخر، الاندماج النووي عملية تتجمع فيها نواتان ذريتان لتكوين نواة واحدة أثقل. ويلعب اندماج الأنوية الخفيفة مثل البروتون وهو نواة ذرة الهيدروجين والديوترون نواة الهيدروجين الثقيل والتريتيون وهو نواة التريتيوم دوراً هائلاً في العالم وفي الكون، حيث ينطلق خلال هذا الاندماج كمية هائلة من الطاقة تظهر على شكل حرارة وإشعاع كما يحدث في الشمس، فتمدنا بالحرارة والنور والحياة. فبدون هذا التفاعل ما وُجدت الشمس وما وُجدت النجوم، ولا حياة من دون تلك الطاقة المسماة طاقة الاندماج النووي. وتنتج تلك الطاقة الهائلة عن فقد في وزن النواة الناتجة عن الاندماج النووي، وهذا الفقد في الكتلة يتحول إلى طاقة طبقاً لمعادلة ألبرت أينشتاين التي تربط العلاقة بين الكتلة والطاقة.

هذا التفاعل هو الذي يغذي الشمس وباقي النجوم الأخرى في الكون، ويمدهم بالحرارة والضوء.

فائدة الاندماج النووي تكمن في إطلاقه كميات طاقة أكبر بكثير مما يطلقه الانشطار. وبالإضافة إلى ذلك، فإن المحيطات تحتوي بشكل طبيعي على كميات كافية من الدويتريوم اللازم للتفاعل فإذا فلح الإنسان في ترويض تلك الطاقة لتغذية الكوكب بالطاقة لمدة آلاف السنين، كما أن المواد المنبعثة عن الاندماج (خصوصا الهيليوم 4)، ليست مواداً مشعّة.

وعلى الرغم من العدد الكبير من التجارب التي تم القيام بها في كل أنحاء العالم منذ خمسين سنة، فإنه لم يتم التوصل إلى بناء مفاعل يعمل بالاندماج، ولكن الأبحاث في تقدم مستمر لغرض التوصل إلى ذلك. وكل ما اسطاع الإنسان التوصل إليه في هذا المجال جاء في المجال العسكري بابتكار القنبلة الهيدروجينية.

كيفية الحصول عليه

يحدث تفاعل الاندماج النووي عندما تتداخل نواتان ذريتان. ولكي يتم هذا التداخل، لا بد من أن تتخطى النواتان التنافر الحاصل بين شحنتيهما الموجبتين (وتعرف الظاهرة بالحاجز الكولومبي). إذا ما طبقنا قواعد الميكانيكا الكلاسيكية وحدها، سيكون احتمال الحصول على اندماج الأنوية منخفضا للغاية، بسبب الطاقة الحركية (الموافقة للهيجان الحراري) العالية جدا اللازمة لتخطي الحاجز المذكور. وفي المقابل، تقترح ميكانيكا الكم، وهو ما تؤكده التجربة، أن الحاجز الكولومبي يمكن تخطيه أيضا بظاهرة النفق الكمومي، بطاقات أكثر انخفاضا.

وبالرغم من ذلك، فإن الطاقة اللازمة للاندماج تبقى مرتفعة جداً، وهو ما يقابله حرارة أكثر من عشرات أو ربما مئات الملايين من الدرجات المئوية حسب طبيعة الأنوية. وفي داخل الشمس على سبيل المثال، يجري تفاعل اندماج الهيدروجين المؤين عبر مراحل إلى تولد الهليوم، في ظل حرارة تقدر ب 15 مليون درجة مئوية، ويحدث ذلك ضمن عدة تفاعلات مختلفة تنتج عنها حرارة الشمس. وتُدرس بعض تلك التفاعلات بين نظائر الهيدروجين بغرض إنتاج الطاقة عبر الاندماج، مثل: الديوتيريوم–ديوتيريوم أو الديوتيريوم–تريتيوم. أما في الشمس فتتواصل عملية الاندماج إلى العناصر الخفيفة ثم المتوسطة ثم ينتج منها العناصر الثقيلة مثل الحديد، الذي يحتوي في نواته على 26 بروتون ونحو 30 من النيوترونات. وفي بعض النجوم الأكثر كتلة عن الشمس، تتم عمليات اندماج لأنوية أضخم تحت درجات حرارة أكبر.

وعندما تندمج أنوية صغيرة، تنتج نواة قد تكون أكبر ولكنها غير مستقرة تسمي أحيانا نواة مركبة، ولكي تعود إلى حالة استقرار ذات طاقة أقل، تُطلق جسيم أو أكثر (فوتون، نيوترون، بروتون، على حسب التفاعل)، وتتوزع الطاقة الزائدة بين النواة والجسيمات المطلقة في شكل طاقة حركيّة. وتنطلق نواة ذرة الهيليوم بطاقة

قدرها 3٫5 MeV وينطلق النيوترون بطاقة قدرها 14,1 MeV (ميجا إلكترون فولت). وفي المفاعلات الاندماجية الجاري تطبيقها حاليا يجتهد العلماء للحصول على مردود جيد من الطاقة خلال الاندماج، أي من الضروري أن تكون الطاقة الناتجة أكبر من الطاقة المستهلكة لتواصل التفاعلات واستغلال الحرارة الناتجة في إنتاج الطاقة الكهربائية. كما يجب عزل محيط التفاعل ومواد المحيط في المفاعلات الاندماجية.

عندما لا يوجد أي وضع مستقر، تقريبا، قد يكون من المستحيل أن نقوم بإدماج نواتين (على سبيل المثال : 4He + 4He).

إن التفاعلات الاندماجية التي تطلق أكبر قدر من الطاقة هي تلك التي تستخدم أكثر الأنوية خفّة لإنتاج الهيليوم، لأن الهيليوم ونواته جسيم ألفا هي أقوى نواة ذرة هلى الإطلاق من جهة تماسكها، فهي تحتوي على 2 بروتون و 2 نيوترون وهؤلاء الأربعة شديدو التماسك بحيث يتحول جزء يعادل 0٫005 من كتلتهم كما في التفاعل الموضح بالرسم ،إلى طاقة حركة تتوزع بين نواة الهيليوم الناتجة والنيوترون. ومجموع الطاقتين الموزعتين = 3,5 + 14,1 = 17,6 ميجا إلكترون فولت. وبالتالي فإن أنوية الدويتيريوم (بروتون واحد ونيوترون واحد) والتريتيوم (بروتون واحد ونيوترونان)، مستخدمة في التفاعلات التالية:

ديوتيريوم + ديوتيريوم <– هيليوم 3 + نيوترون

ديوتيريوم + ديوتيريوم –> تريتيوم + بروتون

ديوتيريوم + تريتيوم –> هيليوم 4 + نيوترون

ديوتيريوم + هيليوم–3 –> هيليوم–4 + بروتون

وهذه التفاعلات هي أكثر التفاعلات دراسة في المخابر عند تجارب الاندماج المراقبة، وكل منها ينتج نحو 17 ميجا إلكترون فولت من الطاقة.

الاندماج المتحكم فيه

يمكن التفكير في عدة طرق تمكّننا من احتجاز محيط التفاعل للقيام بتفاعلات اندماج نووية، ويقوم العلماء فعلا بتلك التجارب بواسطة الاحتجاز المغناطيسي لما يسمى البلازما في جهاز مفرغ من الهواء مع رفع درجة حرارة البلازما إلى عشرات الملايين درجة مئوية. ولكن احتجاز البلازما – وهي أنوية التريتيوم و الديوتيروم العارية من الإلكترونات – تحت هذه الحرارة العالية صعب جدا إذ كلها تحمل شحنة كهربائية موجبة تجعلهم يتنافرون عن بعضهم. فما يلبث التفاعل أن يبدأ بينهم لمدة أجزاء من الثانية حتى يتنافروا ويتوقف التفاعل. وينصب حاليا اهتمام العلماء على ابتكار وسيلة يستطيعون بها إطالة مدة انحصار البلازما وإطالة مدة التفاعل. وتلك المجهودات ما هي إلا بغرض استغلال طاقة الاندماج النووي لإنتاج الطاقة الكهربائية.

مميزات الاندماج النووى

يتميز الاندماج النووى عن الانشطار النووى كمصدر للطاقة بالمميزات الآتية:

1- وفرة الوقود الاندماجى فمن المعروف أن الديوتريومs21H يوجد فى الماء الثقيل بمياه البحر حيث يكون نسبته إلى الماء العادى 1 : 6000 . وهذه الكمية من الديوتريوم تكفى لإنتاج الطاقة اللازمة للبشرية لحوالى 20 ألف مليون سنة.

2- الطاقة الناتجة من المفاعل الاندماجى أكبر من طاقة المفاعل الانشطارى فالكيلو جرام من اليورانيوم ينتج طاقة تعادل 22.9 مليون كيلووات ساعة بينما الكيلو جرام من الديوتيريوم ينتج 177.5 مليون كيلووات ساعة أي أنها أكبر بحوالى ثمان مرات.

3- لا تتخلف نظائر مشعة من عملية الاندماج النووى بينما يتخلف من عملية الانشطار النووى نفايات عالية الإشعاع التى تقدر بحوالى 8000 طن سنوياً من المفاعلات النووية العاملة فى العالم

المشاكل التي واجهت العلماء

ومن أهم المشاكل التى تواجه العلماء لإحداث الاندماج النووى ما يأتى:

1- الحصول على درجة حرارة عالية تبلغ ملايين الدرجات المئوية لتحويل نظائر الهيدروجين s21H ، s31H إلى حالة البلازما Plasma أي الحالة المتأينة منها ولتكتسب طاقة الحركة اللازمة للتغلب على قوى التنافر بين الأنوية.

2- تجميع البلازما فى مركز الوعاء الحاوى للوقود Plasma Confinementوذلك لإبعادها عن الجدران فتصبح البلازما معزولة ولا تتسرب طاقتها إلى الوسط المحيط بها وبذلك تحافظ على درجة حرارتها وترتفع فيها درجة الحرارة والضغط تدريجياً حتى تتم عملية الاندماج.

ولتحقيق هذه الشروط يوضع خليط الديوتيريوم والتريتيوم بكمية بسيطة داخل وعاء مفرغ إلى ضغط منخفض ويمر فى الوعاء تيار كهربى تبلغ شدته مئات الآلاف من الأمبيرات ونتيجة مرور التيار تنشأ حرارة عالية ترفع درجة حرارة نظائر الهيدروجين فتتحول إلى حالة البلازما وفى نفس الوقت يتولد مجال مغناطيسى قوى جداً يعمل على تجميع Confinement البلازما فى شريط رفيع وشديدة الإضاءة ذو ضغط وحرارة عالية وبعيداً عن جدران الوعاء.

ومن الجدير بالذكر الإشارة إلى صعوبة الحصول على شدة التيار المطلوبة لأن هذا يتطلب بناء مولد كهربى الذى يقوم بتوليد فرق جهد يساوى مئات

الملايين من الفولت بدون توقف . ويبين الشكل أساسيات أحد أجهزة الاندماج النووى الذى يعرف باسم توكاماكTokamak

كيف يمكن تحقيق الاندماج النووي؟

ويوجد الديوتيريوم في الماء الثقيل الذي يوجد في مياه المحيطات والبحار حيث يوجد بنسبه 1جم لكل 6 ألاف جم من الماء العادي. ويفصل الماء الثقيل بواسطة التحليل الكهربائي، ويلزم لذلك طاقة تعادل 60 ألف كيلوات ساعة. أما التريتيوم فإنه يوجد في الطبيعة بكميات ضئيلة. لذلك فإنه يحضر عن طريق قذف الديوتريوم بالنيوترونات السريعة. وتحتاج تفاعلات الاندماج إلى درجات حرارة عالية تقدر بعشرات الملايين من الدرجات المئوية.

وفي هذه الدرجات تنفصل نواة ذرات الهيدروجين عن الإلكترونات وتصبح الأنويه كأنها سابحة في وسط من الإلكترونات وتعرف هذه باسم البلازما Plasma.

ولكي تتغلب الأنوية علي قوة التنافر بينها يلزم وجود ضغط عال يبلغ عدة مليارات من الضغوط الجوية. ويطلق علي التفاعلات الاندماجية اسم التفاعلات النووية الحرارية Thermonuclear Reactions نظرا لأنها تحتاج إلى طاقة حرارية كبيرة لإتمامها.

هذه الشروط متوفرة في الشمس التي تحتوي علي كميات هائلة من الهيدروجين وحيث تتوافر درجات الحرارة العالية (15 مليون درجة مئوية) وفيها تتحد 4 بروتونا وينتج الهليوم. وتعرف هذه العملية بدورة البروتون_ بروتون.

الاندماج النووي والقنبلة الهيدروجينية

استخدم الاندماج النووي في تصنيع القنبلة الهيدروجينية Hydrogen or Thermonuclear bomb وقد أمكن توفير الشروط المطلوبة من درجة حرارة وضغط عال في هذه القنبلة بواسطة قنبلة نووية (ذرية) انشطارية لفترة قصيرة تساعد علي حدوث الاندماج بين نظائر الهيدروجين.

وتعادل قوة القنبلة الهيدروجينية قوة انفجار 20 مليون طن من مادة الـ TNT وهي أقوي ألف مرة من قوة القنبلة الذرية وتسبب دمارا تاما في منطقة طولها 10 أميال ويصل تأثيرها الحراري إلى عشرين ميل وينتشر غبارها الذري إلى ارتفاع 30 ألف قدم فوق سطح الأرض. ومن أخطر المواد المشعة الناتجة من الانفجار نظير

السترنشيومSr3890s وعمر النصف له 27 سنة. وإذا سقط علي الأرض يمتص من التربة بواسطة النباتات ومنها إلى الحيوان وينتقل إلى الإنسان عندما يتغذى علي ألبانها ولحومها ويترسب Sr3890sفي العظام مسببا سرطان العظام.

وكان العالم الألماني هانز بيت Hans Bethe أول العلماء الذين فرضوا أن الطاقة الناتجة من النجوم، مثل: الشمس هي نتاج تفاعلات الاندماج النووي (1938). وقد أستحق عليها جائزة نوبل في الفيزياء عام 1967م.

أيهما أسهل: الإندماج النووي أم الإنشطار النووي

وقد يبدو للوهلة الأولى أن الإندماج النووي أسهل كثيراً من الإنشطار النووي, لأن الديتريوم موجود في الطبيعة ويمكن الحصول عليه بكميات وافرة بثمن رخيص, إلا أن الحال ليس كذلك بسبب زيادة قوة التنافر الكهربائية عند اقتراب النواتين من بعضهما البعض ولهذا السبب فإنه من أجل إحداث اندماج نووي لا بد من توفير الظروف التالية:

1. حصر الأنوية الخفيفة في حيز صغير جداً لزيادة إمكان تصادمهما والتحامهما معاً.
2. زيادة الضغط الواقع على الأنوية الخفيفة زيادة كبيرة.
3. رفع درجة حرارة الأنوية الخفيفة إلى رتبة (710) درجة سيلسيوس, وذلك لاكسابها طاقة حركية عالية.

وبسبب صعوبة توفير كل هذه الظروف, ولا يوجد إناء يمكن أن يحوي مادة درجة حراراتها عالية ومضغوطة بهذا الشكل, لذلك كان من الصعب تحقيق الإندماجات النووية في المختبرات العلمية.

مزايا المفاعل النووي الإندماجي

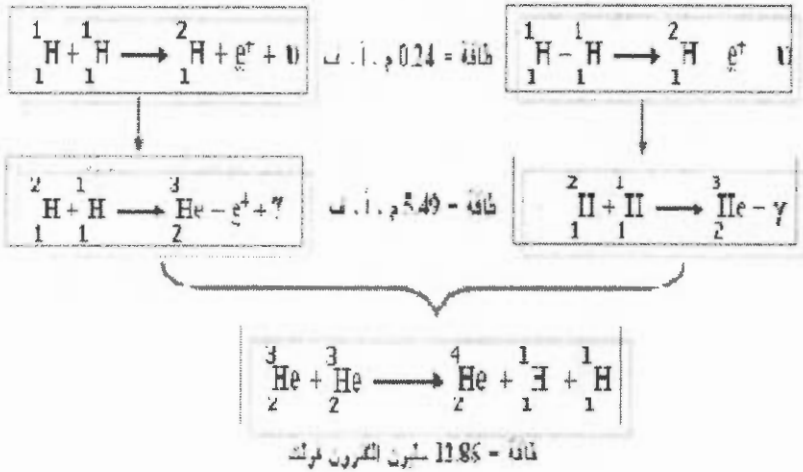
1. سهولة الحصول على الوقود النووي حيث أنه يمكن مثلاً استخلاص الديتريوم من مياه البحر.
2. النفايات الناتجة (الهيليوم) أنوية غير مشعة.
3. من السهل إيقاف التفاعل.

وقد توصل العلماء إلى إحداث اندماج نووي محدود في القنبلة الهيدروجينية والموضحة في الشكل التي وقودهاالهيدروجين الثقيل (الديتريوم) والتي تتكون من غلاف قوي جداً في داخله قنبلة نووية انشطارية, توفر درجة الحرارة العالية اللازمة لتزويد أنوية الهيدروجين بالطاقة الحركية, ولتفجير القنبلة الهيدروجينية يتم أولاً تفجير القنبلة النووية الإنشطارية فترتفع درجة حرارة الديتريوم ارتفاعاً هائلاً مما يمكن نُواه من الإندماج وتوليد طاقة حرارية هائلة .

وقد أجرت الولايات المتحدة الأمريكية, أول تجربة للقنبلة الهيدروجينية في أيار عام 1951 في المحيط الهادي, وفي تشرين الثاني من العام نفسه. اجرت التجربة الثانية باستخدام قنبلة من عيار 7 ميغا طن, وكان نتيجة هذه التجربة اختفاء جزيرة من البحر اختفاء تاماً.

الطاقة الشمسية Solar Energy

يفسر العلماء طاقة النجوم بحدوث تفاعلات اندماج نووي في باطنها, فنظراً لارتفاع درجة حرارة باطن النجم والتي قد تصل إلى 15 مليون كلفن كما في الشمس وكذلك كبر الضغط, جعل العالم بيثيه Bethe يفترض أن مصدر الطاقة الشمسية هو الإندماج النووي الذي يحدث بين أنوية الهيدروجين لتكوين أنوية الهيليوم, وأثناء ذلك تنتج الطاقة الشمسية الهائلة. واقترح بيثيه دورة تسمى دورة البروتون . البروتون في الشمس موضحة فيما يلي.



تبدأ هذه الدورة بتصادم بروتونين ($^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H$) لتكوين ديوترون ($^{2}_{1}H$) وينتج بوزيترون (e+) ونيوترينو (u) وعندما يتكون الديوترون فإنه يصطدم ببروتون آخر خلال ثواني ويكوّن نواة الهيليوم ($^{3}_{2}He$) ثم تتصادم نواتي الهيليوم ($^{3}_{2}He$) الناتجتين من تفاعلين مستقلين ,وتكوّن ($^{4}_{2}He$) المستقر وبروتونين .

وبنظرة شاملة لما يحدث في دورة البروتون . البروتون, فإن ما يحدث فعلياً هو اندماج 4 بروتونات لتكوين نواة هيليوم وبوزيترونين وبانتاج كمية من الطاقة (ط) ويمكن حسابها:

ط = [4 ك البروتون . ك الهيليوم . 2 ك الكترون] س2

حيث س: سرعة الضوء

ثم لننظر ما يحدث للبوزيترونين الناتجين, إن ما يحدث فعلياً هو إفناء الكترونين مع البوزيترونين وتحويل الكتل إلى أشعة جاما طَ) طَ = 4 ك الكترون × س2

وبذلك تكون

الطاقة الناتجة من الدورة = 4 (ك بروتون + ك الكترون) س2 . (ك الهيليوم + 2 ك الكترون) س2

= 4 [ك البروتون .

ك الهيليوم]

وبذلك تكون

الطاقة الناتجة = [4(1.00873) . (4.00260)] (931)

= 26.7 مليون الكترون فولت