IAEA

صحيفة الوقائع الخاصة بالوكالة

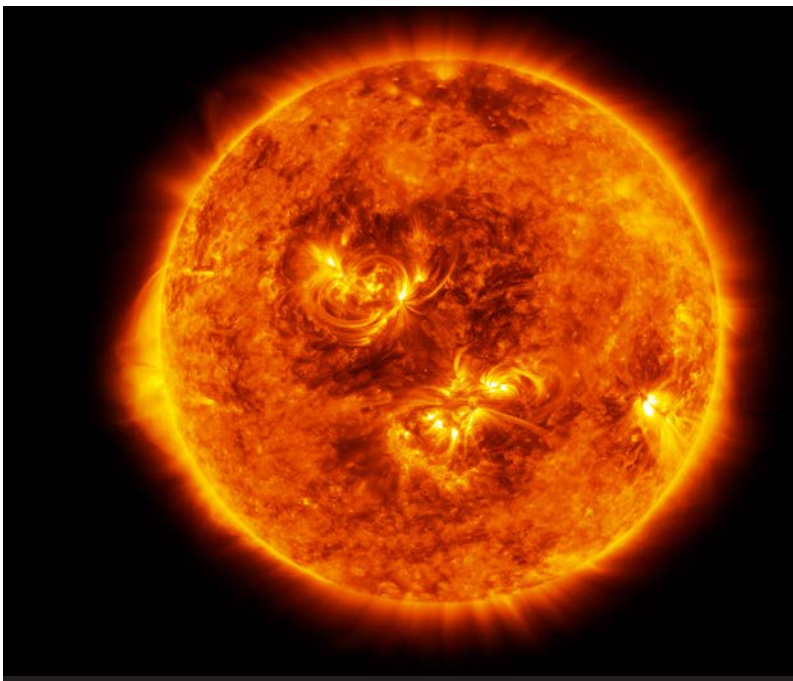
العلوم والتكنولوجيا النووية

تسخير الطاقة الناتجة عن الاندماج النووي

ما الذي ينبغي أن أعرفه؟

يعتبر الكثيرون أنَّ توليد الطاقة من الاندماج النووي هو التحدي الهندسي الأكبر في مجال الطاقة. ويركِّز العديد من الباحثين والمهندسين في مختلف أنحاء العالم على إيجاد سبل لإنتاج هذه الطاقة عن طريق استنساخ الظروف التي توجد بصورة طبيعية في النجوم، مثل الكثافة ودرجة الحرارة، على كوكب الأرض.

وخلافاً للانشطار النووي، الذي ينطوي على شقِّ الذرَّة لإنتاج الطاقة، فإنَّ الاندماج النووي يقوم على دمج نوى خفيفة معاً لتكوين نوى أثقل، بما يؤدي إلى انبعاث الطاقة. وهذه هي الطريقة التي تحوِّل بها النجوم كميات ضئيلة من الكتلة إلى كميات هائلة من الطاقة. ولم تكن الحياة على الأرض لتغدو ممكنةً من دون تفاعلات الاندماج النووي التي تستمدُّ منها الشمسُ طاقتها.



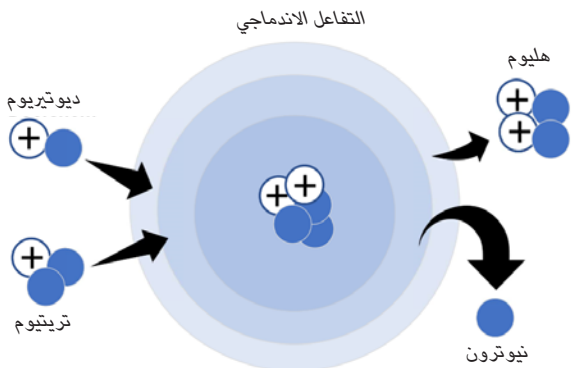
الشمس — المفاعل الاندماجي الوحيد العامل في مجموعتنا الشمسية في الوقت الراهن — هي مصدر معظم الطاقة التي نستخدمها في حياتنا.
(الصورة من: NASA/SDO/AIA)

ورغم المزايا التي يُتوقَّع أن تجنيها المجتمعات من توليد الطاقة من الاندماج النووي، مثل وفرة الوقود وسهولة الحصول عليه والخلو من الانبعاثات الكربونية ومن النفايات العالية الإشعاع، فإنَّ وضع الاندماج النووي موضع التنفيذ العملي لا يزال من أكبر التحديات التي تواجهها علوم الفيزياء والهندسة التجريبية اليوم؛ حيث إنَّ التحكُّم في تفاعل اندماجي يقع عند درجة حرارة تبلغ ١٠٠ مليون درجة مئوية مهمة تتَّسم بالتعقيد والصعوبة.

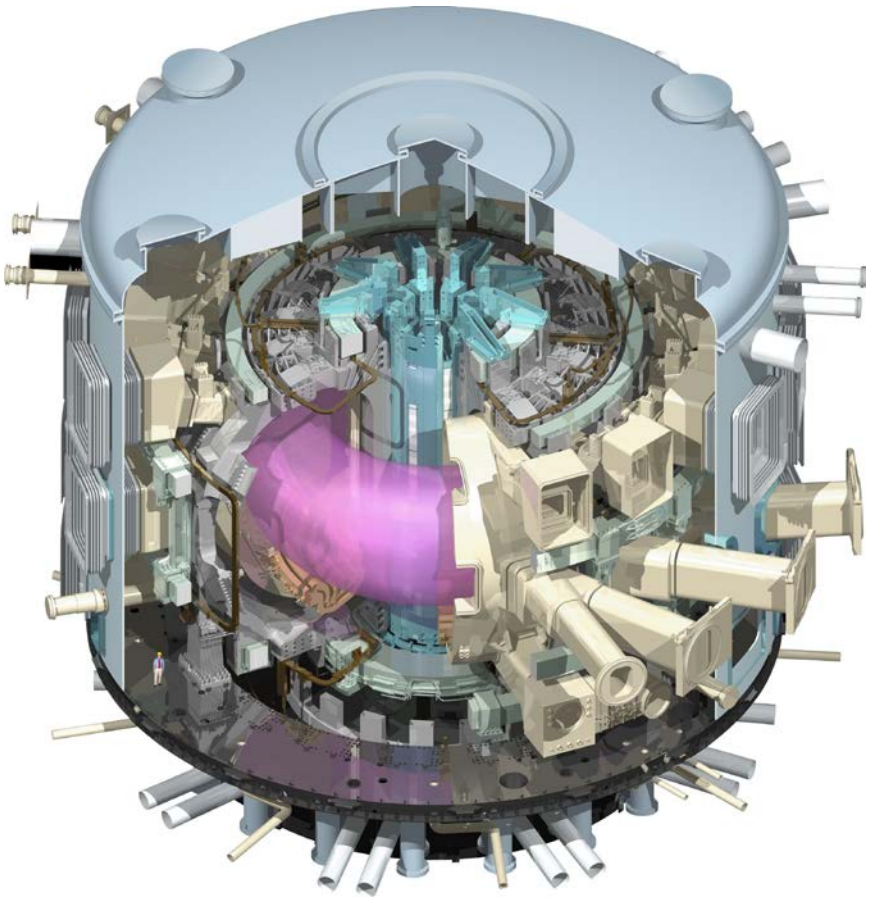
وفور التغلُّب على هذا التحدي، يمكن أن يصبح الاندماج النووي مصدراً للطاقة يُعتبر من الناحية العملية غير قابل للاستنفاد، ويتَّسم بكونه مأموناً وملائماً للبيئة ومتاحاً للجميع وقادراً على تلبية الاحتياجات العالمية من الطاقة.

كيف يعمل الاندماج النووي؟

في قلوب النجوم، تقع التفاعلات الاندماجية بين ذرات الهيدروجين داخل بلازما كثيفة، في درجات حرارة تتجاوز ١٠ ملايين درجة مئوية. والبلازما هي الحالة الرابعة من حالات المادة، وتتَّسم بخصائص فريدة تميِّزها عن المواد الموجودة في الحالات الصلبة والسائلة والغازية. وتتكوَّن البلازما من جسيمات مشحونة حرَّة الحركة، وتنشأ في درجات



سوف يُستخدم خليط من الديوتيريوم والتريتيوم — وكلاهما من نظائر الهيدروجين — كوقود لمحطات القوى الاندماجية في المستقبل. حيث تتصادم داخل المفاعل نوى الديوتيريوم والتريتيوم وتندمج، فتنبعث ذرات هليوم ونيوترونات.
(الصورة من: ماتيو باربارينو/الوكالة الدولية للطاقة الذرية)



التوكاماك في المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي سيصل ارتفاعه إلى ٣٠ متراً وسيزن ٢٣ ٠٠٠ طن. ويمكن تكوين فكرة عن حجم هذه الآلة من الرسم البالغ الصغر لرجل يرتدي قميصاً أزرق (في الركن الأيسر السفلي من الصورة). ويُقدَّر عدد الأجزاء التي يتكوَّن منها التوكاماك في المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي بنحو مليون جزء.

(الصورة من: المشروع الخاص بالولايات المتحدة والمعني بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

الحرارة المرتفعة عند إزالة الإلكترونات من الذرات المتعادلة. وحسب فهمنا في الوقت الراهن، فإنَّ نسبة تفوق ٩٩ في المائة من المادة الموجودة في الكون توجد في شكل بلازما، بما في ذلك المادة بين النجمية والنجوم نفسها، مثل الشمس في مجموعتنا الشمسية.

وفي أي محطة قوى نووية قائمة على الاندماج النووي المتحكَّم فيه، لا بدَّ من استيفاء شروط ثلاثة:

١- إيجاد درجة حرارة بالغة الارتفاع (تتجاوز ١٠٠ مليون درجة مئوية) بما يتسبَّب في وقوع تصادمات بين جسيمات عالية الطاقة؛

٢- والوصول إلى مستوى كافٍ من الكثافة في البلازما — التي يقع التفاعل داخلها — من أجل زيادة احتمالية وقوع هذه التصادمات؛

٣- وتوفير الاحتواء الكافي لاحتجاز البلازما وإتاحة الفرصة لوقوع التفاعلات الاندماجية بصورة مستمرة.

ومفهوم الاحتواء الذي يحقِّق أفضل النتائج حتى الآن هو "التوكاماك" (الذي يستمد اسمه من اختصار للعبارة الروسية "الغرفة الحَلَقية الشكل ذات الملفات المغناطيسية")، وهو تصميم يشبه كعكة الدونَت ابتُكر في خمسينات القرن العشرين، وتُستخدم فيه مغناطيسات قوية لاحتواء البلازما. ويمكن لآلات التوكاماك بالفعل أن توفِّر الشروط الأساسية للاندماج، سواء من حيث كثافة البلازما أو درجة الحرارة المطلوبة، ومن ثمَّ يمكن توليد التفاعلات الاندماجية. لكنَّ ما لا يزال ينقص هذه الآلات هو ضمان تحسين صافي القوى المنتَجة وإطالة فترة الاحتواء، التي تُعَدُّ مقياساً لقدرة المجال المغناطيسي على المحافظة على طاقة البلازما بمرور الوقت.

ما هو المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي ولماذا يحظى بأهمية بالغة؟

سيكون المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، وهو مشروع تعاوني بين ٣٥ بلداً، أكبر تجربة للاندماج النووي تُجرى على كوكب الأرض. وهو الآن قيد التشييد في مدينة سان بول ليه دورانس، فرنسا، ومن المقرَّر أن يبدأ تشغيله في نهاية عام ٢٠٢٥.

وقد نتج الزخم الذي أفضى إلى بدء إنشاء المفاعل في عام ٢٠٠٧ من مناقشات جرت في محافل عقدتها الوكالة بشأن عدَّة

مبادرات للتعاون في مجال بحوث الاندماج وتطوير تكنولوجياته على المستوى الدولي. والمدير العام للوكالة الدولية للطاقة الذرية هو وديع اتفاق المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي.

والغرض من المفاعل هو إيضاح كيفية تحقيق مكاسب أعلى كثيراً من القوى الاندماجية مقارنة بسائر تجارب الاندماج التي أُجريت حتى الآن. فبعد ضخ ٥٠ ميغاواط من القوى الحرارية إلى المفاعل لتسخينه، يهدف المفاعل إلى توليد ٥٠٠ ميغاواط من القوى الحرارية في نبضات طويلة تستغرق بين ٤٠٠ و٦٠٠ ثانية. ورغم أنَّ القوى التي سينتجها المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي لن تُستمد منه في شكل قوى كهربائية، فإنَّه سوف يمهِّد الطريق أمام استحداث آلات يمكنها أن تفعل ذلك.

فالمرحلة الثانية بعد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، أي تحويل الحرارة إلى كهرباء، سوف تتصدى لها محطة قوى الاندماج الإيضاحية المعروفة باسم محطة "ديمو" (DEMO). ومن المتوقع أن تعمل محطة "ديمو" على استكشاف وإيضاح إمكانية التشغيل المتواصل أو شبه المتواصل، والاكتفاء الذاتي من الوقود، وإنتاج الطاقة على نطاق واسع، بما في ذلك تحويلها إلى كهرباء، ويمكن توصيلها بالشبكة الكهربائية بحلول عام ٢٠٥٠ تقريباً.

هل تنتج عن الاندماج النووي نفايات مشعة كما في حالة الانشطار النووي؟

تنطوي أسهل عملية اندماج يمكن تحقيقها على نظيرين من نظائر الهيدروجين: الديوتيريوم والتريتيوم. وفي حين أنَّ التريتيوم مشع، فإنَّ عمره النصفي قصير (١٢,٣٢ سنة). وهو لا يُستخدم إلا بكميات قليلة نسبيًّا، ومن ثمَّ، فخلافاً للنوى المشعة الطويلة العمر، فهو لا يشكِّل أي خطر كبير.

ويؤدي التفاعل بين الديوتيريوم والتريتيوم إلى إنتاج ذرة هليوم (وهو غاز خامل) ونيوترون، تُحصد طاقتهما لتشغيل المفاعل وإنتاج الكهرباء، على التوالي. ولهذا فإنَّ المفاعلات الاندماجية لا تتسبَّب في إيجاد نفايات مشعة طويلة العمر.

غير أنَّ الاندماج يؤدي إلى إنتاج مواد منشَّطة نيوترونيًّا حول البلازما. وبعبارة أخرى، فعندما تصطدم النيوترونات (الناتجة من التفاعل الاندماجي) بجدران المفاعل، تصبح الهياكل والمكوِّنات التي تتألف منها هذه الجدران مشعَّة. ولذلك فإنَّ أحدَّ أهم التحديات التي ستواجه تشييد محطات الاندماج النووي في المستقبل يتمثَّل في الارتقاء بتصميم التشييد إلى المستوى الأمثل بغرض التقليل إلى أدنى حدٍّ من هذا النشاط الإشعاعي المحفَّز بفعل النيوترونات، ومن ثمَّ كميات النفايات المشعة الناتجة.

ما هو الدور الذي تؤديه الوكالة فيما يتعلق ببلازما الاندماج وتكنولوجيا الاندماج؟

تعمل الوكالة، منذ إنشائها في عام ١٩٥٧، على دعم بحوث الاندماج النووي. وتضطلع الوكالة بالعديد من الأنشطة بشأن الاندماج النووي، في إطار إرشادات المجلس الدولي لبحوث الاندماج النووي، وهو هيئة استشارية تابعة للوكالة تضمُّ أعضاء من جميع أنحاء العالم.

وتتولى الوكالة تنسيق الجهود الدولية في مجال بحوث الاندماج وتطوير تكنولوجياته بالجمع بين الفيزيائيين وعلماء المواد وأخصائيي البيانات النووية والمهندسين وخبراء البلازما، من بين متخصِّصين آخرين. وتنظِّم الوكالة أيضاً المؤتمر المعني بطاقة الاندماج النووي — وهو أكبر فعالية دولية في مجال الاندماج النووي في العالم.

ومن خلال حلقة العمل الخاصة بمحطة القوى الإيضاحية، تقوم الوكالة أيضاً بدور الجهة المركزية المعنية بوضع خطط البرنامج واستهلال أنشطة البحث والتطوير الجديدة، من أجل إعداد مفاهيم متعدِّدة لإيضاح مفاعلات القوى الاندماجية.

وتعمل الوكالة في السنوات الأخيرة على إعداد مبادئ توجيهية ووثائق مرجعية لتستخدمها الأوساط المعنية بالاندماج، وذلك بهدف المساعدة على تيسير مختلف العمليات والارتقاء بها إلى المستوى الأمثل، وتيسير تبادل المعلومات بشأن البحث والتطوير في مجال الاندماج النووي. فعلى سبيل المثال، نشرت الوكالة مؤخَّراً وثيقة تقنية بعنوان "نهج متكامل لتصنيف أمان المكونات الميكانيكية للتطبيقات الاندماجية" (Integrated Approach to Safety Classification of Mechanical Components for Fusion Applications) (وثيقة الوكالة التقنية IAEA TECDOC-1851)، وهي أول وثيقة مبادئ توجيهية دولية متعلقة بالاندماج النووي.

كيف تسهم الوكالة في بناء القدرات؟

ترعى الوكالة التعاون فيما بين المختبرات والمرافق، وهو ما يسهم إسهاماً كبيراً في تطوير بحوث الاندماج وتكنولوجياته، وكذلك في إعداد ما يلزم لذلك من المبادئ التوجيهية والمعايير ذات الصلة.

الموقع الإلكتروني الخاص بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي: منظر جوي لموقع تشييد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في حزيران/يونيه ٢٠١٩. (الصورة من: المنظمة المعنية بالمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

وعن طريق الأنشطة البحثية المنسَّقة، أُنشئت عدَّة شبكات تضمُّ أجهزة اندماج صغيرة، ويجري الآن استخدام هذه الشبكات بنجاح للتمكين من اتِّباع نهج متكامل في المساعي الرامية إلى إيجاد حلول لعدد من القضايا المعلَّقة. فعلى سبيل المثال، تُنظَّم تجارب مشتركة في إطار هذه الشبكات عن طريق الجمع بين خبراء من مؤسسات متعدِّدة لاختبار قدرات إحدى الآلات، ومن ثم زيادة التنوع الفكري وتحقيق أكبر قدر ممكن من الإنتاج العلمي المستمد من الجهاز قيد التجريب. وتُعَدُّ سلسلة الدورات الدراسية بشأن فيزياء البلازما بالاشتراك بين مركز عبد السلام الدولي للفيزياء النظرية والوكالة مثالاً آخر لمبادرة دولية تسهم في بناء القدرات في هذا المجال.

وبالإضافة إلى ذلك، تهدف الوكالة إلى توسيع نطاق أنشطة التعليم والتدريب المقدَّمة للجيل التالي من العلماء والمهندسين في مجال الاندماج النووي. ولهذا الأمر أهمية خاصة، حيث إنَّ أنشطة البحث والتطوير في مجال الاندماج النووي تتطلب تكنولوجيات أحدث بصورة متزايدة، وهو ما يتجاوز آفاق الدراية الفنية المتاحة في يومنا هذا.

المزيد من المعلومات

شعبة العلوم الفيزيائية والكيميائية
الوكالة الدولية للطاقة الذرية
Vienna International Centre
PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

البريد الإلكتروني: Fusion-physics@iaea.org

المواقع الإلكترونية:
nucleus.iaea.org/sites/fusionportal
www.iaea.org/topics/fusion
www.iaea.org/publications/nuclear-fusion

تصدر صحائف الوقائع الخاصة بالوكالة عن مكتب الإعلام العام والاتصالات
المحرِّرة: آبها ديكسيت • التصميم والتخطيط: ريتو كين

للحصول على المزيد من المعلومات عن الوكالة وعملها، زوروا موقعنا الشبكي www.iaea.org
أو تابعونا على

أو طالعوا منشور الوكالة الرئيسي، مجلة الوكالة، عبر الرابط التالي www.iaea.org/bulletin
IAEA, Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria
البريد الإلكتروني: info@iaea.org • رقم الهاتف: ٠-٢٦٠٠ (١) ٤٣+ • رقم الفاكس: ٧-٢٦٠٠ (١) ٤٣+