الفصل الخامس
الاندماج النووى

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 تنطلق خلال هذا الاندماج كمية هائلة من الطاقة، تظهر على شكل حرارة وإشعاع، كما يحدث في الشمس (شكل ١)، فتمدنا بالحرارة والنور والحياة. فدون 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، ويتحول هذا الفقد في الكتلة إلى طاقة؛ طبقاً لمعادلة ألبرت أينشتاين، التي تربط العلاقة بين الكتلة والطاقة. هذا التفاعل هو الذي يغذي الشمس، وبقية النجوم الأخرى في الكون، ويمدهم بالحرارة والضوء.

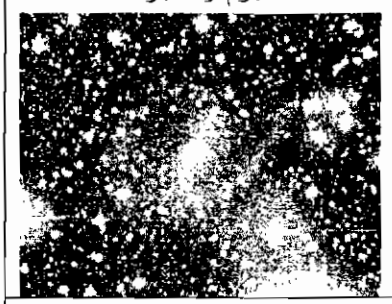
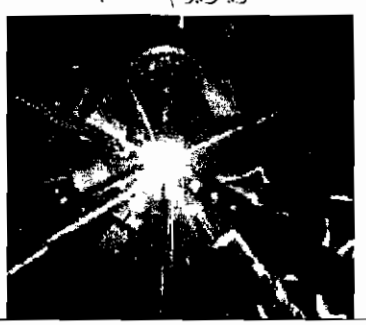
تكمن فائدة الاندماج النووي في إطلاقه كميات طاقة، أكبر بكثير مما يطلقه الانشطار. وبالإضافة إلى ذلك، فإن المحيطات تحتوي، بشكل طبيعي، على كميات كافية من الدويتريوم اللازم للتفاعل، فإذا أفلح الإنسان في ترويض تلك الطاقة لتغذية الكوكب بالطاقة لمدة آلاف السنين، فإن المواد المنبعثة عن الاندماج (خصوصا الهيليوم ٤)، ليست مواد مشعّة.

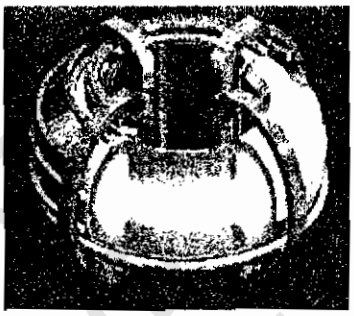
وعلى الرغم من العدد الكبير من التجارب، التي تم القيام بها في كل أنحاء العالم منذ خمسين سنة، فإنه لم يتم التوصل إلى بناء مفاعل يعمل بالاندماج، ولكن الأبحاث في تقدم مستمر لغرض التوصل إلى ذلك. وكل ما استطاع الإنسان التوصل إليه في هذا المجال، جاء في المجال العسكري بابتكار القنبلة الهيدروجينية.

شكل (١): الشمس، مركز تفاعلات اندماج نووية متعدّدة.

حصر البلازما والتسخين

يتطلب الاندماج النووي بلازما كثيفة ذات درجة حرارة عالية، وأطول فترة زمنية ممكنة لتحرير طاقة الاندماج، ويوضح الجدول الآتي ملخصًا لطرق حصر البلازما، وآلية تسخينها وبعض الأمثلة.

طريقة الحصر	آلية التسخين	صورة لنموذج
الجاذبية	انضغاط (الجاذبية) التفاعلات الاندماجية (مثل سلسلة تفاعل بروتون مع بروتون)	النجوم والمجرات 
القصور الذاتي	انضغاط (انفجار ضمني منقاد بحزم الليزر أو بالأشعة السينية من الليزر أو حزم من الأيونات) التفاعلات الأندماجية (الديوتيريوم – تريتيوم)	تفاعل حزم الليزر مع كريات من الدويتريوم الصلب 

طريقة الحصر	آلية التسخين	صورة لنموذج
المغناطيسية	موجات كهرومغناطيسية تسخين أومي (بالتيار الكهربي) حزم الجسيمات المتعادلة (الهيدروجين الذري) انضغاط (بالمجالات المغناطيسية) التفاعلات الاندماجية (الديوتيريوم – تريتيوم)	التوكاماك 

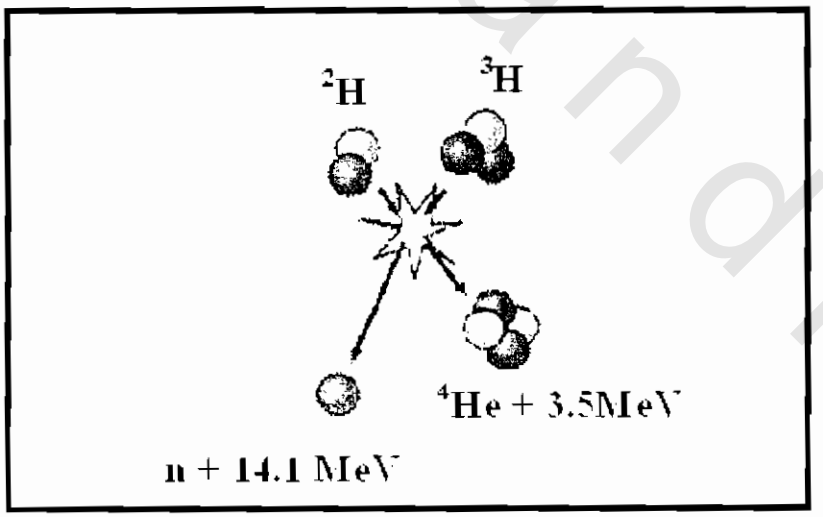
آلية الإندماج

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 منخفضًا للغاية، بسبب الطاقة الحركية (الموافقة للهيجان الحراري) العالية جدًا اللازمة؛ لتخطي الحاجز المذكور. وفي المقابل، تقترح ميكانيكا الكم، وهو ما تؤكده التجربة، أن الحاجز الكولومبي يمكن تخطيه أيضًا بظاهرة النفق. بطاقات أكثر انخفاضا.

وعلى الرغم من ذلك، فإن الطاقة اللازمة للاندماج تبقى مرتفعة جدًا، وهو ما تقابله 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 بـ ١٥ 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 (انظر شكل ٢). أما في الشمس، فتتواصل عملية الاندماج إلى العناصر الخفيفة ثم المتوسطة، ثم ينتج منها العناصر الثقيلة مثل الحديد، الذي يحتوي في نواته على ٢٦ بروتون، ونحو ٣٠ من النيوترونات.

وفي بعض النجوم الأكثر كتلة عن الشمس، تتم عمليات اندماج لأنوية أضخم، تحت درجات حرارة أكبر.

وعندما تندمج أنوية صغيرة، تنتج نواة غير مستقرة، تسمي أحياناً نواة مركبة. ولكي تعود إلى حالة استقرار ذات طاقة أقل، تـُطلق جسيمًا أو أكثر (فوتون، نيوترون، بروتون، على حسب التفاعل). وتتوزع الطاقة الزائدة بين النواة والجسيمات المطلقة في شكل طاقة حركيّة. وطبقاً للرسم التوضيحي، تنطلق نواة ذرة الهيليوم بطاقة قدرها 3.5MeV، وينطلق النيوترون بطاقة قدرها 14.1MeV. وفي المفاعلات الاندماجية الجاري تطبيقها حاليًا، 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.



شكل (٢)

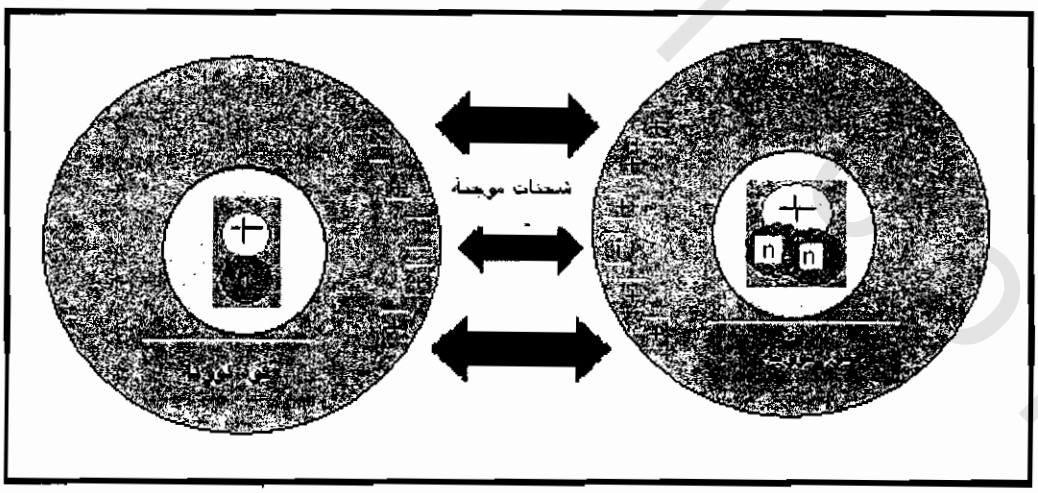
إن التفاعلات الاندماجية التي تطلق أكبر قدر من الطاقة، هي تلك التي تستخدم أكثر الأنوية خفّة لإنتاج الهيليوم؛ لأن الهيليوم ونواته جسيم ألفا هي أقوى نواة ذرة على الإطلاق من جهة تماسكها، فهي تحتوي على ٢ بروتون و ٢ نيوترون وهؤلاء الأربعة شديدو التماسك؛ بحيث يتحول جزء يعادل ٠٫٠٠٥ من كتلتهم، كما في التفاعل الموضح بالرسم، إلى طاقة حركة تتوزع بين نواة

الهيليوم الناتجة والنيوترون. ومجموع الطاقتين الموزعتين = 3.5+14.1 =17.6MeV ، وبالتالي فإن أنوية الدويتيريوم (بروتون واحد ونيوترون واحد) والتريتيوم (بروتون واحد ونيوترونان)، مستخدمة في التفاعلات التالية:

- دويتيريوم + دويتيريوم -> هيليوم ٣ + نيوترون
- دويتيريوم + دويتيريوم -> تريتيوم + بروتون
- دويتيريوم + تريتيوم -> هيليوم ٤ + نيوترون
- دويتيريوم + هيليوم ٣ -> هيليوم ٤ + بروتون

وهذه التفاعلات هي أكثر التفاعلات دراسة في المخابر، عند تجارب الاندماج المراقبة، وينتج كل منها نحو 17MeV من الطاقة.

حاجز الجهد الفعلي للقوى الكهروستاتيكية، هو السائد قبل حدوث الاندماج عند المسافات الكبيرة. تتنافر الأنوية المجردة من الإلكترونات مع بعضها بسبب قوى التنافر الكهروستاتيكية بين البروتونات الموجبة الشحنة، إذا اقتربت هذه الأنوية من بعضها؛ بحيث تتغلب قوى التجاذب النووى على قوى التنافر الكهروستاتيكية. يحدث الاندماج وتحرر النيوترونات، ويبين الشكل أسفل عند المسافات القصيرة، كيف تصبح قوى التجاذب النووية أكبر من قوى التنافر الكهروستاتيكية



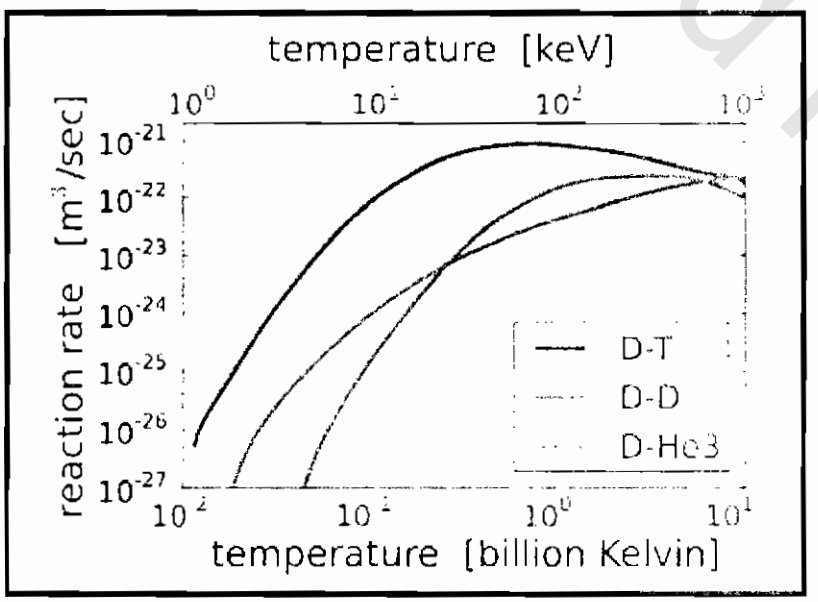
شكل (٣): عند المسافات القصيرة، تصبح قوى التجاذب النووية أكبر من قوى التنافر الكهروستاتيكية.

الاندماج المتحكم فيه

يمكن التفكير في عدة طرق، تمكّننا من احتجاز محيط التفاعل للقيام بتفاعلات اندماج نووية، ويقوم العلماء فعلاً 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 والديوتيروم الخالية من الإلكترونات – تحت هذه الحرارة العالية صعب جدًا؛ إذ إنها كلها تحمل شحنة كهربائية موجبة، تجعلهم يتنافرون عن بعضهم. فما يلبث التفاعل أن يبدأ بينهم لمدة أجزاء من الثانية؛ حتى يتنافروا ويتوقف التفاعل. وينصب اهتمام العلماء حاليا 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.

بلازما الإندماج

يزداد معدل التفاعل الاندماجي سريعًا بزيادة درجة الحرارة؛ حتى يصل الى اقصى قيمة، ثم ينخفض تدريجيًا. القيمة العظمى لمعدل التفاعل D-T عند درجات حرارة منخفضة (حوالي ٧٠ كيلو الكترون فولت أو ٨٠ مليون كلفن)، مقارنة مع القيم العظمى لمعدل التفاعلات الأخرى مثل (D-He3 & D-D)، التي تحتاج الى درجات حرارة أعلى (انظر الشكل ٤).



شكل (٤): رسم بياني يوضح العلاقة بين درجة الحرارة، ومعدل التفاعل لثلاثة أنواع من التفاعلات الاندماجية.

عندما تصل الحرارة الدرجة التي يحصل فيها الاندماج، تكون المادة في حالة بلازما. إنها حالة خاصة للمادة الأولية، تكوّن فيها الذرات أو الجزيئات غازًا أيونيًا.

تحت درجات الحرارة العالية، يتم اقتلاع إلكترون أو أكثر من السحابة الإلكترونية المحيطة بكل نواة؛ مما ينتج عنه أيونات موجبة وإلكترونات طليقة.

ينتج عن التحرك الكبير للأيونات والإلكترونات داخل بلازما حرارية، عدة اصطدامات بين الجسيمات الموجبة الشحنة الكهربية. ولكي تكون هذه الاصطدامات قوية بما فيه الكفاية لإنشاء تفاعل اندماجي، تتدخل ثلاثة عوامل:

١. الحرارة T؛

٢. الكثافة N؛

٣. زمن الاحتجاز τ.

حسب لوسون، فإن المعامل $N\tau$ يجب أن يصل حدا فاصلا للحصول على الـ *breakeven*؛ حيث تكون الطاقة الناتجة عن الاندماج مساوية للطاقة المستخدمة. يحدث الإيقاد إثر ذلك في مرحلة أكثر إنتاجًا للطاقة (لم يتوصل العلماء لإيجادها حتى اليوم في المفاعلات التجريبية الحالية). إنه الحد الذي يكون التفاعل على إثره قادرًا على المواصلة من تلقاء ذاته، دون انقطاع. لتفاعل ديتوريوم + تريسيوم، يقدّر هذا الحد بـ $١٠^{١٤}$ ثانية/سم^3.

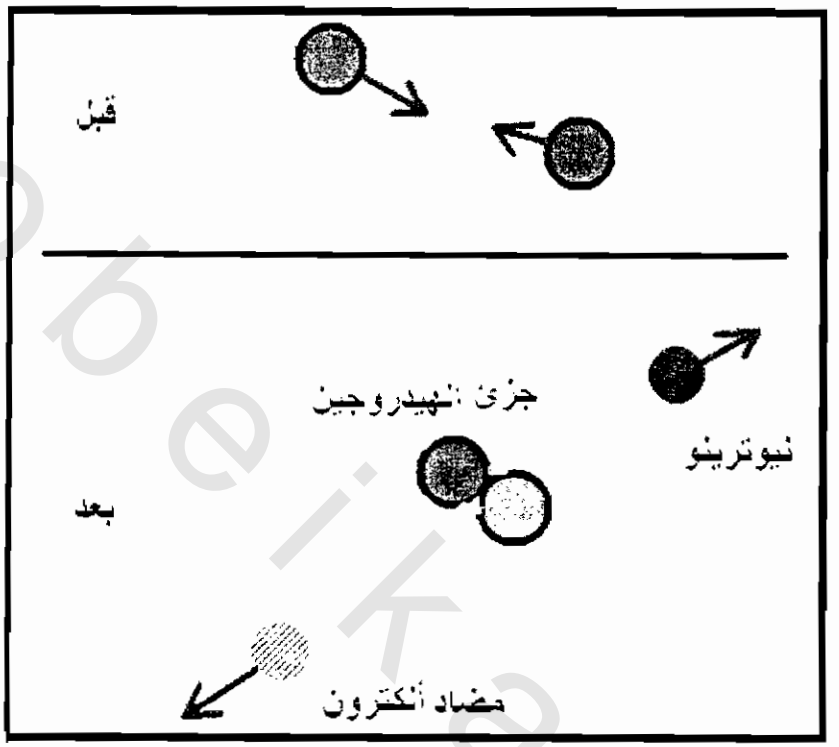
الاندماج في الشمس خطوة بخطوة

تفاعلات الاندماج النووي العامّ

الخطوة الأولى

ينتج عن تفاعل بروتون مع بروتون جزئ الهيدروجين، ومضادّ إلكترون ونيوترينوَ، كما هو موضح بالمعادلة (١)، والشكل (١):

$$^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + \text{antielectron} + \text{neutrino} \qquad (1)$$



الشكل (٥)

هذه الخطوةِ مستحيلةٌ تقريباً.

تَنافرُ البروتونات مع بعضها البعض؛ لأن لكليهما نفس الشحنة (موجبة)، كما يَجِبُ أنْ تصبح خلال مسافة 10^{-15} m بعضها البعض للتفاعلاتِ القويةِ لإحتِجازها.

يَجِبُ أنْ تتحولَ إحدى هذه البروتوناتِ إلى نيوترون (تَنبَعِثُ مضادَ ألكترون ونيوترينوَ)، وهذا يَتطلّبُ تفاعلاً ضعيفًا. ولكن فرصةَ حدوث هذا التفاعلِ الضعيفِ فقط، عندما تصبح المسافات بين البروتونات تقريباً صفر. ويستحيل أن يتحقق هذا القُرْب إلا بشرطين:

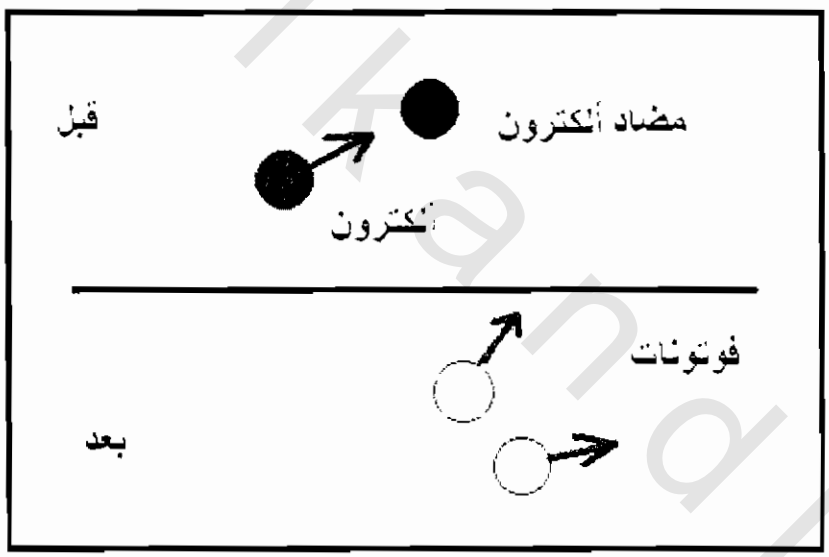
١- يَجِبُ أنْ يَكُونَ الغاز حارًّا جدًّا؛ لكي تتصادم البروتونات مع بعضها البعض بالسرعةِ العاليةِ، وهذا يجعلهم يَقتربونَ إلى بعضها البعض، على الرغم من أنَّ يَصُدّوا بعضها البعض.

٢- رغم ذلك، فإن حدوث هذا التفاعل أمر نادرٌ جداً. ولهذا السبب ما زالَتْ الشمس تَحترقُ بعد ٤,٦ بليون سنةٍ!

الخطوة الثانية

نتج عن تفاعل ألكترون مع مضادَ ألكترون، الفوتونين (تمتص هذه الفوتوناتِ ذات الطاقةِ العاليةِ بواسطة الغاز، وفي النهاية تَعطي الكثير مِنْ الفوتوناتِ ذات الطاقةِ المنخفضةِ)، ويتلاشى كلاهما، كما هو موضح بالمعادلة (٢)، والشكل (٢)

electron + antielectron --> photon + photon (2)

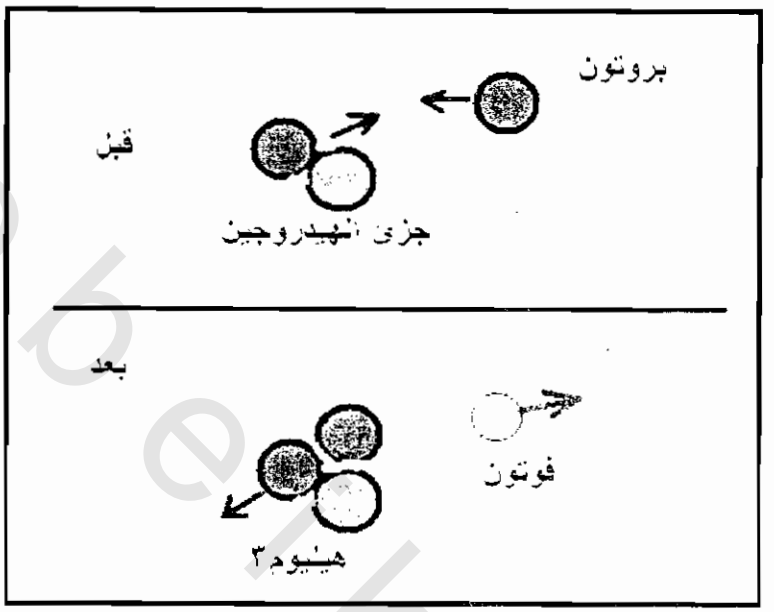


الشكل (٦)

الخطوة الثالثة

تفاعل بروتون مع جزئ الهيدروجين ينتج عنه نواة هيليوم ٣، وفوتون واحد، كما هو موضح بالمعادلة (٣) والشكل (٣):

$$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + photon \qquad (3)$$

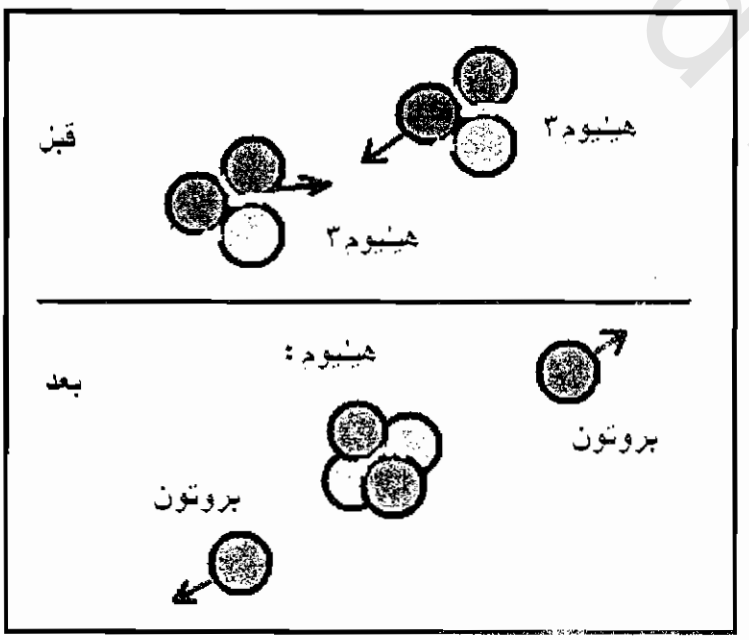


الشكل (٧)

الخطوة الرابعة

تفاعل هليوم٣ مع هيليوم ٣ ينتج عنه نواة هيليوم٤، وعدد ٢ بروتون، كما هو موضح بالمعادلة (٤) والشكل (٤):

$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H \qquad (4)$$



الشكل (٨)

obeikandl.com

الخطوات من ١ – ٣ تتكرر مرتين، أما الخطوة ٤ مرة واحدة.

محصلة النتائج هى:

$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H$ + antielectron + neutrino
$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H$ + antielectron + neutrino
electron + antielectron --> photon + photon
electron + antielectron --> photon + photon
$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He$ + photon
$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He$ + photon
$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H$

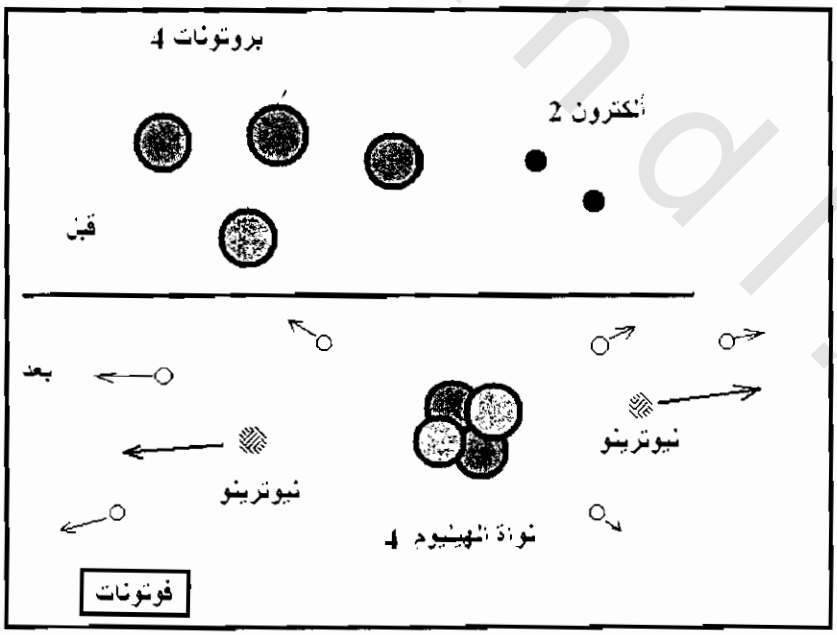
That is

$$\mathbf{6\ {}^{1}H + 2\ e \rightarrow {}^{4}He + 2\ {}^{1}H + 2\ neutrinos + 6\ photons}$$

or

$$\mathbf{4\ {}^{1}H + 2\ e \rightarrow {}^{4}He + 2\ neutrinos + 6\ photons} \qquad \mathbf{(5)}$$

عند تفاعل عدد أربعة من البروتونات مع اثنين من الإلكترونات، تنتج نواة الهيليوم، واثنان من النيوترينو، وعدد ٦ من الفوتونات، ومحصلة الطاقة المتحررة من هذا التفاعل ٢٦ ميغا إلكترون فولت بروتون، كما هو موضح بالمعادلة (٥) والشكل (٥).

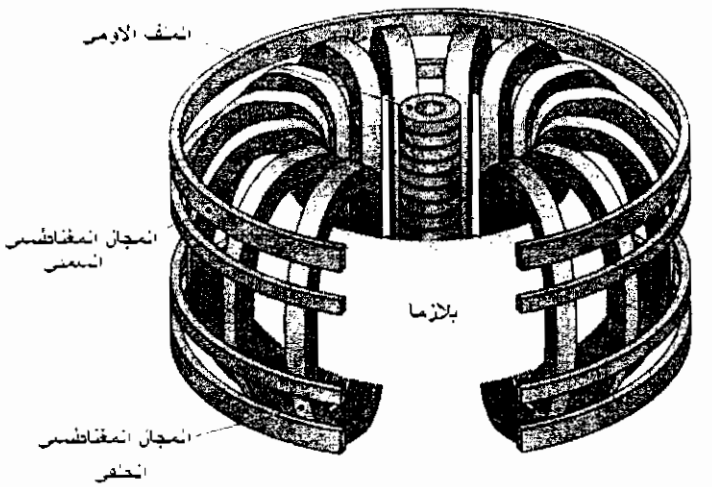


الشكل (٩)

لا تذهب الفوتونات ذات الطاقةِ العاليةِ التي أنتجتْ بالعمليةِ النوويةِ بعيدًا، بل إنها تمتص بواسطة الغاز، وتؤدي إلى تسخينهَ. ويَبْقى الهيليومُ في منتصفِ الشمسِ. وتهرب النيوترينوات بسهولة خارج الشمسِ.

التوكاماك Tokamak

التوكاماك نوع من أنواع المفاعلات النووية الاندماجية، وطريقة من طرق بناء هذه المفاعلات (انظر شكل ١٠). ما زالت هذه الطريقة قيد البحث والتجربة، ولم تصل إلى مرحلة الاستغلال الاقتصادي بعد. تعمل هذه الطريقة عن طريق رفع درجة حرارة بلازما إلى درجة الاندماج النووي. وبما أن البلازما ذات درجة حرارة عالية جدًّا، فإنه يجب فصلها وإبعادها، وجعلها لا تلامس مكونات المفاعل، وإلا أتلفته، وتسبب ذلك في برودتها، وانقطاع التفاعل الاندماجي. يتم في المفاعلات، المبنية على طريقة توكاماك، جعل البلازما تطفو وسط المفاعل، دون أن تلامس أيا من أجزائه عن طريق مجالات مغناطيسية، تحافظ على البلازما في مسار دائري. وفي الوقت الراهن تتمثل الصعوبات أمام هذا النوع من المفاعلات، في الحفاظ على تواصل التفاعل الاندماجي؛ أي على حرارة البلازما؛ حيث إن اختلاف السرعة في طبقات البلازما الداخلية والخارجية يسبب تداخلات، تقلل من درجة الحرارة؛ مما يتطلب جعل الحقل المغنطيسي أو القوة المغناطيسية في شكل لولبي. وهذا يتم عن طريق ضخ تيار كهربائي في البلازما، والذي يساهم في رفع درجتها قليلاً، بغض النظر عن تقليل الخسائر الناتجة عن التداخلات. كما أن تبريد المفاعل أيضًا لا يسمح بتشغيل متواصل له بل فقط، بعمل متقطع نبضي. كل هذا أدى إلى أنه حاليًا في أفضل الأحوال، يمكن فقط استرداد كمية الطاقة، التي تصرف لتشغيل المفاعل؛ أي إنه لا يصلح لإنتاج الكهرباء، إلا أن بعض المفاعلات التجريبية في المستقبل تريد أن تبرهن على إمكانة إنتاج طاقة أكبر من تلك الطاقة اللازمة لتشغيلها.



شكل (١٠) التوكاماك

الظروف الملائمة للتفاعل الاندماجي

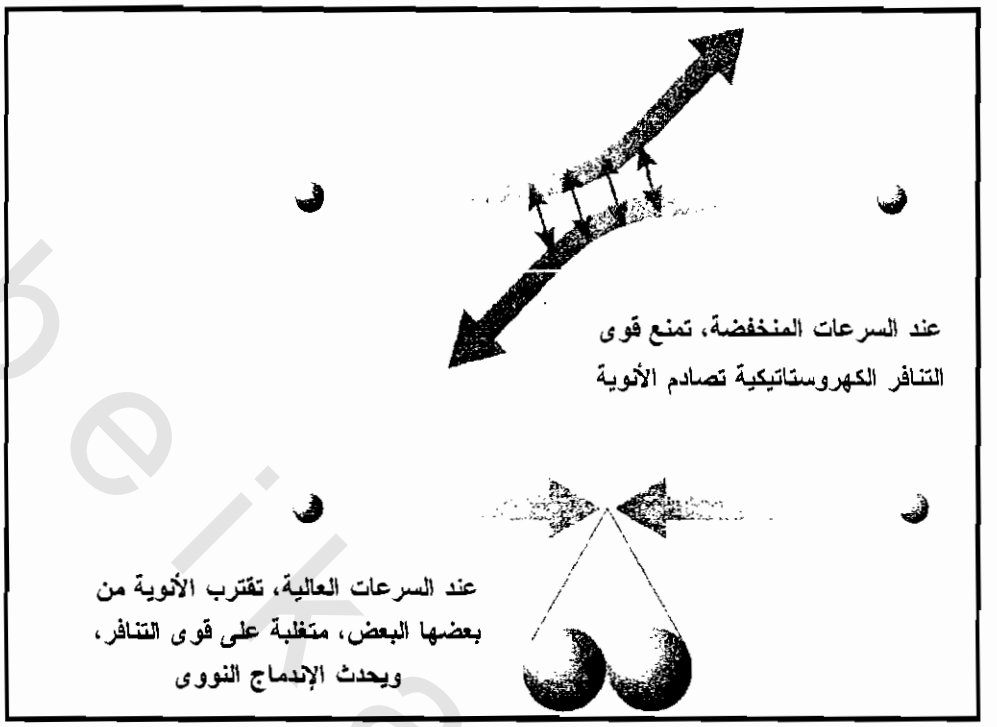
ضرورة تحقيق البارامترات الثلاث (درجة الحرارة وكثافة البلازما والفترة الزمنية للحصر) في آنٍ واحد، كشرط لحدوث استمرارية الاندماج في البلازما. ويطلق على حاصل ضرب هؤلاء (أو الثلاثي) ناتج الاندماج، وبالنسبة لحدوث اندماج D-T ، فإن هذا الناتج يجب أن يتجاوز كمية معينة – المشتق من معيار لوسون؛ نسبة الى العالم البريطاني جون لوسون، الذي أتم صياغته في عام ١٩٥٥. تحقيق الظروف الملائمة لتلبية معيار لوسون يضمن تجاوز نقطة تعادل البلازما – وهي النقطة، التي تتجاوز فيها قدرة الاندماج القدرة المطلوبة للتسخين، والإبقاء على البلازما.

درجة الحرارة

تحدث التفاعلات الاندماجية بمعدل كافٍ، فقط عند درجات حرارة عالية جدًا – عندما تتغلب ايونات البلازما، ذات الشحنة الموجبة، على قوى التنافر الطبيعية فيما بينها (شكل ١١). عادة، في المفاعل JET، هناك حاجة إلى أكثر من ١٠٠ مليون كلفن لحدوث تفاعل اندماجي D-T، وتتطلب التفاعلات الاندماجية الأخرى (مثل D-D، $D - He^3$) درجات حرارة أعلى من ذلك.

الكثافة

يتناسب عدد التفاعلات الأندماجية لكل وحدة حجم تقريبًا مع مربع الكثافة، لذا يجب أن تكون كثافة أيونات الوقود كبيرة بما فيه الكفاية؛ لكي تأخذ التفاعلات الاندماجية مكانها بالمعدل المطلوب. يتم تقليل الطاقة المتولدة بالاندماج، إذا خفف الوقود بذرات الشوائب، أو تراكم أيونات الهليوم من التفاعلات الاندماجية في حد ذاتها. كلما تم حرق أيونات الوقود في عملية الاندماج يجب الاستعاضة عنها بوقود جديد ومنتجات الهليوم (الرماد) يجب إزالتها.



شكل (١١)

فترة حصر الطاقة

فترة حصر الطاقة هي مقياس لمدى طول فترة الإبقاء على الطاقة في البلازما، قبل أن تضيع. وتعرف على أنها النسبة بين الطاقة الحرارية الموجودة في البلازما، ومدخلات الطاقة؛ المطلوبة للحفاظ على هذه الظروف. في جهاز الجيت (JET) على سبيل المثال (انظر الشكل ١٢)، تستخدم المجالات المغناطيسية لعزل البلازما الساخنة جدًا من جدران الوعاء، البارد نسبيًا؛ من أجل الحفاظ على الطاقة لأطول فترة ممكنة. ويقتصر جزء كبير من فقد البلازما المحصورة مغناطيسيا على الإشعاع. تزداد الفترة الزمنية للحصر بشكل كبير مع حجم البلازما (تحتفظ الأحجام الكبيرة بالحرارة أفضل بكثير من الأحجام الصغيرة) -- مثال ذلك الشمس، فترة حصر الطاقة بها هائل.

لحدوث الاندماج النووي، لابد من تحقيق ظروف البلازما التالية في آنٍ واحد.

درجة الحرارة البلازما : ١٠٠-٢٠٠ مليون كلفن.

وقت الحجز : ٤-٦ ثوانٍ.

الكثافة في مركز البلازما: $1-2\times10^{20}m^{-3}$.

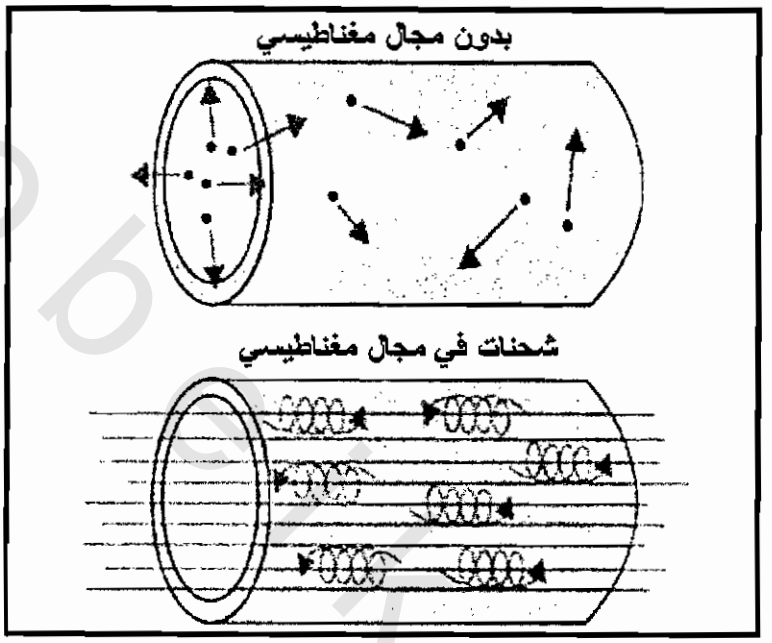
علما بأن البلازما ذات الكثافة العالية تتطلب زمن حصر أقصر، ولكن من الصعب للغاية تحقيق كثافة البلازما العالية، في المجالات المغناطيسية الواقعة.

شكل (١٢): تجربة JET – صورة البلازما من كاميرا الفيديو CCD (من وراء نافذة كوارتز).

حصر البلازما مغناطيسيا

بما أن البلازما تضم الجسيمات المشحونة: الأيونات (الموجبة) والإلكترونات (السالبة)، يمكن استخدام المجالات المغناطيسية القوية لعزل البلازما من جدران وعاء الاحتواء – وبالتالي يمكن تسخين البلازما في درجات حرارة أكثر من ١٠٠ مليون كلفن. تقلل هذه العزلة للبلازما من فقدان الحرارة عن طريق التوصيل للوعاء، وتعمل أيضا على تقليل الشوائب من جدران الوعاء في قلب البلازما، التي من شأنها أن تلوثها، وكذلك تعمل على تبريدها بالإشعاع.

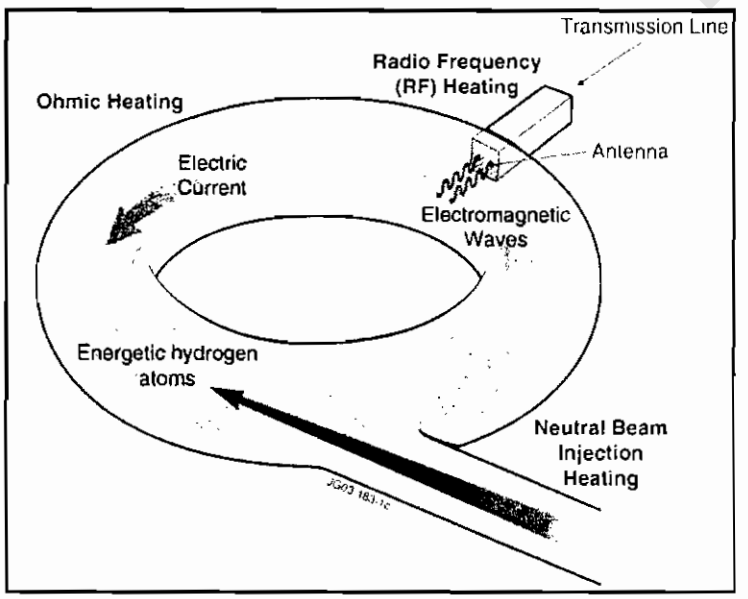
في المجال المغناطيسي، تضطر جزيئات البلازما المشحونة في التدويم على طول خطوط الحقل المغناطيسي (انظر الشكل ١٣). تكون نظم الحصر المغناطيسي الواعدة حلقية (على شكل حلقة)، وهؤلاء أكثرهم تقدمًا هو التوكاماك. حاليا، أكبر توكاماك في العالم، هو JET الجيت في المملكة المتحدة، على الرغم من أن آلة المستقبل (الأيتر) ستكون أكبر من ذلك.



شكل (١٣)

تسخين البلازما

أحد المتطلبات الرئيسية للاندماج هو تسخين جزيئات البلازما لدرجات حرارة عالية جدًا. وعادة ما تستخدم الأساليب التالية لتسخين البلازما، ويعمل كل منهم على متن أكبر مفاعل اندماجي، وهو الجيت (الجهاز الحلقي الأوربي المشترك). انظر الشكل (١٤)



الشكل (١٤)

التسخين الأومي

تصل قيم التيار إلى ٥ ملايين أمبير في بلازما الجيت JET - عادة عن طريق المحولات أو الملف اللولبي؛ فضلا عن توفير القبص الطبيعي للعمود البلازما بعيدًا عن الجدران، وارتفاع درجات الحرارة البلازما - عن طريق تنشيط إلكترونات وأيونات البلازما في اتجاه حلقي، باستخدام قليل من الميجا واط من قدرة التسخين.

التسخين بحقن الجسيمات المحايدة

يتم حقن سيالات من ذرات الديوتيريوم أو التريتيوم المحايدة، ذات الطاقة العالية في البلازما، وتنتقل الطاقة من السيالات إلى البلازما، خلال التصادم مع أيونات البلازما. ويتم إنتاج السيالات المحايدة في مرحلتين متميزتين. أولاً، يتم إنتاج حزم من الأيونات النشطة، من خلال تطبيق جهد تعجيل، يصل إلى ١٤٠ ألف فولت. ومع ذلك، فإن سيل الأيونات المشحونة لن يكون قادرًا على اختراق المجال المغناطيسي في التوكاماك. وبالتالي، فإن المرحلة الثانية تضمن للحزم المعجلة إتمام تحييدها (أي أن الأيونات تحولت إلى ذرات حيادية) قبل الحقن في البلازما. وتصل القدرة الإضافية المتاحة في الجيت JET إلى ٢١ ميجاوات من أنظمة تتسخين حقن الجسيمات المحايدة.

التسخين بالترددات الراديوية

عند حصر البلازما بالمجالات المغناطيسية، تدور الأيونات والإلكترونات حول خطوط المجال المغناطيسي في التوكاماك، وتردد الموجات الكهرومغناطيسية، التي تتوافق مع ترددات الأيونات أو الإلكترونات قادرة على حدوث رنين، أو اضمحلال لقدرة الموجات، داخل جسيمات البلازما في حالة عدم التوافق. عند حدوث الرنين، يتم نقل الطاقة من موجات الراديو إلى البلازما، وبالتالي يتم تسخينها، وهذه الطريقة تتطلب قدرة تسخين تصل إلى ٢٠ ميجا واط.

في توكاماك الجيت JET، يتم وضع عدد من الهوائيات في وعاء التفريغ لبث موجات، تنتشر في مدى التردد من ٢٥-٥٥ ميجاهرتز في قلب البلازما. وهذه الموجات يتم ضبطها لحدوث رنين لاسيما مع أيونات البلازما - وبالتالي يتم تسخينها، وتتطلب هذه الطريقة ضخ قدرة تصل إلى ٢٠ ميجا واط.

أيضا يمكن أن تستحث هذه الموجات تيارات في البلازما، من خلال توفير "دفع" الإلكترونات، لعبورها في اتجاه واحد معين. في الجيت، يستخدم ما يقرب من ١٠ ميجاواط من هذه الموجات الميكرونية، التي تسمى الهجين السفلى (٣,٧ ميجاهيرتز)؛ لتعجيل الإلكترونات البلازما لتوليد تيار بلازما، يصل إلى ٣ ميجاواط.

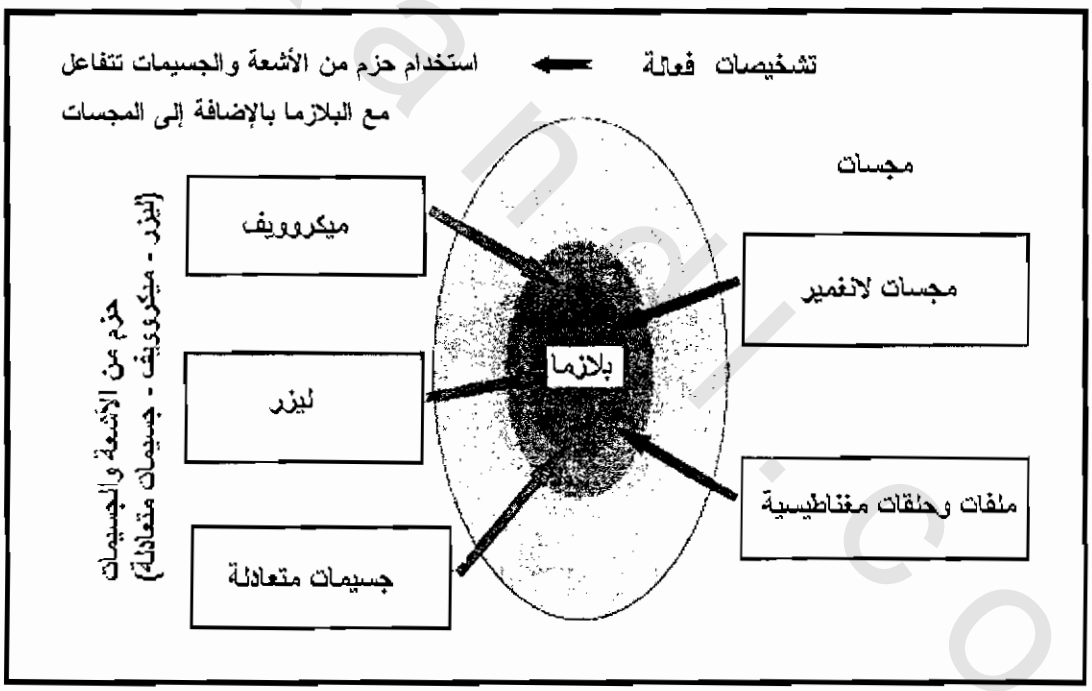
التسخين الذاتي للبلازما

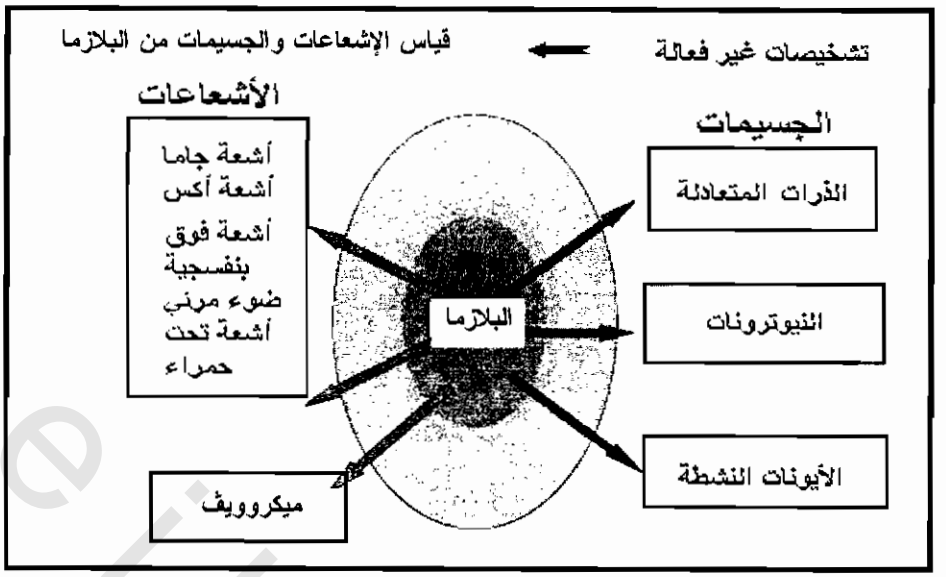
تنتج أيونات الهليوم (أو ما تسمى جزيئات ألفا) عند اندماج الديوتريوم والتريتيوم، وتبقى داخل مصيدة البلازما المغناطيسية لفترة، قبل أن يتم ضخها بعيدًا عن طريق الحارف. وتهرب النيوترونات (المحيادة) من المجال المغناطيسي وأسرها في محطات الطاقة المستقبلية، والتى ستكون مصدرًا للطاقة الأندماجية لإنتاج الكهرباء. عندما تتساوى كل من قدرة الاندماج مع الطاقة المطلوبة لتسخين البلازما والمحافظة عليها، عندئذ تتحقق التعادلية. من ناحية ثانية، تعمل طاقة الاندماج التي تتضمن أيونات الهليوم، فقط، على تسخين أيونات الوقود الديوتريوم والتريتيوم (بالاصطدامات)؛ لكي تحفظ مجريات التفاعل الاندماجي. وعندما تحافظ هذه الآلية على درجة حرارة البلازما المطلوبة لتفاعل الندماجي، عندئذ يصبح التفاعل ذاتيًا (أي ليس هناك حاجة لتسخين البلازما من الخارج)، وهو شرط الإشعال. في البلازما المحصورة مغناطيسيا، يتطلب كون شرط الإشعال لدى التفاعل الاندماجي D-T حوالي ست مرات (في زمن الحصر، أو في كثافة البلازما) من شرط التعادل.

قياس البلازما

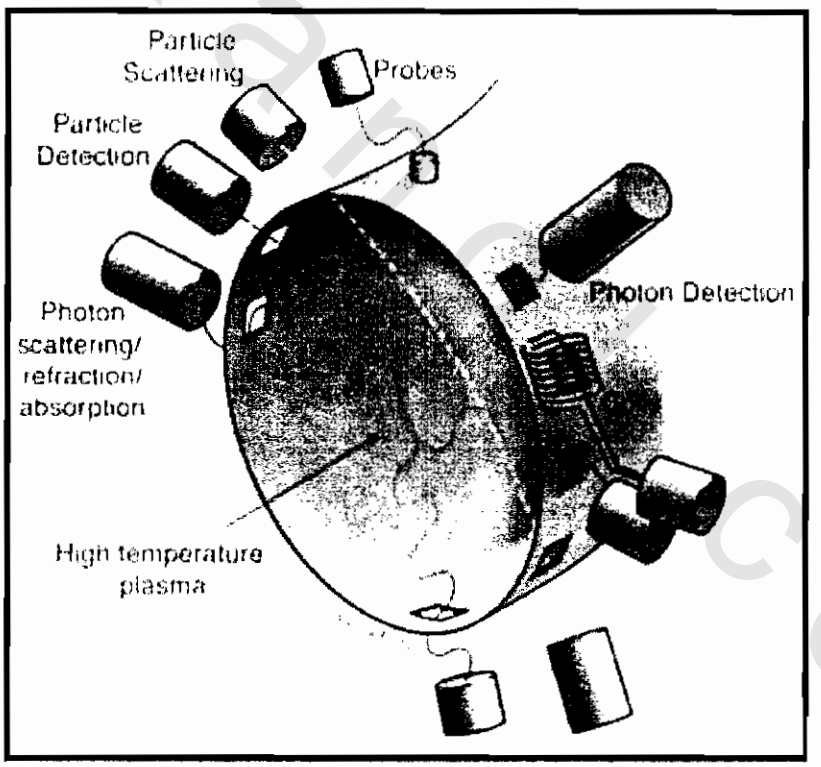
قياس الخصائص الرئيسية البلازما هي واحدة من أصعب جوانب بحوث الاندماج. معرفة بارامترات البلازما المهمة (درجة الحرارة والكثافة والفقد الإشعاعي، وغيرها) مهم جدًا في زيادة فهم سلوك البلازما. ويمكن تصنيف تقنيات القياس الى فعالة أو غير فعالة (انظر الشكل ١٥).. في تشخيصات البلازما الفعالة، يتم جس البلازما (عبر أشعة الليزر، والموجات الدقيقة، والمجسات ..إلخ). على سبيل المثال، في مقياس التداخل (inteferometers)، يتم مرور أشعة الميكروويف خلال البلازما، ويحدث تباطؤ للأشعة بمرورها في البلازما (مقارنة بمرورها عبر الفراغ). ومن هذه التقنية، يمكن قياس معامل

انكسار البلازما، التي تمكننا من معرفة كثافة الأيونات / الإلكترونات الموجودة في البلازما. مع استخدام جميع التشخيصات الفاعلة، يجب التأكد من أن آلية الجس لا تؤثر بشكل كبير على سلوك البلازما (انظر الشكل ١٥). مع التشخيص غير الفاعل للبلازما، يتم قياس الإشعاع والجسيمات المنبعثة من البلازما، وتستخدم هذه المعرفة لاستنتاج معرفة سلوك البلازما في ظل ظروف معينة. على سبيل المثال، من خلال عملية التفاعل الاندماجي D-T، كواشف النيوترونات على متن التوكاماك، تقيس تدفق النيوترونات المنبعثة من البلازما. جميع الأطوال الموجية للموجات المشعة (مرئية، والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية وغيرها) أيضا. في كثير من الأحيان، تقاس من مواقع عديدة في البلازما. وبالتالي يمكن المعرفة التفصيلية عن العملية، التي خلقت الموجات، ومن ثم يتم استنتاج برامتر البلازما الرئيسي.





شكل (١٥)



شكل (١٦): بعض تقنيات المستخدمة لقياس خصائص البلازما.

استيللاريتور stellarator

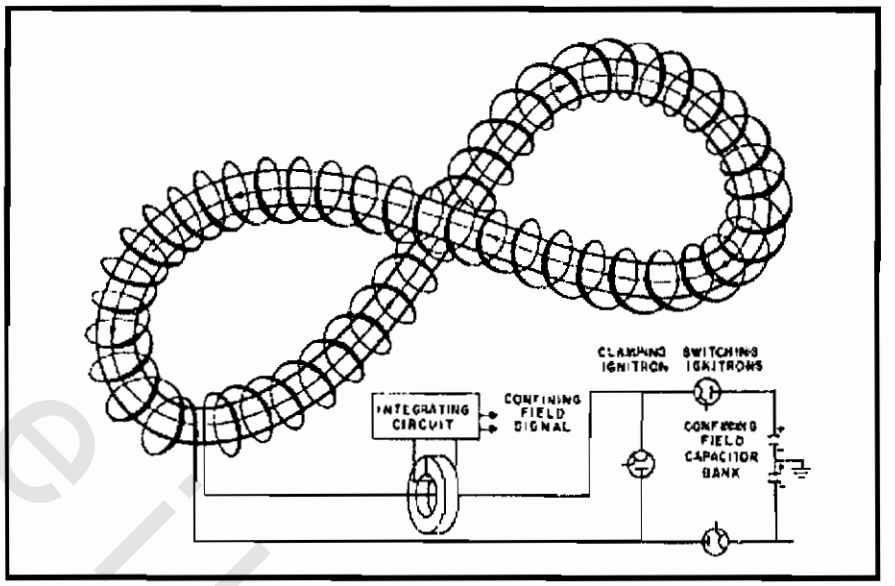
اقترح سبيتزر في عام ١٩٥١ استيللاريتور stellarator كجهاز لحصر البلازما حصرًا مغناطيسيًّا، ومنذ ذلك الوقت، تم بناء سلسلة من الأجهزة وتشغيلها في جامعة برينستون لإجراء البحوث التجريبية في مثل هذه الأنظمة.

ويتم حصر البلازما في جهاز استيللاريتور فقط باستخدام المجالات المغناطيسية المنتجة خارجيًّا. ويعطى التكوين المغناطيسي في الوعاء مع التحول الدوراني لهندسة حصر البلازما، ذات مرتبة أعلى من تلك، التي تكون في الجهاز الحلقي البسيط. وهو يفعل ذلك بحكم توافر المسار، على طول خطوط القوة المغناطيسية، التي يمكن بسهولة تدفق التيارات؛ لتحييد تراكم الشحنات التي تنتجها انجرافات الجسيمات في المجال الحلقي العام. وقد استخدمت طريقتان لإعطاء التحويل الدوراني إلى الأجهزة برينستون. الأول، هو موضح في الشكل (١٧-أ)، ويشوه الوعاء في شكل "الرقم ثمانية"، في حين أن الثانية تستخدم تيارات، تسري في موصلات حلزونية مساعدة على سطح أنبوب حلقي منتظم. في كل الحالتين، يزود المجال المحوري بالتيار الساري في الملفات النحاسية المحاطة بالأنبوب.

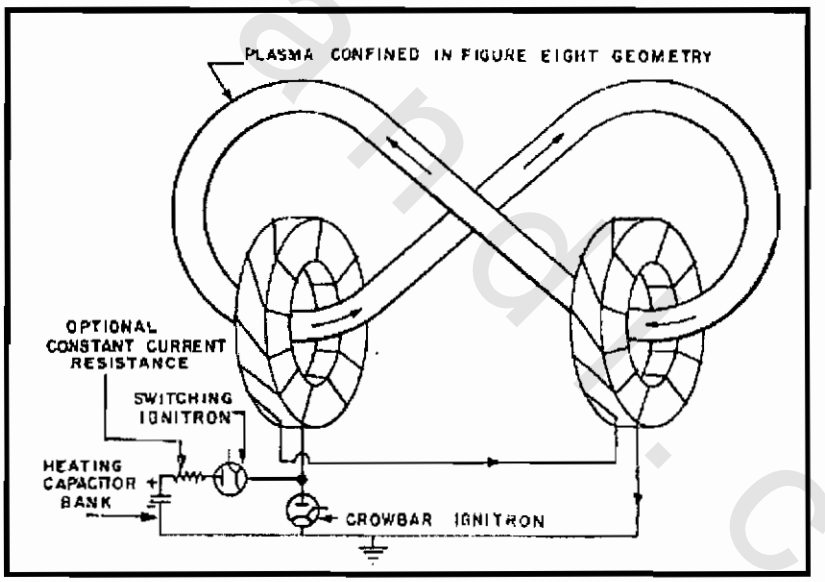
يتم إنجاز التأين والتسخين الأولي للبلازما المحصورة في جهاز استيللاريتور، عن طريق أنبوب مغلق من البلازما، تعمل كملف ثانوي لمحول خارجي، كما هو مبين في الشكل (١٧-ب). تنتج تغيرات الفيض في المحول الحديدي مجال كهربي محوري في البلازما، الذي يعجل الإلكترونات، وبقدر أقل بكثير لدى الأيونات. وبالتالي، تكون الطاقة المعطاة إلى جزيئات الغاز عشوائية واستخدامها في انجاز التأين للغاز، وينتج عن ذلك "تسخين" البلازما.

استيللاريتور هو أيضًا طريقة مشابهة لبناء المفاعلات اللاندماجية، غير أنها تمتلك ميزة أن تقليل الخسائر الناتجة عن التداخلات لا يكون عن طريق تيار كهربائي، يضخ في البلازما، بل عن طريق بناء وشكل هندسي أكثر تعقيدًا للمغناطيسات، التي تولد الحقل المغنطيسي.

ويشترك كلا المفاعلين في ميزة أنهما أكثر أمنًا من المفاعلات التقليدية الانشطارية؛ بسبب أن التفاعل النووي ينقطع بمجرد ملامسة البلازما لحوائك المفاعل، كما أن النفايات الناتجة أقل إشعاعًا من تلك، التي تنتج عن مفاعلات كلاسيكية.



شكل (١٧-أ): تشويه الوعاء هندسيًا بحيث يأخذ الرقم ثمانية، والدوائر المبسطة لمجال الحصر.

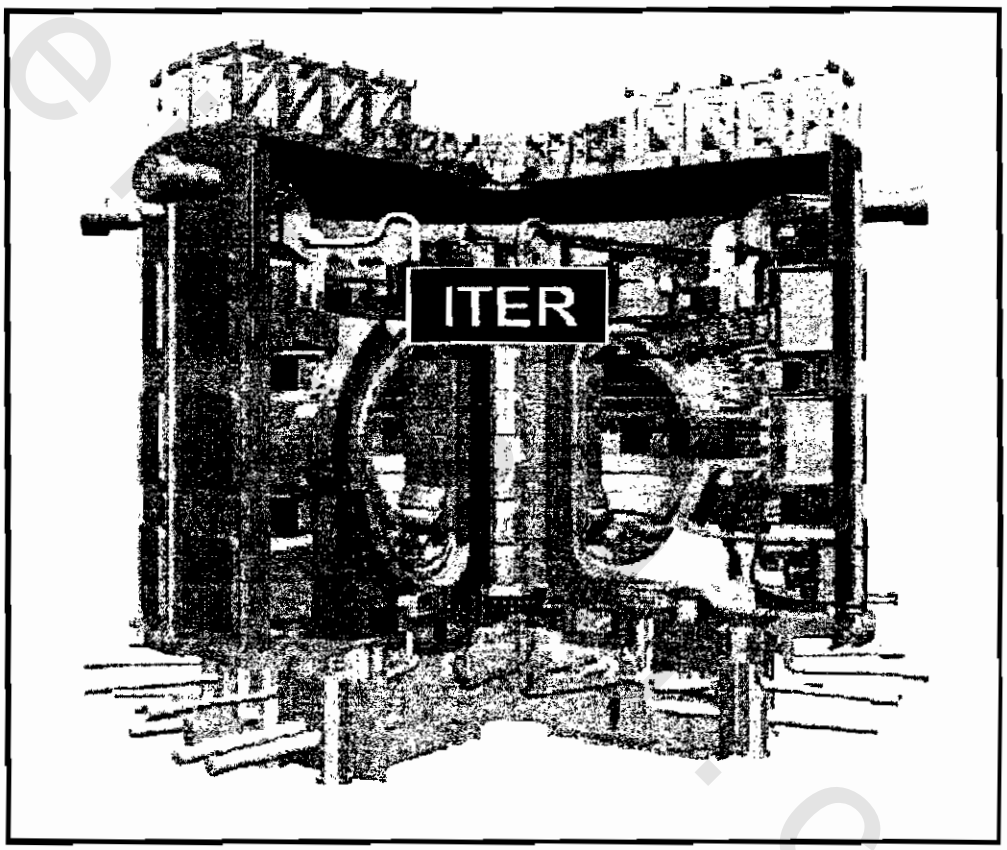


شكل (١٧-ب): جهاز التسخين الأومي والدوائر المبسطة لهذا الغرض.

الأيتر ITER (المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

زادت التحديات البيئية في قريتنا الكونية الصغيرة، فعاش العالم، في الصيف الماضي، معاناة تغيراتها، بحرائق هائلة في روسيا، وبفيضانات شديدة في الصين والباكستان؛ فقد أدى سوء استخدام الطاقة إلى ارتفاع درجة الحرارة على سطح الكرة الأرضية، والذوبان السريع لجليد قمم الجبال، ليؤدي لحرائق

شاسعة في منطقة، وفيضانات غزيرة في مناطق أخرى من العالم. وتحتاج معالجة هذه التحديات لجهود إقليمية وعالمية مشتركة، ولن تستطيع أي حكومة معالجتها بجهود فردية، وبدأت تتفهم دول العالم هذه الحقيقة، وتعاونت للعمل في مشروع دولي؛ لبناء مفاعل الاندماج النووي لنقل اقتصاد العالم لاقتصاد هيدروجيني، بإنتاج كميات هائلة من الطاقة النظيفة من مياه البحر، بالاستفادة من ذرات الهيدروجين المكونة للماء.



شكل (١٨) الأيتر

المشاركون في هذا المشروع، هم: الاتحاد الأوربي، والولايات المتحدة، واليابان، وروسيا، والصين، وكوريا الجنوبية، والهند. وترجع فكرة هذا المشروع إلى عام ١٩٨٥، حينما قررت الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي وبالتعاون مع الاتحاد الأوربي واليابان؛ للعمل في مشروع اندماج نووي لإنتاج الطاقة النووية، لتقر نماذجه الهندسية في عام ٢٠٠١، وتوافق على بناء مفاعله في عام ٢٠٠٥، وتعتمد خطته التنفيذية في عام ٢٠٠٧. وعين مجلس

المشروع، أوسامو موتوجيما، المدير العام السابق للمركز الوطني الياباني لعلوم الاندماج النووي، مديرًا عامًّا لتنفيذه، كما وفرت اليابان ٢٠% من خبرائه. يوضح الشكل (٨) حجم المفاعل، قياسًا على صورة الرجل الموجودة أسفل الشكل.

والجدير بالذكر أن التجارب العلمية للاندماج النووي بدأت في عام ١٩٣٢، وطورت أبحاثها العسكرية في الأربعينيات، كما تمت تجربة الانفجار النووي للقنبلة الهيدروجينية في عام ١٩٥٢، وأجريت أبحاث التحكم في الاندماج النووي لإنتاج الطاقة في الخمسينيات.

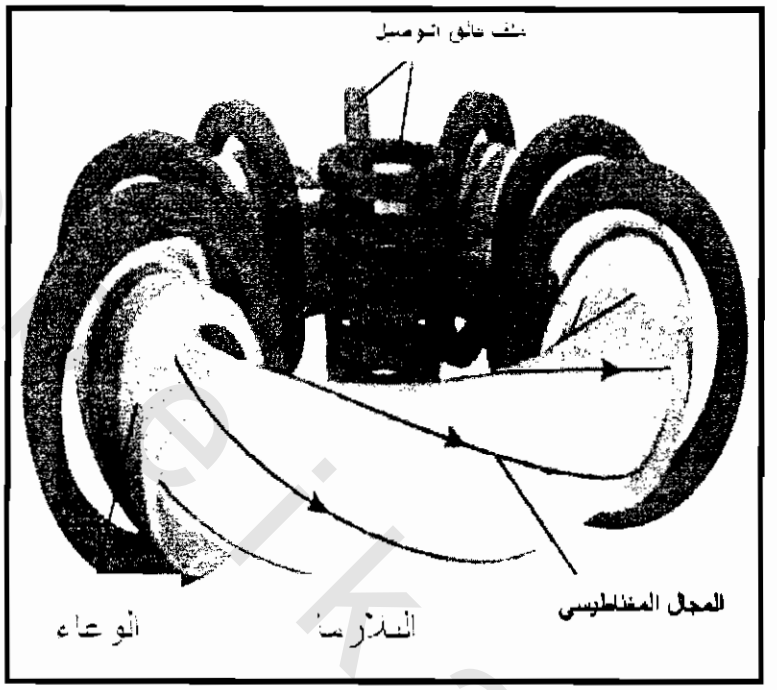
وتعتمد فكرة هذا المشروع على آلية إنتاج الطاقة في الشمس من اندماج النظائر المشعة للهيدروجين؛ إذ يقوم مفاعل الاندماج النووي في مرحلته الأولى على إنتاج نظائر الهيدروجين المشعة، بدمج ذرتين من الهيدروجين لتكوين الديوتريوم، أو ثلاث ذرات من الهيدروجين لتكوين التريتوم. وسيقوم في مرحلته الثانية بدمج التيوتريوم والتريتيوم لتكوين غاز الهليوم، وسيترافق ذلك مع إنتاج كمية هائلة من الطاقة. وتنحصر صعوبة عملية الاندماج النووي في تحويل النظائر المشعة للهيدروجين، الديوتريوم والترتيوم، إلى البلازما.

والبلازما هى غاز أيوني، مكونة ذراته من إلكترونات وبرتونات غير متساوية، ويحتاج حصره والتحكم فيه إلى درجة حرارة عالية جدًّا، تقدر بمائة مليون درجة مئوية. ومن المقرر أن يقوم المفاعل بإنتاج البلازما في عام ٢٠١٩، وسيبدأ بعملية الاندماج النووي للديوتريوم والتريتيوم في عام ٢٠٢٧. ويكلف بناؤها المفاعل تريليون ين ياباني، وسيغطي الاتحاد الأوربي ٤٥,٤% من الكلفة، وستغطي كل من بقية الدول الست ٩,١% من الكلفة. وسيبنى المفاعل في فرنسا، وسيكون قطره أو ارتفاعه ٣٠ مترا، وستطور الدول المشاركة أجزاءه المختلفة، وتنقلها إلى موقع المشروع. وسيبدأ المفاعل فى إنتاج الطاقة الكهربائية من مياه البحر في عام ٢٠٢٥.

ويعتبر مشروع الاندماج النووي الجديد خطوة مهمة في إمكانة الاستفادة من التحكم في الطاقة الناتجة من الاندماج النووي؛ لتطوير تكنولوجية تنتج الطاقة الكهربائية النظيفة. وهذا المشروع أصبح تحت رعاية الوكالة الدولية للطاقة الذرية؛ حيث توفر الوكالة الدعم الكامل للمشروع، مثل: تنظيم المؤتمرات الدولية لطاقة الاندماج، مرة كل عامين، وكذلك الاجتماعات الفنية مع خبراء

من مشروع الأيتر، وإصدار الوثائق والرسائل الأخبارية من المشروع. وتقوم فكرة هذا الجهاز على مفهوم التوكاماك (شكل ٩)؛ حيث يتم تسخين الوقود الى أكثر من مائة مليون درجة؛ حيث تتحقق عملية الاندماج النووي لالتحام أكثر من نواة نووية (الديوتريوم والتريتيوم)، لتكوين نواة أثقل (الهليوم)، بالإضافة إلى النيوترونات، التي تنقل معظم الطاقة الناتجة من التفاعل إلى جدار الوعاء. ونظرًا لوجود طبقة رقيقة من الليثيوم، يتم إنتاج التريتيوم نتيجة تفاعل النيوترونات مع الليثيوم، ويمكن التخلص من الحرارة الناتجة من إبطاء حركة النيوترونات بمائع التبريد. لتحقيق معدل طاقة ناتجة من المفاعل أكثر من الطاقة اللازمة لإحداث هذا التفاعل، فإنه يتطلب بلازما كثيفة، وذات درجة حرارة عالية بالإضافة إلى احتوائها لفترة زمنية طويلة. ولكي يتحقق ذلك، لابد ان يكون حجم مفاعل الأيتر ضعف حجم أكبر مفاعل، وهو الحيت JET الموجود حاليًا في المملكة المتحدة.

أما عن منظمة المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، فإنها المسؤلة عن تنفيذ المشروع ومقرها مدينة كاداراش جنوب فرنسا، وهي أيضًا المسؤلة عن كافة أعمال المشروع، مثل: الحصول على التراخيص، وشراء المعدات وتجارب التشغيل الفعلي للمشروع. وتتحمل الدول الأعضاء في المنظمة تكلفة المشروع، حيث تقدر بحوالي خمسة بلايين يورو، موزعة على عشرة سنوات. تم الانتهاء من معظم الأعمال التصميمية للمشروع في عام ٢٠٠١. إن مشروع الأيتر ليس غاية في حد ذاته، وإنما هو جسر تجاه المحطة الأولى، التي توضح إمكانية إنتاج الطاقة الكهربية على نطاق واسع.



شكل (١٩): المبدأ الذي يعمل بموجبة مفاعل الأيتر.

الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي

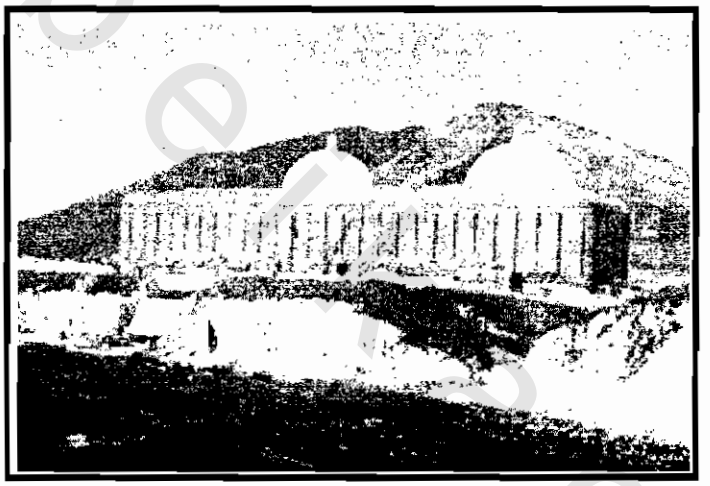
تم اكتشاف الانشطار النووي في ديسمبر ١٩٣٨؛ أي بعد حوالي ٤٢ عامًا من اكتشاف النشاط الإشعاعي، عندما حاول العلماء استحداث نظير لعنصر اليورانيوم ٢٣٥، ذي العدد الذرى ٩٢، والذي تحتوي نواته على ١٤٣ نيوترون، بإضافة نيوترون جديد إلى نواته ليصبح يورانيوم ٢٣٦. وهذا النظير غير مستقر؛ فيتفتت إلى وحدات صغيرة لعناصر جديدة، ويكون مصاحبًا لانبعاث طاقة حرارية هائلة؛ نتيجة نقص في مجموع كتل الوحدات الصغيرة بعد التفاعل، عن تلك الكتلة الداخلة قبل التفاعل. وبتطبيق علاقة آينشتين، قدرت الطاقة الحرارية المتولدة من انشطار نواة اليورانيوم ٢٣٦ بحوالي ٢٠ مليون ضعف الطاقة الحرارية، المتولدة من اشتعال جزئ واحد من مادة الديناميت. ونظرًا لخروج عدد ٣ نيوترونات، بالإضافة إلي عنصر السترنشيوم والزينون s، فإن هذا الانشطار يمكن أن يستمر؛ بحيث تتكرر هذه العملية مع نويات يورانيوم أخرى، فيما يسمى بالتفاعل المتسلسل.

تعتبر مصادر الطاقة النووية من أهم المصادر الرئيسية في العالم اليوم؛ بسبب كمية الطاقة الهائلة، التي يمكن أن نحصل عليها من الوقود النووي القليل الذي

يستهلك. إلا أن الخطر الذي يرافق إنتاج مثل هذه الطاقة وإجراءات السلامة، التي لا يستطيع كثير من الدول توفيرها؛ أدى إلى التقليل من انتشار استخدام مثل هذه الطاقة. ومن أهم المخاطر التي تنتج من حوادث الانشطار النووي هو التسرب النووي، الذي حدث من المفاعل النووي (تشيرنوبل) في روسيا عام ١٩٨٥م، والذي خلف تلوثًا للبيئة بالإشعاعات النووية، ونتج عن ذلك إصابة كثيرين من السكان بأمراض مختلفة. أيضًا بعد الزلزال القوي الذي ضرب الساحل الشرقي لليابان يوم ١١ مارس ٢٠١١، قد أفاد بأن مفاعلات محطة فوكوشيما النووية، كانت في حالة سيئة بسبب شدة الزلزال، والمشاكلات مع أنظمة التبريد لوحظ تسرب اشعاعي. يوضح الشكل (١١) انفجار في إحدى المحطات النووية، ونتج عنه تسرب إشعاعي.

والتفاعل النووي الذي يحدث في مثل هذه الحالة، هو الانشطار النووي؛ حيث تقذف ذرات العنصر المستخدم كوقود نووي مثل نظير اليورانيوم بقذائف من النيوترونات؛ فتنشطر النواة إلى نواتين أو أكثر، ويرافق هذا الانشطار انبعاث قدر كبير من الطاقة وعدد من النيوترونات الحرة. وتصطدم هذه النيوترونات التي تتحرر بذرات اخرى من ذرات الوقود النووي، فتنشطر هي الأخرى فيستمر التفاعل (الانشطار) وبشكل متزايد؛ ولهذا يسمى مثل هذا التفاعل بالتفاعل المتسلسل، وتجعل عملية التسلسل في التفاعل مقدار الطاقة الناتجة عن التفاعل يصل إلى حد لا يمكن السيطرة عليه؛ مما يؤدي إلى انفجار المفاعل النووي، وهذا ما يحدث في القنبلة النووية. أما في المفاعلات النووية المستخدمة لتوليد الكهرباء أو تحريك السفن الضخمة أو غيرها (شكل ١٠)، فانه لا بد أن يحتوي المفاعل النووي على وسائل للسيطرة على سرعة التفاعل؛ لجعل الانشطار يحدث بمعدل ثابت، عندما يصل مقدار الطاقة إلى حد معين، والوسيلة – في الغالب – هى امتصاص جزء من النيوترونات الناتجة من الانشطار، ومنعها من الاصطدام بذرات اليورانيوم، وبذلك نجعل عملية الانشطار تحدث بصورة منتظمة وليست متزايدة. ومن أجل امتصاص النيوترونات، تستخدم عدة طرق، من أهمها: وضع قضبان ماصة للنيوترونات من مواد مناسبة مثل الكادميوم، وتتحرك هذه القضبان تلقائيًا إلى داخل المفاعل النووي، بمجرد وصول درجة الحرارة داخله إلى حد معين، وتقوم بامتصاص كمية من النيوترونات؛ مما يؤدي إلى توقف نمو التفاعل، وأن الطاقة الناتجة يمكن حسابها بمقارنة طاقة الربط النووية للنواة قبل انشطارها، ومجموع طاقة الربط النووية للنواتين الناتجتين؛ حيث نلاحظ أن هناك فرقًا بين الطاقتين، وهو

الطاقة التي نحصل عليها من عملية الانشطار، أو بمعنى آخر أن الطاقة لكل نيوكلون في النواة الثقيلة هي أكبر كثيرًا من الطاقة، لكل نيكلون في النواة الخفيفة. توفر محطات الطاقة النووية ١٧٪ من إنتاج الكهرباء في العالم، وتقدر بنسبة ٧٥٪ من الكهرباء في فرنسا. يمكن أن ينتج واحد باوند من اليورانيوم (حجم كرة البيسبول) طاقة، تقدر بأكثر من مليون غالون من البنزين.



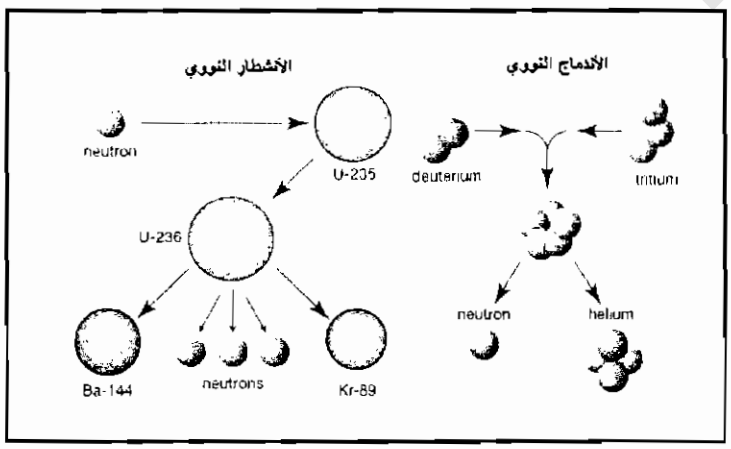
شكل (٢٠): محطة نووية لتوليد الطاقة.

شكل (٢١): انفجار في محطة نووية في اليابان.

القنبلة النيتروجينية هي أحد تطبيقات الاندماج أو الانصهار النووي الاندماج النووي عملية معاكسة للانشطار النووي، تمامًا حيث إنه في عملية الاندماج النووي، تتحد نواتان خفيفتان؛ لتكونا نواة جديدة، إلا أن عملية الاندماج ليست ممكنة في جميع العناصر؛ حيث تحدث في العناصر التي يكون فيها مجموع

طاقة الربط للنواتين، قبل الاندماج أكبر من طاقة الربط للنواة. الناتجة من الاندماج، فيتم بذلك الاستفادة من الفرق في الطاقة.

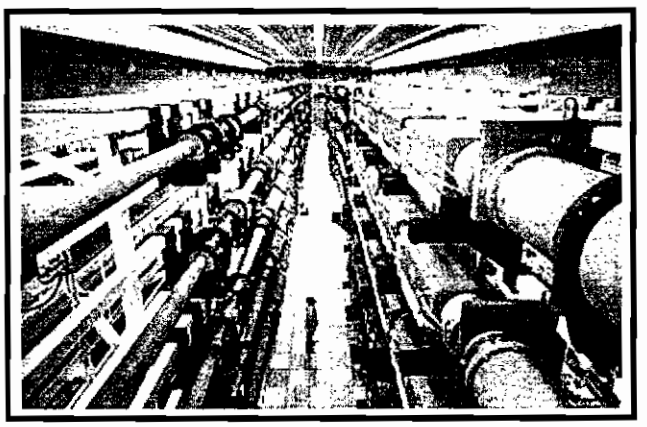
ويعتبر الاندماج النووي أقل خطرًا من الانشطار النووي؛ بسبب عدم وجود إشعاعات نووية في هذا التفاعل، إلا أن إرادة الله، عز وجل، جعلت الاندماج النووي أكثر صعوبة؛ حيث تعمل الشحنة التي تحملها كل نواة على منع الاندماج عكس ما يحدث في الانشطار. ومن أجل حدوث الاندماج النووي، لابد من توفر طاقة كبيرة؛ من اجل التغلب على قوة التنافر الكهربائي بين النواتين وتقريبهما من بعضهما؛ ليتاح لقوى الترابط النووية أن تعمل. وهذه الطاقة اللازمة لبدء التفاعل، لا يمكن الحصول عليها بطريقة تقليدية؛ حيث تقدر بمائة مليون درجة مئوية؛ ولذلك يستعان بالتفاعل الانشطاري؛ لكي يحدث التفاعل الاندماجي كما في القنبلة الهيدروجينية؛ حيث يوضع بها قنبلة صغيرة انشطارية تكفي الطاقة الناتجة عنها لحدوث تفاعل اندماجي، بين ذرات نظير الهيدروجين، والتي هي من مكونات القنبلة الهيدروجينية، وللمعلومية، فإن الطاقة الناتجة عن اندماج نواتين هي أكبر كثيرًا من الطاقة اللازمة؛ لإحداث هذا الاندماج. وحتى الوقت الحاضر، لا توجد استفادة من التفاعل الاندماجي لأغراض سلمية للسبب الذي ذكرناه، إلا أن الأبحاث تجري بشكل جاد في إيجاد سبل مناسبة لإنتاج الطاقة والتحكم بها، بواسطة التفاعل الاندماجي، وهذا النوع من التفاعل هو الذي يمد سطح الأرض بما تحتاج إليه من طاقة؛ حيث يحدث مثل هذا التفاعل على سطح الشمس، بين نظير ذرات الهيدروجين (الديتيريوم).



شكل (٢٢): الفرق بين الانشطار النووي والاندماج النووي.

الاندماج بحصر القصور الذاتي

الاندماج بحصر القصور الذاتي، هو عملية تحفيز لتفاعلات الاندماج النووي بتسخين وانضغاط هدف الوقود، الذي يتكون من كبسولات صغيرة غالبًا، تحتوي على خليط من الديوتيريوم والتريتيوم. لتسخين وانضغاط الطبقة الخارجية لهدف الوقود، توجه الطاقة من الخارج، عن طريق استخدام حزم من الليزر الضوئي أو إلكترونات أو أيونات ذوي طاقة عالية. تستخدم معظم أجهزة الحصر بالقصور الذاتي أنظمة الليزر (شكل ١٣). عند تسخين الطبقة الخارجية لمادة الهدف، فإنها تتفجر إلى الخارج؛ مما يؤدي إلى حدوث قوة تفاعل ضد ماتبقى من الهدف وتعجيله للداخل، وترسل أمواجًا تصادمية داخل المركز. هذه الأمواج التصادمية الناشئة من الخارج إلى الداخل، تسبب انضغاط وتسخين الوقود عند المركز، فتتيح فرصة سير التفاعل. ومن المفروض ان تلك الطاقة الناتجة، من تلك التصادمات، سوف ترفع من درجة حرارة الوقود النووي المحيط، وتؤدي إلى التفاعل الاندماجي. والهدف من الاندماج بالقصور الذاتي، هو إنتاج الحالة المسماة "الإشعال"؛ حيث تتسبب عملية التسخين في سلسلة تفاعلات، تعمل على أحتراق جزء من الوقود. وتبلغ كريات الوقود حجم سن القلم، ويحتوي على ١٠ ملليجرامات من الوقود، وفي الواقع يتفاعل جزء صغير من الوقود، ويؤدي إلى حدوث الاندماج. وفي حالة اندماج مادة الهدف كاملة، فإن الطاقة الناتجة سوف تعادل الطاقة الصادرة من حرق برميل من النفط.

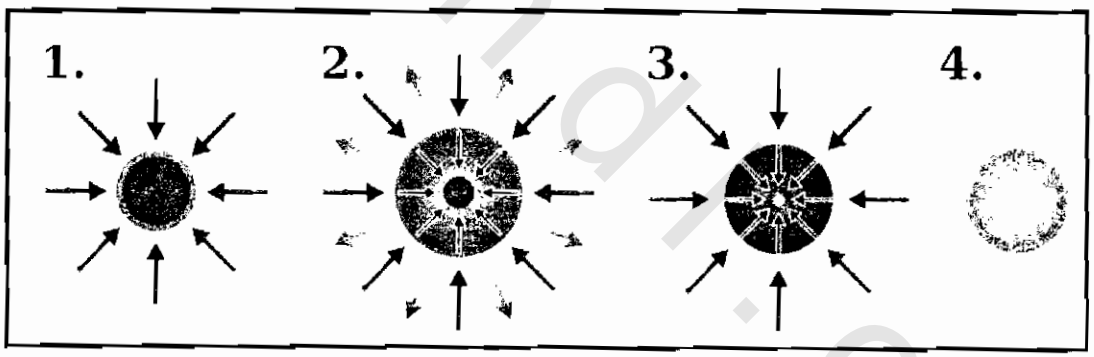


شكل (٢٣): ليزر ضخم يستخدم في اندماج القصور الذاتي، وهو يتكون من ١٠ أشعة

طريقة القصور الذاتي

يوضح شكل (١٩) المراحل الانتقالية لتحقيق تفاعل الاندماج النووي بالقصور الذاتي لكبسولة من الوقود، تحتوي على مخلوط من الديوتيريوم والتريتيوم، عن طريق تصويب عدد كبير من أشعة الليزر عالية الطاقة. تمثل الأسهم الزرقاء عمليات الأشعة المتجهة إلى الداخل، والأسهم البرتقالية العمليات المتجهة إلى الخارج، وتمثل الأسهم البنفسجية الطاقة الحرارية الضاغطة المتجهة إلى الداخل ومراحل إشعال الاندماج النووي بطريقة القصور الذاتي:

١. يقوم شعاع الليزر بتسخين سطح الهدف لإنتاج بلازما.
٢. تتأثر مادة الوقود وتنضغط إلى الداخل بالأمواج التصادمية.
٣. تصل مادة الوقود في الكبسولة إلى المرحلة الحرجة، التي تفي بشرط لاوسون (كثافة قلب الوقود ٢٠ ضعف كثافة الرصاص ودرجة حرارة الأشعال ١٠٠ مليون درجة مئوية).
٤. يبدأ تفاعل الاندماج النووي الحراري بسرعة، خلال الوقود المضغوط، وتنطلق طاقة أكبر من الطاقة المستخدمة.



شكل (٢٤): رسم تخطيطي لمراحل الأندماج بالقصور الذاتي بأستخدام الليزر.

تشخيصات بلازما التوكاماك

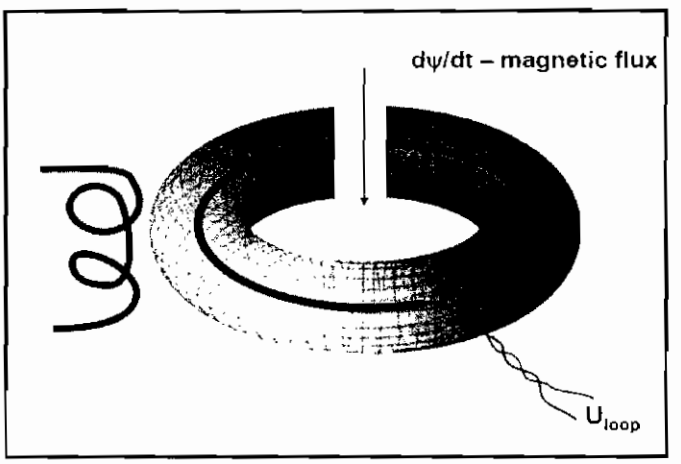
لا يجد المهندس والتجريبيون المشتغلون بالغازات العادية صعوبة في تحديد الخواص الفيزيقية لحالة الغاز. ويمكن قياس درجة الحرارة للغاز باستخدام الترمومتر أو البيرومتر، وكذلك يمكن قياس ضغط الغاز باستخدام البارومتر، ويمكن قياس سرعة تدفق الغاز باستخدام مقياس التدفق، بالإضافة إلي الطرق الفيزيقية والفيزوكيميائية المتطورة؛ لتحديد المكونات الكيميائية. أما البلازما، فإنمها تمثل موقفًا مختلفًا عن الغازات العادية؛ حيث يوجد عديد من الحالات لقياس درجة الحرارة بطرق مختلفة لنفس نوع البلازما؛ مما يؤدى إلى نتائج

مختلفة مع بعضها. طرق تحديد درجة الحرارة والكثافة ومكونات البلازما هي من أهم البارامترات في فيزياء البلازما التجريبية، وهي تسمى تشخيصات. ويمكن تشبيه تشخيص الغاز العادي بتشخيص الطبيب البشرى لمريض وتشخيص البلازما بتشخيص الطبيب البيطري للحيوان.

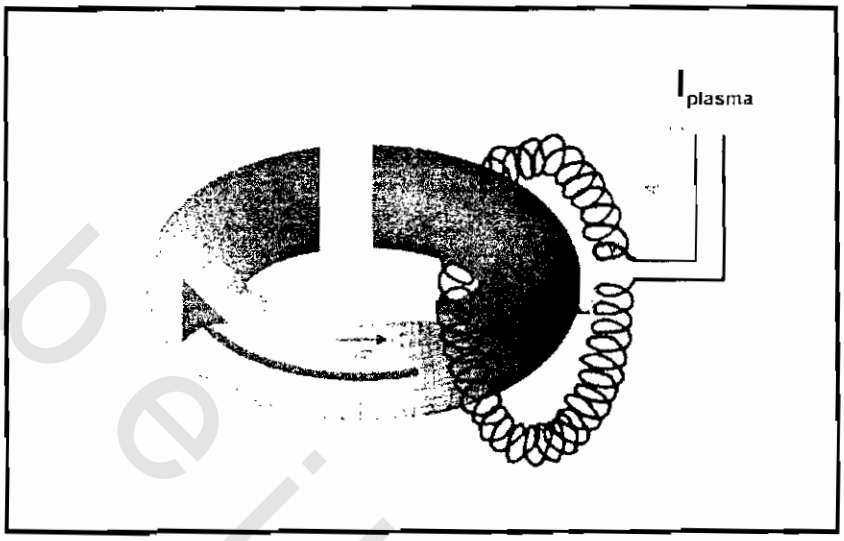
يعتبر قياس كميات البلازما مهمة صعبة؛ لأنها ليست مثل أي مادة عادية. ويحقق قياس كميات البلازما بأستخدام المجسات الكهروستاتيكية تفاعلاً مع البلازما، ويسبب إضطرابًا للكمية المقاسة. استخدام هذه الطرق في البلازما الساخنة غير ملائم؛ لأنها تؤدي إلى تعطيل التفريغ. هناك طرق أخرى لتشخيص البلازما الساخنة، هي قياس الإشعاعات المنبعثة في المنطقة تحت الحمراء والميكرونية، وكذلك تفاعل موجات الأشعة تحت الحمراء والميكرونية مع البلازما. يحقق قياس الخصائص البصرية (مثل معامل الانكسار) أيضًا معلومات عن البلازما. يمكن قياس خصائص البلازما بطرق دقيقة وموثوق بها، باستخدام الأشعة تحت الحمراء والميكرونية. بارامترات البلازما الرئيسية، مثل: كثافة ودرجة حرارة الإلكترونات. قياس التقلبات في كثافة ودرجة الحرارة الإلكترونات يمكن من تحديد كثافة تيار البلازما بتشخيصات متطورة.

حلقة الجهد

تستخدم حلقة الجهد للحصول على الجهد المستحث في البلازما بين النهايات المفتوحة، باستخدام حلقة ذات لفة واحدة مجاورة لتيار البلازما. وهذا الجهد المستحث في البلازما يتم بواسطة محول التسخين الأومي، في أنظمة التوكاماك.



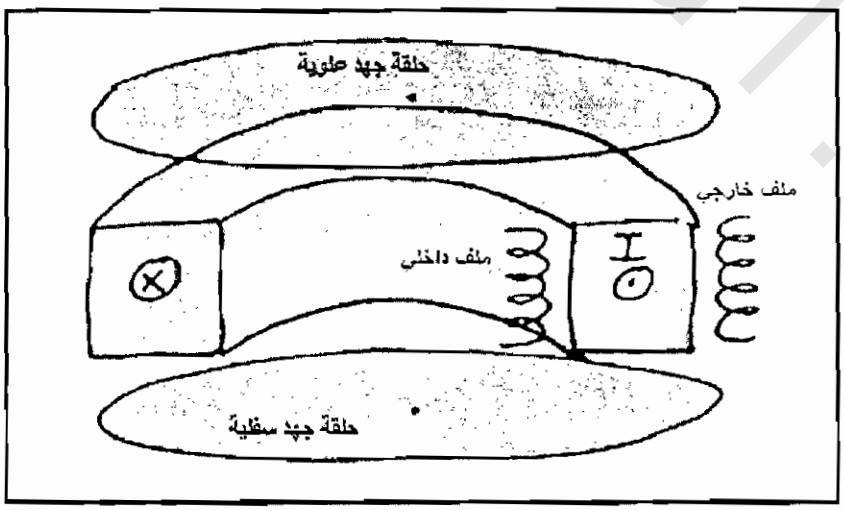
شكل (٢٥): حلقة الجهد.



شكل (٢٦)

مراقبة موضع البلازما

توضع ملفات داخل وخارج البلازما، وحلقات جهد أعلى وأسفل البلازما؛ لرصد موضع البلازما داخل وعاء التفريغ الحلقي والإشارات من تلك الملفات، وتستخدم الحلقات في تحكم التغذية الخلفية لموضع البلازما.

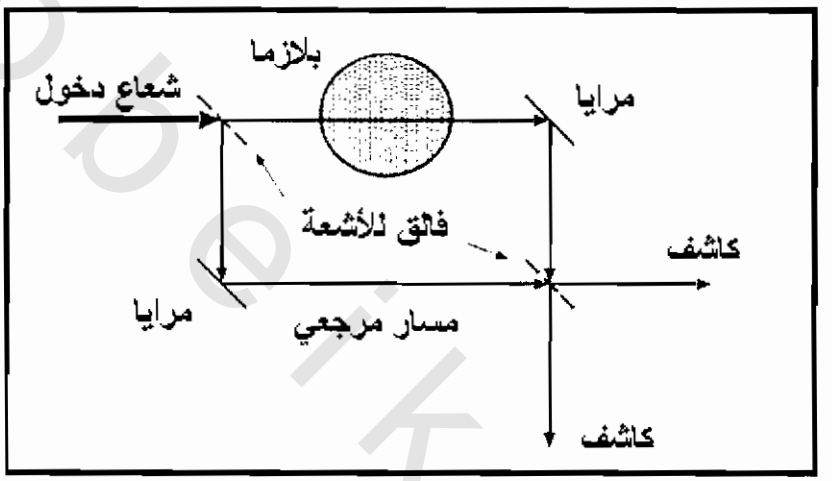


شكل (٢٧)

obeikandi.com

مقياس التداخل (Interferometry)

يحدث التداخل إذا تم وضع البلازما في ذراع واحدة من التداخل، ومن ثم فإن مرحلة التحول متناسبة مع كثافة البلازما تتكامل على طول الطريق.



شكل (٢٨): مقياس التداخل لماخ-زيندر.

انتشار الموجات في البلازما الباردة – معادلة التشتت

تستند جميع الأشعة تحت الحمراء والميكرونية إلى قياس الاشعة المنبعثة من البلازما وانتشارها داخل البلازما، أو انتشارها بإطلاقها من الخارج؛ خلال البلازما. وهذا يعني أن الخصائص البصرية للبلازما يجب أن تقاس بالتفصيل؛ خصوصا أن معامل الانكسار للبلازما ذات أهمية كبيرة. وهو يخبرنا ما إذا كان سيتم امتصاص الموجات الساقطة، أو انعكاسها في البلازما.

يوصف انتشار الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل البلازما بمعادلات ماكسويل

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad ; \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

بعد حذف B نحصل على المعادلة التفاضلية ل E

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \frac{\partial}{\partial t}\left(\mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right) = 0$$

ومراعاة مبدأ التطابق يمكننا أن نحلل المعادلة في دوام جزئي، ويعتمد جزء تردد باستخدام تحويل فوريه للحقل الكهربائية:

openkanal.com

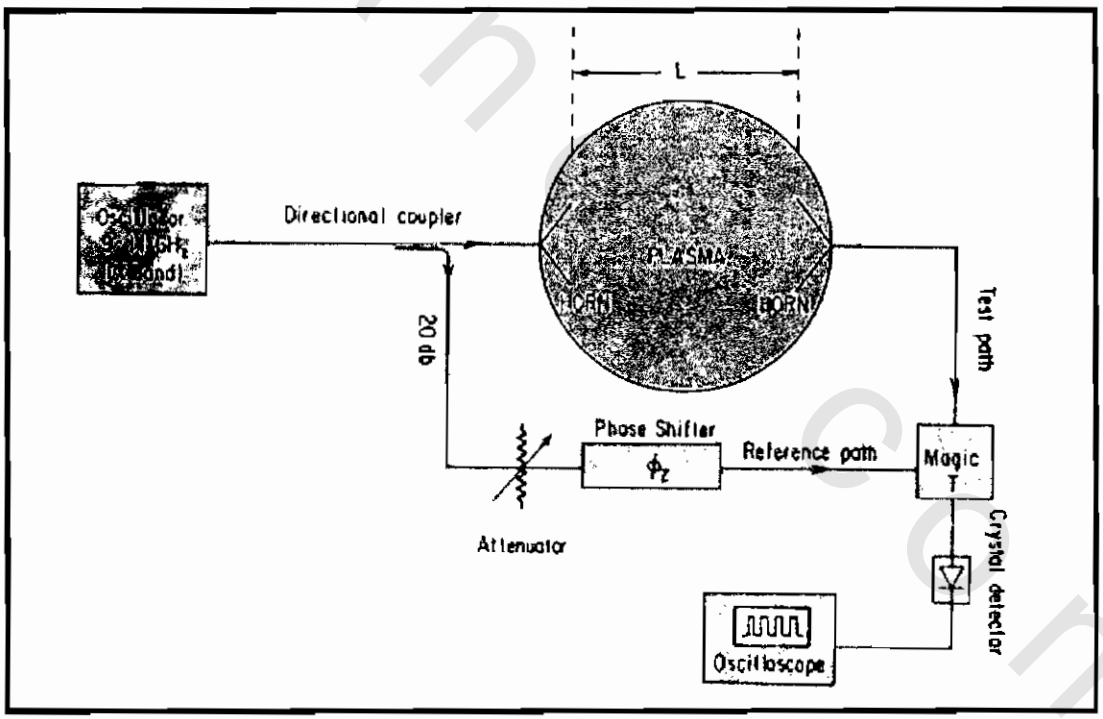
$$\mathbf{E}(x,t) = \int E(\mathbf{k},\omega)\, e^{-i(k\,x-\omega\,t)} d^3\mathbf{k}\; dt.$$

مقياس التداخل

مقياس التداخل الميكروني من أهم الطرق التشخيصية لقياس كثافة الإلكترونات في البلازما، دون اضطراب. مقياس التداخل، المبين بالشكل، هو نسخة من مقياس التداخل لماخ–زيندر Mach-Zehnder. ويتم قياس الكثافة بمقارنة التغير في الطور لموجتين: إحداهما تجتاز البلازما، والأخرى موجة مرجعية تجتاز الفراغ، أو الهواء خارج البلازما. ونتيجة لتغير كثافة البلازما، يتغير طول المسار للأشعة الميكرونية، وبالتالي يحدث تغير في الطور.

الأمواج في البلازما عادة أمواج عادية O waves، لها معامل انكسار، يعطى بالعلاقة:

$$N^2 = 1 - \frac{n}{n_c}$$



شكل (٢٩): مقياس التداخل الميكروني.

تعتمد فقط على الكثافة وليس المجال المغناطيسي.

المجال عند الكاشف الناشئ عن الأشارة المارة خلال ذراع المجس.

$$E_1 = A_1 \cos\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)$$

حيث:

$$\phi_{\text{plasma}} = \int_0^l (k - k_0)dx \,,\; k_0 = \frac{\omega}{c} \,,\; k = \mu\frac{\omega}{c} \,.$$

المجال عند الكاشف الناشئ عن الإشارة المارة خلال ذراع الإسناد:

$$E_2 = A_2 \cos\left(\omega t + \phi_2\right).$$

مخرج الكاشف:

$$\begin{aligned} V &= \left(E_1 + E_2\right)^2 \\ &= A_1^2 \cos^2\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right) + 2A_1A_2 \cos\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)\cos\left(\omega t + \phi_2\right) \\ &\quad + A_2^2 \cos^2\left(\omega t + \phi_2\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{A_1^2 + A_1^2 \cos 2\left(\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}}\right)}{2} \\ &\quad + A_1A_2 \cos\left(2\omega t + \phi_1 + \phi_{\text{plasma}} + \phi_2\right) + A_1A_2 \cos\left(\phi_1 + \phi_{\text{plasma}} - \phi_2\right) \\ &\quad + \frac{A_2^2 + A_2^2 \cos 2\left(\omega t + \phi_2\right)}{2} \end{aligned}$$

$$V = \frac{A_1^2}{2} + A_1A_2 \cos\left(\phi_1 + \phi_{\text{plasma}} - \phi_2\right) + \frac{A_2^2}{2} \,.$$

obeikandl.com

القبص ذات المجال المنقلب
Reversed field pinch (RFP)

تأثير القبص هو ظاهرة خاصة بحفظ البلازما، بعيدة عن جدران الوعاء الحاوي للبلازما، باستخدام المجال المغناطيسي. وتؤدي هذه الظاهرة إلى زيادة كثافة البلازما وتسخينها من خلال الانضغاط الأدياباتيكي في غضون ذلك البلازما، تسخن بتأثير جول. في عام ١٩٥١، قام العالمان كوسين ووار Cousins and Ware بحصر البلازما، داخل وعاء حلقي صغير، ولاحظوا أن عمود البلازما غير مستقر. وسرعان مايتحطم نتيجة اللاستقرارية التي تنمو سريعا. ولكي يتم التغلب على اللاستقرارية لتفريغ القبص، كان لابد من الاهتمام بتوليد القبص المستقر، الذي يتم عادة في الأنظمة الحلقية. يستقر التفريغ بتسليط المجال المغناطيسي الحلقي؛ بحيث يتساوى مع المجال السمتي الناتج من شدة تيار البلازما نفسه، والمجال الحلقي يخمد اللاستقرارية.

جهاز القبص ذات المجال المنقلب (RFP)، هو نظام حلقي متماثل محوريًّا؛ حيث تنحصر البلازما باتحاد المجال السمتي، الناتج من تيار البلازما الساري حول الوعاء، والمجال الحلقي الناتج من التيارات السارية في كل من البلازما والملفات الخارجية. وهذا الجهاز (RFP) يشبه، إلى حد كبير، نظام التوكاماك؛ حيث يتكون من وعاء حلقي الحاوي للبلازما، والمحاط بملفات حلقية، مسئولة عن توليد المجال المغناطيسي الحلقي B_T (انظر الشكل ٧). مسمى الجهاز مأخوذ من حقيقة المجال المغناطيسي، الحلقي في المنطقة الخارجية (حافة البلازما) ينقلب بالنسبة لاتجاهه كما بالشكل (٨). الفرق بين نظام التوكاماك والقبص، أن المجال المغناطيسي الحلقي B_T أكبر من المجال السمتي B_P في التوكاماك، بينما يتساوى المجالان –تقريبًا – في المقدار، في حالة القبص بالإضافة إلى انقلاب المجال الحلقي في المنطقة الخارجية للبلازما. البارامترات الأساسية التي تحدد شكل القبص، هي:

بارامتر القبص (θ)، الذي يحدد من العلاقة:

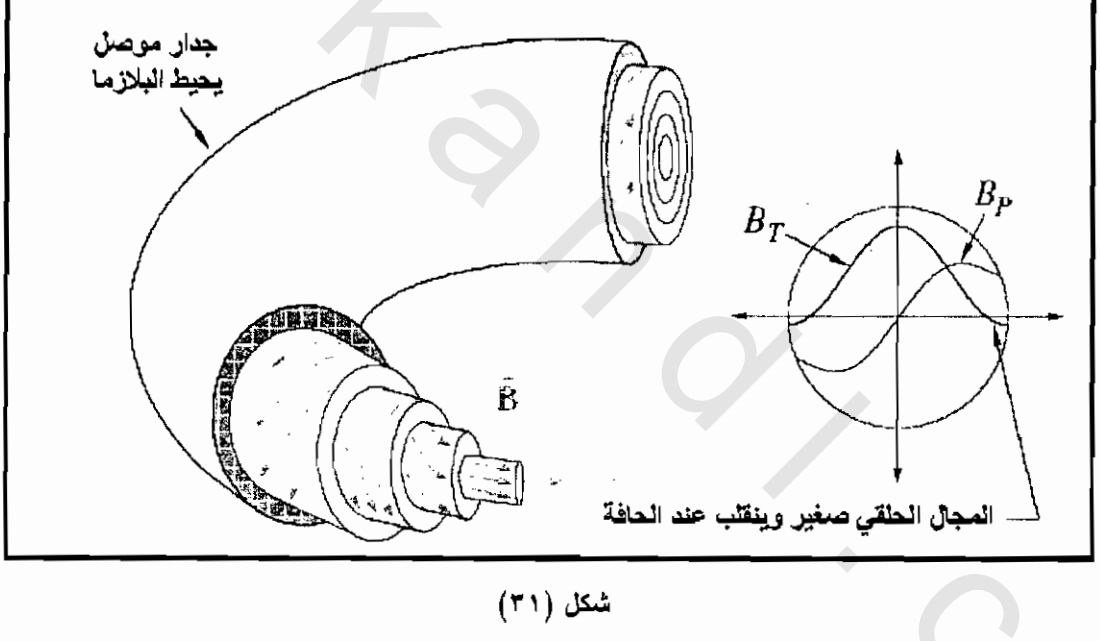
$$\theta = B_P(a)/\langle B_T\rangle$$

بارامتر الأنقلاب (F)، والذي يحدد من العلاقة:

$$F = B_T(a)/\langle B_T\rangle$$

حيث $B_T(a)$ و $B_P(a)$ هما المجالان: الحلقي والسمتي، عند الجدار $\langle B_T\rangle$ متوسط المجال الحلقي عبر المقطع العرضي للبلازما.

شكل (٣٠): القبص ذات المجال المتقلب.



شكل (٣١)