طاقة الاندماج النووي مصدر الطاقة المستدام والنهائي

عمرو بدر[1]، محمد صوان[2]، ليلي الجبّالي[2]

[1]مهندس تكنولوجيا الاندماج النووي في مشروع (ايتر) الدولي، فرنسا.

[2]أستاذ أبحاث فخري متميز في قسم الهندسة النووية والفيزياء الهندسية في جامعة ويسكنسن، ماديسون في الولايات المتحدة الأمريكية.

تمهيد

عند سؤال الفيزيائي الشهير ستيفن هوكينج عن تسمية إنجاز علمي واحد يتمنى أن يعيش ليراه خلال حياته كانت الإجابة: "أريد مشاهدة طاقة الاندماج النووي وقد أصبحت مصدرا متجدّدًا ونظيفًا للطاقة" [1]. وقبل هوكنج بعقود، قدّم الفلكي البريطاني المعروف آرثر إدينغتون محاضرة صرّح فيها بالقول إن "النجوم تستمدّ طاقتها من خزّان هائل من الطاقة .... سيكون غيرَ قابل للنضوب لو أننا نعرف فقط كيفية استخلاصه" [2]، وكان يشير إلى الاندماج النووي. وبعد عقود من البحث عن "خزان الطاقة الهائل" هذا في عشرات المختبرات الدولية، تمّ الشروع في بناء أكبر مفاعل اندماج نووي في العالم يُعرَف بـ (ITER) عام 2006. وفي عام 2022، أطلقت الإدارة الأميركية رؤيتها العشرية لإنتاج طاقة الاندماج تجاريًّا ومثلها حكومات أخرى. وبالتوازي مع القطّاع العام، يوجد الآن ما يزيد عن 40 شركة اندماج تجارية خاصة حول العالم يستثمر بها أقطاب الأعمال المشهورون وبرؤوس أموال تصل الى مليارات الدولارات.

هذا الحراك غير المسبوق من القطاعَين العام والخاص للوصول إلى طاقة الاندماج لم يأتِ من فراغ، لأن توليد الطاقة من تفاعلات الاندماج بشكل تجاري يُعدّ نقلة حضارية نوعية ذات تبعات عريضة جدًّا، فضلاً عن كونها من أهم وأعظم الإنجازات العلمية والتقنية التي سيسجلها الإنسان إن قُدِّر لها النجاح.

الطاقة و التنمية

الطاقة عنصر بالغ الأهمية للتنمية البشرية وأداة محورية لمواجهة تحديات الاستدامة في الاحتياجات الاجتماعية والاقتصادية والبيئية. مع نمو سكان العالم والزيادة السريعة في احتياجات الطاقة لمواكبة متطلبات التنمية البشرية، يصبح لزاماً ضمان مصدر طاقة مستداماً ونظيفاً بيئياً. يمثل الوقود الأحفوري (الفحم والنفط والغاز الطبيعي) ما نسبته 82% من الاستهلاك العالمي الأولي للطاقة و60%من إنتاج الكهرباء، وتتوزع النسّب المتبقية بين مصادر الطاقة النووية والكهرومائية والطاقة المتجددة (الكتلة الحيوية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية) كما هو موضح في الشكل (1). إن مساهمة الوقود الأحفوري أعلى بكثير في الدول العربية. مثلاً، يسهم الوقود الأحفوري بنسبة 89% من إنتاج الكهرباء في مصر. في المقابل، يُعَدّ احتراق الوقود الأحفوري مسؤولاً عن انبعاثات كبيرة من مُلوِّثات الهواء المتضمّنة انبعاثات الغازات الدفيئة والمؤدية بدورها إلى زيادة ظاهرة الاحتباس الحراري. وتشمل الآثار السلبية زيادة المخاطر على السواحل والنظم البيئية وموارد المياه العذبة وصحة الإنسان. ولغاية تقليل المخاطر المتعلقة بالتغير المناخي والحفاظ على البيئة للأجيال القادمة، فإنه من الضروري الانتقال إلى خيارات طاقة منخفضة الكربون. وقد وافقت نحو 200 دولة مشاركة في مؤتمر المناخ (COP28) الذي عُقِد في مدينة دبي خلال شهر ديسمبر 2023 على ميثاق عالمي يدعو للانتقال بعيداً

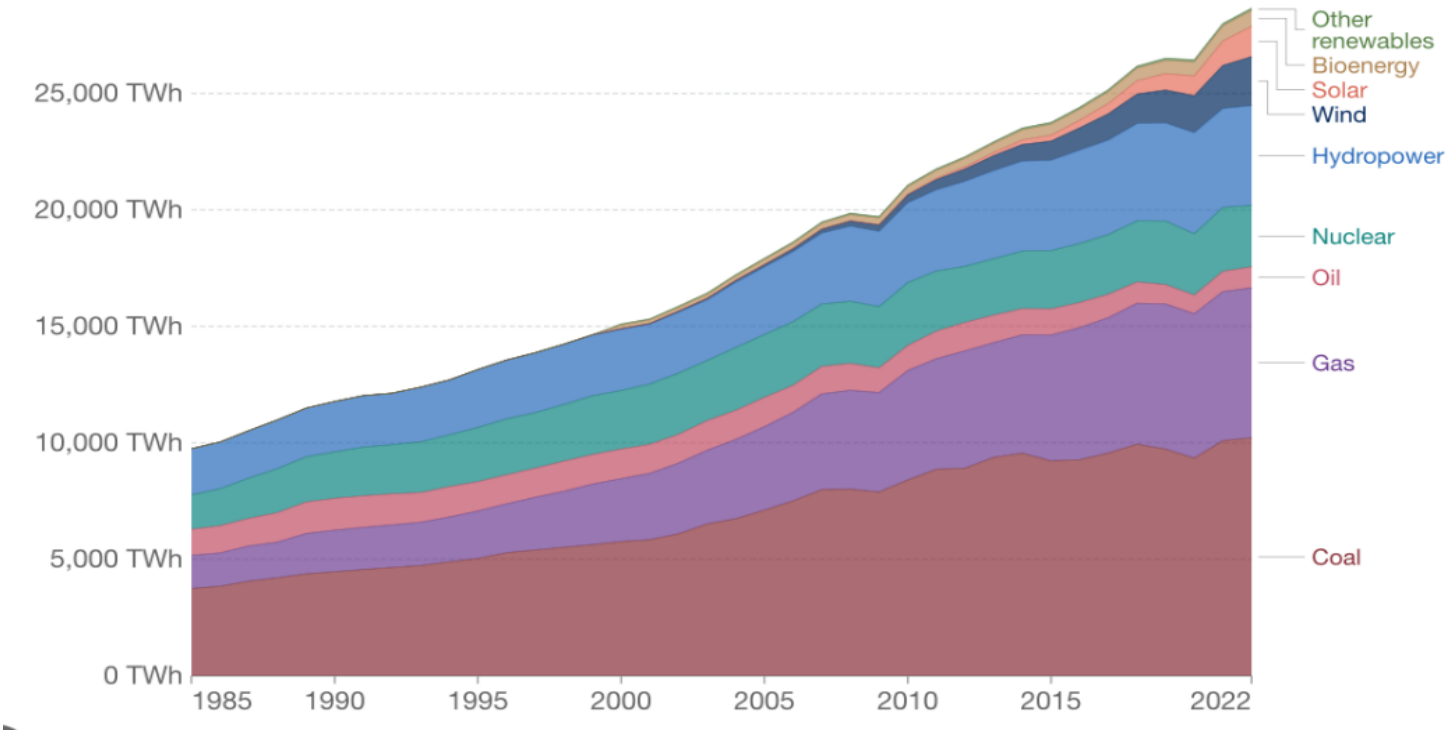
© الجمعية العربية للفيزياء

عن الوقود الأحفوري والتوقف كلياً عن إضافة ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي بحلول منتصف القرن الحالي. كما يدعو الميثاق الدولي إلى مضاعفة كمية الطاقة المتجددة إلى ثلاثة أضعاف بحلول 2030. تُعَدّ الطاقة النووية إلى حد بعيد أكبر مصدر خالٍ من الانبعاثات الكربونية لإمدادات مستمرة وموثوقة لتوليد الكهرباء. وقد أصدرت 22 دولة خلال مؤتمر المناخ (COP28) إعلاناً مشتركاً لمضاعفة القدرة النووية على مستوى العالم إلى ثلاثة أضعاف بحلول 2050 وذلك إدراكاً للدور المحوري الذي تمثله الطاقة النووية في تحقيق صافي صفري من انبعاثات الغازات الدفيئة بحلول 2050.

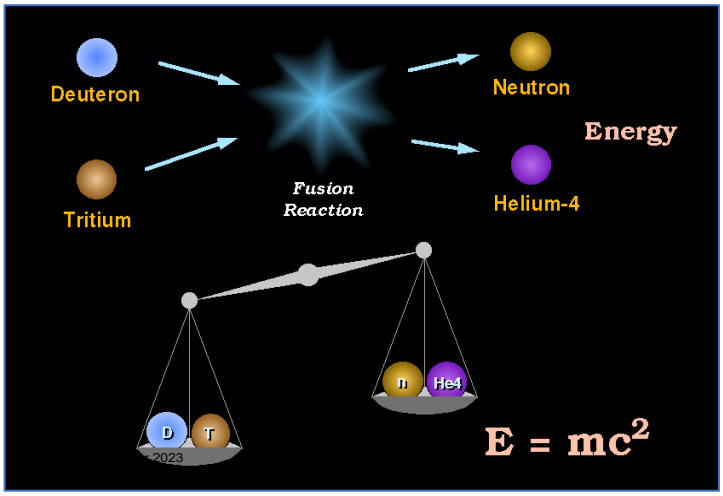
طاقة الاندماج النووي

على النقيض من الانشطار النووي الحاصل في المفاعلات النووية الحالية، يحدث الاندماج النووي من اندماج نواتين ذريتين خفيفتين ممّا يطلق كمية هائلة من الطاقة. وكمورد وقود غير ناضب تقريباً، تلعب طاقة الاندماج النووي دوراً رئيساً في تلبية الطلب العالمي على الطاقة في المدى الطويل. يُعتبر تفاعل اندماج الديوتيريوم ـ التريتيوم (D-T) التفاعل النووي الواعد لتوليد القدرة من الاندماج النووي، كما هو مُبيَّن في الشكل (2)، حيث أنّ كلاً من الديوتيريوم والتريتيوم يُعَدّ من نظائر ذرّة الهيدروجين. يتسبب اختلاف الكتل بين الديويتيريوم والتريتيوم من جهة وبين الهيليوم-4والنيوترون من جهة أخرى بانبعاث الطاقة الكبيرة من تفاعل الاندماج. إضافة لذلك، لتحقيق هذا التفاعل النووي، يجب أنّ تكون درجة حرارة نواتي الديوتيريوم والتريتيوم أعلى من 10 كيلو إلكترون فولت أو 100.000.000 درجة مئوية (1 إلكترون فولت= 11.300 درجة مئوية). عند مستويات طاقة كهذه، تكون هذه الذرات متأيّنة بشكل كامل لتشكّل حالة البلازما، وهي الحالة الرابعة للمادة. الديوتيريوم هو ذرّة موجودة بوفرة في الطبيعة ويمكن استخلاصها من مياه البحر بتكلفة بسيطة.

يتولّد التريتيوم في محطة طاقة الاندماج بواسطة امتصاص النيوترونات المنبعثة من البلازما أثناء التفاعل في ذرات الليثيوم الموجودة داخل بطانيات خاصة حاملة لليثيوم في حجرة المفاعل.



شكل (1). الإنتاج العالمي للكهرباء حسب المصدر [3]



الشكل (2). تفاعل اندماج الديوتيريوم ـ التريتيوم (D-T) وانطلاق الطاقة بسبب الاختلاف في الكتلة بين الديوتيريوم والتريتيوم من جهة، والنيوترون والهيليوم4 من جهة أخرى .
credit: Mohammed Sawan

ميزات طاقة الاندماج

تشير الدراسات إلى أن الكميات المتوافرة الآن والتي يمكن استخلاصها تجارياً من الديتريوم كافية لسد الاحتياجات العالمية من الطاقة لآلاف السنين. التريتيوم ـ الوقود الآخر المستعمل في التفاعل ـ هو عنصر مشع ذو عمر نصف قصير يساوي 12 عام، لذلك هو نادر الوجود في الطبيعة، لكن يمكن توليده بواسطة تفاعلات داخل حجرة المفاعل بين النيوترونات الصادرة من التفاعل الاندماجي وجدار المفاعل المكوّن من مواد تحتوي عنصر الليثيوم، حيث يتفاعل النيوترون مع الليثيوم لتوليد التريتيوم. في جميع الأحوال، إن كميات الوقود الاندماجي المتوفرة تكفي لسدّ احتياجات الاستهلاك العالمي لعدة قرون قادمة على أقل تقدير. يمكن للاندماج النووي توليد أربعة أضعاف الطاقة لكل كيلوجرام من الوقود مقارنة مع تفاعلات الانشطار النووي (الحاصلة في المفاعلات النووية الحالية)، وأكثر من أربعة ملايين ضعف الطاقة الناجمة من حرق كيلوجرام واحد من الوقود الأحفوري، كما أنه لا يطلق غازات ضارة بالبيئة، ويُعتبر تفاعلاً آمناً لا يمكن خروجه عن السيطرة. في المحصلة، يُعتبر الاندماجُ مصدرَ طاقة آمنًا، نظيفًا ومتجدّدًا، ويمكن الاعتماد عليه كبديل للوقود الأحفوري في حال وصلت التقنية للنضج اللازم. من الجدير ذكرُه إطلاقُ ما يصل إلى 35 دولة في مؤتمر المناخ (COP28)، الذي عُقد في مدينة دبي، خطةَ مشاركة دولية لتعزيز الاندماج النووي، مُشيرةً إلى أنّ هذه التكنولوجيا خاليةً الانبعاثات يمكن أن تكون أداةً حيوية في مكافحة التغير المناخي.

برامج الاندماج العالمية: نظرة إلى المشهد الحالي

بدأت الأبحاث العلنية حول الاندماج النووي في خمسينيات القرن الماضي بعد مؤتمر الاستخدامات السلمية للطاقة الذرية الذي عقد في سويسرا عام 1958 والذي عُرِف بالمؤتمر "العملاق" لكثرة أعداد المشاركين، حتى إنّ غرف الفنادق في مدينة جنيف امتلأت بالكامل تقريباً، فاضطر بعض المشاركين للسكن في مدن أبعد ــ بعضها في فرنسا ــ لمتابعة وقائع المؤتمر الكبير [4].

في الوقت الحاضر، هناك المئات من تجارب الاندماج على مستوى العالم والتي تتطرق إلى كافة مبادئ الاندماج المغناطيسي [5,6,7]. يوجد اليوم تعاون دولي مثير للإعجاب في كافة مجالات البحث، كما أن كمية المعرفة المتراكمة والضخمة أدت إلى الثروة الحالية في علوم الاندماج النووي. بعد ما يزيد عن الـ 70عامًا من البحث والتطوير في علوم الاندماج، يتزايد الاهتمام العالمي اليوم حولها بشكل كبير، بجانب الدعم غير المسبوق لها من الحكومات والقطاع الخاص. مثلاً، سيصمّم القطاع الخاص محطات اندماجية ريادية يمكن أن تصبح قيد التشغيل في ثلاثينيات القرن الحالي. وقد وصل التنافسُ بين الدول التي لديها برامجُ اندماجٍ قويّةٌ أشدَّه لإنشاء أول محطة طاقة اندماج تجارية بحدود عام 2050.

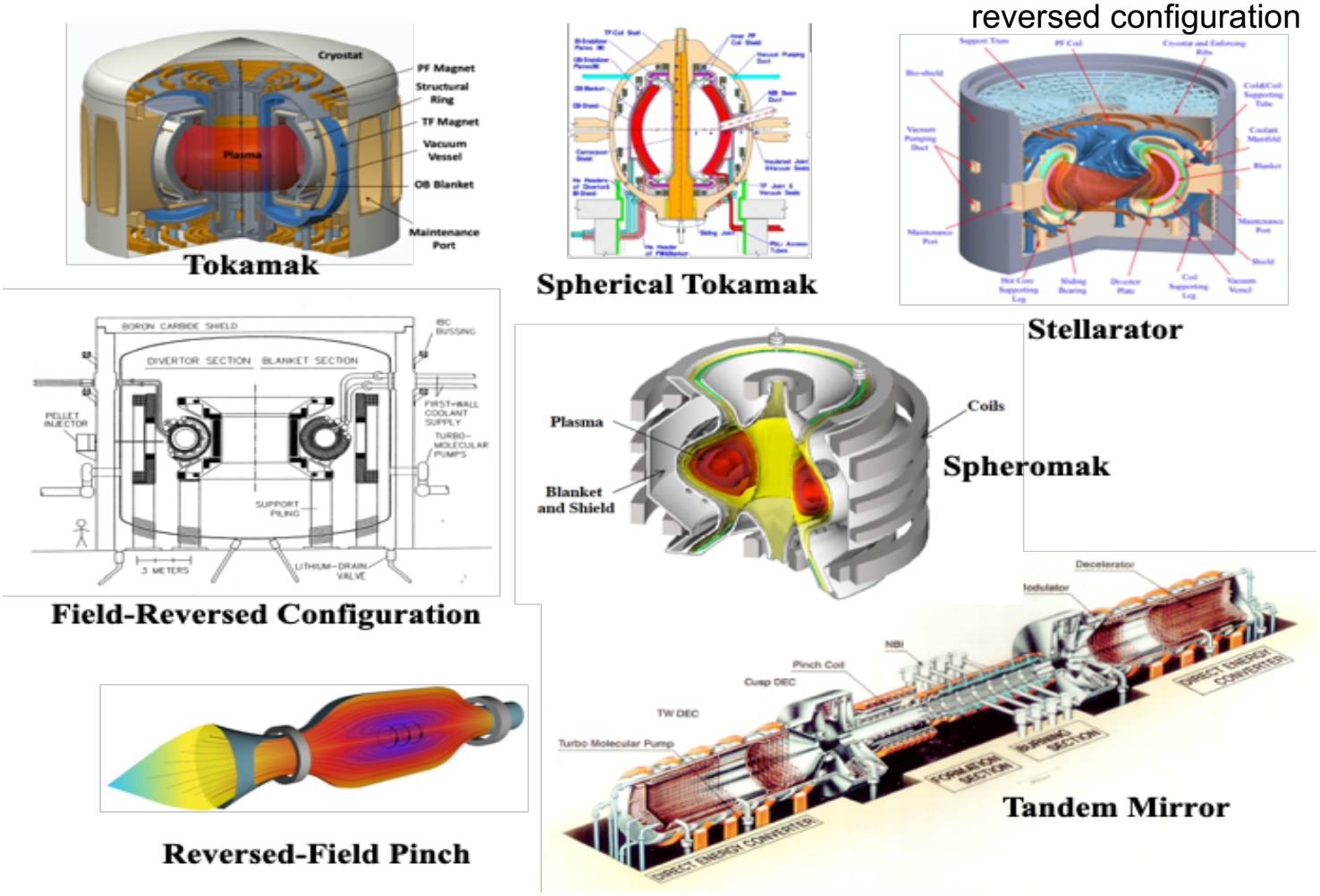
تاريخ موجز لمفاهيم الاندماج

تم تطوير العديد من طرق حصـــر البلازما الســـاخنة، منها الحصـر القصـورى والحصـر المغناطيسـي. تعتبر الطريقة الثانية هي الأبرز، حيث تُسـتعمل مجالات مغناطيسـية قويّة لأغراض حصـــر البلازما الســـاخنة داخل حجرة التفاعل، وأشـــهر هذه الطرائق هي التوكـاماك (tokamak) الذي طُوِّر في الاتحاد السـوفييتي، والنجمي (stellarator) ـــــ الذي طُوِّر في الولايات المتحدة ـــــــ والقَرْص (pinch) والمرآة (mirror) [4] والطـارة الكرويـة (spherical tours (ST) وقَرْص المجـال المعكوس (-reversed field pinch (RFP) و التوكاماك الكروي – سفيروماك (spheromak) والتكوين معكوس المجـال (-field reversed configuration (FRC)) والمرآة الترادفية ((tandem mirror (TM).

جميع هذه المفاهيم المغناطيســية الســبعة والموضــحة في الشكل (3) شـهدت تعديلات أسـاسـية خلال العقود الخمسـة الماضــية، حيث اســتطاع التوكاماك أنّ يبقى المهيمن على مفاهيم الحصر المغناطيسية الأخرى حتى الآن.

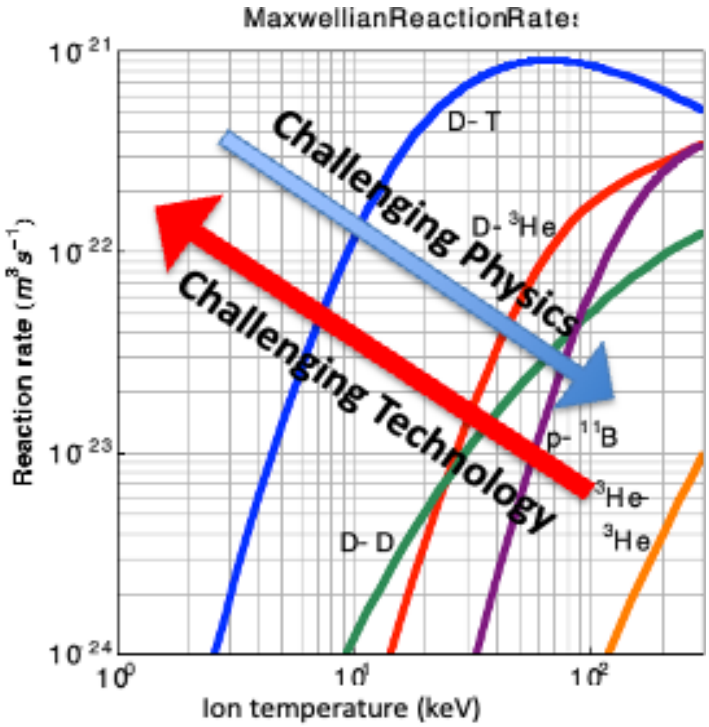
دورات وقود الاندماج

يركِّز الجيل الأول من الاندماج النووي المفترَض حاليًّا على وقود(D-T) الذي يمثل الحد الأدنى من متطلبات إشعال بلازما الاندماج على النطاق التجاري. لذلك فإن معظم دراسات وتجارب الاندماج مكرسّة حالياً لدورة وقود(D-T) وبخصوص مرافق الاندماج النووي من الجيلين الثاني والثالث فتشمل دورات وقود ديوتيريوم -- ديوتيريوم (D-D)



الشكل (3). مناظر توضيحية لمفاهيم الاندماج المغناطيسي السبعة. الشكل مقتبس من[8]

وديوتيريوم ــ هيليوم^3 ($D - He^3$) وبروتون ــ بورون^{11} ($P - B^{11}$) وهيليوم^3 ــ هيليوم^3 ($He^3 - He^3$). التفاعلات المبنية على وقود (D-T) سهلة نسبياً لأنها تحتاج درجات حرارة أقل لبدء التفاعل لكنها في المقابل تطلق فيضاً من النيوترونات عالية الطاقة والتي تتسبب في التنشيط الاشعاعي لمكوّنات المفاعل، ممّا يُزيد من صعوبة التصميم هندسيًّا مقارنة بأنواع الوقود الأخرى التي تتطلب درجاتِ حرارة أعلى لبدء التفاعل، وبالتالي فهي أصعب فيزيائيًّا، لكنها تُنتِج (أو لا تُنتج، اعتماداً على نوع الوقود) كمياتٍ أقلَّ من النيوترونات، ممّا يجعل تصميمها أبسط نسبيًّا من الناحية الهندسية والتشغيلية. هذه العلاقات موضحة في الشكل (4).



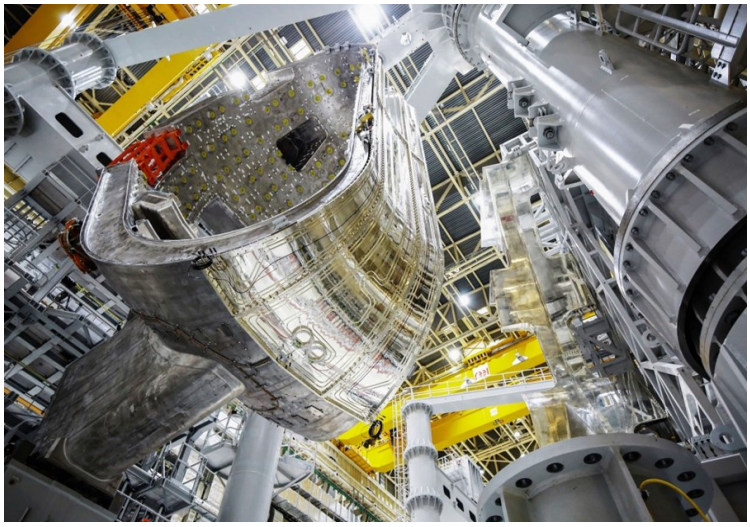
الشكل (4). العلاقة بين معدّل التفاعل لتفاعلات اندماج مختلفة كدالّة مرتبطة بدرجة الحرارة[credit: Laila El-Guebaly] .

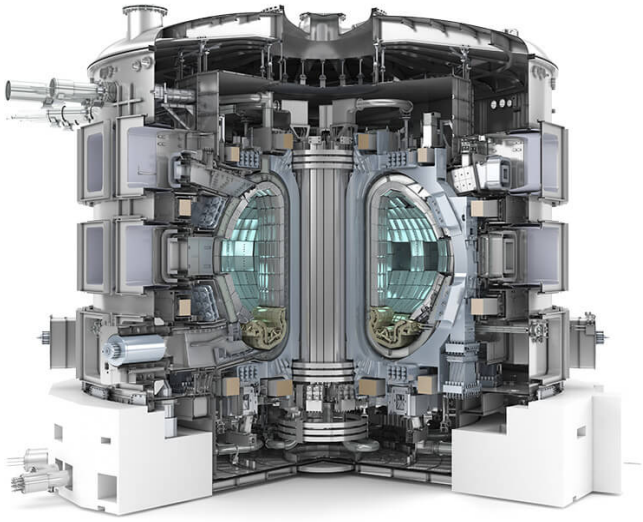
مشروع ايتر الدولي (ITER)

يعتبر مشروع المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي، المعروف اختصاراً بـــ (ايتر)، أكبر وأبرز مشروع لطاقة الاندماج النووي في العالَم حاليًّا بمشاركة 35 دولة هي دول الاتحاد الأوروبي وبريطانيا، الولايات المتحدة، اليابان، الصين، كوريا، روسيا، والهند. تبلُغ كلفة المشروع حتى الآن ما يزيد على العشرين 20 مليار يورو مرشّحة للزيادة ممّا يجعل مشروع (ايتر) واحدًا من أكبر المشاريع العلمية وأكثرها كلفة على الإطلاق، متفوّقا بذلك على مشروع مصادم الهادرونات الكبير في سيرن (ما يقارب 3 أضعاف التكلفة).

يهدف مشروع ايتر إلى إثبات الجدوى الفنية والتقنية لتوليد الطاقة باستعمال تفاعلات الاندماج. يعتبر الكثيرون مشروع (ايتر) واحدًا من أعقد المشاريع الفنية والهندسية على الإطلاق، وبالفعل، يتكوّن مفاعل ايتر الاندماجي من 10 ملايين قطعة تتكامل مع بعضها بهامش دقة يصل أحيانًا إلى أجزاء من الألف من المتر (مليمتر) في عناصر يصل طول بعضها إلى ارتفاع مبنى من 10 طوابق. هذه الدقة غير المسبوقة تجعل من تصميم وتصنيع الكثير من الأجزاء عملية بالغة التعقيد والحساسية وتتطلب مهارات فنية متقدمة تملكها الدول الصناعية الكبرى – وأحيانًا لا تملكها بشكل كُلي، فتضطر للتعاون مع بعضها لصناعة بعض المكوّنات وتجميعها. تصل حرارة البلازما الساخنة داخل مفاعل ايتر إلى 150 مليون درجة مئوية، أي ما يقارب 10 أضعاف حرارة نواة الشمس. تجعل حرارةٌ كهذه ــ مضافا إليها حزم النيوترونات والإشعاعات عالية الطاقة داخل حجرة المفاعل ــ مسألةَ اختيار وتطوير مواد ذات قدرة تحمّل عالية للحرارة والإشعاع قضيةً حاسمةً لنجاح طاقة الاندماج. يُظهِر الشكل (5) ــ يميناً تصميماً حاسوبياً لمنظر عام لمفاعل ايتر بارتفاع 30 مترا، إضافةً إلى منظر حقيقي لجانب من أعمال تجميع أجزاء المفاعل التي تتمّ حاليًّا كما هو موضح في الجزء الأيسر من الشكل نفسه.

© الجمعية العربية للفيزياء





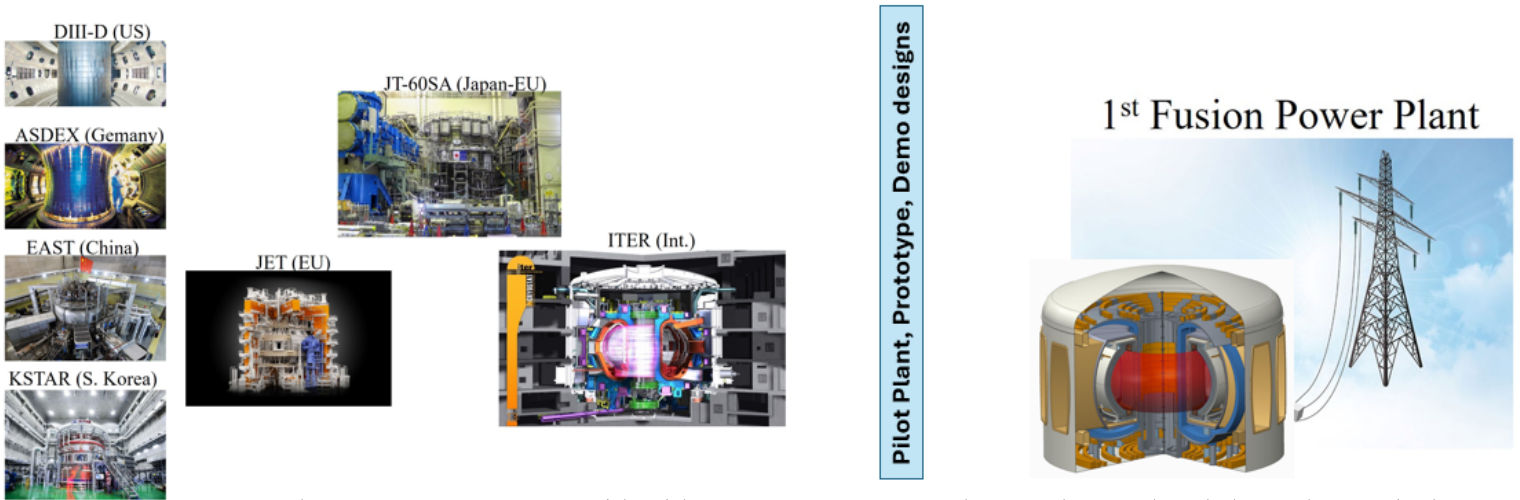
الشكل (5). منظر عام لمفاعل ايتر (يمين) إضافة لمنظر إحدى عمليات تجميع أجزاءٍ من المفاعل [credit: F4E]

خارطة الطريق لطاقة الاندماج

يبقى مشـــروع (ايتر) حجر الأســـاس في كثير من برامج الاندماج الحكومية حول العالم ونقطة العبور إلى محطات الاندماج المســتقبلية، حيث تســعى الدول إلى الاســتناد على نتائجه في بناء الجيل القادم من محطات الاندماج المعروفة بـ "ديمو" (والتي تهدف إلى إثبات الجدوى الاقتصادية للاندماج) وصـولا إلى بناء نموذج أولي لمحطة طاقة اندماج بحلول عام 2050. بالتوازي مع الجهود الحكومية، هناك ما يزيد عن 40 شركة حول العالم حاليا تأمل في طرح نماذجها الخاصة من محطات الاندماج خلال عقد أو عقدين من الآن. تســتثمر هذه الشركات شخصياتٌ من أمثال بيل جيتس مؤسس شركة ميكروسوفت وجيف بيزوس مالك شركة أمازون وغيرهم من أقطاب عالم المال والأعمال. الشكل (6) يمثل المسار العام لبرامج الاندماج الحكومية حول العالم وصولا إلى محطات الاندماج التجارية. من الجدير بالذكر أن القطاع الخاص يفترض مساراتٍ مختلفةً لتحقيق الاندماج التجاري وخلال مدة زمنية افتراضية أقصر بشكل غير بسيط من برامج الاندماج الحكومية.

المبادرة العربية لطاقة الاندماج

هناك زخم كبير يدور حول طاقة الاندماج حاليا وصل ذروته



الشكل (6). المسار العالمي الحكومي للاندماج النووي بدءا من تجارب تشغيلية حالية مرورا بـ (ITER) وصولا إلى (DEMO) ثم محطة الطاقة الأولى من نوعها (التصاميم من غير مقياس رسم أو أبعاد حقيقية).

للمرة الأولى منذ عقود. على الرغم من الكمّ الكبير من الأبحاث والتطوير في هذا المجال إلا أن هذا النشاط الحيوي لا يزال ضعيفاً جداً في العالم العربي. ولسدّ هذه الفجوة، تمّ تشكيل مجموعة عمل غير ربحية، تُسمّى "المبادرة العربية لطاقة الاندماج"، تتألف من نخبةٍ متميزةٍ من العلماء والمهندسين وقادة الصناعة الذين يعملون في أماكن بارزة في المنطقة العربية وحول العالم، ويدفعهم طموح مشترك لدعم تطوير طاقة الاندماج عربياً. تحظى المبادرة العربية لطاقة الاندماج بدعم جهات رفيعة المستوى منها الديوان الملكي الأردني، من خلال صاحب السمو الملكي الأمير الحسن بن طلال، وهو أحد الشخصيات العربية الداعمة بقوةٍ للمبادرة. تعقد المجموعة الخاصة بالمبادرة اجتماعاتِ عملٍ دورية إضافةً الى التواصل مع الجهات الدولية، وندعو كلَّ مهتم بالموضوع للتواصل معنا من أجل المساهمة في هذه المبادرة الرائدة.

المراجع

[1] https://www.iter.org/newsline/-/2956
[2] https://ccfe.ukaea.uk/eddingtons-dream-becoming-reality-100th-anniversary-of-the-discovery-of-solar-fusion/
[3] Energy Institute – Statistical Review of World Energy (2023)
[4] https://www.iter.org/newsline/54/1205
[5] IAEA World Fusion Outlook 2023. https://www.iaea.org/publications/15524/iaea-world-fusion-outlook-2023.
[6] The IAEA Fusion Portal. https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/Fusion%20Portal.aspx.
[7] The ITER Project. https://www.iter.org.
[8] Laila A. El-Guebaly, “Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958-2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends.” Energies 2010, 3 (6), 1067-1086 (2010). https://www.mdpi.com/1996-1073/3/6/1067

واحدات بلانك

من النتائج المذهلة للفيزياء الحديثة أنّ الطبيعةَ تختار الواحداتِ الأساسيةَ الخاصّة بها لمقادير الطول L والزمن T والكتلة M. هذه الواحدات الطبيعية الثلاث مرتبطةٌ بالمجالات الثلاثة المؤلّفة من الميكانيك التقليدي والكهرمغناطيسية/النسبية وميكانيك الكمّ، فكلٌّ من هذه المواضيع يُقدّم واحدةً أساسيةً في الطبيعة:

(1) ثابتة الجاذبية (الثقالة) G من قبل الميكانيك التقليدي.
(2) سرعةَ الضوء c من قبل الكهرمغناطيسيّة والنسبيّة.
(3) ثابتة بلانك $\hbar$ ، وقدّمها ميكانيك الكمّ.

حيث أنّ G, c, $\hbar$ مستقلةٌ خطّياً بدلالة أبعادها، نستطيع كتابة L وT وM بدلالتها.

(1) من F=Ma، لدينا من أجل قوة الثقالة $\left[\frac{GM^2}{L^2}\right] =$ $M\frac{L}{T^2}$، ممّا يعطي $[G] = \frac{L^3}{MT^2}$

(2) $[c] = \frac{L}{T}$

(3) من معادلة بلانك E=$\hbar\omega$ (حيث ω هو التواتر بواحدة 1/T)، فيكون لدينا $[\hbar] = ET = \frac{ML^2}{T}$

يمكن الآن إيجاد L وT وM بدلالة هذه الواحدات الأساسيّة الجديدة.

(1)طول بلانك $L \sim \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$، ويبلغ 1.6×10^{-35} متراً.

(2)زمن بلانك $T = \frac{L}{|c|} \sim \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$، ويبلغ 5.4×10^{-44} ثانيةً.

كتلة بلانك $M = \frac{|\hbar T|}{L^2} \sim \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ ، وتبلغ 2.2×10^{-8} كيلوغراماً.

يتمّ تحقيق منظومة الواحدات المُفضَّلة لدينا في الفيزياء من خلال إعطاء كلٍّ من هذه الثوابت القيمةَ 1 فيها. وهذا يمنحنا سلّماً أنيقاً -وعمليّاً أيضاً- لإجراء القياسات يُدعى الواحدات الطبيعية أو واحدات بلانك. يُعتبَر طول بلانك وزمنه ثابتتَين دون ذريّتَين subatomic، أمّا كتلةُ بلانك فهي ضخمةٌ بالمقارنة مع كتل الجسيمات دون الذريّة، إذ تساوي كتلتها حوالي 10^{19} كتلةَ البروتون، على الرغم من أنها لا تزال صغيرةً بالمقارنة مع مقاييس الحياة اليومية التي اعتدنا عليها.

مرجع: C. Vafa, Puzzles to Unravel the Universe, 2021، الترجمة العربية: ألغاز تكشف عن جوهر الكون، الفصل الثامن: مذهب الطبيعيّة في الفيزياء، التحليل البُعدي، دور أندروميدا 2022.