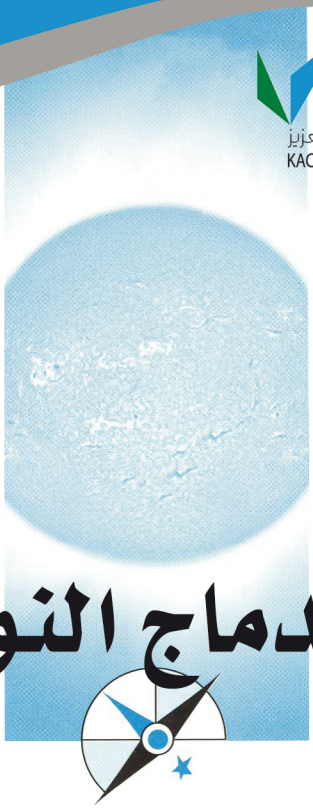
المملكة العربية السعودية

مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST

كتاب العربية



الاندماج النووي

تأليف: جوزف فايس

ترجمة: زينا مغربل

مراجعة: أبو بكر سعد الله

١٤٣٥هـ - ٢٠١٤م

ماذا أعرف؟

Que sais-je?

المملكة العربية السعودية

الاندمـاج النـووي

تأليــف : جوزف فايس

ترجمــة : زينا مغربل

مراجعة : أبوبكر سعدالله

ماذا
أعرف ؟

Que
s a i s - j e?

ح مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، ١٤٣٥هـ
فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

فايس، جوزف
الاندماج النووي. / جوزف فايس ؛ زينا مغربل ؛ أبو بكر سعدالله
الرياض، ١٤٣٥هـ
٩٩ص ؛ ١٢×١٨,٥ سم
ردمك: ٢-٦٦-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨
١- الطاقة النووية ٢- المفاعلات النووية أ.مغربل، زينا (مترجم)
ب. سعدالله، أبو بكر (مراجع) ج.العنوان
ديوي ٥٣٩,٧٩٦ ١٤٣٥/٥٧٥١

رقم الإيداع: ١٤٣٥/٥٧٥١
ردمك: ٢-٦٦-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨

جميع الحقوق محفوظة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
ص.ب. ٦٠٨٦ الرياض ١١٤٤٢
المملكة العربية السعودية
هاتف : ٤٨٨٣٤٤٤ - ٠١١-٤٨٨٣٥٥٥ فاكس : ٠١١-٤٨٨٣٧٥٦
الموقع الالكتروني: www.kacst.edu.sa
المكتبة الالكترونية: kacst.edu.sa/ar/about/publications
البريد الالكتروني: awareness@kacst.edu.sa

رقم الإيداع الدولي للأصل بالفرنسية:
ISBN 2 13 053309 4
الطبعة الأولى: فبراير، ٢٠٠٣

تم الإصدار ضمن التعاون المشترك بين مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
والمجلة العربية (الثقافة العلمية للجميع)

المقدمة

يتمتّع العديد من الحيوانات بمكوّنات لغويّة تتيح لها التّواصل فيما بينها، بل إنّ منها ما يجيد التّلاعب بأدوات حقيقيّة بإتقان، إلّا أنّ ماهو منها عاجز عن إضرام النّار أو الحفاظ على توهّجها، ومن هنا كان التمكّن من النار هو العلامة المميّزة لولادة البشرية. ففي جميع الأحوال كان التحكّم في النّار بداية رحلة الإنسان للبحث عن الحياة أكثر من مجرد البقاء على قيدها .

منذ البداية، كان لاستخدام النّار آثار بالغة التنوّع: الحرارة، والحماية، والضّوء، وتحويل الغذاء والمعادن، والموضوع المطروح هنا في الواقع أعظم من النّار في حدّ ذاتها؛ فالمسألة متعلّقة باستخدام الطّاقة بأشكالها كلّها. من هنا، -وقبل ظهور "آلات النّار"، وعدم التمكن الممكن بعد من تحويل النّار إلى طاقة ميكانيكيّة- سعى الإنسان بحثًا عن هذه الطّاقة في الرياح أو الماء الجاري، ولا سيّما في ترويض الحيوانات، بل -يا للأسف- لاستعباد بني جنسه.

يتأمّل الإنسان منذ القدم في مصدر آخر للطّاقة، ألا وهو النّجوم، وبخاصّة نجمه هو؛ الشّمس، وقد تعرّف أخيرًا، ومنذ أقلّ من مئة عام، إلى مصدر هذه النّار الاستثنائية، مدركًا أيضًا أنّ بروميثيوس Prometheus لن يهْديه قبسًا من النّار يستخدمه كما يشاء، إلّا أنّه منذ أقلّ من عشرة أعوام، تمكّن الإنسان من تكرار هذه الظّاهرة في مختبراته، مبتكرًا سبيلًا لاستخراج أكثر أشكال الطّاقة عالميّةً ومرونةً؛ الكهرباء، وهكذا، وفي العصر الذي بلغت فيه الحاجة إلى الطّاقة أوجها، ها هو باب يفتح، لنتخطّى عتبته، ونجد مسلكًا يدعونا إلى المضيّ قدمًا، وحيث ينتظرنا تحدّ آخر.

الفصل الأوّل

البلازما والاندماج النوويّ

١. المبادئ الرئيسة

إنّ النـار حقيقة شـائعة، وقد تطـوّرت بعض المفاهيـم المتعلّقة بالنار؛ متسـلّلة إلى اللغة الرائجة في صـورة مصطلحات الحرارة أو درجتها. بيد أنّه فور محاولة التعمّق في فهم هذه المصـطلحات، سرعان ما نجد أنّه قد يتعذّر إدراك معانيها الحقيقيّة، وإن بدا استخدامها خاليًا من الإبهام، ولا عجب في ذلك، فكم اسـتغرق علماء الفيزياء أنفسهم من الوقت؛ للتخلّص مـن المفاهيم الخاطئة التـي طالما اقترنت بالنّار. سـنتحدّث في كلّ ما يلي وباسـتمرار عن غازات معرّضـة لدرجات حرارة اسـتثنائيّة في ارتفاعها، كمـا لا يتحقّـق إلّا في النجوم أو المختبرات العلميّة المختصّـة، ولكي نتمكّن جيدًا من استيعاب ما يدور في مثل هذه الظروف، ينبغي الرجوع إلى مفهوم الحـرارة؛ لتحديد معنى دقيق وحدسـيّ؛ لذا سـنتناول فكـرة "الحرارة" العامّة، ودراستها في ضوء ما نعرفه عن شأن طابع المادّة "الذرّيّ".

١- ما الحرارة؟

لننظـر إلـى أحد البالونـات المربوطة بخيـط، كتلك التي يمْسـك بها الأطفـال. هـذا البالـون ممتلئ بغـاز خفيف جدًا؛ غـاز الهيليـوم، وتقول الفيزيـاء الحديثة إنّ الغاز -كسـائر أشـكال المادّة- مؤلّف من حشـد من الأجـزاء الصّـغيرة؛ -أي الـذرّات- أيّ ذرّات الهيليـوم في هـذا المثـال- التـي سنشـبّهها في الوقـت الرّاهن بكرات صـغيرة صـلدة. هـذه الذرات غير الملتصـقة ببعضـها بعضًـا؛ فثمّة حيّز فراغيّ كبير يتغلغـل بين الكرة والأخرى، تتحـرّك رواحًا ومجيئًا بالاتّجاهات كافّـة، مرتطمةً فيما بينها، ومرتـدّة عن جـدران البالـون. الآن -وقد رسـمنا هذا المشـهد- بوسـعنا

---

[1] ملاحظة المترجم: بروميثيوس: أحد الجبابرة في الميثولوجيا الإغريقية، ذهبت الأساطير إلى أنّ إله الإغريق زيوس كلّفه وأخاه أبيمثيوس بخلق البشر ومنحه متطلّبات البقاء. أي الهيليوم والأكسجين

الحديث عن الحرارة؛ فحرارة محتوى البالون من الغاز، إذا أردنا قياسها بوحدات مناسبة، تساوي متوسّط طاقة الهيجان في ذرّات الغاز؛ إذ تنجم زيادة حرارة الغاز عن تصعيد سرعة الهيجان في الجسيْمات التي يتكّون منها، وعلى سبيل المثال والتّوضيح، يأتي الأكسجين الذي في الغلاف الجوّيّ المحيط بنا على هيئة ذرّتين مرتبطتين تكوّنان جزيْء الأكسجين، وتتحرّك هذه الثّقّالاث الصّغيرة الناجمة في دوران بسرعة ٥٠٠م/ث، وبمزيد من السرعة عند درجات حرارة عليا كما سنبيّن لاحقًا. لا بدّ من الإشارة إلى أنّ لكتلة هذه الجسيْمات أثرًا هنا، وأنّ لكلّ درجة حرارة معيّنة قيمةً توافقها لمتوسّط السرعة، متناسبةً عكسيًّا مع كتلة الجسيْمات المُعْنيّة، بمعنى أنّه إذا خلط هذان الغازان وبدرجات حرارة متساوية، تتحرّك الجسيمات الأخفّ بفعل معدّلات سرعة الجسيْمات الكبرى.

وفي ضوء هذا المفهوم للحرارة، يمكن توقّع بعض الآثار البالغة الأهمّيّة عند ارتفاع درجة الحرارة في الغازات. لنبدأ إذن بتصوّر ما يلي: في الوسط محلّ النظر، نجد ذرّات متضامنة، أيْ جزيئات، بدلًا من ذرّات فرديّة. بزيادة درجة الحرارة من خلال تصعيد شدّة اصطدام الجزيئات ببعضها بعضًا، يصبح انفجار هذه الجزيئات أمرًا لا مفرّ منه، وهكذا، وكما نشاهد في الواقع، يمكن للحرارة، إذا بلغت الارتفاع المطلوب أن تدمّر الروابط الكيميائيّة المتأصّلة في تركيب الجزيئات كافّةً؛ لذا فلا غرابة في أن نجد عند درجات الحرارة المرتفعة إمّا أجسامًا صغيرة ، أو مزيجًا منها.

لنتأمّل الآن أثرًا آخر بالغ الأهمية في سياق بحثنا هذا، إلّا أنّه لا بدّ لنا قبل ذلك من تطوير نموذج الذرّة الذي شيّدناه؛ فالذّرّة، وإن كانت تبدو كرةً صغيرةً للوهلة الأولى، فهي في الواقع مكوّنة من نواة ثقيلة ذات شحنة كهْربائيّة موجبة محاطة بسحابة من الإلكترونات، تلك الجسيمات الخفيفة ذات الشّحنة الكهربائيّة السلبيّة تتجاذب الإلكترونات والنّواة؛ ليتكوّن مجموع متعادل كهربائيًّا كما هي المادّة بطبيعة الحال، ويعرف هذا

النّموذج الجديد بالنّموذج "الكوكبيّ"، نظرًا لمشابهته المجموعة الشّمسيّة، حيث الشّمس العظيمة تحلّ محلّ النّواة، محاطة بالكويكبات الصّغيرة والخفيفة الوزن، محل الإلكترونات. لنعد الآن إلى دراسة حركة التنامي في درجات الحرارة في ضوء هذا النموذج الأكثر تعقيدًا، الذي تشتدّ فيه قوّة اصطدام الذرات، ويتحطّم ذلك الرابط الذي بين النّواة والإلكترونات، كما توقّعنا.

لنتوقّف قليلًا عند لحظة نشوء هذه الظاهرة الجديدة. ذلك أنّه عند تعرّض غاز ما لدرجة حرارة ملائمة، تفقد الذّرات تدريجيًّا إلكتروناتها. تسمّى الذّرات التي فقدت جزءًا من إلكتروناتها الأيونات، وتعْرف هذه الظّاهرة بتأيّن الغاز. الجدير بالذكر أنّ الغاز بمجْمله يبقى متعادل الشّحنة الكهربائيّة، ولا سيّما أنّ الإلكترونات التي لا تزال حاضرة -وإن باتت منفصلةً- تصبح إلى حدّ ما منفصلة عن النّوى التي كانت مرتبطة بها في السّابق. يصبح المشهد وكأنّنا بصدد غازين مختلطين: غاز من الإلكترونات، وغاز من الأيونات، مع العلم أنّ خصائص هذا الوسط مختلفة تمامًا عن وسط غاز "عاديّ"، ولا سيّما أنّ الوسط الجديد موصل عال للكهرباء؛ وذلك بفضل الشّحنات الكهربائيّة التي أصبحتْ متحرّكة. كما تلاحظ آثار أخرى، مثل صدور مختلف الإشعاعات وبعض الحساسيّة إزاء الحقل المغناطيسيّ. بذلك، وإذا صعّدنا درجة الحرارة بدءًا من الحالة الصّلْبة المتميّزة بتراصّ ذرّاتها، ننتقل أوّلًا إلى الحالة السّائلة التي تنزلق فيها الذّرات فوق بعضها بعضًا، ومن ثمّ إلى الحالة الغازيّة التي تصبح فيها الذّرّات منفصلة، قبل الوصول أخيرًا إلى هذه الحالة الفريدة التي أشرنا إليها آنفًا، -التي تعْرف بالبلازما. كما تعدّ في بعض الأحيان "الحالة الرّابعة" من حالات المادّة، ومن الأمثلة اليسيرة جدًّا على هذه الحالة كيفيّة عمل أنبوب فلوري؛ إذ تعرّض كمّية صغيرة من المادّة لدرجة

---

* أي الهيليوم والأكسجين

حـرارة ١٠٠،٠٠٠°م فتصـبح في حالـة البلازما. كما ثمّة مثـال آخر، من الطبيعة، يمكن مشـاهدته دائمًا في النجوم، ولا سـيّما شمسنا التي لا تزال دومًـا في حالـة البلازما المتوهّجة؛ لذا سـنهتمّ فيما يلـي بما يحدث في لبّ البلازما الكامنة في قلب الشـمس، وحيث درجات الحرارة التي تصـل إلى ١٥ مليون درجة مئويّة.

٢- انعطاف صغير عند النجوم

بدأنا فيما سـبق تسـلّق سـلّم درجات الحرارة التي تصل إلى درجات حرارة النّجوم، ويمكن الاستمرار هكذا وصولًا إلى درجات عليا فعليًّا، وهو ما يحدث بالفعل في معجلات الجسـيمات التي تطرأ فيها -حسـب علمنا، خلال لحظات اصـطدام وجيزة- درجات الحرارة التي كانت سـائدة لدى نشـأة الكـون (١٠١٥ ألف للمعجل الكبير في جينيفا، سويسـرا). سـنبقى متواضعين في طموحنا، ففي الواقع، وفي البلازما المعرّضة لدرجات حرارة مرتفعة -بلا شـكّ- وإن كانت أقلّ بكثير ممّا وصـفنا آنفًا، تحدث ظاهرة رئيسة تقتصر على الذّرّات الخفيفة.

يتكوّن النجم بصـورة أساسـيّة من بلازما هيدروجينيّـة، نظرًا لكون الهيدروجـين أخـفّ من كلّ الـذرّات؛ إذ ترتطم في هـذه البلازما الأيونات وتتنافر بصـورة طبيعيّة؛ نظرًا لتماثل شحناتها الكهربائيّة، وإذا حدث أن أدّى مسار أيونين إلى التقائهما، أسفرت قوّة تنافرهما عن إبطاء حركتهما، ومن ثمّ انحرافهما؛ فيتجنّب أحدهما الآخر قبل أن يتقاربا بصورة كبيرة. أمّا إذا كانت الصّـدمة الواقعة بين الأيونين هي صـدمة "مباشـرة" وعند معدّل سـرعة كافية، تقارب الأيونان إلـى حدّ دخولهما حقل القوّة النوويّة، وهو حقل شديد القصر، علمًا أنّ قوّة التجاذب القائمة عندئذ بين الأيونين أعظـم قدْرًا من قـوّة تنافرهمـا الكهربائيّة؛ ونتيجةً لذلـك يترابط هذان الأيونان مشكّلَيْن أيونًا فريدًا أثقل: يقال حينئذ إنّ النّوى قد دمجت.

هكـذا، وفي النجـوم الأشـبه بالأفران، تطهى الأجسـام التـي تكوّننا

وتكـوّن هذا العـالم كافّة، بدءًا مـن الهيدروجين: والكربون، والأكسـجين، والحديد،...إلـخ. بـدأ الاندمـاج النـوويّ بعـد لحظـات مـن ولادة الكون (الانفجار العظيم The Big Bang) ولا يزال مسـتمرًّا اليوم لضمان توليد المادة التي تشـكّل عالمنا، وهناك المزيد- فإذا وزنّا الأيونين قبل التّصادم، ومن ثمّ الأيون الناجم عن الاصـطدام، لاحظنا نقصًا في المادّة، وعلى وفق نظريّة أينشـتاين الشـهيرة: $E = mc2$، فقد تحوّلت هـذه المادّة إلى طاقة، وعلـى صـعيد ملموس، يتمتّع الأيـون الناجم عن الاندماج النوويّ بسـرعة تعادل عشـرات أضـعاف السّـرعة التي في الأيونين الأصـليّين، وهنا تكمن ميـزة هذا التفاعـل الرئيس؛ إذ يمكن أن يمثّل اندمـاج ذرّات الهيدروجين مصدرًا للطاقة، شريطة أن نتمكّن منه تمامًا على الأرض.

قبل الإياب إلى أرضـنا وهمومنا، لنسّع إلى فهم المزيد عن سرّ تشغيل الطبيعة لمصـادر الطّاقة والحرارة الهائلة التي تجسّدها النجوم؛ فقد بتنا ندرك أنّ النجم يتشكّل من سحابة هائلة من الهيدروجين المتخلخل إلى حدّ ما؛ سحابة ستبدأ بالتقلّص والانقباض ببطء بفعل قانون الجاذبية العامّة، الـذي يفرض تجاذب الكتل كلهـا. تبدأ إذن ذرّات الهيدروجين بالسّـقوط فوق بعضـها بعضًا، والسّـقوط نحو مركز السّـحابة في الوقت نفسه، مما يسّفر أوّلًا عن اكتساب ذرّات الهيدروجين قدرًا من السّرعة، أمّا على صعيد ارتطـام هذه الـذرّات فيما بينها، فتتحوّل هذه السّـرعة إلى حرارة، ويبدأ غاز الهيدروجين بالسّخونة، وعند بلوغ الحرارة ارتفاعًا كافيًا، كما سبق أن ذكرنـا، تندمج أيونات الهيدروجين، مولّدًا هذا الاندماج أيونات الهيليوم؛ إذ ينجم هذا التفاعل عن قدْر هائل من الطّاقة. لنلاحظ الآن الأثر الثاني الذي لا يقلّ أهميّة؛ إذ تمسـك قوّة التجاذب الناجمة عن الجاذبية العامّة بالجسـيمات كافّة، مع بعضـها بعضًا، وكأنّها تحصـر الجُسيمات؛ أيْ أنّها تتدارك تشتّتها، ومن ثمّ تؤمّن استمرار هذه العمليّة:. فإذا تسبّب اصطدام ما أو أيّ ظاهرة أخرى ما بطرد جسيْم ما، اتّخذ هذا الأخير هذه الحركة، إلّا أنّ قـوّة الجاذبيّة سـتكْبح الجسـيْم في الوقت ذاته، وترْجعـه إلى حالة

السّقوط نحو قلب الغيمة.

ينبغي إذن تصوّر الآليّة الأساسيّة لإنتاج الطّاقة بوساطة اندماج أيونات الهيدروجين في ضوء ثلاث ركائز رئيسة، على غرار ما يحدث في النّجوم، وهي الركائز التي سنتناولها تفصيلًا في وقت لاحق: مادّة أساسيّة مكوّنة من ذرّات خفيفة، ومبدأ تسخين هذه المادة لتبلغ درجة الحرارة الملائمة، ومبدأ حصر البلازما، وتجنّب تفرّق الجسيمات، وفتور حرارتها.

٣- عودة إلى الأرض

الآن -وقد رسمنا الإطار العامّ- لنحاول تحديد الظّروف التي ينبغي أن تتحقّق عمليًّا؛ للتمكّن من الاستفادة من تفاعلات الاندماج النووي. أوّلًا: ما الذرّات الخفيفة التي ينبغي أن نستخدمها؟ تبيّن التّجارب التي أُجريت في المختبرات لتصادم الذرّات أنّ أسهل تفاعل اندماج يمكن إجراؤه يكون باستخدام نوعين من الهيدروجين: الدّوتريوم والتّرتيوم، وهما في الواقع نظيران للهيدروجين؛ إذ يكتب التّفاعل كما يلي:

وقد بيّنّا بصورة يسيرة، تحت رموز العناصر الكيميائيّة، نوى الذرات المعنيّة؛ فعلى يسار السّهم، أيْ قبل حدوث التفاعل، نلاحظ نوى الدّوتريوم والتّرتيوم المكوّنين من جسيم إيجابيّ واحد (البروتون) وعلى التّوالي نترون ونترونان، علمًا أنّ النترون هو جسيم متعادل ذو كتلة قريبة جدًّا من كتلة البروتون، وعلى يمين السّهم يتمثّل الناتج من تفاعل الاندماج؛ إذ لدينا ذرّة هيليوم (بروتونان ونترونان) إضافة إلى نترون حرّ. الجدير بالذكر

أنّ محصّلة ناتج هذا التفاعل من الطاقة يكون إيجابيًّا؛ ذلك أنّه إذا عدّنا طاقـة ذرّات الدوتريوم والترتيوم مسـاويةً لـ ٢ (١ للدّوتريوم و١ للتّرتيوم المتعادلـيْن في درجـة الحرارة)، فإنّ طاقة ذرّة الهيليوم تسـاوي ٣٧ وطاقة النّترون الحرّ تعادل ١٤٠؛ أيْ أنّنا حقّقْنا مكسـبًا يناهز الـ ١٠٠ في الطّاقة، بموازنة طاقة جسيمات ما قبل التفاعل مع طاقة الجسيمات النّاتجة.

وقد عيّنتْ تجارب الاصطدام الذرّي الذرّات الأكثر إثارةً للاهتمام في هذا السّـياق، لكنّها بيّنتْ لنا في الوقت ذاته أنّه لا ينبغي توقّع إنتاج الطّاقة بمجـرّد إطلاق شـعاع من الدّوتريـوم مباشـرةً على التّرتيوم المسـتهدف البـارد؛ ففي أكثر مـن ٩٩٪ من الحالات، يكبح الجسـيْم الملْقى حتّى يثْنى عن التفاعل؛ فحالات التّصادم العاديّة مع الانحراف والتباطؤ أكثر شيوعًا مـن حالات التّصـادم المسْـفرة عن اندماج نـوى الذرات. بيـد أنّ النّتيجة تختلف تمامًا في حال غاز سـاخن مكوّن من خليـط متعادل من الدوتريوم والترتيـوم؛ إذ لا تفقد عندئذ الطّاقة لدى التصـادم، بل تتبادلها الأيونات المكوّنة للمادّة السـريعة الاشتعال؛ فتسْـفر الأيونات عن العديد من حالات الاصـطدام الأخـرى في الغاز ذاته، ومنها ما يمكن أن يكـون مواتيًا لعمليّة الاندمـاج. الجديـر بالذكـر أنّه لا بـدّ مـن أن تندمج النّـوى في قلب الغاز السّـاخن؛ لذلـك نعرّف هذه العمليـة بالاندماج النوويّ الحـراريّ، وهكذا يتجلّى شرط أساسـيّ من شروط هذه العمليّة؛ ذلك أنّ تفاعلات الاندماج لا يمكـن أن تتـمّ إلا مـع أيونات ذات سـرعة كافية؛ لذا فمن الضّـرورة ألّا تفْقد هذه الجسـيْمات إثْر عمليّـات أخرى قدْرًا مفْرطًا مـن الطّاقة طوال الاصـطدامات المثْمـرة. بمعنىً آخر وأكثر يسْـرًا لا ينبغـي أن يبْرد المزيج الغازيّ بسرعة مفْرطة.

لا بـدّ هنا من توخّـي المزيد من الدقّـة؛ فبعد تفاعـل الاندماج يواجه أيـون الهيليـوم مصـيرًا مختلفًـا تمامًا عـن مصـير النّـترون؛ فالنّترون

[2] كما يشير اسمه neutron المشتق من neutre أي محايد وélectron أي الكترون.

الصّـغير الحجـم، والمجرّد مـن الشّـحنة الكهربائية، سـرعان مـا يغادر -وبخـطّ مسـتقيم- البلازما التي لا يتفاعـل معها عمليًـا، إلّا أنّ طاقته لا تتبدّد؛ بل تسـتردّ في صـورة حرارة في الجدار المادّيّ؛ إذ سـيمتصّ. أمّا الهيليوم، فهو أيون، لذلك سيتفاعل، خلافًا للنّترون، وبشدّة مع إلكترونات وأيونـات البلازما، ونظرًا لكون الهيليوم هو الأيون ذو الطّاقة الكبرى، فهو الذي سـيتخلّى شيئًا فشـيئًا عن طاقتـه للجسـيمات الأكثر برودةً - والتي يصـادفها. تفاعلات الاندماج إذن -كما في النّجوم- مصـدر للحرارة في قلب البلازما ذاتها.

ممّا لا شكّ فيه أنّنا نسعى إلى بلوغ حالة يعوّض فيها مصدر هذه الطّاقة الدّاخليّـة؛ أيّ أيونـات الهيليـوم الخسـائر كافّة، التي لا مفـرّ للبلازما من تكبّدها، وهي الحالة المسـمّاة الإشـعال؛ أيّ حالة دائمة من الاشتعال تستمرّ ما استمرّت تغذيتها بالوقود. الظّروف التي ينبغي توافرها لبلوغ هذه الحالة ليسـت عسـيرة، وقد أسـفرت الحسـابات عن معادلة يسـيرة تعْرف بمعيار الإشعال (وهي معادلة قريبة جدًّا من معادلة أخرى أقدم: شرط لاوسون):

عندT = ١٠٠ ميلون درجة، ينبغي $n\tau > 1020$ لكلّ م٣ ولكلّ ث؛ إذ:

N هي الكثافة وتقاس بعدد الجسـيمات لكلّ مـتر مكعب (كلّما ازدادت الكثافـة زاد عـدد الاصـطدامات في كلّ ثانيـة)، وτ (ثـوان) هـي الزّمـن النموذجـيّ لتبريد بلازمـا الدوتريوم والترتيوم، الذي يعـرف عمومًا بزمن حصر الطّاقة.

تعـدّ هذه المعادلة- علـى الأقلّ من حيث المبدأ- بديهيّةً إلى حدّ ما؛ فهي تنصّ بصـورة يسـيرة على أنّـه كلّما قصـر الزمن الذي يبقى فيه الوسـط سـاخنًا زاد العـدد المطلوب مـن التّصـادمات لكلّ ثانيـة، علمًـا أنّ القيمة الرّقميـة للعدد الثاني- هنا نقيم في الواقـع حاجزاً عملياً لا بد من تخطّيه- وهو حاجز سـرعان ما ندرك مدى ارتفاعه، فليس من السهل الحصول على وسط يحدث فيه الاندماج النوويّ.

٤- مسارا البحث

في ضوء ما أوضحناه حتّى الآن، بات من السّهل إدراك المبادئ والتحدّيات الرئيسة لمساري البحث الأساسيّيْن، اللّذين تطورّا بقصد السّعْي إلى التحكّم بطاقة الاندماج. عودة مجدّدة لنقطة البداية: لنفترضْ أنّ بحيازتنا وسطًا بلازميًّا ساخنًا متروكًا في الوقت الرّاهن على حاله، يميل هذا الوسط إلى التّبعثر سريعًا في هذه الظّروف؛ إذ يمكن القول، لتعزيز فهمنا لهذه الظاهرة، إنّ جسيْمات البلازما تتباعد في الاتجاهات كافّة، وبمعدّل سرعة أثقلها؛ أيْ بمعدّل سرعة الأيونات، التي تتحرّك بسرعة ١٠٠٠ كم/ث. من هنا كان السّعي إلى تجنّب هذا التبعثر، بمعنى السّعي إلى حصر البلازما. نظرًا لأثر الجدران الماديّة المنطوي في أحسن الأحوال على تبريد البلازما بصورة بالغة، بل وامتصاص الجسيمات في أسوأ الأحوال، توجّهت المساعي البحثيّة نحو الحقول المغناطيسيّة. لكنّنا سرعان ما اكتشفنا أنّ الحقول المغناطيسية ليست عاجزةً، عند درجات الحرارة التي تعنينا، إلا عن حبس مقادير ضئيلة جداً من الكثافة الغازية، وحسب المعادلة آنفًا، ثمّة حاجة عندئذ لإطالة زمن الحصر؛ إذ تحتاج طريقة الاندماج بالحصر المغناطيسيّ (وهو الاسم الذي يطلق على هذا المسار البحثيّ) إلى أن تناهز أزمنة الحصر مدّة الثانية، وقد تبدو الثانية لحظةً عابرةً، لكنّ الصعوبة الكامنة على الصّعيد الماديّ حقيقيّة، وما يدلّ على ذلك هو أنّه ينبغي للأيون أن يثني مساره ١٠٠،٠٠٠ مرّة على الأقلّ، إذا كان طول الحيّز الذي ينبغي أن يبقى فيه ١٠م، إلّا أنّ المسار لا بدّ من أن يكون عشوائيًّا إلى حدّ ما، بفعل التّصادمات، كما أنّه لا ينبغي للجسيم أن يلامس الجدران؛ لأنّ مثل هذا الاحتكاك سيسْفر عن اضمحلال الجسيم، ولم يتحقّق النجاح في تحصيل هذه الظروف على مجموعة من الجسيْمات بصورة مرْضيّ عنها إلّا مؤخّرًا، وفي سياق ترتيب وإعداد مغناطيسيّ بالغ الدّقة.

تاريخيًّا، أدى اكتشاف اللّيزر إلى إعادة طرح هذه المسألة بمصطلحات مختلفة. لنعد مجدّدًا إلى الوسط البلازميّ الذي يميل، في غياب مزيد من الاحتياطات، إلى الانتشار خلال وقت قصير جدًّا؛ وقت ذي قيمة محدّدة، وإن كانت صغيرةً جدًّا، تصل إلى الواحد من المليار من الثانية. تتيح أشعّة الليزر إيصال كميّات من الطّاقة خلال هذه المدة الزمنية؛ تبدو بصورة أوّليّة كافيةً لضغط هدف صغير وتسخينه، ينتج بعد ذلك طاقته خلال وهلة تبعثره العابرة، ويسفر عن ذلك غيمة شديدة السّخونة من الهيليوم والنّترونات التي تتخلّى عن الطّاقة النّاتجة في الجدار المحيط بالجهاز. فهل هذه العمليّة أهون من الاندماج المغناطيسي؟ ينبغي هنا أيضًا العودة إلى معيار الإشعال؛ لتكوين فكرة ولو يسيرة عن مدى تعقيد هذه الآليّة، ففي هذه الحالة يكون زمن الحصر قصيرًا جدًّا، ولا سيّما أنّه يعادل على الأكثر زمن انتشار الهدف، وهذا يعني أنّ الكثافة المستخدمة عالية جدًّا، ولتكن (لنكن عمليّين) مساويةً لألف ضعف من كثافة الموادّ الصّلبة العاديّة. هذا يعني أنّ على اللّيزر أنْ يضمن- في آن واحد- انضغاط المادّة إلى أقصى حدّ، وتسخينًا كافيًا عند نهاية الانضغاط؛ إذ تتمّ المراحل التّالية من العملية كأنّها عمليّة انفجار صغرى. تُعْرف هذه الطريقة بالاندماج بالحصر العطالي، ولا سيّما أنّ الظّاهرة الوحيدة التي تحْصر الجُسيْمات هي قصورها الذاتي، وإن كانت نسبيّة.

تتبع كلتا الطّريقتين اللّتين عرضناهما بدأب، وإنّما كلّ في سياق مختلف تمامًا عن الآخر، فبقدر تطوير عمليّة الاندماج بالحصر المغناطيسيّ- التي لا تطبيق ينتظر منها سوى إنتاج الطاقة- في إطار دوليّ بالغ الانفتاح، يعدّ الاندماج بالحصر العطالي الذي يستخدم لمحاكاة الأسلحة النوويّة في إطار بالغ الخصوصيّة للبحث المصنّف ضمن قطاع "الدفاع". فهل هذا يعني أنّه لا يمكن أن يسفر الاندماج بالحصر العطالي عن تطبيقات لتوليد الطاقة؟ حقًّا لا، وسنعود إلى هذا المحور عند الخوض في آفاق مفاعلات المستقبل.

٥- القياس

ثمّة سؤال بالغ الأهمية ينبغي الإجابة عنه قبل المضيّ قدمًا، وهو سؤال طرحه لورد إنجليزيّ لدى إعداد تجربة علميّة بالغة الأهميّة في إنكلترا: «بأيّ ميزان للحرارة تقاس درجات الحرارة هذه؟». يمكن بالفعل الاكتفاء بالردّ الذي أتى آنذاك على لسان أحد نظرائه: «يا سادتي اللوردات، لا بدّ من أن يكون ميزان الحرارة كبيرًا جدًا».

علينا أوّلًا الوقوف عند قياس مقادير الكثافة الضئيلة جدًّا، المستخدمة في الوقت الراهن في مختبرات الاندماج بالحصر المغناطيسي، علمًا أنّ المقصود بالكثافة الضئيلة جدًّا هو مقادير محدودة جدًّا قياسًا بالسياق العمليّ العاديّ؛ ذلك أنّ الكثافة البلازميّة في الاندماج بالحصر المغناطيسي لا تكاد تتجاوز الواحد من المليون من كثافة الغلاف الجويّ المحيط بنا. إنّنا نتعامل في الواقع مع فراغ حقيقيّ، وفيما يلي الخطوات المتّبعة لقياس مقادير الكثافة: نبدأ أوّلًا بإطلاق شعاع من اللّيزر في الوسط البلازميّ، وحين يلتقي هذا الشّعاع بالإلكترونات، تمتصّ هذه الأخيرة ضوء الشّعاع، وتبثّها في الاتّجاهات كلّها، فهي تنشر الضوء، ويمكن تشبيه هذه الظاهرة بظهور حبيبات الغبار للعيان لدى مرور شعاع نور بها في غرفة معتمة، علمًا أنّ آليّة الانتشار الكامنة مختلفة، إلّا أنّ المبدأ هو ذاته. باستهداف خطّ البصر الأفقيّ، وبمتابعة شعاع ليزر ينتشر عموديًّا، لا يصل أيّ ضوء إلى المشاهد إن لم تكن ثمّة إلكترونات، كما أنّنا نستقبل ضوءًا بقدْر ما في شعاع الليزر من إلكترونات؛ إذ يصبح كلّ من هذه الإلكترونات عندئذ مصْدر ضوء ثانويّ صغير. من هنا كانت كمّيّة الضوء التي تلقّيتْ قياسًا بكثافة غاز الإلكترونات، علمًا أنّه يمكن استهداف نقاط مختلفة من شعاع اللّيزر، والتوصّل إلى قياس للبلازما في نقاط مختلفة من البلازما، ويبيّن مثال الغبار أنّه يمكن للقياس أن يكشف عن كمّيّات ضئيلة

٤ حديث دار بين الكونت فيربرز والفيكونت ديفدسون في غرفة اللوردات في ١٩ مارس ١٩٨٧.

جدًّا من المادة. لتسهيل القياس، ينبغي وجود خلفيّة شديدة السّواد لتفادي أيّ انعكاس لضوء عارض، ومصدر ليزر ذي قدرة كافية، ومتلقّيات للضّوء البالغة الحساسيّة (مضاعفات الضّوء). الجدير بالذكر أنّ معظم هذه التّجهيزات المخبريّة تتمتّع بمعدّات القياس بصورة روتينيّة تمامًا، بل إنّها تستخدم معدّات أكثر تعقيدًا، تسمح بإجراء قياسات على أوقات زمنيّة بالغة التّقارب.

ينبغي الآن الانتقال إلى تحديد درجة حرارة الإلكترونات التي قسّنا توًّا كثافتها؛ إذ نستخدم هنا أيضًا الجهاز نفسه، لكنّنا نتعمّق أكثر في تحليل الضوء المتلقّى، فبدلًا من الاكتفاء بتحليل الكثافة الإجماليّة للضّوء المنتشر، نحلّل هنا تركيبه بواسطة أدوات معدّة لهذه الغاية، مثل أجهزة المطياف، وهي تتيح، على غرار المنشورات، نثر الضّوء؛ لرؤية الألوان التي تكونّه كافّة. يتبيّن هنا أنّ الضوء، الذي كان له في بادئ الأمر لون واحد يحدّده الليزر، يكتسب بعد الانتشار، نطاقًا من الألوان، ويقال إنّ الضوء يمثّل "طيفًا»؛ ذلك أنّ الإلكترونات تخلّف في الضوء الذي تنشره أثر سرعتها، على صورة تغيّر يسير في اللون، تمامًا كما تترك السّيارة أثر سرعتها في الحزمة التي ترسلها باتّجاه الرادار الذي يرصد المركبات عند حافة الطّريق، وهو ما يعْرف بأثر دوبلر، وفق ما سبق ذكره بشأن درجة الحرارة، يتّضح لنا أنّه يمكن بتطبيق رياضيّ يسير الانتقال من فارق اللّون إلى متوسّط سرعة الإلكترونات، ومتوسّط سرعتها عند درجة حرارتها. ينبغي هنا الإشارة إلى أمرين: أوّلًا- كما سبق أن لفتنا- يمكن أن نحدّد درجة الحرارة في نقطتين في البلازما، لدينا إذن ما هو أفضل من درجة الحرارة المتوسّطة؛ إذ يمكن أن نحدّد على سبيل المثال كيفيّة التغيّر في هذا المقدار بالذّهاب من مركز البلازما إلى طرفها، وهذه معلومة قيّمة حقًّا، ولكنّنا نرى أيضًا وهذه هي الملاحظة الثانية- أنّه كلّما ارتفعت درجة الحرارة عظمت فوارق اللّون، وسهل القياس. بذلك- في الوسط البلازمي النموذجي- تكون درجات الحرارة البالغة الارتفاع في الوسط أسهل للقياس من درجات الحرارة الدّنيا الّتي نجدها على الطّرف.

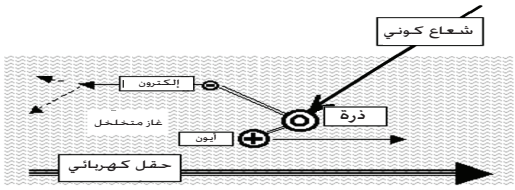
ختامًـا، تبيّن هذه القياسـات -بلا شـكّ- كيف يمكـن التدخّل بدقّة في وسـط ساخن وهشّ، دون إثارة اضطراب فيه، علمًا أنّ هناك -حقًّا- وسائل أخرى متّبعة. إضافة إلى ذلك، لا تزداد الصّعوبات بالضّرورة بازدياد درجة الحرارة، بل ربّما يكون العكس صحيحًا.

٢- التّسخين

رأينـا أنّـه لم تكن هنـاك أيّ حاجة إلى تسـخين خارجيّ، ولا سـيّما أنّ تفاعلات الاندماج كفيلة بالحفاظ على درجة الحرارة المرتفعة، ويعرف هذا التّسخين بتسخين (تسـخين ألفا) وذلك نسبةً إلى أيونات الهيليوم، مصدر هذه الحرارة، إلّا أنّ الاسـتفادة من هذا التسـخين يقتضـي أوّلًا بلوغ درجات حرارة تناهز عشرات الملايين، وللتّمكّن من الوصول بأيّ وسط غازيّ إلى هذا القدْر من الحرارة، تستخدم ثلاث وسائل رئيسة، كثيرًا ما تستعمل في الواقع مجتمعةً في التّجهيزات التّجريبيّة الرّاهنة، التي لا يمكن بعدُ أن يتدخّل فيها تسـخين ألفا. تجدر الإشـارة- لدى وصف كلّ من هذه الوسـائل- أنّه ينبغي أن تبلغ قوى التّسـخين المسـتخدمة في الأحوال جميعها عشرات الملايين من الواط؛ لذلك فإنّ المعدّات التي سنتناولها فيما يلي هي مكوّنات بالغة الأهميّة في كلّ تجربة راهنة، وكلّ مفاعل في المستقبل، وذلك ليس بسبب دورها في هذه العملية فحسب، بل لأحجامها والقيود المترتّبة عليها .

١- التّسخين الأومي

ثمّة طريقة تسـخين شـائعة الاسـتخدام منـذ بداية الأعمال الخاصّـة بالغازات المتأيّنة، وهي طريقة قائمة على مبدأ يسـير؛ إذ يسـتخدم التفريغ الكهربائيّ لإيجاد الوسط البلازمي وتسخينه أيضًا. نستعين بالشّكل ٢ أدناه لإيضاح هذه العمليّة:



رسم توضيحي ٢.- تأين الغاز وبدء سلسلة التفاعل الكيميائي

يحتوي كلّ غاز بعض الأيونات وبعض الإلكترونات الحرّة، وذلك بفعل الأشعّة الكونيّة المؤيّنة التي تخلّف وراءها جسيّمات مشحونة على امتداد مرورها عبر المادّة، وإذا وجد حقل كهربائيّ ملائم، وضبط ضغط الغاز بحكمة، اكتسبت هذه الجسيّمات سرعةً، شاحنةً بدورها أيونات وإلكترونات أخرى بفعل اصطدامها بالغاز المتعادل. بدورها تبدأ الأيونات والإلكترونات بالتحرّك ثمّ الإسراع، منتجةً جُسيمات أخرى، ومن ثمّ سرعان ما يتولّد بفعل الانهيار تيّار كهربائيّ كبير: «فولطية الانهيار». في خضمّ هذه الحركة، تتبدّد طاقة الجُسيمات في محيطها بفعل التصادمات؛ مما يسّفر عن تسخين البلازما التي تكوّنت لدينا للتوّ. الجدير بالذكر أنّ أثر التسخين فاعل في البلازما كما في حالات المقاومة الكهربائية كلّها، سواء أكان السّلك الكهربائي في مصباح أم مقاومة مشعاع: تتبدّد الطّاقة الكامنة في التيّار في المادّة التي يمرّ بها هذا التيار، وتذكّرنا ظاهرة الانهيار الموصوفة هنا بالبلازما الناجمة عن البرق لدى تكوّن حقل كهربائيّ كبير بين الأرض والسّحاب؛ فالمبدأ هو ذاته، بيد أنّ شدّة التيارات الكهربائيّة ووقت التّشغيل أعظم قيمة منها في بلازما الاندماج. كما أنّ الجهد المستخدم في مختبرات الاندماج من مقياس الفولط، مقابل مئات الملايين من الفولطات التي نقيسها في البرق.

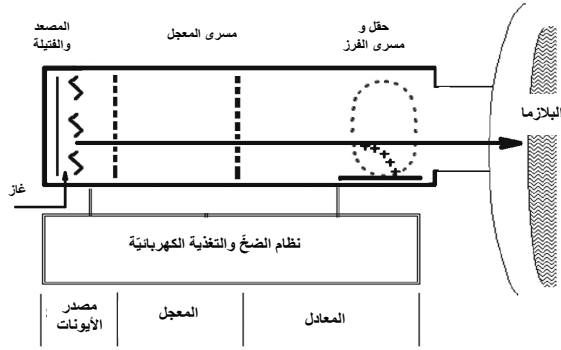
مبدأ التّسخين الأوميّ يسير إذن، ولا صعوبة في تطبيقه، إلا أنّ ثمّة حدودًا لهذه العملية. أوّلًا: لا يرغب دومًا في وجود تيّار كهربائيّ،

وهنـاك مئات التّرتيبات وإعدادات الحصـر التي تسـتثني حتّى وجود تيّار كهـذا، إلّا أنّه في حـال الرغبة في هـذا التيّار، أو القبول بوجوده، يقتضـي الحرص على عدم تلويـث البلازما توليد مثل هذا التّيـار دون اللجوء إلى الأقطـاب الكهربائيّـة؛ أيّ دون صـلة مادّيّة بالوسـط الحـارّ، لذلك يتولّد التّيّار بالتّحْريض؛ ما يفرض وجود حقل مغناطيسـيّ متنام باسـتمرار (أو متناقص باسـتمرار): تحـدّ القيمة القصـوى للحقول المغناطيسـيّة التي نسـتطيع توليدها هذه العمليّة، وسـنرى لاحقًا أنّ طرائق التّسخين الأخرى تمكّننـا من تجاوز هذا الحدّ، لكنّ الثمن هو درجة أعلى بكثير من التّعقيد، وفضـلًا عمّا سـبق ذكره من قيود، تجدر الإشـارة إلـى أنّ درجة الحرارة النّاجمـة عن التسـخين الأومـي محدودة في حـدّ ذاتها؛ ذلـك أنّ مقاومة البلازما للتّيّار الكهربائي تتناقص مع تنامي الحرارة؛ وسـرعان ما توصل البلازما التيار الكهربائيّ على نحو أفضـل من النّحاس بعشـرة أضـعاف، فلا يعود تنامي التّيار مصـاحبًا لتنامي الحرارة؛ ونتيجة لهذا القصـور في الفعاليّة، يجّب عند درجات الحرارة المرتفعة اللجوء إلى أساليب أخرى.

٢- التّسْخين بالحقْن بذرّات متعادلة

ينطوي الجهاز الآخر المستخدم لتسخين البلازما (التي كثيرًا ما تنْتج بوساطة التّسخين الأومي) على حقْن البلازما بحزمة من الذرّات المتعادلة ذات السّـرعة العالية، وهي ذرّات الدّوتريوم أو التّرتيوم. لنقم بوصف هذه الآلية المتّبعة بصورة مفصّلة وعمليّة.

لا نعرف كيف ننتج حزمة من الذرات بصورة مباشرة انطلاقًا من غاز متعادل؛ لأنّه يتعذّر تسريع هذه الذّرات تحديدًا؛ لكونها متعادلة كهربائيًّا.



رسم توضيحي ٣.- شكل محقن الجسيمات المتعادلة

لذلك- ولتخطّي هذه العقبة- ينبغي اللجوء أوّلًا إلى جُسيم مشحون: الأيون. تتمثّل هذه الآليّة إذن في تحويل الذرّات المحايدة في الغاز الأساسيّ إلى أيونات، ومن ثمّ تسريعها، قبل العودة إلى حالة التّعادل الكهربائيّ قبل حقن البلازما، وثمّة ثلاثة أجهزة متخصّصة يؤدّي كلّ منها إحدى هذه العمليّات الكبيرة الثلاث: مصدر الأيونات، المعجل، والمعادل.

مصدر الأيونات هو غرفة تُحقن بالغاز المعدّ لإنتاج الحزمة؛ غرفة فيها إلكترونات تتّسم بالطّاقة الكافية لتأيين الغاز بالقصف؛ إذ تصدّر فتيلة مسخّنة بصورة يسيرة الإلكترونات التي نحتاج إليها، ومن ثمّ تسرّع بواسطة مسرى يغذّى بصورة ملائمة، من ثمّ يدْفع الحقل الكهربائيّ السّائد (في المصدر) الأيونات نحو المعجل، وهكذا تلج الأيونات النّاجمة بصورة مستمرّة حيّز التسريع؛ هذا الحيّز بدوره مرصّع بالمساري المثقوبة، متيحًا مرور الأيونات ومؤدّيًا وظيفتين في آن واحد؛ إذ يضمن أوّلًا تسريع هذه الأيونات، كما يضمن أيضًا تنسيق الحزمة، وإضفاء مواصفات هندسيّة محدّدة عليها، بحيث يكون لدينا عند منفذ المعجل حزمة أيونات مزوّدة بطاقة جيّدة، ينبغي الآن تحييدها.

المعادل هو حيّز خاضع لضغط منخفض من الغاز، وحين تخترق

الحزمة هذا الحيّز، تتمكّن بعض أيوناتها من استرداد الإلكترون من الغاز المتبقّي، وهو الإلكترون الـذي تحتاج إليه هذه الأيونات لتتحوّل مجدّدًا إلى ذرّة متعادلـة. الجدير بالذّكر أنّ عمليّة المعادلة ليسـت كلّية، بل يصـحبها بعض المردود، وهذا يعنـي أنّه قبل الخروج من المعادل، تفرز الجُسـيمات للتخلّص من الأيونات المتبقّيـة، بحيث لا تمرّ إلّا الذّرّات المتعادلة، ويُحدث هذه العمليّة بصـورة عامّة حقل مغناطيسـيّ محليّ يوجّـه الأيونات التي لا تزال باقية في حزمة الخروج في مسرى مهيّأ خصوصًا لهذه الغاية.

مـن ثمّ تتّبع الذرّات طريقها في خطّ مسـتقيم نحو الوسـط البلازمي الذي تنفذ إليه، علمًا أنّ طاقة هذه الذّرات تعادل عشـرات الأضـعاف من الطّاقة المتوسّـطة المخصوصـة بأيونات البلازما. على وفـق هذه الآليّة، لا تمكث الـذّرّات المتعادلة عنـد البداية طويـلًا بهذه الحال، فـأوّل التقائها بأيونـات البلازمـا، سـرعان ما تفقد إلكترونهـا، وتتحوّل مـرّة أخرى إلى أيونـات. يتمثّـل إذن حقـن الذّرات المتعادلـة بظهور أيونات تتمتّع بسـرعة اسـتثنائيّة في الوسـط البلازمـيّ، ومرّة أخرى تـؤدّي الاصـطدامات دوْر التّسـوية، موزّعـةً فيض الطّاقة بين الجُسـيمات كافّة؛ فتسـخن البلازما نتيجة لذلك، ولكن ثمّة سؤال يتبادر إلى الذهن هنا: لم اللّجوء إلى الذّرّات المتعادلة إذا كانت الأيونات السّـريعة كافية؟ إنّ الحقل المغناطيسـيّ يحتّم علينـا المرور بهذا «المنعطف»؛ فمع تحريفه مسـار الجُسـيمات المشـحونة كافّة، ولا سـيّما الأيونات، إلّا أنّه لا يؤثّر في مسـار الذّرات المتعادلة القادرة وحدها على الانتشار إلى وسط البلازما، تحديدًا حيث تسخّن.

تسفر هذه العمليّات عن نتائج جيّدة، وهي تعدّ جزءًا من طيف تدابير التّسـخين الطّبيعية التي في التّجارب الرّاهنة، إلّا أنّ ثمّة صـعوبةً تواجهنا —يا للأسف— عند سعْينا إلى ابتكار أجهزة حقْن من هذا القبيل للمفاعل؛ ذلك أنّ مردود عمليّة المعادلة الذي لفتنا إليه آنفًا يتناقص إلى حدّ تعطيل الآليّة، والسّـبب وراء ذلك يسـير؛ فالأيونات المتسـارعة المصطدمة بالغاز المتبقّي سـتنْتزع منه إلكترونات بلا شـكّ، إلّا أنّ احتمـال ارتباط إلكترون

ما بأيون سـريع، عند معدّلات السّرعة العالية، يتضاءل أكثر فأكثر. يمكن معالجة هذه الصّـعوبة باسـتخدام أيونات سـلبيّة عند البداية، مصنوعة مـن ذرّات متعادلـة لم ينتزع منها إلكترون، بـل ذرّات ألْحق بها فيض من الإلكترونات، ولا شـكّ في أنّ تأمين مصـدر أيونات سلبيّة أمر أكثر صعوبةً من تأمين مصـدر تقليديّ، ولكنْ على صـعيد آخر، سـيبقى على وفق هذه الطريقة مردود عمليّة المعادلة كبيرًا حتّى عند معدّلات مرتفعة من الطاقة؛ إذ يميـل هذا النّوع من الأيونات دومًا إلى فقد إلكترونه الزائد، وفي سـياق التّقديرات الفيزيائيّة، يمكن القول إنّ مصـادر الأيونـات التقليديّة بقيمة 100 keV[5] تعدّ شائعةً، وقد سمحت الأيونات السّلبية بالتوصّل إلى مصادر تصل طاقة جُسيماتها إلى عشرة أضعاف ذلك؛ أيْ ما يبلغ MeV[1] (مليون إلكترون فولت) ويزيد. ذلك أنّ معدّلات الطّاقة التي تصل إلى MeV[1] هي اللّازمـة للنفاذ إلى أعماق بلازما المفاعـل، التي تتميّز بأبعادها العظيمة، وكثافتها الهائلة في الوقت نفسه.

إضـافة إلى ذلك، ودون وجود علاقة مباشـرة بالتسخين، نظرًا لكون الـذرّات المتعادلة التي تحْقن هي ذرّات الدّوتريوم أو التّرتيوم، تسّـهم هذه الآليّة أيضًا في تغذية الوسط البلازمي المكوّن تحديدًا من أيونات الدّوتريوم والتّرتيوم بالوقود.

٣- التّسخين باستخدام الموجات العالية التردّد

انطوت الآليّة السّـابقة على رفْع درجة الحرارة في وسط بارد أو فاتر، بإدخال بعض من مادّة بالغة السّـخونة في هذا الوسـط، وهو أسلوب شبيه بوصفة عتيقة جدًا كانت تستخدم منذ مئات الآلاف من السّنين؛ ففي ذلك العصـر الذي كانت فيه النار مكتشـفة- ولكنّ أواني الفخّار لم تكن قادرة بعْد على تحمّل لهب النار- كان الإنسـان- على ما يبدو- يسـخّن حسـاءه بإلقاء بعض الأحجار المستخرجة من المستوقد مباشرة في المرق. سنتصوّر

٤ أي ١٠٠ كيلو إلكترون فولت

الآن طريقةً أكثر حداثةً: التّسخين بوساطة الأمواج الدّقيقة.

التّسخين يعني إضفاء قدْر من الطاقة، إلّا أنّه من المعلوم أنّ الموجات الكهرومغناطيسيّة (كتلك المستخدمة في فرن الموجات الدّقيقة، جهاز الرادار، أو التي تنقل البثّ الإذاعيّ والتلفزيونيّ) هي طريقة لبثّ الطّاقة من هوائيّ يشكّل -إلى حدّ ما- طرف جهاز إرسال، وعوضًا عن حقن الوسط البلازميّ بجُسيمات مفْعمة بالطّاقة، تنطوي هذه الآلية على تسخير طاقة الموجات بتصنيع مثل هذه الجُسيمات مباشرة في الوسط، وذلك بتسريع الأيونات والإلكترونات الموجودة، وتبثّ الموجة الكهرومغناطيسيّة حقلًا كهربائيًّا متذبذبًا وحقلًا مغناطيسيًّا متذبذبًا في الوقت ذاته؛ ونظرًا لكون أيّ جسيم مشحون ومتحرّك عرْضةً للتأثّر بهذين الحقلين، يمكن توقّع انتقال الطّاقة من هذه الموجات إلى الجُسيمات؛ فالمقصود هنا تحديدًا هو آثار الرّنين؛ أيْ أنّه في مثل هذه الظّروف، إمّا أن تكون سرعة انتشار الموجات قريبةً من سرعة الجُسيمات، أو أن يكون تردّد الموجة مساويًا للتردّد النموذجيّ لحركة هذه الجُسيمات، وتتمثّل الفكرة بصورة تخطيطيّة في وضع جهاز إرسال قويّ؛ لتغذية هوائيّ يحقن وسطًا بلازميًّا قريبًا منه بموجة كهرومغناطيسيّة. ما يتبع ذلك هو عمليّة لا تخلو من التّعقيد في الواقع؛ إذ إنّ من شأن هذه الموجات، إمّا الانتشار بصعوبة في الحيّز الذي بين الهوائيّ والبلازما، أو عبور البلازما دون «رؤيتها»، أو حتّى الارتداد عن البلازما؛ أي الانعكاس تمامًا دون اختراق الوسط الذي ينبغي تسخينه. عندئذ تكون ثمّة خيارات محدّدة لكي تنتقل إلى البلازما، وتمْتصّ بصورة ناجحة؛ أيْ أنّها تتخلّى تمامًا عن طاقتها في الوسط، ويمكن ألّا تمتصّ إلّا على الصّعيد المحليّ، أو ألا يخصّ إلّا مجموعةً محدّدةً من الجُسيمات (مثل الإلكترونات مثلًا) وهذا في حدّ ذاته ليس أمرًا خطيرًا، فكما قلنا، سيكون للاصطدام دائمًا دور في توزيع الطّاقة بصورة أكثر انتظامًا، وهنا -كما كان الحال سابقًا- الأيونات في النّهاية هي التي تسخّن؛ لكي تتفاعل على وفق المطلوب.

ولتجنّب الخوض في اعتبارات فنيّة عديدة في وقت سابق للأوان، دعنا نضيف هنا بعض البيانات الفيزيائيّة المخصوصة بالتردّدات الثلاثة الكبيرة محلّ الاعتبار. تاريخيًا، يتراوح التردّد الأول بين ٣٠ و ١٠٠ ميغاهيرتز، وهو تردّد السّيكلوترون؛ أي التّردد الدّوراني للأيونات؛ لأنّه يوافق تردّدًا نموذجيًّا لحركة الأيونات. يستفاد هنا من دوران الأيونات حول نفسها في حقل مغناطيسيّ بدورة (أو تردّد) لا تعتمد إلّا على كتلتها وقيمة الحقل المغناطيسيّ، وهنا يهجم على البلازما بهذا التردّد، أو بمضاعفاته. يتناول التسخين الأيونات مباشرةً، وتكيّف أجهزة الإرسال الصّناعية المستخدمة في البثّ الإذاعي أجهزة الإرسال المستخدمة.

بالمثل، ينطبق المنطق نفسه على الإلكترونات، فهي أيضًا شحنات كهربائيّة متحرّكة في حقل مغناطيسي. بيد أنّ التّسخين الدّوراني للإلكترونات (وهو الاسم المطلق على هذه الآليّة) يتمّ عند تردّد أعلى بكثير؛ أيْ حواليْ ١٠٠ غيغاهيرتز، ولا سيّما أنّ كتلة الإلكترون أقلّ بآلاف المرّات من كتلة الأيونات، ولا يوجد أيّ جهاز إرسال صناعيّ بهذا التردّد، ومتّسم بالخصائص الملائمة؛ لذا يتوقّف استخدام هذه الطريقة في التّسخين الواسع النطاق على التطوّرات التقنيّة الجارية.

أخيرًا، ينبغي الإشارة إلى عملية التّسخين الهجينة، التي يكون فيها تردّد الموجة بين قيمتي التردّد التي سبق وصفهما، التي تستفيد، كما التسخين الدّوراني للأيونات، من وجود أجهزة إرسال قويّة مستخدمة بالفعل في المجال الصناعيّ.

وسواء أُسْتُخْدمتْ بصورة فرديّة أم جماعيّة، يمكن الوصول بفضل وسائل التّسخين هذه إلى درجات الحرارة المطلوبة، إلّا أنّه من الخطأ الاعتقاد بأنّ فائدة وسائل التسخين هذه تتوقّف عند هذا الحدّ، فإذا نجحت في دورها في تصعيد اضطراب الوسط، أمكن استعمال هذه الوسائط كذلك لتوصيل طاقة أكثر انتظامًا، ومن المجْدي أحيانًا استخدام أجهزة التّسخين هذه؛ للحفاظ على ثبات تيّار يمرّ بالبلازما، أو حثّ

البلازما على الدوران حول نفسها، وسنعود إلى هذه النّقطة تحديدًا في إطار الحصر، الذي فيه ما يسوّغها. ذلك أنّ عمليّتي تسخين البلازما وحصرها التي سنتناولها الآن، ليستا بمنأى تمامًا عن بعضهما بعضًا؛ على الأقلّ لأنّ الحصر النّاجع للطّاقة، بتجنّبه أيّ خسارة فيها، يقلّص الطّاقة المطلوبة للتّسخين اللازم للبلازما، وهناك أيضًا اعتبارات أخرى أقلّ وضوحًا نتناولها في نهاية الفقرة المخصوصة بالاضطراب (ص. ٣٤).

٣- الحصر

أثبتت التّجربة أنّه لدى التوصّل إلى درجات مرتفعة من الحرارة بصورة سريعة إلى حدّ ما (وليس دائمًا بالقدر المطلوب من الكثافة)، كانت أزمنة الحصر تقدّر ببعض الأجزاء من الألف من الثانية، بل وأقلّ أحيانًا، وكان تحقيق أيّ تقدّم أمرًا شاقًّا، وفي حين تمكّن الإنسان من رسم المبادئ الرئيسة للتّسخين منذ زمن باكر، تطوّر عدد من التّرتيبات المغناطيسيّة فيما يتعلّق بالحصر، وسرعان ما تخلّى عنها في وقت لاحق، مع التّجارب. لا شكّ في أنّ مسألة حصر الجُسيمات هي مسألة محوريّة ومعقّدة، وينبغي الوقوف عليها بصورة أكثر تفصيلًا.

١- دور الجِدْران المادّيّة

ربّما نعتقد بصورة بديهيّة أنّ الجدران الماديّة لا تفيد في حصر البلازما، والسّبب الذي يتبادر إلى الذهن لذلك هو أنّ البلازما غاز قائظ إلى درجة تطاير أيّ مادة تلامسها. لكنّ الحدس مخطئ في هذه الحالة تحديدًا؛ لأنّه يفتقد إحدى المعطيات ذات الأهمية في هذا السّياق، وهي كمّيّة الغاز المعنيّ؛ ففي جهاز الاندماج، تكون كمّيّة الغاز الحارّ محدودة، ولا تزيد -على الأكثر- على بعض الغرامات من المادّة. كما أنّ قذف البلازما نحو جدار ما لا يختلف عن قذف قطرة من الماء المغليّ في وعاء من

الثّلج. قطع الثلج لا تكاد تتأثّر بحرارة القطرة، في حين تبرد هذه الأخيرة تمامًا. هكذا، ودون مراعاة الحالات العرضيّة، إذا تحتم إقامة مسافة بين الجدار والبلازما، يكون ذلك لحماية البلازما أوّلًا، وليس لحماية الجدار.

بل إنّ هذا الشرط أكثر تقييدًا ممّا نظن؛ إذ لا ينبغي للبلازما حتّى أنْ تجسّ الجدار جسّاً، فإنّ غادر قدْر مفرط من جُسيمات البلازما وارتطم بالجدار، توجّه بعض الذّرات المنتزعة من الجدار نحو البلازما، مثل ذرّات الحديد على سبيل المثال في حال كان الجدار فولاذيًّا. بدورها تتفاعل هذه الذّرات الثقيلة مع إلكترونات البلازما، مسفرة عن انبعاث قدر هائل من الإشعاع، علمًا أنّ طاقة هذا الإشعاع مستمدّة من البلازما، وهي خسارة تنجم عن تبريد البلازما على نحو لا يمكن تداركه. كما لا يمكن أنْ تحاط البلازما إلّا بطبقة من الغاز البارد الذي تحول كثافته دون تبريده بنفسه. ينبغي إذن أن يوجد بين البلازما والحاجز حيّز عازل يكون فيه الضّغط المتبقّي ضعيفًا، ومتحكّمًا به بمنتهى الحرص على الأقلّ.

هذا المخطّط هو الذي تقوم عليه التّجارب المخصوصة بدراسة الحصر المغناطيسيّ كافّة. بدءًا بوسط البلازما، نجد أوّلًا الحيّز الذي توجد فيه البلازما، التي تتناقص كثافتها كلّما ابتعدنا عن مركزها نحو طرف الحيّز، ولدى ابتعادنا عن المركز، سرعان ما نصل إلى سطح يرسم حدود البلازما، وهو السّطح المسمّى السّطح الفاصل. بعد السّطح الفاصل نجد منطقةً عازلةً للبلازما، ومن ثمّ الجدار المادّيّ المحكم الذي يسمح في غياب البلازما بخفض الضّغط المتبقّي حتّى الجزء من المليار من الضّغط الجوي، وسنعود مجدّدًا إلى هذا الهيكل بالتّفصيل، إضافة إلى بعض المكوّنات الأخرى عند الحديث عن المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبيّ الدوليّ أو مشروع هذا المفاعل المسمّى «أيتر» ITER (ص.٨٤). لنعد مجدّدًا إلى السّطح الفاصل، ونوضّح دوره بصورة أكثر تفصيلًا؛ إذ يرسم هذا السّطح غير المادّي، الذي يحدّده شكل الحقل المغناطيسيّ حدود البلازما، حائلًا دون امتدادها نحو الجدران الماديّة، كما تجري عمليّات

تبـادل المادّة على طول هذا السـطح، فإذا غادر جسـيم ما البلازما وعبر السّطح الفاصل، سرعان ما تتناوله المضخّة لإخلائه، وهذه هي الآليّة التي يسـتخْرج بهـا أيونات الهيليوم، التي تكون مثـل رماد مفاعلات الاندماج، وبالعكس، يزيد الجسـيم الذي يقطع السطح الفاصل باتّجاه قلب البلازما مـن كثافة هـذه الأخيرة، وهكـذا تغـذّى البلازما بالوقود مـن خلال هذا الدّفق المحْكم من الغاز.

يتبيّن إذن ممّا سبق أنّه ينبغي احتواء البلازما دون ملامستها؛ إذ إنّ علينا التأثير في البلازما من بعْد، وهو ما يشار إليه في سياق الفيزياء بمصطلح حقل القوّة، وسنوضّح ما يتضمّنه هذا المصطلح في الحالة التي تعنينا هنا.

٢ - الحقل المغناطيسيّ

يجـذب المغناطيـس بـرادة الحديـد، فنتحـدّث حينئـذ عـن الحقـل المغناطيسـيّ، ويجذب قضـيب من البلاسـتيك الذي يدعك بقطعة قماش قصاصـات مـن الورق علـى بعد منه، وهو مـا يعرف بالحقـل الكهربائيّ؛ كذلـك تجذبنا الأرض، وهو ما يعرف بالحقل الجذبيّ. كلّ هذه القوى التي تؤثّـر من بعْد معروفة حقًّا، ومـن الطبيعيّ النظر إلـى إمكانيّة اللّجوء إلى إحداهـا. لنبـدأ بحقل الجاذبية؛ فهو الحقل العاكف على تشـغيل النجوم، وكمـا هو الحجر الذي تحتجزه الأرض، وينتمي إليها في آن واحد، تمسـك هذه الجُسـيمات مجتمعة ببعضـها بعضًا في قلب هذا الأتون الكوكبيّ، وإذا أمعنّـا في النّظـر وجدنا أنّ قـوة الجاذبيّة القائمة بين جُسـيمات البلازما هـي قوّة بالغة الصـغر؛ لذلك لا بدّ من اسـتخدام كمّيّـات هائلة من المادّة لاستشـعار أثر الحصـر المطلوب، وهـذا أمر غير وارد علـى الإطلاق؛ لأنّ كتلة الأرض بذاتها لا تكفي لاحتواء جُسيمات البلازما السّاخنة؛ مما يعني أنّ مبـدأ الحصـر القائم بين النجوم غـير قابل للاسـتخدام على كوكبنا الأرضـي. ثمّـة عائق آخر وهو أنّه يمكـن أن نبيّن أنّ هـذه القـوى البعيـدة – التي يمكن أن يمارسها الحقل الكهربائيّ– لا تمكّننا من القيام بالحصر

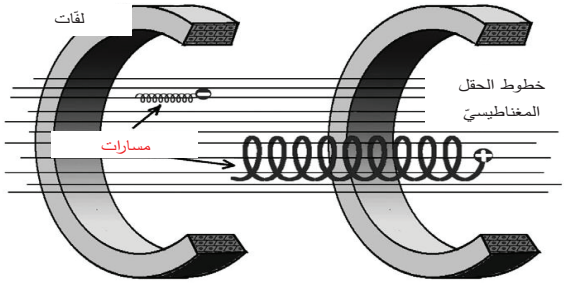
المأمول؛ ولذلك بقي النّظر إلى الحقل المغناطيسيّ.

مبدئيًّا، قد يبدو استخدام الحقل المغناطيسيّ مثيرًا للاستغراب، ولا سيّما أنّ البلازما مكوّنة من أيونات وإلكترونات، وهي ليست كُتلًا مغناطيسيّة، بل شحنات كهربائيّة. بيْد أنّ حركة هذه الشّحنات تغيّر الكثير، هذا إن لم تغيّر كلّ شيْء، وللإحاطة جيّدًا بهذا الجانب الأساسيّ، ينبغي الرجوع إلى ما يطْلق عليه علماء الفيزياء اسم خطّ فعل القوّة، وذلك بالعودة إلى أكثر الحقول ألْفة لنا، وهو الحقل الجذبيّ؛ إذ تكون خطوط فعل قوّة هذا الحقل خطوطًا عموديّة، أو بمعنىً آخر، يحدّد الاتّجاه الرأسي على الدوام اتّجاه تأثير القوّة الناجمة عن الحقل الجذبيّ، وبصورة عامّة، تعدّ خطوط فعل القوّة خطوطًا تحدّد في كلّ مكان اتّجاه تأثير القوّة الفاعلة في هذا المكان على كتلة ملموسة من قبل الحقل، إلّا أنّ ما سبق لا يعني بالضرورة أن تكون خطوط فعل القوّة هي خطوط مستقيمة، ولا سيّما أنّ ذلك الزّعم غير مؤكّد حتّى للجاذبيّة؛ إذ تتّسم خطوط فعل القوّة بانحناء طفيف نتيجة وجود كتل عظيمة، ككتل الجبال والمعادن ذات الخامة الكثيفة، وما إلى ذلك، بل إنّ هذا أكثر ما يكون صحيحًا بالنّسبة إلى الحقل المغناطيسيّ؛ فالأرض تحديدًا هي كالمغناطيس العملاق، تكشف البوصلة في كلّ لحظة اتّجاه حقلها المغناطيسيّ، وهنا أيضًا تحني الكتل المغناطيسيّة خطوط فعل القوّة (قارب، كتلة فولاذية، إلخ...)، ويتولّد الحقل المغناطيسي في المختبرات العلميّة بمنتهى الحريّة، بواسطة اللفائف التي يمرّ من خلالها تيّار كهربائي، ومن هنا يتّضح أنّ بوسعنا، فور تعديل شكل هذه اللفائف أو توجّهها، صوغ خطوط فعل القوّة بأشكال بالغة التنوّع، وقد أظهر خبراء الحصر المغناطيسيّ عن علماء الفيزياء على مدى السّنين خيالًا خصبًا في هذا السّياق. لتناول موازنة جريئة أخرى، وذلك نمط الرّسم الصينيّ؛ فإذا كان الحقل المغناطيسيّ نهرًا، عندئذ تكون خطوط فعل القوّة خطوطًا تابعة للتيّار؛ أيّ موازية لضفاف النّهر؛ إذ يكون هذا الأخير هادئًا، متجنّبةً، كما يفعل الماء ما يعترضها من عقبات،

متفرّقـةً حول الأحجـار، ومتحوّلة في مواطـن الدّوامات المائيّـة إلى دوائر صغيرة مأسورة، وبالنظر إلى الحقل المغناطيسيّ- وكأنّه حزمة من خطوط فعل القوّة- نستطيع الآن مناقشة انتقال الجُسيمات.

٣- حركة الجسيْم

كيـف يكـون إذن سـلوك شـحنة كهربائيّـة لـدى غمرهـا في حقـل مغناطيسـيّ؟ أظهرت التّجارب أنّ الشّـحنة السّاكنة غير معرّضة لأيّ قوّة، وهو أمر متوقّع. أمّا إذا زوّدتْ هذه الشحنة بسرعة محدّدة، لم يؤثّر الحقل المغناطيسـيّ في مقدار سـرعتها، بل قيّد مسار هذه الشحنة. يلفّ الجسيم في أثنـاء حركته حول خطّ فعل القـوّة ما دامت الحركة على طول خطّ فعل القـوّة حرّةً تمامًا. من هنا نصـل إلـى نتيجة أولى بالغـة الأهمّية؛ وهي أنّ الجُسـيمات المشـحونة كافّةً -والوسـط البلازمي لا يتكوّن إلّا من مثل هذه الجُسـيمات- مقيّدة فرديًّـا باتّباع خطّ فعل القوّة في الحقل المغناطيسـي، ويبيّن الرّسـم التوضـيحيّ ٤ نموذج الحقل المغناطيسـيّ الثابت، كما تتبيّن اللّفات التي تحْدث هذا النوع من الحقول المغناطيسيّة.

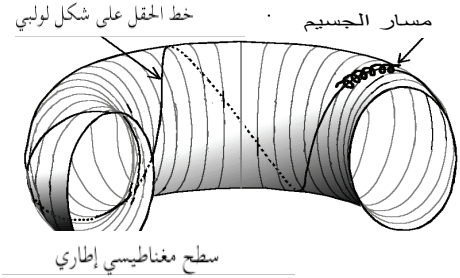


رسم توضيحي ٤. مسار أيون (+) والكترون (-) في حقل مغناطيسي ثابت

خطوط فعل القوّة هنا هي خطوط مستقيمة متوازية، وتأتي مسارات الجُسيمات على صورة لولبيّة؛ إذ تتحرّك الأيونات تحديدًا في اتّجاه معاكس للإلكترونات؛ ونظرًا لكون كتلة الأيونات أعظم بكثير من كتلة الإلكترونات، فهي ذات مسار أعرض بكثير من مسار الإلكترونات (الرسم ٤)، وفي الحقول المغناطيسيّة ودرجات الحرارة التي تعنينا، يقلّ طول أشعّة (أنصاف أقطار) هذه اللّوالب عن الميليمتر لدى الإلكترونات، في حين تبلغ عدّة سنتمترات بالنّسبة إلى الأيونات الأكثر سرعةً. الأثر المتمثّل في الحصر الجانبيّ ذو فائدة بالغة بلا شكّ، بيد أنّ هذا لا يعالج مشكلتنا إلا جزئيًّا، ما دامت الجُسيمات لا تزال تتحرّك بسرعة ١٠٠٠ كم/ث على طول خطّ المجال المغناطيسيّ. وفي الماضي، مال الخبراء إلى معالجة مسألة الأطراف بواسطة حلّين اثنين: إقامة حواجز مغناطيسيّة على امتداد خطّ الحقل، أو إنشاء خطوط مغلقة للحقل، وقد خيّب الحلّ الأوّل، الذي يعْرف بالمرايا المغناطيسيّة أو التّرتيبات المفتوحة، التوقّعات، ولم يستمرّ البحث فيها، في حين يبدو الحلّ الثاني واعدًا.

إذا استخدمنا بدلًا من اللّفات الموضّحة في الرّسم الأخير أشكالًا دائريّةً على صورة أسافين البرتقال، تحوّلت خطوط المجال المغناطيسيّ إلى دوائر؛ أيْ خطوط مغلقة؛ وهذا أمر يسير بلا شكّ، لكنّه ليس كافيًا. ففي هذه الحالة، يتحرّك الجسيم حقًّا نحو مسار لولبيّ حول خطّ المجال الدّائري في حدّ ذاته، إلّا أنّ هذه الحركة يصحبها في الوقت نفسه انحراف عموديّ بطيء يحمل الجسيم في نهاية المطاف نحو الجدار، علمًا أنّه لا يمكن تفادي ظاهرة الانحراف في التّرتيبات المغلقة، إلّا أنّه يمكن تداركه بتعقيد الترتيب بعض الشيء (الرّسم التّوضيحي ٥)، وأسهل مثال ممكن على هذا النّوع من الأسطح هو مثال الحجْرة الهوائيّة في المركبة، وهي حجرة منتفخة لا صمّام لها. لنرسم الخطوط التي تلتفّ بانتظام على هذا السّطح، ولنتصوّر أيضًا أنّنا قادرون على توليد مجال مغناطيسيّ، تأتي خطوطه على هذه الصورة. في هذا الترتيب المعقّد بعض الشيء، تتحرّك هذه الجُسيمات على طول خطوط الحقل في دوّامة حولها بالشّعاع نفسه المذكور آنفًا. لننظر الآن إلى أثر الانحراف المحتّم؛ إذ يؤثّر في الاتّجاه نفسه (أيْ نحو الأعلى هنا)، ويتبيّن لنا أنّه حين يتحرّك الجسيم إلى «أعلى» السّطح، يبتعد من مركز الترتيب، لكنّه عند مروره إلى «أسفله»، يسْحب إلى المركز. من الناحية الرياضيّة، يتبيّن أنّ التّعويض هنا يكون

تامًّا، بحيث يؤسر الجسيم؛ لأنّه يجبر على البقاء مثنيًّا على مقربة شديدة من السّطح المغناطيسي.



رسم توضيحي ٥. مسار جسيم على سطح مغناطيسي

وقد اقترحت ودرست سبلًا شتّى لتوليد هذا النّوع من خطوط المجال، ومن «الأسطح المغناطيسيّة». تنطوي إحدى الوسائل المتّبعة على تحديد حركة محدّدة للفّات معقّدة إلى حدّ ما، وكافية في حدّ ذاتها للحصول على التّرتيب المناسب (مثل جهاز ستيلاراتور Stellarator). كما أنّ ثمّة طريقةً أخرى تنطوي على العكس؛ على العودة إلى اللّفات اليسيرة، ولكنْ بتمرير تيّار كهربائي في الوسط البلازميّ (مفاعل توكاماك Tokamak)، وهو التّرتيب الذي يرجع إليه ما يلي من نصّ هذا الكتاب.

٤- اضطرابات السّمت

إنّ ما عرضناه للتوّ يشكّل أساس ترتيبات الحصر الأكثر فعاليّةً، إلّا أنّنا لم ننظر حتّى الآن إلّا إلى حركة الجسيم الواحد، ويبقى أن ننظر إلى ما يحدث حين يسكن هذه الأجهزة عدد كبير من الجُسيمات التي تتفاعل بشدّة فيما بينها.

النتيجة الأولى عاديّة جدًّا؛ إذ تصطدم الجُسيمات العديدة اصطدامات عديدةً بصورة فوضويّة؛ مما يسفر عن انتشارها ببطء نحو الخارج، فكلّ ما يدور يحْدث وكأنّ الجهاز ساميّ إلى حدّ ما، وهذا

الانتشـار أمر متوقّع حقًّا، بل إنّ ما ينجم عن ذلك من نفاذ الجُسيمات أمر مقبـول تمامًا؛ ونظـرًا لإمكانيّة توليد الحقول المغناطيسـيّة القويّة التي بتنا قادرين على تكوينها، فإنّ حجم هذا الهروب ضئيل جدًّا.

ثمّة أثر آخر أكثر إثارة للاضطراب؛ إذ يصبح الوسط البلازميّ مسرح اضطرابات ذات آثار سلبيّة جدًّا في الحصر، ولندرس هذه الظّاهرة البالغة الأهميّـة عن كثـب. تحُـدث إلكترونات البلازمـا، المتحرّكة بسـرعة فائقة والمضـطربة باستمرار، تأرجحًا متنوّعًا، وإذا تفرّقت الأيونات والإلكترونات قليلًا على الصّعيد المحلّيّ، نتج عن ذلك مجال كهربائيّ متأرجح مثل كثافة الجُسـيمات، وإذا انتظمـت حركة الإلكترونـات، ظهرت تيّـارات كهربائيّة محليّة تسـفر بدورها عن حقول مغناطيسية متأرجحة. تشكّل هذه المجالات والتيّارات المتنوّعة الأصـل اضطرابات تؤثّر في الحصر في الجهاز؛ لذلك لا ينبغـي النّظر إلى «القفص المغناطيسـي» على أنّه قفص محْكم القضـبان، وقد سـبق أن أشرنا إلى أنّ هذا الأسر مكوّن من مادة مساميّة، وهذه المادة مضطربة؛ فضلًا عن كونها مساميّة، وهنا تتمثّل معْضلة الحصر الحقيقية؛ ففقـدان الجُسـيمات- ومن ثمّ الطّاقـة- هو أعظم بكثير ممّـا كان يوحيه نمط الاصطدامات العاديّ. إضافة إلى ذلك، فإنّ هذا الإعداد المغناطيسيّ معرّض للتحطّم في حال نمت هذه الحركة العشوائية بصورة مفرطة، وبلغت البلازما الجدران، وقد حظيت هذه المسائل كافّة- ولا تزال- بالبحث الذي تعكف عليه يوميًّا المختبرات العلميّة في مجال الاندماج النوويّ.

هناك أثر ثالث يتدخّل في ترتيبنا هذا، وهو الأثر الملاحظ حين نباشـر تصعيد درجة حرارة البلازما بعمليّات تسخين إضافيّة، وهو أثر كريه جدًّا؛ فإضافة تسـخين مساعد يقوّض من جودة الحصر، ذلك أنّ حقن البلازما بالطاقـة من شـأنه زيادة الاضـطراب القائم أصـلًا. لكنّ الـدواء هنا من الـداء؛ فقـد أثبتت التّجربة أنّه لـدى تجاوز حدّ ما مـن الطّاقة التي تُحقن بهـا البلازما، نجد إحدى حالتين منفصـلتين تمامًا، وهو ما يعْرف بنمطي الحصـر. يعرف النّمط الأوّل بالنّمط إل mode L (مشـتقّ من الإنجليزية

low أيْ منخفض) الذي يتمثّل باستمرار التّدهور المشار إليه. بيد أنّنا قد نبلغ نمط حصر آخر يعرف بالنّمط إتش mode H (مشتقّ من الإنجليزية high أي عال) ذي المواصفات الأكثر مؤاتاةً. مع عدم تحقّق أوْجه الفعاليّة الكاملة التي يؤدّيها الحصر الجيّد، نجد خصائص حصر مقبولة تمامًا؛ لذلك تنطوي التّجارب الكبرى على وسائل التّسخين كافّة، التي تتيح تجاوز حدّ القوّة المذكور، بحيث تحقّق الحصر الجيّد مع تسخين البلازما.

أسفرت الأبحاث التي تناولت هذه المسائل عن نتائج أخرى. بالرّغم من عدم اكتشافنا تمامًا سرّ وجود النّمط إتش، إلّا أنّ الخلاصة العامّة هي بالبحث عن سرّ هذا التّحسّن في آليّة تحدّ من حجم الخلايا التي يظهر فيها الاضطراب ويتطوّر فيها، ومن شأن كلّ ما يجنبنا أيّ توسّع حيزيّ للاضطراب أن يسفر عن تحسين آليّة حصر البلازما، وإذا تذكّرْنا أنّ عمليّات التّسخين الإضافيّة قادرة على إحداث دوران البلازما أو توليد تيّار محليّ، تبيّن لنا سبب تعمّدنا أن تكون السّرعة أو التّيار الناجمين غير منتظمين، بحيث يمكن التوصّل «إلى تمزّق» خلايا الاضطراب، ودراسة أنماط الحصر المعزّز بصورة أكثر من النمط إتش. تسفر هذه الإمكانات التي تتيحها آليّات التّسخين عن إسهام مهمّ في سبيل معالجة تحدّيات الحصر، ويمكن تصوّر مدى أهميّة الأعمال النظرية الجارية وتعقيدها في هذا الصّدد.

٥- النتائج التي يتوصّل إليها وقوانين المقادير الأسّيّة

استعرضنا، فيما سبق، ظاهرة الاضطراب، وهي ظاهرة أو مجموعة من الظّواهر التي تتجاوز فيزياء البلازما وتشتمل على ميكانيكا الموائع، وتذهب إلى أبعد من ذلك، ولا سيّما أنّنا نلْحظ هذا النّوع من الآثار في حركة الموائع، مثل حركة الغاز، بل وفي تطوّر التّفاعلات الكيميائيّة أو حركيّة التّجمعات الحيّة، وثمّة ثابت تجدر الإشارة إليه في هذه الظواهر

كافّـة، وهي عجزنا عـن تطوير نموذج رياضـيّ كامل لهـذه الظّواهر، على غرار نمذجة مسـار قمر اصـطناعيّ ما؛ للتنبّؤ ببالغ الدّقة بحركته البعيدة على سـبيل المثال. ذلـك أنّ النّماذج المسـتخدمة لتناول الاضـطراب تلجأ دائمًا إلى اسـتخدام معلّمات ضـبط وتعديل ذات قيم مشتقّة من التّجارب، والبلازما ليست مستثناة من هذه القاعدة.

أمام استحالة التّوصّل إلى تفسير نظريّ كامل، مصحوب بنمذجة ذات قـدرة تامّـة على التنبؤ، عكف خـبراء فيزياء البلازما على اسـتنباط أكبر قدر ممكن من المعلومات من التّجارب القائمة؛ لاسـتخلاص قانون تجريبيّ للحصـر، دون التّوقف مع كل ذلك عن السّـعي؛ لكشـف أصول الاضطراب مع خبراء المجالات الأخرى، وقد أثمرت هذه الجهود -بلا شـكّ- في سـياق تقدير زمن الحصـر في الطّاقة، وهو عدد مميّز لكلّ تجربة؛ إذ يعتمد أوّلًا، وبقدْر كبير، على حجم جهاز التّجربة، وعلى الحقل المغناطيسـيّ المستخدم كذلك، وهذا واضح إلى حدّ ما، إلّا أنّ الممارسة العمليّة أوضحت أيضًا وجود مقادير أخرى ينبغي النّظر إليها بعين الاعتبار، حال أردْنا صياغة قانون عامّ بصـورة كافية. من هنا شكّل الخبراء قاعدةً واسعةً من البيانات، بالنّسبة إلى نوع الجهاز المسـتخدم الأكثر شـيوعًا، التي تشتمل على حالات تجريبيّة بالغة التنوّع، ومن ثمّ باشـروا في توليف مجموع المعلومات المخصوصـة بكلّ أداء في قانـون فريـد، مـن شـأنه تحديد زمن الحصـر. تـتراوح قيم زمن الحصر من ٥ إلى ٥٠٠ ميليثانية، ومن الملاحظ أنّ المقاييس لا تتجاوز أبدًا ١٥٪ مـن القيـم التي يتنبّأ بها هـذا القانون. هذا القانـون التجريبيّ الذي يعْـرف بقانون المقادير الأسّـيّة، يتيـح التنبّؤ بأوْجـه أداء الجهاز، على وفق مميّزاته المخصوصـة به، أو يتيح تحديد خصـائص بنائه، على وفق أوْجه الأداء المرجوّة.

تعدُّ هذه النتيجة نتيجةً جوهريّةً، إلّا أنّ ثمّة نتائج أخرى تجسّد، بصورة مباشرة، أكثر التّقدّم المحرز، وحال أوجه الأداء الراهن. في عام ١٩٩١، كان المجتمع العلميّ واثقًا من إحاطته بسـلوك البلازما إلى حدّ المحاولة بإجراء

تجربة حاسمة: استخدام «وقود حقيقيّ» في مفاعل توكاماك (من الدّوتريوم والتّرتيوم)، ومشاهدة عمليّة إنتاج الطّاقة، بصورة مباشرة. وقد أجريت التّجربة باستخدام جهاز أوروبيّ قائم في إنجلترا: جهاز جيت JET، وقد استغرق هذا الحدث حوالى ثانية واحدة، وبلغت الطّاقة الناجمة حينئذ حوالى ١ ميغاواط (أي مليون واط)، وكما توقّعت قوانين المقادير الأسّيّة، كانت المحصّلة الإجماليّة سلبيّةً؛ إذ كان ينبغي تزويد البلازما بقدْر من الطّاقة يفوق ما تستطيع إنتاجه، لكنّ حلم مفاعل الاندماج كان قد بدأ يقترب من الواقع الملموس لأوّل مرة. وقد تأكّدت هذه النتيجة، منذ ذلك الحين، أوّلًا في الولايات المتّحدة، ومن ثمّ طوّرتْ بصورة بالغة في الولايات المتّحدة و أوروبا، حتّى أنتجت تجربة جيت عام ١٩٩٧ طاقةً فاقت قيمة ١٦ ميغاوات. كما تعزّز زمن الحصر الذي رصد في تفاعل الاندماج أيضًا بصورة كبيرة، وأخيرًا تحقّقتْ شروط درجات الحرارة وزمن الحصر اللّازمَين للحصول على ناتج يوازن الطّاقة المزوّدة للبلازما، وتلك النّاجمة عن هذا الوسط البلازميّ بدوره. هي حصيلة هائلة بلا شكّ، لكنّ أهمية هذه التّجربة لا تقتصر على كمّ الطّاقة النّاجمة عن تفاعلات الاندماج؛ فمن الثّمار التي مكّنتنا هذه التّجربة من حصادها نتيجتان ذات أهمّيّة جوهريّة. فقد تمكّنّا -لأوّل مرّة- من مشاهدة تسخين ألفا، واستطعنا عمليًّا قياس أثر تسخين أيونات الهيليون في الإلكترونات، بما يسفر عن تفاعلات الاندماج، وقد أتاحت هذه المقاييس تأكيد التّقديرات النّاجمة عن النّماذج التي طوّرها خبراء البحث النظريّ. ثمّة ملحوظة ثانية لا تقلّ أهميّة، وهي أنّ احتواء البلازما جُسيمات فائقة السّرعة، مثل أيونات الهيليوم، لم يسفر عن أيّ اضطراب أو تدهور في الحصر بصورة عامّة. تجدر الإشارة هنا إلى أنّ النّتيجة الثّانية هذه كانت متوقّعة؛ فهي ما استنْتجتْه النّظريّة، لكنّ أهمّيتها تتمثّل تحديدًا في تأكيد هذه الشّكوك بالتّجربة العمليّة.

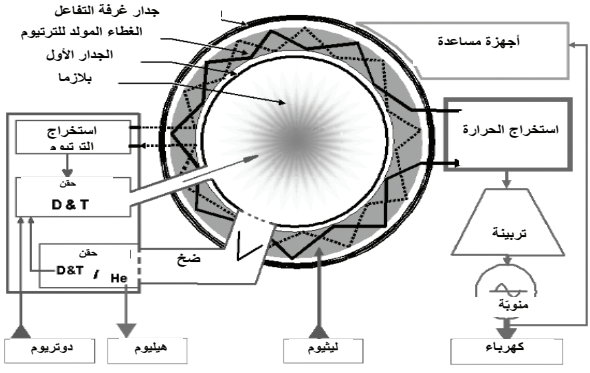
مكّنتنا هذه النتائج إذن من تحديد حجم المفاعل المنتج للطّاقة بصورة مؤكّدة، وسيكون ذلك هو محور الفصل القادم.

٤- المفاعل وإنتاج الطاقة

١- مبدأ المفاعل

بعد عرض المبادئ الرئيسة المخصوصة بالبلازما، نستطيع الآن تناول المفاعل بصورة ملموسة أكثر، وسنلجأ- لهذه الغاية- إلى مخطّط وظيفيّ؛ أيّ رسم تخطيطيّ يبيّن الوظائف الرئيسة اللازمة لسير الجهاز بصورة ناجحة. الجدير بالذّكر أنّ هذا الرّسم العامّ صائب، بصرف النظر عن أسلوب الحصر المختار، سواء أكان بوساطة الحصر المغناطيسيّ أم الحصر العطالي، وسنعرض لاحقًا التفصيلات المخصوصة بمفاعل توكاماك، الذي يمكن عدّه مفاعلًا نموذجيًّا للحصر المغناطيسيّ.

لنتصوّر إذن وجود وسط بلازميّ أشبه بكتلة ضخمة من الغاز القائظ في قلب المفاعل (الرّسم التوضيحيّ ٦)، ومن ثمّ لننظر إلى هيكل الطّبقات المتتالية المحيطة بالبلازما، التي تمكّن من استخدام هذا الوسط التّفاعليّ للحصول على الطّاقة، في الوقت الذي تضمن فيه حمايته أيضًا.



رسم توضيحي ٦. مخطط وظيفي للمفاعل

لا يمكن للبلازما السّـاخنة -كما نعلم- البقـاء مدّة طويلة في الفراغ؛ لذا نجد على مسافة محدّدة منها حائطًا عازلًا يشكّل جدار غرفة التّفاعل. تتعرّض هذه الغرفة لضـخّ دائم يضـمن عزل البلازما، بصورة جيّدة، عن بقيّـة مكوّنات الجهاز، وذلك بواسـطة حيّز جيّد من الفراغ. بدءًا بمكوّنات غرفة التّفاعل، لنتأمّل أوّلًا مصير الوقود؛ إذ يغذّي هذا الوقود الغرفة، عن طريق حقن مباشر ومحكم بمزيج الدّوتريوم/التّرتيوم بالحالة الغازيّة، أو بقذف مكعّبات ثلجيّة صغيرة من الدّوتريوم والتّرتيوم باتّجاه البلازما. بعد الاحتراق، ترْسـل الموادّ الغازيّة المسـتخرجة عن طريق المضخّة إلى جهاز لفصـل الرماد (الهيليوم في هذه الحالة) عن الوقود غير المحترق (الباقي مـن الدّوتريوم و التّرتيوم). من ثمّ يعـاد تدوير المواد غير المحترقة باتّجاه غرفة التفاعل، باستخدام الآليّة نفسها المستخدمة لتغذيتها بالوقود.

في كتلة الغاز الشّـديد الحرارة، ومع سـير تفاعـلات الاندماج، تبعث البلازما بجُسـيمات سريعة وأشـعّة، والأهمّ هو إصدارها نترونات مفعمة بالطّاقـة. سـرعان ما تخبـو الجُسـيمات السّـريعة والأشـعّة، متخلّيةً عن طاقتهـا في الجـدار الأوّل الـذي تواجهـه إثر مغـادرة البلازمـا، علمًا أنّ ثمّـة تيّـار تبريد يمـرّ بهذا الحاجـز الذي يعـرف بالجـدار الأول، ومعدّ- خصوصًـا- لاسترجاع الحرارة التي تستقرّ في هذا الجدار المكوّن من موادّ قـادرة على ضـمان نقـاء البلازما الواجب، لدى تعرّضـها للقصـف بهذه الأشـعة والجُسيمات السّريعة، ومع قدرة هذا الجدار على الاحتفاظ بهذه الجُسيمات والأشعة، إلّا أنّه يكاد أن يكون غير ذي أثر في النّترونات المفعمة بالطّاقـة التي تخترقه؛ لتمْتصّ بعد ذلك على بعُد مسـافة قصـيرة، فيما يعرف «بالغطاء المولّد للتّرتيوم».

للغطاء القائم بين الجدار الأول وغرفة الفراغ ثلاث وظائف أساسـيّة؛ إذ يسـتعيد هذا الغطاء أوّلًا طاقة النّترونات، التي تكبح عند اصـطدامها بالفولاذ على سـبيل المثال؛ مما يسـفر عن تسـخين هذه المادّة، كما يسري سـائل كالماء مثلًا، في هذا الهيكل،؛ ليجلي الحـرارة النّاتجة نحو الأجهزة

التقليديّة- أيْ مولّد البخار والتّربينة والمنوبّة التي تنتج الكهرباء في نهاية المطاف.

أمّا الوظيفة الثّانية التي يتولّاها هذا الغطاء، فهي مخصوصة بالتّرتيوم، كما يتبيّن من اسمه، فوحده الدّوتريوم- من نوعي الوقود المستخدمين- متوافر، ويوجد في مياه البحر، في حين لا يوجد التّرتيوم إلّا بكمّيات محدودة جدًّا في الطّبيعة؛ لذا يجب إنتاجه، ويُنتج التّرتيوم بقصف جسم آخر متوافر بسهولة- مثل اللّيثيوم- بالنّترونات؛ لذلك يوضع اللّيثيوم في صورة خزف أو سبيكة معدنيّة في الغطاء الذي يتحوّل إلى غطاء مولّد للتّرتيوم لدى قصفه بالنّترونات.

أخيرًا، تنطوي وظيفة الغطاء الثّالثة، وهي الأخيرة، على إيواء جدار غرفة التّفاعل من حزمة النّترونات؛ فالغطاء مسؤول عن حماية خاصّية العزل فيها.

استرداد الحرارة، وتوليد التّرتيوم، وحماية الغرفة؛ هذه الوظائف التي يناط بها هذا الغطاء، والذي لا بدّ من أن يكون معقّدًا لتأديتها. يحتوي الغطاء- كما رأينا- الفولاذ واللّيثيوم، كما يتخلّله تيّار أو تيّاران؛ لضمان مهمّتين: أمّا الأولى فهي طرد الحرارة النّاجمة عن طاقة النّترونات في موادّ الهيكل، وأمّا الثّانية فهي استخراج التّرتيوم النّاجم عن قصف الليثيوم بالنّترونات، وعمليًّا، يأتي الغطاء في صورة شطيرة من الصّفائح والأنابيب المكوّنة من مختلف المواد، التي يتحدّد أسلوب إعدادها على النّحو الأمثل، بواسطة رموز حسابات نترونيّة. ثمّة خيارات ممكنة في هذا الإعداد: مثل نوع اللّيثيوم الذي يختار، ومادّة الهيكل، والسّائل الحامل للحرارة، وحتّى الترتيب العام، أيْ طريقة تنفيذ الوحدات المكوّنة لهذا الجهاز الكلّي، الذي يغطّى بأجزاء مجْمل السّطح الدّاخليّ لغرفة الفراغ.

بالعودة إلى المخطّط العام، يُلحظ وجود مجموعة الأجهزة المساعدة، التي لا غنى عنها لعمليّات التّسخين أو حصر البلازما، وهي ممثّلة في المخطّط بصورة رمزيّة، ولا سيّما أنّنا هنا في سياق عامّ، وقد تكون

هـذه الأجهـزة متمثّلـة في أشـعّة ليزر، في حـال الاندماج العطـالي، أو في اللّفـات في حـال الاندماج المغناطيسـيّ. الجدير بالذّكر أنّ هـذه المكوّنات المساعدة تستمدّ الطّاقة من الكهرباء النّاتجة، شأنها في ذلك شأن أجهزة المفاعل كافّة.

يمكن إضـافة عنصـر كمّي لهذا الوصـف الوظيفي البحت للمفاعل، فأيًّـا كان نوع المفاعل المسـتخدم، لا بـدّ من أن يكون ذا حجـم معيّن، على الأقلّ، لحدوث الإشـعال أو حتّى الاقتراب من تحقّقه، وسواء أكان الحديث عن اندماج مغناطيسـيّ أم اندماج عطالي، تتمتّع المفاعلات التي عرضـت –عادة– بطاقة تساوي حوالى ١٠٠٠ ميغاواط، ومن باب الموازنة، لا بدّ من التّذكير بأنّ طاقة المحطّات النوويّة في فرنسـا تتراوح بين ٩٠٠ و١٤٠٠ ميغـاواط؛ لذلـك فإنّ الاندمـاج ليس بعيدًا عـن واقع السّـوق الذي ينتمي إليه، إلّا أنّ عمليّة الاندماج تعدّ جزءًا ممّا يعرف بوسائل الإنتاج المركزيّة؛ فالاندمـاج– خلافًـا لمصـادر الطّاقـة الأخـرى– لا يمْكـن أن يتحقّـق في وحدات مصغّرة.

ثمّة سؤال هنا يطرح نفسه في ضوء الملاحظة الأخيرة: هل هذا هو نوع المفاعل الذي يحتاج إليه المجتمع؟ لقد تنامى جدل في السّـبعينيّات، خلص إلى أهميّة تفضـيل مصـادر الطّاقة ذات الحجم الصـغير واسـتخدامها، بصـورة لامركزيّة؛ لأنّ هذا هو المسـتقبل المتوقّع والمـراد، ولكنْ ما حقيقة ذلك بالضّـبط؟ للإجابة عن هذا السؤال، فلْنتناول على سبيل المثال تطوّر مصـدر للطّاقة ملائـم للإنتاج اللامركزيّ، وهي طاقـة الرّياح. نلْحظ أنّ الحقائـق لم تؤكّد حديث السـبعينيّات، فسـرعان ما جمّعـتْ أعمدة طاقة الرّياح، بالعشـرات، في المواقـع التي عدّتْ ملائمة لهـذا النوع من الإنتاج، وقد تطوّرت فيما يسـمّى مزارع الرّياح مراكز إنتاج صـناعيّة حقًّا، بصورة أوجب وصـلها بشـبكة قادرة على جمـع الطّاقة النّاتجـة، وتعويض أوقات التوقّف الناجمة عن همود الريح، وفي الوقت نفسه، استمرّت طاقة الوحدة الرّيحيّـة في التّنامـي، حتّى باتت اليوم تناهز ٢ ميغـاواط، وبقوائمها التي

تبلغ ارتفاع ١٢٠ م ومراوحها ذات قطر يساوي ٨٠م، بعد تتربينات الرّياح في الواقع عن نطاق الإنتاج اللامركزي، وتقصد المشروعات الرّاهنة إلى تعزيز القدرة الوحدويّة لهذه الأجهزة، وهذا ما يخصّ طاقة الرياح، إلّا أنّ مصادر الطّاقة الأخرى تميل نحو هذا الاتّجاه أيضًا، وقد أثبت الزّمن أنّه حتّى لو دعت الحاجة إلى الإنتاج اللامركزيّ، وأمكن تلبيتها بهذه الصّورة، لا يزال الإنتاج المركزيّ في جدول الأعمال الرّاهن، ولا ينبغي أن نتوقّع في المستقبل انقلابًا تامًّا على هذا التّيار؛ وذلك لسبب يسير جدًّا؛ إذ تتركّز التجمّعات السّكّانيّة في حدّ ذاتها بصورة تزداد قربًا من البحور أو الأنهار؛ إذ يقطن نصف سكّان الأرض في الوقت الرّاهن على الشّريط الساحليّ، وتذهب توقّعات المراقبين كافّة إلى تعزّز هذه الظاهرة، التي ستزداد بتوسّع المدن الكبرى، وفي هذه الظّروف، وفي المستقبل الذي يمكن توقّعه، ستبقى الحاجة إلى إنتاج الطّاقة على مقربة من المدن قائمةً، وبصورة مركّزة- إلى حدّ ما- من الأمور الواقعة، وإن كان من المؤكّد أنّه يتحتم إنتاج الطاقة بصورة لامركزيّة في وحدات صغيرة، بعيدًا عن الشّبكات العظيمة التقليديّة. هذه الحاجة المزدوجة تعني- بيسْر- أنّه لا يمكن الزّعم أنْ تتحقّق هذه المطالب كافّة بواسطة الاندماج فقط، وهل هناك من يشكو من ذلك؟

٢- الأمان

انطلقت المساعي البحثيّة المخصوصة بطاقة الاندماج وتطوّرت في عالم بات يتنامى وعيه بالآثار الصّحّية والبيئيّة الناجمة عن النشاط البشري بصفة عامة، وعن إنتاج الطّاقة بصفة خاصّة؛ لذا كان من الطّبيعي أن يهتمّ الباحثون في ميدان الاندماج النوويّ بمدى أمان المفاعلات المستقبليّة، علمًا أنّ الأعمال التي جرت في هذا النّطاق مؤطّرة بمبدأ سلوك عامّ وهدفين رئيسيْن.

يحرص المجتمع البحثيّ على إجراء دراسات مفصّلة بخصوص الأمان، بصورة تتّسم بالانفتاح الكامل؛ دراسات سديدة وموازنة مع أنواع

المفاعلات كافّة، التي يمكن اقتراحها في هذا النّظام لتوليد الطاقة. الجدير بالذكر أنّ هذه الدراسات تحظى بالقسط الأعظم من التغطية الإعلاميّة؛ إذ تعرض نتائج هذه الدراسات منذ زمن بعيد على نحو مفصّل في أثناء المؤتمرات الدوليّة، وربّما تبدو هذه البيانات بغيضة أحيانًا، إلّا أنّ ثمّة العديد من الدراسات التحليليّة، السّهلة النفاذ، التي ترفع بانتظام لمختلف الهيئات البرلمانيّة أو الحكوميّة؛ بغية إعلامها بوضوح تامّ. كما شكّلت منظّمات رقابيّة منفصلة؛ لإبداء أحكامها بشأن هذه الموضوعات، وستكوّن-بلا شكّ - المزيد من المنظّمات لهذه الغاية.

فضلًا عن مبدأ الشّفافيّة، ثمّة هدفان تجدر الإشارة إليهما:

- ينبغي إظهار أنّ أسوأ حادث يمكن وقوعه لن يشكّل أيّ خطر يفرض إخلاء المناطق السّكانيّة الواقعة على المحيط الخارجي للمفاعل.

- ينبغي ألّا تفرض النّفايات الإشعاعيّة النّاجمة عن عمليات الاندماج عزلًا يمتدّ على مقاييس الأزمنة الجيولوجيّة؛ أيْ أنّها لن تكون عبئًا تدفع الأجيال القادمة ثمنه.

لدى قراءة هذه الأهداف، يتّضح أنّ الأمر لا يقتصر على الاندماج النوويّ وحده، وأنّ أهدافًا مماثلة رسمت لمصادر الطّاقة الأخرى، ولكنْ -خلافًا لمصادر الطاقة الأخرى- لا يمكن تطوير مفاعلات الاندماج النوويّ إلّا بعد ضمان تحقّق هذه المزايا قبل أيّ تطوير صناعيّ. هذه الأهداف واقعيّة، وسنبيّن السّبب فيما يلي:

لنتجوّل الآن في سلسلة إنتاج الطّاقة القائمة على مبدأ تفاعل الاندماج، وسنصادف في طريقنا تلك الخصائص الأوّلية والسّمات الأساسية المخصوصة بالاندماج، التي تجعل سمات هذه العمليّة واعدةً جدًّا من منظور الأمان. تعدّ هذه الخصائص بالغة الأهمّيّة، إلّا أنّ الدّراسات المخصوصة بالأمان لا يمكن أن تقتصر على اعتبارات عامّة، بل تبحث بحثًا دقيقًا فيما يمكن توقّعه من مفاعل الاندماج في حال عمله بصورة سليمة أوّلًا، وفي حال وقوع حادث ما ثانيًا، وسنرى أخيرًا طبيعة الوضع النّاجم عن

هدمها. نقتبس فيما يلي خلاصة النّتائج الرّقمية المخصوصة بالدّراسات التي كلّفت المفوّضية الأوروبيّة بإعدادها، والمخصوصة بالتّوكاماك؛ لإظهار ما يمكن ترقّبه في سياق أمان مفاعل الاندماج النوويّ.

ثمّة ملاحظة مبدئيّة تجدر الإشارة إليها؛ لا يعدّ التّوكاماك مفاعلًا فريدًا من نوعه، بل سلسلة من المفاعلات التي لا يزال لها العديد من الخيارات التقنيّة المتاحة. كما ننظر إلى الماء أو الهيليوم سائل تبريد، وإلى اللّيثيوم على هيئة خزفيّة، أو على صورة خليط، فضلًا عن مختلف موادّ البناء الممْكنة، وسنجد هنا النّتيجة التي تشمل مجمل هذه الخصائص دون الوقوف عندها ووصفها، ومن المنطلق ذاته، لن نتناول إلّا مكوّنات الأمان السلبيّ فيما يتعلّق بالظروف العارضة. لن نأخذ بالاعتبار أبدًا أيّ تدخّل إنسانيّ أو فعل تلقائيّ من شأنه إصلاح الوضع العارض، ومن ثمّ تقليل آثاره؛ ذلك أنّ الموقف المتّخذ هنا هو موقف متشائم عن قصد؛ فهو يبالغ في نتائج أيّ خلل. أمّا الموادّ المستخدمة في صنع التّوكاماك؛ فهي موادّ متكيّفة مع بيئة الاندماج، سواء أكانت على وشك التّوافر- مثل بعض أنواع الفولاذ- أم كانت بحاجة إلى مزيد من التّطوير- مثل السّبائك المكوّنة من الفاناديوم أو التّيتانيوم- أم كانت في أفق الابتكار البعيد، كبعض الموادّ المركّبة القائمة على كربيد السّيليكون (SiC/SiC)، وأخيرًا، ولتجنّب إصابة القارئ بالملل، لن نتناول إلّا الأثر في الصّحّة العامّة، وإن لم تغفل دراسات الأمان -حقًّا- عن الأثر الصّحّيّ الواقع على العاملين على هذه الأجهزة.

١) استخراج الوقود ونقله: لنبدأ جولتنا عند أولى المراحل في سلسلة عمليّات إنتاج الطاقة الكهربائيّة، ألا وهي عمليّة استخراج الوقود ونقلها.

والوقود المستخدم هو الدّوتريوم واللّيثيوم، والأمر اللّافت هنا ليس الخصائص المخصوصة بكلّ من هاتين المادّتين، بقدر ما هي مستخدمة بمقادير ضئيلة جدًّا؛ إذ يكفي لمصنع لإنتاج ١٠٠٠ ميغاواط من الطّاقة

الكهربائيّة إمداده بأقلّ من ١ كغم من الدوتريوم، وأقلّ من ١٠ كغم من اللّيثيوم الطّبيعيّ. في المقابل، يتطلّب إنتاج قدْر مماثل من الطّاقة في محطة قدرة نوويّة راهنة ٥٠٠ كغم من اليورانيوم الطّبيعيّ، وبخاصّة في محطة تستخدم الاحتراق، ٥,٠٠٠ طن من الوقود أو الغاز، وحوالى ١٠,٠٠٠ طن من الفحم! ولا ننسى أنّه ينبغي نقل هذه الكمّيات بعد استخراجها: ١٠,٠٠٠ طن من الفحم في اليوم؛ ما يسفر عن مرور ٤٠٠ كلّ أربع وعشرين ساعة.

وإذا أضفنا إلى هذه الاعتبارات أنّ أيًّا من الدّوتريوم والليثيوم لا يتّسمان بأيّ سميّة كيميائيّة خاصّة، تبيّن لنا تميّز الاندماج بأنّه يجنّب، بطبيعته البحتة، عددًا من المشكلات، كتلك المتعلّقة بتشغيل معدّات الاستخراج أو النقل؛ فلا حاجة إلى المناجم، أو المحطّات البحرية، أو خطوط أنابيب النّقل، أو أنابيب الغاز أو القوارب، ومن ثمّ لا مجال لحدوث التلوّث العرضيّ أو الحتميّ نتيجة استخراج الوقود، ولتغذية ما يزيد على عشرة من مفاعلات الاندماج، يكفي إنتاج سعة عربة لقطار سكّة حديد واحدة وإيصالها، كلّ عام.

ها قد تجاوزنا المرحلة الأولى من استخراج الوقود ونقله، ولا جدوى من الخوض مطوّلًا في تخزينها الآمن، أيًّا كان الموقع الذي نتصوّر تخزينها فيه؛ وذلك لسبب أساسيّ: لا توجد أيّ ظاهرة طبيعية (سواء أكانت عرضيّة أم لا) قادرة على تحرير طاقة الاندماج المُختزنة في الدّوتريوم أو اللّيثيوم على نحو تلقائيّ، وتمامًا، كما قد ينهار سدّ ما، أو يشتعل مخزون من الموادّ الهيدروكربونية، لا يمكن تحرير طاقة الاندماج إلّا باستخدام نظام معقّد وعامل بصورة تامّة؛ لذلك- كما لاحظنا- فإنّ إنتاج طاقة الاندماج أمر صعب، وهذا يعني أنّ بوسعنا تخزين مقادير كبيرة من الطّاقة على نحو آمن. من هنا كان ضمان المخزون- أيضًا- ضمانًا لاستمرار توافر تموينه.

٢) باطن المفاعل. ها قد وصلنا إلى داخل المفاعل.

في هذا المكان، تجتمع تعريفات الظروف اللازمة كافّة؛ لإتاحة

التّحرير في طاقة الاندماج، وفي هذه المرحلة، ثمّة مصدران للتّحديات المتعلّقة بأمان الموقع التي قد نواجهها: وجود أجسام مشعّة سامّة بطبيعتها ينبغي تفادي انتشارها، وعدم ضبط إنتاج الطّاقة بصورة قد تسفر عن دمار هائل، بل وذيوع المضمون السّامّ الذي في المفاعل جزئيًّا أو كليًّا، إذا ما كان هذا الإنتاج مفرطًا. نقف أوّلًا إذن عند مصير الجسَمين اللّذين اسْتهْلكا وأنْتجا، قبل تحليل الشّروط في ضبط مفاعل الاندماج وظروفها.

إنّ أوّل جسْم مشعّ يصنّع وينْتج في المفاعل هو التّرتيوم، وهو جسم ذو دورة حياة قصيرة إلى حدّ ما (دورة مشعّة تستمرّ ١٣ عامًا) يسفر تحلّله عن بثّ إلكترون محدود النّشاط. كما أنّ ذرّة التّرتيوم صغيرة الحجم، وسهلة الانتشار؛ لذا وجب -نظرًا لسمته الإشعاعيّة والتنقليّة- اتّخاذ عدد من الإجراءات الاحتياطيّة، إلّا أنّ معالجة التّرتيوم معروفة منذ مدة، وفي هذا السّياق، أتاحت مفاعلات الانشطار بنمط كاندو Candu (وهي سلسلة كنديّة) التي تنتج وتحتوي بصورة مستمرّة كميّات كبيرة من التّرتيوم اكتساب خبرة صناعيّة حقيقيّة في إدارة التّرتيوم، وتقصد المختبرات العاملة على الاندماج إلى تحسين هذه الخبرة وتطويرها؛ للاستفادة من كلّ تقدّم يسفر عن تقليص وجود التّرتيوم في المفاعل والأجهزة المساعدة له، وعلى كلّ حال، لا يتراكم التّرتيوم إلى ما لا نهاية؛ لأنّه وقود، ويدوّر داخل المفاعل نفسه؛ إذ يضمحل في أثناء تفاعل الاندماج.

كما ينتج اندماج الدّوتريوم والتّرتيوم نترونًا نشطًا، تمتصّه الموادّ المحيطة بالمفاعل، إلّا أنّ النّوى التي قد يصادفها النّترون في سباقه ربّما تتحوّل وتصبح مشعّة، وهنا يكمن المصدر الثاني للنّشاط الإشعاعيّ في مفاعل الاندماج؛ إذ إنه «تنشّط» الموادّ المحيطة مباشرة بالبلازما نتيجة القصف النترونيّ، وهنا -وخلافًا لحال التّرتيوم- يتنامى التّنْشيط؛ بمعنى أنّ المادّة المعرّضة للقصف تزداد نشاطًا إشعاعيًّا كلّما اشتدّ قصفها. وسيبْحث هذا الأمر تفْصيلًا عند تناول معالجة المخلّفات.

بعد أن عيّن الجسيمين السّامّيْن في داخل المفاعل؛ أي التّرتيوم والموادّ

التي تنشّط، ينبغي النّظر إلى الظّروف المخصوصة بإدارتهما في توكاماك بحجم المفاعل. تتعلّق النّتائج الأوّليّة بعمل المفاعل على نحو طبيعيّ؛ أي الوضع الذي يتحكّم فيه بإنتاج الطاقة على النّحو الأمثل.

ثمّة عمليّات مراقبة أو صيانة عديدة يترتّب القيام بها في أثناء عمل المفاعل، وانبعاث بعض النّواتج المشعّة الطّفيفة في أثناء هذه العمليات أمر لا مفرّ منه، وقد توجد هذه النّواتج إمّا في الدّاخنة، ومن ثمّ في الغلاف الجويّ، أو في مياه القاذورات التي تغادر المفاعل، وقد عكف الباحثون على دراسة حجم هذا الانبعاث وآثاره في الصّحة العامّة بصورة معمّقة، وقد تبيّن من هذه الدراسات أنّه أيًّا كان نوع التّوكاماك، وطبيعة المخلّفات (مطرودة في الهواء أو في الماء)؛ فإنّ الأثر الصحي في أكثر فرد معرّض لهذا الأثر يعادل كأقصى حدّ:

1μ Sv[6]/ سنة

ممّا لا شكّ فيه أنّ هذه القيمة هي أدنى بكثير من كلّ المعايير المقبولة، ويجدر بنا الوقوف هنا عند دلالة هذه القيمة التي تقاس بوحدة غير شائعة، وسنلجأ في ذلك إلى موازنة مستمدّة من الحياة العاديّة: كلّما بلغنا ارتفاعًا أعلى، قلّتْ سماكة الغلاف الجوي الذي يعصمنا من الشّعاع الكوني، وازداد بذلك الأمر الشّعاع الكونيّ الذي نتلقّى، وتنامى أثر هذا الإشعاع بدوره في الصّحّة، الذي يزداد تحديدًا مقدار ١ μ زيفرت حين نرتفع أقلّ من ثلاثة أمتار! هي إذن قيمة ضئيلة بالفعل، تمامًا كما الخطر الذي نعرّض أنفسنا له حين نختار العيش بعيدًا عن السّاحل البحريّ.

لنقف الآن على تقويم التّداعيات لحادث خطير محتمل داخل المفاعل. هناك احتمالات وأسباب عديدة لحادث من هذا القبيل، مثل توقّف مضخّات التبريد على نحو مفاجئ، أو تمزّق غرفة الفراغ، أو دمار لفّات الحقل المغناطيسي، وتتوافر لدى عدد من القطاعات الصناعيّة اليوم

6 Sv الزيفرت: هي وحدة قياس جرعة الإشعاع المكافئة

وسائل تقويم مجرّبة، تمكّن من وصف نتائج مثل هذا الوضع، وقد بذل جهْد متأنّ لتطبيق هذا الإطار العامّ ببالغ الدّقّة لحالة الاندماج بخصوصيّتها، يتمثّل في توقّع التّداعيات في عدم إحكام التفاعل، ومصير المنتجات المشعّة في حال تدهور الظّروف.

هناك خاصّيتان تؤثّران في سياق التحكّم بالتّفاعل: أولاهما هي الحدّ الطبيعيّ لفائض الطّاقة الناجم عن تغذية غرفة التفاعل في كلّ لحظة بكمّية الوقود اللّازمة لتشغيل المفاعل، لمدّة لا تزيد على دقيقة فقط؛ أيّ ما يعادل غرامًا من الوقود أو أقلّ. بذلك فإنّ الطّاقة الإجماليّة التي يحتمل تحرّرها بصورة عرضيّة محدودة جدًّا. بيد أنّ ثمّة خاصّية أخرى؛ فالنّتيجة المباشرة لتغيّر مفاجئ في المفاعل هي استنباط بعض الغاز المحكم من الجدار، ونزع بعض ذرّات المادّة، وهذه المواد كافّة سريعة الانتشار في الاتجاهات كلّها، وبخاصّة نحو البلازما التي تسفر عن تبريدها بصورة مفاجئة، الأمر الذي يحول في الوقت نفسه دون تتمّة تفاعلات الاندماج، وإنتاج الطاقة. هاتان آليّتان سلبيّتان من آليّات الأمان كما يتبيّن لنا، بمعنى أنّهما لا تتطلّبان تدخّلًا بشريًّا للعمل.

في حال وقوع حوادث كتلك المشار إليها أعلاه، لن يكون لفائض الطّاقة إذن إلّا تداعيات محدودة جدًّا، إلّا أنّه ينبغي توقّع التّنامي في كمّيات الموادّ المشعّة المتسرّبة؛ إذ نتوقّع عندئذ تعطّل العديد من الأجهزة أو حتّى تحطّمها، وعلى وفق الحسابات البالغة الدّقة التي أجريت في هذا السياق، وبالنّظر بعين الاعتبار إلى سلوك التّجهيزات السّلبي فقط لا غير، يقدّر أثر الكمّيات المسرّبة في الشّخص الأكثر عرضة؛ للتضرر بمقدار ٢,٥ ميليزيفرت، وهو قدر مساو تقريبًا لأثر الإشعاع الطّبيعي الذي يتلقّاه كلّ إنسان سنويًّا، والمقصود هنا الفرد الذي لا يقيم في منطقة جرانيتيّة بصورة كبيرة.

كما يمكن القول إنّ السّمات المخصوصة بمفاعل الاندماج في حدّ ذاتها تسمح بتوقّع تشغيل آمن، سواء في ظروف طبيعيّة أم عرضيّة، وقد أكّدت

عمليّات التّقويم المضبوطة التي أجريت على مختلف نماذج المفاعلات، وباستخدام أفضل الأدوات الصّناعية الراهنة، هذه التّوقّعات.

ج) خارج المفاعل: ها نحن مجدّدًا خارج المفاعل، في المكان والزّمان اللّذين يتبادر فيهما تساؤل طبيعيّ بخصوص طبيعة النفايات الناجمة عن هذا الموقع، وأسلوب تصريفها، وذلك في سياق مختلف آليّات إنتاج الطاقة.

بصورة عامّة، تنتج التفاعلات الكيميائيّة أو النوويّة لتوليد الطّاقة في محطّاتنا محروقات، وهذا أمر لا يمكن تجنّبه، حتّى في مصنع خياليّ كامل، فحرق الكربون النقيّ في الأكسجين النقيّ، على سبيل المثال، لن يسفر عن أمطار حمْضيّة أو سلائف الأوزون، إلّا أنّه في الوقت نفسه سينتج من الغاز الكربوني ما ينتجه مصنع عاديّ وقوده الفحم. كذلك الحال بالنسبة إلى الآليّة النوويّة لصنع الطاقة التي لا يمكن فيها تفادي نواتج التّفاعلات المصاحبة لانشطار ذرّة اليورانيوم. فلنطلق اسم «النّفايات الأوّلية» على النفايات التي يفرضها مبدأ عمل في كلّ نظام لصنع الطّاقة، واسم «النفايات الثانويّة» على تلك النّاجمة عن مواطن القصور المختلفة في الوقود، والناجمة- أيضًا- عن متطلّبات بناء معدّات صناعيّة وعملها. يلاحظ عندئذ في حالتي آليّة الاحتراق، وآلية الانشطار، أنّ التحدّيات الأكثر تعقيدًا هي الناجمة عن إدارة النّفايات الأوليّة؛ أيّ غاز الكربون ومنتجات الانشطار. هذه النفايات الأوّليّة هي التي تسعى محطّات إنتاج الطّاقة إلى تخزينها الطّويل خارج الغلاف الحيويّ، بيد أنّ الهيليوم هو النفاية الأوليّة التي تطرحها عملية الاندماج، وهو جسم غير مشعّ، ولا يتّسم بأيّ نشاط أو سمية كيميائية، وهو -عدا ذلك- مثل المخلّف المثاليّ؛ لأنّه إن أطلق في الغلاف الجويّ، ابتعد ببطء نحو الفضاء؛ فالأرض عاجزة عن إبقائه. إنّ تجرّد النّفايات الأوّليّة النّاتجة عن الاندماج من السميّة يقلّل -فورًا- مضارّ هذا النظام لإنتاج الطّاقة.

أمّا النّفايات الثانويّة فمكوّنة أساسًا من كتلة المواد المحيطة بالبلازما، التي باتت مشعّة؛ بسبب القصف النّتروني. هناك فكرتان رئيستان، هما:

قـوام إدارة هـذه المخلّفات، واختيار الموادّ ونهـج التخزين. تختار -قبل كلّ شـيء- الموادّ ببالغ الحرص؛ فغياب النّفايات الأوّلية هو سرّ فعاليّة اختيار المـوادّ، بحيث تصْـطفى تلك المـوادّ التي تحدّ، إلى أقصـى حدّ، النّشـاط الإشـعاعي الناجم عن سير النّترونات، والمقصود هنا لا يقتصر على الحدّ من النشـاط الإشعاعي فحسـب، بل الحدّ أيضًـا من مدّة النّشاط ورواجه أيضًـا؛ أي الحـدّ من كلّ المخاطر التـي قد تنجم لدى وقـوع حادث خطير ناجم عن المفاعل أو تخزين النفايات. يتّضـح مسـبقًا وجود عدد من الموادّ التي تتّصـف بالخصـائص المطلوبة، وإن اقتضـت الحاجة إلى المزيد من الدّراسـة قبل اسـتخدامها على الصّـعيد الصّـناعيّ. أمّا الفكـرة الثانية ففكـرة عاديّة ومتعلّقة بإدارة النفايات، علمًا أنّ هناك ممارسـتين تتبعان في الوقت الراهن: نشـر النفايات وما لذلك من تداعيات ندركها تمامًا، أو عزلها عن الغلاف الحيويّ، والخيار الثاني هو المرجّح حقًّا.

بعـد عرض المفاهيم العامّـة، ينبغي العودة مجدّدًا إلـى أوجه التّقويم الدقيق التي أجريت بشأن مفاعل التّوكاماك؛ إذ اختيرت السّبائك المحدّدة المقـرّرة للاسـتخدام بصـورة واقعيّـة؛ أيْ بالنّظّـر -فقط- إلـى قدرات الصّناعة الرّاهنة. هي موادّ مركّبة طوّرت على النّحو الأمثل في سياق إدارة النفايات، وتتمتّع في الوقت ذاته بخصـائص ضروريّة ذات صلة بالصّلابة الميكانيكيّة ومقاومة التأكّل. تجدر الإشارة هنا إلى أنّنا لا نتحدّث عن موادّ افتراضـية؛ إذ أنتجت عدّة أطنان لأغراض الاختبار، استخدمت بعد ذلك في تجارب وعرّضت للإشعاع، وداخل التّوكاماك ذاته بالنسبة إلى بعضها؛ أي في بيئة نموذجيّة لبلازما المفاعل.

انطلاقًا من هذه الأسس، نعرض فيما يلي بصورة مجملة جدًا النّتائج المتّسقة، التي وصلت إليها الدراسات كافّة:

أوّلًا: حجـم النفايات الناجم قريب ممّـا تخلّفه محطّة للطاقة النووية ذات قدرة مماثلة، بل وربّما يزيد قليلًا، ولا سـيّما أنّ التّوكاماك أقلّ غلظًا من خزّان مفاعل بالماء، والأهمّ هو أنّ إجمالي مقدار السّـمية الإشـعاعية

المحتويــة تقــلّ أكثر من مئة مرّة عن تلك الناجمة عن تشــغيل مفاعل نوويّ راهن، وهذه عاقبة رئيســة حقًّا، وهي نتيجة ملموسة؛ لانعدام السمية لدى النفايات الأوّلية، كما سمّيناها، ولاستيعاب أهمّيّة هذه القيم، لنعدْ مجدّدًا إلى مصــدر للكهْربــاء البالغ الرّواج علــى الأرض، ألا وهــو الفحم. هناك الكثيرون الذين يجهلون حقيقة احتواء الفحم بطبيعته على أجسام مشعّة، علمًــا أنّه كثــيرًا ما يتجاهــل أثر هذه السّــميّة الإشــعاعيّة؛ لأنّها محدودة جدًّا، وفي ســياق السّميّة الإشــعاعيّة النّاجمة، يمكن موازنة حالة الاندماج مــع حالة الفحم، مع فارق يســير: تتبدّد السّــمية الإشــعاعيّة النّاجمة عن اســتخدام الفحم كليًّا في الغلاف الحيويّ في أثناء الاحتراق، في حين تبقى السّــميّة الإشــعاعية النّاجمة عن الاندماج محتكرة؛ لذا فإنّ أثرها أضعف حتّى من سمية الفحم.

وفي ســياق الحديث عن احتــكار النفايات أو حصــرها، ينبغي تحديد زمن الحصر المطلوب، ونرجع في ذلك إلى تقرير بهذا الخصوص رفع إلى المفوضــيّة الأوروبيّة التي تموّل هذه الأعمال كافّة وتضبطها، «عقب بضعة عقود، يكون المضــمون المشعّ السّــامّ لهذه المواد المنشّطة، والنّاجم عن عمل مفاعل الاندماج وهدمه، قد تضاءل قدْره. يمكن إخراج معظم هذه المواد- وربّما جميعها- من حيّز المراقبة، أو إعادة تدوير القليل-إن وجد- من هذه المواد التي تحتاج إلى تخزين دائم، وذلك بوسائل التحكّم عن بعد.»

تبدو آفاق هذه الآليّة إيجابيّة جدًّا، إلّا أنّ هذه الأعمال لم تنته بعد، لذا كان الحذر واضحًا في هذه الكلمات. فقد وضعت بالفعل المبادئ الأساسية، بيْد أنّه لا تزال ثمّة مراحل ينبغي اجتيازها بين مرحلة التّجريب في المختبر والتطبيق الصــناعي، ولا بدّ هنا من حفظ خلاصة التقرير المذكور سابقًا: «لا ينبغي أن تكون الموادّ التي ينشطّها الاندماج عبئًا على الأجيال القادمة».

بعــد أن انتهينا من شــرح الأمور المخصوصــة بضــمان عمــل المفاعل بصــورة آمنة، نســتطيع الآن العودة إلى ســياق الطّاقة بصورة عامّة أكثر. لا يقبــل أيّ امــرئ علــى الخطــر، مهما كان ضــعيفًا، بقلــب فــرح، إلّا أنّ

الأمر يتعلّق بحاجة ضـروريّة، فنحن نحتاج إلـى الطاقة؛ لذا علينا موازنة الخيارات المتنوّعة الممكنة لتلبية هذه الحاجة. الدّراسـات المقارنة ليسـت فقط مثيرة للاهتمام في هذا السـياق، بل لا غنى عنها لإعلام المسـتخدم النهائـيّ بالخيارات التي رجّحناها باسـمه. على سـبيل المثال، ربّما يجدر بنا ذكر نتيجة مخصوصـة بمصـدر كثيرًا ما يقترح -خيارًا ممكنًا اليوم- وهـي تربينة الغـاز، ودون الخوض في الاعتبارات المخصوصـة بالاحتباس الحراري، بل بالنظر فقط إلى الأثر المباشـر في الجهاز التنفّسـيّ المترتّب علـى التلوّث الكيميائيّ (NOx) المنتشـر في الغلاف الجوي، من قبل موقع حديث كهذا، وجد أنّ إنتاج ١ تتراواط/ساعة، أي ما يعادل ١٠٠٠ ميغاواط مدّة ١٠٠٠ ساعة، يتسبّب في ٥ وفيات، أيْ أنّ مرفق تُربينة غاز يولد ١٠٠٠ ميغاواط وخلال مدة ٧٠٠٠ سـاعة بالعام (إنتاج الطاقة في فرنسـا يعادل حوالـى ٦٠ مرفقًـا من هذا القبيل) سيسـفر لا محالة عن وفاة ٣٥ نسـمةً سنويًّا، وهي نتيجة أفضل -بلا شكّ- ممّا قد يحصل لو استخدمنا الفحم أو الكتلة الحيويّة، لكنّ هذه البيانات لا تقارن بتلك المخصوصة بالاندماج، التـي يجدر بنا هنا تذكير القارئ بها؛ فالقيم المخصوصـة بالاندماج التي يصل أقصاها إلى الميليزيفرتات لا تسفر عن أيّ أثر يمكن رصده، بل ربّما لا تسفر عن أيّ أثر أبدًا، حسب رأي العديد من الباحثين.

٣- التّكلفة

نرغـب -نحن المسـتهلكين- في النّفاذ إلى وفرة من الكهُرباء بصـورة آمنـة، وبتكلفة اقتصـاديّة رخيصـة؛ لذا فإنّ النّشـاط البحثـيّ في مجال الطّاقة ليس بمنأى عن الاعتبارات الاقتصـادية، أيًّا كانت دقّة البحث على صعيد الفيزياء أو تفوّق الدّراية التقنيّة. لن نسعى هنا إلى توقّع ثمن الكيلو واط /ساعة بحلول عام ٢٠٥٠م، وإن حاول بعض الناس ذلك، بل سنكتفي بأمر أكثر تواضعًا، ومحاولة الإجابة عن السّؤال التالي: بعد تذليل العقبات الفيزيائيّة والتقنيّة، هل سـتكون هناك عقبات اقتصاديّة يمكن توقّعها من

شأنها أن تحرمنا من أيّ تطبيق عمليّ لنتائج هذا البحث؟

١) تكلفة الكهرباء التي يولّدها الاندماج.- هو تقدير يسير إلى حدّ ما، وإن كان شاقًّا، ولن نخوض هنا في تفصيلات المحاسبة، بل سنعرض وسيلة الحساب؛ بحيث تكون النتائج التي نحصل عليها محلّ ثقة.

يتكوّن مفاعل مولّد للكهرباء من غلّاية تطلق تفاعل الاندماج، وأجهزة معروفة جيّدًا، وهي التّربينات والمنوّبات إلخ... أسعار هذه المعدّات الأخيرة، وغيرها من الأجهزة الأقدم، مثل الأسوار الخرسانيّة، ومعدّات الوصل وغير ذلك من الأدوات، معروفة –حقًّا- ويبقى تحديد ثمن الغلّاية فقط ، وهنا يأتي دور خبرة مختبرات الاندماج، التي باتت مديدة. فقد طوّرت المختبرات، التي شيّدت التّوكاماك، نماذج حاسوبيّةً تسمح بتكييف خصائص التّجارب المتوقّعة لقيود الميزانية، وتحدّد هذه النماذج التكاليف، فضلًا عن توقّع أوجه الأداء المنتظر؛ مما يسمح بعد ذلك بتسويات واقعيّة، ولم يفت المجتمع البحثيّ موازنة هذه النّماذج كافّة، وقد تبيّن اتّفاقها، سواء أكانت باليورو أم الين أم بالدّولار. كما توجد اليوم وسائل لتقويم التّكاليف في مرفق التّوكاماك (حتّى نسبة ١٥٪) على وجه الدّقّة، وذلك لكَم واسع من أوجه الأداء، وما أجري على صعيد التّجارب أجري أيضًا على صعيد مشروعات المفاعل، وكان الأهمّ تّأكيد نتائج طلبات العروض التي أطلقت لأكبر صناعيّي العالم، خلال تطوير مشروع عالميّ ضخم بحجم مشروع المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبيّ الدّولي أيتر ITER- لتقديرات البرامج الحاسوبيّة.

استنادًا إلى هذه القاعدة الرّاسخة، الّتي تحدّد ثمن النموذج التجريبيّ، نضفي نظريّة اقتصاديّة؛ لاستنتاج سعر المرفق لدى تصنيعه. ثمّة فرضيّات كوّنت هنا -بلا شكّ- وسيحتم ذلك تأكيد بعض البيانات عن طريق التجربة؛ كما ثمّة هامش للأخطاء دائمًا، إلّا أنّه يمكن استخلاص نتيجة يسيرة من كلّ ذلك، وهي أنّ تكلفة الكهرباء ربّما تكون في الحدّ الأدنى مما يعرف بالطّاقات المتجدّدة، مثل طاقة الرّياح، والطّاقة

الفلطائيــة الضّــوئية، إلــخ... تبعث بحــوث الاندماج الأمل في الوصــول في النّهاية إلى منتج ذي قيمة تجاريّة حقيقيّة، فهذا هو المنتظر والمؤكّد.

٢) التّكاليــف الخارجيّــة: لا تفــي الحســابات السّــابقة بمســألة التكاليف ذات الصّــلة بنشــاط مصــنع لإنتاج الطّاقة؛ فقد حدّد الباحثون منــذ زمن، وعلــى وجه الدّقــة، أوجه التّلوّث الناجم عن تشــغيل المصــنع؛ مما يســفر –حقًّا– عن تكاليف إضــافيّة. لمعالجة هذه المسألة، ينبغي أوّلًا تقويم انبعاثات الملوّثات، التي يمكن أن تحصــل في مختلف مراحل الإنتاج، بدءًا باســتخراج الوقود أو صــنع الإســمنت لتشــييد المفاعل، مرورًا بإنتاج الكهربــاء، وحتّى معالجة النفايات وهدم المصــنع. بعد ذلك ينبغي تحديد الآثــار البالغة التنوّع التــي يحدثها التلوّث في البيئة، وفي صــحة التجمّعات السّــكانيّة، وإن كانت تقيم بعيدًا عن مقرّ هذا النشــاط الصّــناعيّ. أخيرًا نصــل إلى المرحلة النهائية التي تنطوي على ترجمة التداعيات في كلّ هذه الآثــار، إلــى التّكلفة المترتّبة جرّاء ذلك، ونســب هــذه التكاليف إلى حجم الإنتــاج (كيلوواط ســاعي)، وهكذا يحدّد مــا يعرف بالتّكلفــة الخارجيّة للكيلوواط الســاعي؛ لأنّ هذه التّكلفة غالبًا ما تكون غير ذات صــلة بعمليّة التّبادل التي تربط منْتج الكهرباء بمستهلكها، وقد أُجريت في أنحاء العالم العديد من الأعمال الرّامية إلى تحديد هذه التكاليف الخارجية؛ ولا ســيّما دراســة أجراهــا في أوروبــا من عــام ١٩٩٣ إلــى ١٩٩٨ عشــرات الباحثين مــن مختلف الدّول، ومختلف شــركات إنتاج الطّاقة. تعرف هذه الدراســة بإكســترن إي ExternE، وهي الّتي اعتمدنا عليها –مرجعًا– هنا، ويسّــهل في هذا السّــياق تصوّر تنوّع نطاق الموضوعات التي ينبغي تناولها واتّساعه؛ لوضــع مختلف نظم إنتاج الطّاقة على قدم المســاواة، وكثيرًا ما تســتخدم نتائــج هذا التقرير في التقريرات والمذكّرات الرّســميّة؛ نظرًا لجودتها؛ إذ تعدّ الأكثر تســاوقًا واكتمالًا، وتجدر الإشارة أيضًا إلى توخّي هذه الدراسة أعلى معايير الشفافية؛ وذلك لتفادي الوقوع في جدال أيديولوجيّ عقيم.

يمكــن الآن تنــاول النتائج التي توصّــلنا إليها، بعد أن رســمنا المبادئ

العريضة للعمليّات الحسابيّة المتّبعة. تجدر الإشارة مجددًا، على سبيل الموازنة، إلى أنّ تكلفة الإنتاج الراهن لمصادر الطّاقة الأكثر ربحيّةً تساوي تقريبًا ٣٠ جزءًا في الألف من اليورو لكلّ كيلوواط ساعي، ويضاف إلى ذلك المقدار الأساسيّ التكاليف الخارجيّة؛ بحيث نحدّد تكلفة الإنتاج الفعلية، التي يضبطها في الأحوال جميعها مجمل التدبيرات المتنوّعة المتّخذة لمعالجة آثار التلوث، والرسوم الطبية، ورسوم التّرميم في مختلف مواطن التّدهور، إلخ...، ويمكن الخروج من هذه النتائج بقيمتين مميزّتين. ينطوي نظام إنتاج الكهرباء باستخدام الفحم على القدر الأعلى من التّكاليف الخارجية، تناهز بكثير ٢٠ جزءًا في الألف من اليورو للكيلوواط الساعي، وتعدّ هذه القيمة نمطيّةً بالنسبة إلى مصادر الطّاقة القائمة على الاحتراق. أمّا النظام الفلطائي الضوئيّ، الذي يسخّر الطّاقة الشمسية، فينطوي على تكاليف خارجيّة تزيد كثيرًا على الجزء من الألف من اليورو، وهذه قيمة نمطيّة أيضًا على صعيد مصادر الطّاقة المتجددة، إذا تجاهلنا التّكاليف المتّصلة بالتّخزين أو التّعويض عن أوقات اللّاإنتاج، وباستخدام حدود الحساب نفسها، تصل التّكاليف الخارجيّة المرتبطة بالاندماج إلى حوالى الجزء من الألف من اليورو للكيلوواط السّاعيّ.

تكرّر هذه النتيجة إذن بصورة أخرى المميّزات البيئيّة التي يتّسم بها الاندماج. التي عرضناها في الفقرة السّابقة، كما تظهر وجهًا آخر من أوجه تكلفة الطّاقة، ولإبراز هذا المفهوم بصورة أوضح، ولأنّنا في سياق أزمنة طويلة، نعود مجدّدًا إلى نزعتين مؤثّرتين لا شكّ في أنّهما ستوجّهان سوق الطّاقة في السنوات المقبلة. يمثّل ارتفاع أسعار المحروقات نتيجة استنزافها النّزعة الأولى التي لا يمكن تفاديها، التي ستمسّ المصادر الرّاهنة بصورة أو أخرى، إلّا أنّه لا يتوقّع أن تؤثّر في إنتاج الكهرباء، باستخدام الاندماج؛ لأنّه لا يعتمد على هذه المحروقات، وتتمثّل النزعة الثانية في تقنين الأنظمة وفرض الضرائب والإعانات المتعلقة بقطاع الطاقة؛ أيّ ميل واضح نحو تقليص التكاليف الخارجية، ودمجها في سعر

الكيلوواط السّاعي، وهذا توجّه مرغوب فيه، وسيتأكّد بلا شكّ. بيد أنّ أخذ التّكاليف البيئية بالحسبان لن يعوق تطور تقنية الاندماج، وذلك كما هو شأن ارتفاع أسعار المحروقات، بل على العكس.

على أيّ حال، لا ترمي هذه الحسابات الاقتصادية إلى وضع الاندماج في منافسة مع مصادر الطّاقة الأخرى المستخدمة أو المستقبليّة. مثل هذه المنافسة ضرب من العبث، ولا سيّما أنّ الاندماج لا يزال في مراحل التّطوير في الوقت الرّاهن، وإنّما ترمي إلى ضمان الاتّساق في هذه المساعي البحثيّة على الدّوام مع الهدف الرئيسيّ المحدّد لها: إيجاد مصدر للطاقة قابل للاستخدام الصناعيّ، وملائم للبيئة، ويعكف مجتمع الباحثين في نطاق الاندماج على تفعيل هذه النّتائج ذات الأهميّة البالغة.

٤- الموارد

كما مكّنتنا من الإجابة بصورة واضحة عن الأسئلة المختصّة بأمان الإنتاج وتكلفته، تتيح لنا نماذج مفاعل الاندماج الإجابة عن الأسئلة المختصّة بالموارد المطلوبة؛ لتطوير نظام إنتاج الطّاقة باستخدام الاندماج.

والحديث عن الموارد يحملنا لا إراديًّا على التفكير في الوقود اللازم للتّشغيل، بيد أنّ هذه ليست المسألة الجوهريّة. دعونا نتصوّرْ أوّلًا مفاعلًا يوقده الدّوتريوم وحده. مع أنّ استخدامه وحده هو أمر أكثر صعوبةً من استعمال مزيج الدّوتريوم والتّرتيوم، إلّا أنّ هذا التّصوّر الفرضيّ قابل –حقًّا– للبحث فيه. بمعنى آخر، في هذه الحالة، ولتوافر الدّوتريوم في مياه البحر الذي يمثّل مكوّنًا ضئيلًا جدًّا منها، فإنّ هذا يعود إلى استخراج ما يعادل، منْ كلّ ليتر من ماء البحر، مقدارًا مكافئًا من الطّاقة التي نستمدّها من ٣٠٠ لتر من النّفط، وعلى صعيد الوقاد، بحوزتنا على وفق هذا التصوّر «بئر نفطيّ» يعادل ٣٠٠ ضعف من أضعاف حجم مجمل المحيطات، التي لن يؤثر في مستواها استخراج الدّوتريوم. بالعودة إلى مزيج الدّوتريوم/التّرتيوم، على افتراض أنّه تستخرج هذه العناصر الأساسيّة، أي الدّوتريوم

والليثيوم، من مياه البحر، نصل إلى الاستنتاج نفسه.

لعلّ الأكثر إثارةً للاهتمام هنا، هو النظر إلى مسألة الموارد من زاوية الموادّ اللازمة لتشييد المفاعل، وقد لاحظْنا أنّ هيكل المفاعل معقّد إلى حدّ ما، وأنّه قائم على مواد ابتكاريّة؛ لذا فمن الطّبيعيّ التّساؤل بشأن مدى توافر هذه الموارد. الآن وقد طرحنا السّؤال الصحيح، ننظر مباشرة إلى خلاصة تقرير رسميّ كان الاتّحاد الأوروبي قد أمر بإعداده، وهي الخلاصة التّالية: لا صعوبة في التفكير في تشييد ١٠٠٠ مفاعل وتشغيله مدّة ١٠٠٠ عام. ما يهمّنا إذن من موضوع الموارد، و الموارد المطلوبة كافّة، هو أنّها لا تشكّل عائقًا لتطوير الاندماج بصفته مصدرًا لإنتاج الطاقة.

الفصل الثّاني

الجوانب التقنيّة

انصبّ اهتمامنا- في معظم ما سبق- على الصّعوبات المتعلّقة بفيزياء الوسط البلازميّ، وهذا أمر طبيعيّ؛ فهذا هو المحور الأصليّ الذي تطرح فيه الأسئلة الرئيسة، وهنا الحاجة إلى الخروج بإجابات مبتكرة قدر الإمكان. هل يعني ذلك أنّنا لو نجحنا في معالجة هذه المسائل كافّة لما انطوى تطوير الاندماج -مصدرًا للطاقة- على أيّ تحدّيات؟ الأمر ليس كذلك -حقًّا- ويكفي للاقتناع بذلك مراجعة رحلة التطوّر من الاكتشاف إلى الاستخدام الصّناعي في العديد من المجالات المعروفة لدينا. فقد تطلّب على سبيل المثال تحويل عبور المحيط الأطلسيّ، الذي أنجزه الطّيار الرائد ليندبرغ، إلى رحلة مباشرة من نيويورك إلى باريس كما هي اليوم، العديد من الابتكارات التقنية المتنوّعة، وهي لا تقتصر على هذا الفرع المختصّ من الفيزياء المتمثّل في الدّيناميكا الهوائية، وموادّ جديدة، وإلكترونيّات الطّائرات، والتّجهيز بالمحرّكات.. سنحت أوجه التقدّم التقنيّ في هذه المجالات والعديد من المجالات الأخرى لتطوير الطيران التجاري بصورة فعليّة، وكذلك الأمر بالنسبة إلى الاندماج. الجدير بالذكر أنّه حين استعان مجتمع باحثيّ الاندماج بلجان الخبراء؛ للحصول على آراء خارجيّة بشأن أعمالهم، أكّد خبراء الصّناعة في هذه اللجان ضرورة المبادرة، بأسرع وقت ممكن، بمثل هذا التّطور التقنيّ، الذي يتوقّف عليه مستقبل الاندماج بصفته مصدرًا للطاقة.

ولمحاولة توقّع هذه التطوّرات التقنيّة الضروريّة، ولإلقاء بعض الضّوء على الأسئلة ذات الأهميّة، سنقف على نظامي الاندماج: اندماج الحصر العطالي و اندماج الحصر المغناطيسي، دون النظر إلى الفيزياء، وبتثبيت الاهتمام بأوْجه التّقنية المختصّة بكلّ نظام، وقد أسهمت الدّراسات المختصّة بمفاعلات الاندماج- وهي دراسات مستقبليّة- في توضيح بعض المفاهيم الأساسيّة التي ينتظر إحراز تقدّم فيها، وقد ارتسمت العقبات الرئيسة التي يجب تذليلها، وسنحرص، لكلّ من أوجه التّقنية محلّ الدراسة، على إيضاح التحدّي الرئيس، قبل إلقاء نظرة سريعة على ما وصلت إليه مساعي البحث الرّاهنة.

١. اندماج الحصر العُطالي

بالنّظر إلى مكوّناتها الأساسية، يتكوّن المفاعل الذي يعمل على مبدأ الحصر العطالي من غرفة نرمي فيها هدفًا مشتعلًا في أثناء طيرانه بمتجه طاقة. فيما يلي فحص لكلّ من هذه المكوّنات الثلاثة الرئيسة.

١.١ الغرفة

هي مقرّ عملية إنتاج طاقة هائلة، موجزة ودوريّة، هي من الإيجاز بحيث يمكن موازنة آليّة تحرير الطّاقة مع انفجار. تحديدًا، علينا حصر سلسلة من الانفجارات تتراوح من ٥ إلى ١٠ انفجارات صغيرة في الثّانية، يوافق كلّ منها استخدام مئة كيلو غرام من موادّ متفجّرة. ينبغي إذن وقاية الغرفة ممّا ينبعث بعنف خلال لحظات الاشتعال الفائقة السرعة من أشعّة سينية ونترونات وحطام الهدف، علمًا أنه تمتصّ الأشعّة السينية، بخاصّة في سمْك مادة البناء المحدود، وممّا تحدث شدّة هذه الأشعة من تطاير سطحيّ للجسم الذي تصادفه هذه الأشعة. الجدير بالذكر أنّ هذا التأكّل هو وجه الصّعوبة الأكبر، إذ يقدّر بأقل من ١μm لكلّ هدف محترق.

يجري في الوقت الرّاهن البحث في سبيلَيْن؛ لتجنيب الغرفة الآثار الأسوأ النّاجمة عن انبعاث الأشعّة السّينية على هذا النّحو العنيف. ينطوي الأوّل على تسييل سائل أو كلل بصورة مستمرّة، ستتطاير جزئيًّا -بلا شكّ- لكنّها ستتجدّد كذلك باستمرار، وهو الحلّ الذي يعرف بحلّ «الجدار السّائل»، وإذا اتّسم هذا الجدار بالسّمْك الكافي، أمن الوقاية النّترونية اللّازمة للغرفة؛ ذلك أنّ تطيير المواد الواقية يلزم، بضمان، تنظيف الغلاف الجويّ في الغرفة قبل الرّمي التالي؛ أيّ خلال زمن بمقدار عشْر الثّانية.

يتمثّل السّبيل الثاني لحماية جدار الغرفة الداخلي في تمديد تأثير الأشعّة السينيّة في الزمن، وذلك على وفق المبدأ التالي: نحافظ في الغرفة باستمرار على ضغط غاز يختار بدقّة (الزّينون، الكريبتون)؛ ليؤدّي من خلال الامتصاص وإعادة الإرسال دور الكابح؛ إذ يبسط هذا الغاز خلال هذا الزمن رأس تدفّق الأشعّة السّينية التي يستقبلها الجدار؛ إذ يقلّل من مقدار هذه الأشعّة اللحظي، ونتجنّب بذلك ظاهرة التّطيير، ويمكن ترك الجدار عاريًا، إلّا أنّ جدار الغرفة في

هذه الحالة عرّضة لدفق النّترونات دون تخفيف؛ لذا ينبغي التّرتيب لاستبداله عدّة مرات خلال حياة المفاعل. الجدير بالذكر أنّ مبدأ الحماية بغلاف جويّ غازيّ ليس مبدأً عامًّا؛ فهو يفترض عدم إثارة هذا الغلاف الجويّ لأيّ اضطراب على انتشار الحزم في اتّجاه الهدف، وهذا لا يحدث إلّا إذا كان متّجه الطّاقة من أشعّة الليزر.

٢. الهدف

تمثّل كرة صغيرة مجوّفة ذات قطر من ٢ إلى ٣ مم. الهدف الذي سيتعرّض للقصف في الاندماج بالحصر العطالي، وهي مكوّنة من طبقة من الدّوتريوم والتّرتيوم الصّلب ينبغي الحفاظ عليها بدرجات حرارة منخفضة. ربّما تكون هذه الكلة معلّقة (أو لا) داخل علبة أسطوانية تسمّى «هولروم[٧]» holhraum ذات قطر يعادل حوالى ضعْف قطر الكلة، وينبغي توخّي الدّقة الشديدة في صناعة كلة الوقود والهولروم وتجميعها.

تستخدم في التّجارب الرّاهنة أقلّ من عشرة أهداف في اليوم؛ إذ تدّخل هذه الأهداف يدويًّا في الغرفة، فإمّا أن تكون على داعم أو معلّقة بخيوط دقيقة جدًّا، ومن شأن المفاعل أن يستهلك أقلّ قليلًا من مليون هدف في اليوم؛ بحيث تدّخل آليًّا بوتيرة ١٠/ث كما ذكرنا سابقًا، في غرفة تزيد فيها درجة الحرارة على٥٠٠ درجة مئوية؛ لذا يجب أن يكون الإنتاج على قدْر كبير، وأن يحقن بسرعة بالغة لتجنّب الارتفاع في حرارة هذه الأهداف الباردة جدًّا، أكثر من درجة مئويّة واحدة، خلال رحلتها عبر الغطاء ومن ثمّ داخل الغرفة.

هناك شرط اقتصاديّ صارم ينبغي إضافته لهذه الشروط الفيزيائية الثابتة، ذلك أنّ بموازنة ثمن بيع الطّاقة المنتجة من قبل هدف ما مع سعْر تكلفة هذا الهدف، يتبيّن أنّه لا ينبغي أن يزيد سعر التكلفة على نصف دولار أمريكيّ، إلّا أنّ دراسات أمريكيّة بيّنت أنّ تكلفة صنع هذا المكوّن البالغ الدّقة أقرب في الواقع إلى ٢٠٠٠ دولار للكلة الواحدة. ثمّة حاجة إذن إلى إحراز تقدّم كبير، وينبغي الانصراف عن وسائل الإنتاج الرّاهنة لصالح تقنيات صناعيّة ينبغي ابتكارها.

إنّ التحدّيات التي عرضناها، فيما سبق، هي تحدّيات جليّة، وقد بدأ البحث –حقًّا– عن حلول لمعالجتها؛ فقد نشرت دراسات مفصّلة بخصوص المسائل المتعلّقة بحقن الأهداف، وقد حيكت المقاومة الميكانيكيّة للهدف في

أثناء التّسريع، خلال مرحلة القذف والسّلوك الحراريّ، خلال مرحلة الانتشار بصورة دقيقة، وقد طرحت بضعة مقترحات بشأن أسعار التصنيع وتكلفته، إلّا أنّ المساعي لتطوير وسائل تقنيّة موافقة لهذه المقترحات لا تزال متواضعة جدًّا.

٣. متجه الطاقة

آثرنا هنا استخدام مصطلح «متجه طاقة» على مصطلح «ليزر»؛ لأنّ هذا الأخير، كما سيتبيّن لاحقًا، ليس الوسيلة الوحيدة المتصوّرة في المفاعل لضمان انضغاط الأهداف وتسخينها. لمتطوّر أجهزة اللّيزر الرّاهنة بغية خدمة المفاعل –حقًّا–؛ لذا لا عجب في كون عدد من خصائص الليزر غير موائم لإنتاج الطاقة. بيد أنّه نظرًا لكون أجهزة الليزر الراهنة أو المستقبلية هي أقوى المعدّات التي ابتكرت؛ فهي مثل مرجع يعيننا على تقدير أهميّة التقدم الذي ينبغي تحقيقه.

لنعدْ مجدّدًا إلى مسألة المفاعل؛ لعرضها هذه المرّة في سياق الاحتمالات التي تتيحها أنواع الليزر القائمة؛ فجهاز ليزر قويّ لا يسمح إلّا بالقصف بضع مرات باليوم، في حين يحتاج المفاعل إلى ٥–١٠ أدوار قصف في الثانية؛ أيْ ٥٠٠،٠٠٠ دور قصف يوميًّا، ودون الرجوع مجددًّا إلى البيانات المختصّة بالأهداف، تجدر الإشارة إلى أنّ تقنيات الليزر هي التي تحدّ من أسعار الرّمي في الوقت الراهن.

هناك سمة أخرى ذات أهمية، وهي المردود؛ أيْ مقدار الطّاقة التي نجدها على الهدف، والمضافة إلى الطاقة التي حقنّاها في الليزر بأخذها من الشبكة الكهربائية. لا يصل المردود في الوقت الراهن إلى ١٪، في حين يحتاج المفاعل من ١٠ إلى ٣٠٪ على الأقلّ. إضافة إلى ذلك، يمكن إضافة سمتين أخريَيْن للّيزر هنا، مثل عدد جولات القصف الممكنة بغير صيانة (١٠٠ مليون للمفاعل، مقابل بضع مئات في التّجارب الراهنة)، ولعلّ النتيجة الناجمة عن هذه الملحوظات هي ضرورة الانصراف عن المبدأ نفسه الذي تعمل به أجهزة الليزر الراهنة، التي تعتمد على الزجاج المنشّط والومضات.

في ضوء ما سبق، ينبثق مساران بحثيّان في الوقت الراهن لابتكار متّجه الطاقة المستقبليّ؛ إمّا إعادة تشييد نظام الليزر برمّته، أو الانتقال إلى تقنية أخرى تمامًا، بالتوجّه إلى استخدام الموجهات. من تقنية الليزر إلى تقنية الليزر الإكسيمر، مرورًا بالليزر الصّلب ذي الثنائيّات، ثمّة احتمالات عديدة لاتّباع نظام

الليـزر، وهـي احتمالات تبْحث بدقّة، إلّا أنّنا سـنقف عند المسـار الثانيّ المختصّ بمعجلات الأيونات؛ لأنّه يبدو المسار الواعد.

لـدى البحـث عن حُزم قـادرة على تسـليم مقادير كبيرة مـن الطاقة خلال مـدة وجيزة، من الطبيعيّ أن ننظر إلى حزم الجُسـيمات التي تولّدها المعجلات، مع العلم أنّ هذه الحزم لا تقصـف الهدف بصـورة مباشرة، بل تستهدف الغرفة الجوفاء «الهولروم»، ويقوم هذا الأخير بدور المحوّل العكسيّ، محوّلًا طاقة الحزم إلى حزْمة من الأشـعة السّـينيّة التي تسمح بانضـغاط كلة الوقود. في ضوء ذلك، ينطوي استخدام معجلات الأيونات على مميّزات عديدة، ولا سيّما أن الخصائص الرئيسـة التي تعوق اسـتخدام أنظمة الليزر الراهنة تضـمحل تلقائيًّا؛ إذ يسـهل تحقيـق الاحتراق عشـر مرات في الثانية، وقد يصـل مردود طاقـة المعجلات إلى نسبة ٤٠٪، فضلًا عن تمتّع هذا النّوع من المعدات بموثوقيّة مرضيّ عنها في سياق تطبيقـات الطّاقة التي نبحث فيهـا. بيد أنّ ثمّة حاجةً إلى المزيـد من التقدّم؛ إذ لا بـدّ –أوّلًا– من التأكّد من فعالية اسـتخدام هـدف ذي غرفة جوفاء، وهذا من الأمور التي سـتعكف عليها أكبر نظم الليزر قيد التّشـييد. كذلك ما زلنا بانتظار التطوّر في ميدان المعجلات، وبخاصّة أنّها لا تستخدم في الوقت الراهن في ميدان يخْدم اندماج الحصـر العطالي. ينبغي الحفاظ على القدرة العالية على التجميع المتوافـرة لدينا اليوم، مـع التمكّن من الحزم الأكثر كثافةً، التي يكون كلّ جُسـيم فيها أقلّ طاقةً. كما تسعى البحوث الراهنة إلى إثبات مبادئ المعجلات ذات التيّار القويّ، التي تعد بتطبيقات ربّما لا تقتصـر على ميدان اندماج الحصر العطالي، ويؤمّل أخيرًا في هذا المجال تحقيق انخفاض ملموس في تكاليف التّصنيع.

ثمّة آفاق حقيقيّة واعدة أمامنا، وربّما توجد مسوّغات منطقية لتفضيل تقنية على أخرى، إلّا أنّ الشّـكوك التي تحيط بالحلـول المختلفة تحول دون تمكّننا حتّى الآن من ترجيح خيارات جذريّة على أخرى.

٢. اندماج الحصر المغناطيسيّ

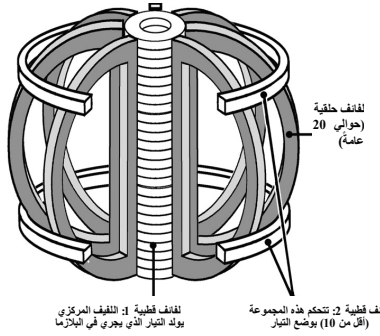
للبحث في الجوانب التقنيّة المختصّة باندماج الحصر المغناطيسي، نقف عند ٣ مجالات رئيسـة: ابتكار لفائف الحقل المغناطيسـي وتصـنيعه، وتقنية المكوّنات المواجهة للبلازما، والتحكّم عن بعْد بمختلف عناصر المفاعل.

١. اللفائف

يستدعي تشغيل مفاعل الاندماج بالحصر المغناطيسي (توكاماك) وجود لفيفتين لتوليد المجالات المغناطيسيّة المنتظرة: نسمّي هذه اللّفائف أحجار المغناطيس.

تضمن المجموعة الأولى من اللّفائف الرأسيّة المجال الحلقيّ الثابت، وتعرف هذه اللّفائف باللّفائف الحلقيّة. تعدّ مجموعة ثانية من اللّفائف على مستويات أفقية هذه مرة، متمّمة بذلك إعداد النظام المغناطيسي؛ لتضمن -بتوليدها حقلاً متغيّرًا- خلْق التّيار السّاري في البلازما وإعالته وضبطه. هذا ما يعرف بالحقل واللّفائف.

هذا وتفرض فيزياء الحصر، بفعل قوانين المقادير، حجم البلازما الذي ينبغي الحصول عليه، إضافة إلى قيمة المجال الحلقي، وقيمة التيار المتحرّك في البلازما. تظهر هذه البيانات الرئيسة مدى كبر لفائف المفاعل؛ إذ يبلغ ارتفاع اللّفائف الحلقية أكثر من ١٠ أمتار، في حين يصل قطْر اللّفائف القطبية الكبرى إلى ٢٠ م، وإذا نظرنا بعين الاعتبار إلى قيم المجال المغناطيسي الذي ينبغي توليده، تبيّن أنّه يتعذّر صنعها بموادّ عادية، مثل النحاس، خشية استهلاك قسط مفرط من الطاقة التي يولدها المفاعل، وينبغي أن تكون هذه اللّفائف كافّة ذات موصليّة فائقة؛ الأمر الذي يجنّب استهلاك الكهرباء، لكنه يسفر عن قيود لا يستهان بها.



رسم توضيحي ٧. الإعداد المغناطيسي للتوكاماك

لتحقيق الموصلية الفائقة، ينبغي صنع السلك الذي نكوّن به الملف بمادّة فريدة من نوعها، وأن يسْتخدم في درجات حرارة منخفضة؛ لذا ينبغي حفظ السلك عند بضع درجات من حرارة مطلقة (-٢٧٠ °م) بتدوير الهيليوم السائل. الجدير بالذّكر أنّ فكرة استخدام السلك كانت لتقليل الحرارة الناجمة عن المجالات المتغيرة المختصّة بالتّوكاماك؛ فالملف المصنوع بهذا السلك يوضع في الخلاء؛ لتجنّب توصيل الحرارة من المحيط، لكنّه محميّ من الإشعاع بواسطة شاشات مبرّدة. أخيرًا ، كانت الغاية من غطاء المفاعل هي الحدّ من دفّق النّترونات وطاقتها التي ربّما تصل إلى اللّفائف.

هي معدّات جسيمة بلا شكّ، ولا غرابة في كونها خاضعةً أيضًا لتأثيرات عظيمة؛ إذ تنجم عن التّيارات والمجالات المغناطيسية المستعملة جهود غامرة تصل إلى آلاف الأطنان. إضافة إلى ذلك، تجدر الإشارة إلى كون المادة الفائقة الموصليّة هشة، وعرّضة لفقدان خصائص الموصليّة حال تعرّضت لضغط مفرط. تفاديًا لهذا المعوّق الجلل، لن تتكوّن اللّفائف بلفّ يسير لعدّة طبقات، بل على العكس، ولضمان توزّع الجهْد بالتّساوي، يغْمد معدّ للسلك، بحيث يكون هذا الأخير موضوعًا ومثبّتًا في حزوز محفورة بعمق ألواح التّعزيز. إنّ لفائف كهذه هي معدّات ميكانيكيّة دقيقة تتطلّب جهودًا بالغةً عند تصنيعها، وهي عمليّة معقّدة إلى حدّ ما

انطلاقًا ممّا ذكر للتوّ، ودون البحث -مزيدًا- في هذا الموضوع، يسهل الخروج باستنتاج أخير: وهو أنّ اللّفائف المغناطيسية مكْلفة، وينبغي أن تكون مضمونة مدى حياة المفاعل، ولا سيّما فيما يتعلّق باللّفائف الحلقية التي من شأن استبدالها أن يتسبّب في انقطاع خطير في عمل المفاعل، وتتّخذ إجراءات عديدة، ويراقب عمل كلّ اللّفائف عن كثب، ويشغل أيّ حدث عرضيّ- مهما صغر- نظام حمايةٍ كاملًا ذا وسائل معروفة؛ نظرًا لاستخدامها مع اللّفائف الراهنة. مع ذلك، يضاعف شرط الموثوقيّة الحاجة إلى التمكّن التامّ من عمليات التصنيع.

نتأمّل هنا -كما فعلنا سابقًا- ما اكْتسب حتّى الآن، وآفاق المستقبل. أوّلًا، يعدّ استخدام الموصليّة الفائقة في المرافق الصغيرة (مثل أجهزة التصوير الطبيّ) من الممارسات الصناعية الراهنة، وقد شيّدت بالفعل أجهزة باستخدام لفائف كبيرة فائقة الموصلية في إطار المختبرات البحثيّة (معجلات الجُسيمات)،

وهي شـائعة الاسـتخدام. بيد أنّ الأهمّ هـو أنّ توكاماكتور-سـوبرا (كاداراش) يعمل منذ أكثر من عشـرة أعوام باسـتخدام لفائف حلقيّة فائقة السرعة، إلّا أنّ هـذه التدبيرات كلّهـا لا تكفي لتلبية متطلّبـات المفاعل، وحتّى في إطار المشـروع الدوليّ الذي سنعود لاحقًا للحديث عنه، شيّدت مخطّطات واختبرت؛ للتأكّد من وسـائل التّصنيع، وضـمان أوجه أداء اللّفائف التي ستصـنع في المستقبل، وفيما يلي الخصـائص الرئيسـة التي تحقق منهـا (على نطاق واسـع أحيانًا): المجال المغناطيسـيّ الأقصـى، والتيار الأقصـى، والاسـتعمال في مجـال متغيّر، وحفظ المجهود، وقد أجريت ١٠،٠٠٠ دورة لاختبار السّـلوك في حالة الإجهاد، وفي ضوء ذلك، من المتوقّع التمكّن من المبادرة الواثقة بتشييد لفائف فائقة الموصليّة يرجّح أن تتفوّق على الإنجازات الرّاهنة.

٢. المكوّنات المواجهة للبلازما

بالابتعاد عن البلازما، نجتاز حيّزًا منخفض الضـغط، وصـولًا بالضّـرورة إلى سـطح صـلب. هذا السّـطح الصّـلب هو في الواقع طرف عدد مـن المكوّنات المتنوّعـة المتراوحة مـن الطّبقة الواقية اليسـيرة إلى هوائيات التّسـخين العالية التردّد، مرورًا بالمرمد المخصّـص لجمع الهيليوم المنتج في قلب البلازما (محوّل divertor). تمثل كلّ هذه الأشياء «المكوّنات المواجهة للبلازما» التي ينبغي التعامل معها بطريقة واحدة، ولا سـيّما أنّها تشـترك في ظرف واحد، بغية الحصول على واجهة جيّدة بين البلازما والجدار. تجدر الإشارة هنا إلى أهميّة الإدارة الناجعة لهـذه الواجهة البينيّة، التي يعزى إليها قدر كبير من أوجه التقدّم المحْرز، وذلك حتّى آونة أخيرة على صعيد التمديد في زمن حصر الطاقة.

قبل الخوض في الحلول المتّبعة، يجدر الوقوف عند التحديات التي تعترضنا. تبعـث البلازما جُسـيمات متفاوتة الطّاقة وأشـعّة متنوّعة نحو الجـدار، وينبغي السّـيطرة علـى آثـار هذه الأشـعّة، فكما سـبقت الإشـارة إليه، ينبغـي أن تبقى البلازمـا حرّة مـن أيّ ملوّث ناجم عن الجـدار. هناك- تحديـدًا- أربع ظواهر ملاحظةً، ومن المتوقّع حدوثها:

- يمكـن أن يمتصّ الجـدار كمّيات كبـيرة من المـواد الغازيّة التـي تبعثها البلازمـا: وهذا أمر مضـايق في حـدّ ذاته، لكنّ الأهم من ذلـك أنه ينطوي على خطر إفساح المجال لتسريب غير متوقّع، وربّما يكون خطيرًا.

– ربّما يتعرّض الجدار للتآكل؛ بفعل الجُسيمات السريعة المصطدمة به. ترسل هذه الصّدمات عندئذ كمّيات صغيرة من الموادّ التي من شأنها تبريد قلب المفاعل على نحو ضارّ.

– ربّما يسخّن الجدار على نحو كبير؛ إثر الاصطدام بقدر هائل من الطاقة، حتّى يتبخّر محليًّا.

– ربّما يتفاعل الجدار تفاعلًا كيميائيًّا مع الدوتريوم والترتيوم المتوافرين؛ مما يسفر عن تكوين هيدروكربونات ستتفكّك فور ملامسة البلازما، وتلويثها.

قد يتعذّر علينا فهم هذه الظّواهر بتفصيلاتها كافّة دائمًا، إلّا أنّها ظواهر تعرّفنا إليها منذ زمن بعيد. ينبغي هنا التذكير بأنّ البلازما لا تزن سوى غرام واحد، وأنّ وجود أقلّ من ١٪ من الذّرات غير المرغوب فيها ربّما يسفر عن انخفاض درجة الحرارة على نحو خطير، في الوقت الذي يتعرّض فيه الجدار لتدفّقات الطّاقة تصل قيمتها وتزيد على ٢٠ ميغاواط في المتر المربّع. يمكن موازنة هذه القيمة الأخيرة مع تدفّق الطّاقة على سطح الشمس، وعلى صعيد الأرض، تعادل هذه القيمة مئتي ضعف من الحرارة الناجمة عن صفيحة واحدة من صفائح فرن كهربائيّ.

تناولت الأعمال التقنية المختصّة بهذه الموضوعات خيار الموادّ المناسبة، والآليّات التي تضمن تبريد القطع المعرّضة لهذه الظروف القاسية، وقد أظهرت التّجارب كذلك الحاجة إلى تطوير وسائل للتحكّم؛ تتيح تأهيل الأشياء المنتجة، وبات من المستطاع بعد التوصّل إلى النتائج الحديثة، تصنيع مكوّنات قادرة على العمل بصورة طبيعيّة، وبالرغم من أوجه التدفّق التي ذكرناها آنفًا، والقادرة أيضًا على مقاومة الإجهاد الناجم عن تتالي الدّورات التي تناوب مرحلة تسخين ومرحلة تبريد، وبفضل هذا النّجاح التقني، يمكن البدء بتجارب على المعدّات الراهنة تتناول المبادئ الفيزيائيّة، والنتائج التقنيّة للأوساط البلازميّة الطّويلة الأمد.

تمهّد مثل هذه النتائج ذات الأهمية البالغة في حدّ ذاتها، السّبيل أمام تجارب مستقبليّة؛ إذ لا يمكن اعتبارها في أيّ حال بأنّها تقدّم حلولًا نهائيّة، ولم يقتصر طرح مسألة عمل البلازما بصورة جيّدة، وتأمين مدّة حياة ملائمة للمكوّنات المحيطة، على الخبراء التقنيين فقط، لأنّ الشروط التي ينبغي تحقيقها

هي ظروف قصوى. تقيم الفيزياء الحدود المفروضة على التقنية، لكنّها تستطيع تخفيفها أيضًا، فنحن بصدد مشكلة متعلّقة بالواجهة البينيّة، وثمّة ابتكارات منتظرة من البحث في الفيزياء من شأنها أن تعالج مثل هذه الصّعوبات التي تظهر في النقاط الحرجة بصورة فضلى. ربّما لا ينطوي الجدار الأوّل في مجمله على صعوبات لا يمكن تذليلها، لكنّ المحوّل في حدّ ذاته شأن بحث بالغ الأهمية، يجتمع فيه الجسم الصّلب بالوسط البلازمي، الأمر الذي يجعله موضوعًا لا يخلو من التّعقيد.

٣. التحكّم عن بُعد

نجد في غرفة البلازما أجسامًا مختلفة سبق وأن صادفناها: مكوّنات الغطاء، وهوائيّات التّسخين العالية التردّد، إلخ... تتطلّب جميعها أعمال صيانة، ولا بدّ من اللّجوء إلى التحكّم عن بُعد للتدخّل بباطن الغرفة؛ ذلك أنّه حين تكون الآلة في حالة توقّف، يكون حجم أشعّة غاما بداخل الغرفة أعظم من إمكانيّة المبادرة بأيّ حلّ آخر. أشعّة الغاما ناجمة عن الإشعاع النترونيّ الذي تتعرّض لهذه المكونات كافّة في أثناء عمل المفاعل؛ لذا يعدّ التحكم عن بُعد جزءًا لا يتجزّأ عن المرفق. لا بدّ هنا من توضيح أمرين أساسيين متعلّقين بظروف استعمال التحكّم عن بعد. أوّلًا: لا يخصّ التحكّم عن بعد عمليّات الآلة كافّة؛ إذ ثمّة أجزاء لا يصلها الإشعاع، ويمكن بعد ذلك النّفاذ إليها بعد اضمحلال البلازما بقليل. ثانيًا: إذا تحكّمْنا بالمكوّنات المعرّضة للإشعاع أو الملوّثة بالتّرتيوم، ينبغي أن تتوافر لدينا في مكان قريب من المفاعل «خلايا حارّة»، بحيث تُنقل وتعالج جميعًا. كما تجري في هذه الخلايا أيضًا عمليّات بالتحكّم عن بعد، إلا أنّها تتمّ عن ممارسات أقلّ حداثة من تلك العاملة في الغرفة؛ فهي عمليّات تقليديّة.

تظهر عمليّات التحكم عن بعد، التي تنفّذ في غرفة مفاعل الاندماج، عددًا من الخصائص المشتركة؛ فالبيئة التي تجري فيها هذه العمليات هي بيئة نموذجية للاندماج؛ إذ تكون أشعّة غاما أكثر شدّة منها في الورشات السّاخنة الأخرى، ومن ثم يعرّض التدخّل في الغرفة لمرّات عديدة؛ نظرًا لتعقيد العمليات، المكوّنات كافّة لجرعات كبيرة منها. كما أنّ أشعّة غاما ليس العنصر الوحيد الذي ينبغي اعتباره؛ إذ ينبغي أن تعمل بعض الأدوات —وبخاصّة معدّات التفتيش– في حيّز مفرغ الهواء، وبوجود حقل مغناطيسيّ، وبصورة عامّة، تفرض الطارة

التي نستخدم فيها أدوات التحكم عن بعد هندسة غير عمليّة، يكون النّفاذ إليها شاقًّا إلى حدّ ما. أخيرًا: كثيرًا ما تكون القطع ثقيلة، وينبغي التحكّم فيها، في ظلّ اختلافات كبيرة في المحاذاة، ومع توخّي منتهى الدّقة، ولا سيّما أنّ النشاط الميكانيكيّ هنا محدود.

توقّع باحثو الاندماج هذه القيود منذ زمن، عاكفين على تناول هذا الموضوع من خلال العمل أوّلًا على الجوانب التي لا تتوقّف على مشروع محدّد فقط؛ لذا كان -ولا يزال- البحث المنهجيّ يتناول جسوء المكوّنات؛ أي تعزيز قدرتها على العمل في الظّروف القاسية التي وصفناها آنفًا؛ إذ تتناول هذه الأعمال البحثية المحرّكات، وأوامر التحكّم من الجانب الإلكتروني، وبصريّات أنظمة المعاينة، إلخ... وهكذا تصوّر الباحثون وابتكروا أنظمةً تؤدي وظائف عامّة جدًّا، مثل نقل الصّور الواردة من داخل الطارة، وقصّ أداة متحرّكة في داخله أنبوبًا وتلحيمه وفحصه، كما درست أجهزة كبيرة؛ ذراع التحكّم من بعد أو السّكك الناقلة القادرة على حمل أدوات تدخل متنوعة. أخيرًا، قام الباحثون بعملية فك وتركيب كاملة عن بعد للمحول فيها جيت «JET» - التجربة الرائدة التي سبق ذكرها.

بعيدًا من الاعتبارات المتعلّقة بتقانة الصّيانة في سياق التشغيل من بعد، يبقى السؤال المطروح، والأكثر عموميّة، هو المختصّ بمدى توافر المفاعل؛ فالعمليّات محلّ اهتمامنا، هي بطبيعتها عمليّات تتمّ في وسط معرّض للإشعاع؛ لذا فهي تستدعي اتّخاذ احتياطات كبيرة وإجراءات احترازية عديدة. كما تجدر الإشارة إلى القيود الناجمة عن اللجوء إلى التشغيل عن بعد، الذي يمكننا من إجراء كلّ هذه العمليات. فالمدّة الزمنيّة التي تستغرقها هذه العمليات من الجوانب المهمّة في التّكلفة الاقتصاديّة الإجماليّة المختصّة بمفاعل الاندماج، ويرصد اليوم الزّمن الذي تستغرقه كلّ عملية بدقّة متناهية، ولا يدّخر جهد لتقليص هذا الزمن قدْر المستطاع، ويراعي التفكير والبحث المختصّ بالمفاعلات هذا الجانب تحديدًا منذ مرحلة التصوّر؛ لتسهيل عمليات الصّيانة المنتظرة لاحقًا، وعلى كل حال، يتحقّق من هذه العمليات على صعيد المخطّط، قبل تشييد المفاعل؛ ذلك أنّ عمليات التناول «في جو بارد» هي الطريقة الفضلى للتخلّص من مواطن القصور كافّة، التي نواجهها لدى تشغيل كلّ هذه الأنظمة التي لا تزال نماذج تجريبيّة.

بالتفكير فيما يتعلّق بالمكوّنات المواجهة للبلازما، وجد الباحثون أيضًا أنّه

بصـرف النظر عن الزمن الذي ربّما تستغرقه كلّ عملية بالتحديد، لا يزال مدى تكـرّر هذه العمليّات أمرًا لا يعتريه اليقين، وهنا تكون موثوقيّة المفاعل، ربّما أكثر من غيرها، سـمة أساسية، ووحدها الممارسـة الحقيقية باستخدام مفاعل أوّلي ذي حجم مناسب ستمكّننا فعليًّا من تقويم مجمل هذه الوسائل.

في ختـام هذا المرور السّـريع على موضـوعات بالغـة التنـوّع، تظلّلها تقنية الاندماج، يتعذّر اسـتنتاج خلاصة وحيدة، بيد أنّه ربّما يكون من المجْدي الخروج بانطبـاع متعلّـق بحقيقة باتـت جليّة: عديدة هـي ميادين التقنيـة، ولا يزال ثمّة الكثير من العمل الذي ينبغي إنجازه.

الفصل الثالث

مستقبل البحث في طاقة الاندماج

ألقت الفقرات السابقة الضوء على مسألة الاندماج كما تطرح في المختبرات، بحيث يمكن تصوّر الصعوبات التي تواجه الباحثين، وتفسير النتائج التي توصّل إليها، وتقدير مدى تقدّم الجهود البحثية. فيما يلي، نتّخذ سياقًا مختلفًا لتناول هذا الموضوع، في محاولة للإجابة عن الأسئلة المنطقيّة التي قد تتبادر في المختبرات. سيكون الحرص هنا على مراعاة وجهة نظر المجتمع عمومًا، وصانع القرار، بل و وجهة نظر دافع الضّرائب مباشرة؛ إذ قد يتساءل كلٌّ منهم عن الجدوى من دعم هذه المساعي البحثيّة.

لطالما كان البحث المختصّ بالاندماج النوويّ الحراريّ المراقب بحثًا هادفًا، وإن كنّا نهتمّ في هذا النوع من الأعمال بفهم الآليّات الفيزيائية المؤثّرة، ليس من منظور اكتساب المعرفة بصورة مجرّدة؛ فالغاية من هذا البحث لم تتغيّر قط، ألا وهي إنتاج الطاقة -أي الطّاقة التجاريّة- ولا شكّ في إسهام الاندماج المحدّدة في إثراء العلم، والمستمرّة على الصعيد النظريّ والتجريبيّ، ووسائل التشخيص، أو حتّى التقنية. بالرغم من ذلك، وعند اتّخاذ قرار مثل قرار الاحتفاظ بمنظومة بحثيّة، يبقى إنتاج الطاقة، كما كان، العامل المقرّر الحاسم.

المراد من هذه الملاحظة المبدئية هو التذكير بالغاية النهائيّة لكلّ بحث مختصّ بالاندماج، والمنظور الذي ينبغي تقويم هذه الأعمال البحثية من خلاله، ولا بدّ من أن يشوب الشكّ التوقّعات، إلّا أنّ على مختبرات البحث في الاندماج الإجابة دومًا عن أربعة أسئلة جوهرية وإن بدت يسيرة:

- هل ثمّة فائدة للمجتمع من إنتاج الطّاقة بوساطة الاندماج؟
- ما السّبيل المنطقيّ لبلوغ هذه الغاية؟
- ما أولى الخطوات نحو التزام ملموس اليوم؟
- ما البيئة المناسبة لضمان تصنيعها؟

نجيب فيما يلي عن كلّ من هذه الأسئلة على التوالي:

١. التعطّش إلى الطاقة

لا جدوى من الوقوف مجدّدًا على مستقبل هذا الكوكب في سياق الطّاقة؛ فقد استعرض هذا الموضوع بصورة مستفيضة، وهو عمومًا من الموضوعات المعروفة، وإن تسبّب جدال ما بين الحين والآخر في التشويش على هذا النقاش. بيْد أنّ المراد هنا هو تأطير هذا الموضوع مجدّدًا في هذا السّياق؛ بقصْد توضيح الجوانب المختصّة، التي تسمح بإضافة الاندماج لطيف الحلول قيد النظر.

هناك ٣ فرضيّات تؤطّر هذه الدراسة:

الفرضية الأولى: حلول العام ٢٠٥٠م، وهو أفق النّظر إلى هذه الأمور، وذلك لأسباب متعدّدة؛ فهو الموعد الذي ينبغي أن يبدأ عنده الاندماج باحتلال مكانته في سوق الطاقة. لكنّ حلول العام ٢٠٥٠م سيشكّل لحظةً حرجةً لمجمل منظومة الطّاقة العالميّة، ولا سيّما أنّه من المتوقّع إعادة التشييد في معظم أنظمة إنتاج الطّاقة بين ٢٠٣٠م و٢٠٥٠م نظرًا لآجال تطوّر هذا الفرع الصناعيّ، ومن المتوقّع أن يتزامن هذا التحوّل مع حقيقتين ستؤثّران بصورة بالغة؛ فبحلول ذلك الوقت، تكون مصادر الطّاقة المختصّة بأوروبا الشّماليّة قد استنزفت (النفط والغاز)، وستبدأ آثار الاحتباس الحراريّ بالتأثير -بصورة محسوسة- في حياتنا اليوميّة.

الفرضية الثانية: سنسلّط اهتمامنا على سوق الطاقة الكهربائية تحديدًا؛ لأنّه المعنيّ بمرافق الاندماج، وهي فرضيّة محدّدة، لكنّها لا تتطلّب المزيد من الشرح.

الفرضية الثالثة: نقصد في حديثنا أوّلًا التّركيب في الدّول المتطوّرة، خاصّة في أوروبا؛ إذ من غير الواقعيّ تصوّر تطبيق آنيّ في الكرة الأرضية كلها؛ فهي تقنية بالغة التطوّر، ولا بدّ من الإقرار بذلك.

بعد توضيح هذه النقاط، يمكن الانتقال إلى وصف سوق الطاقة التي من المزمع أن تخصّ الاندماج. نبدأ أوّلًا بالنظر إلى مدى الطلب، قبل دراسة جانب العرض.

١. جانب الطلب على الطاقة

حين يتغذى، يستقي الإنسان من بيئته الطاقة اللازمة لبقائه، لكنّه يستمدّ منها- أيضًا- الطاقة لأغراض كثيرة أخرى، وهكذا وجد سبل التسخين والإضاءة

والوقاية، فضلًا عن تطوير زراعته وصناعته. هي ظاهرة عالميّة تمسّ كلّ إنسان، وسواء أكان الطلب على الطّاقة يسيرًا أم لأغراض معقّدة، فهو يتنامى تناسبًا مع عدد سكان الأرض من البشر، وقد أجمع المراقبون على استمرار تعداد سكان الأرض في الزيادة حتّى ما بعد عام ٢٠٥٠، وهو النموّ الذي يوافقه نموّ متزامن بالطلب على الطاقة عمومًا، بأشكالها كافّة.

فضلًا عن نموّ الطّلب على الطاقة مع نموّ التعداد البشريّ (حوالى ٨ أو ١٠ مليار إنسان في هذا القرن)، نحن أمام ظاهرة بالغة الأهميّة، وهي نمو الطلب على الطاقة بالتوازي لكلّ نسمة. للتدليل على هذا الجانب، ننظر إلى مثال يسير، وإن كان كاريكاتوريًا بعض الشيء. يعود معدّل وفيات الأطفال في الهند- التي تأوي أكثر من مليار نسمة- بصورة كبيرة إلى الافتقار إلى وسائل حفظ المواد الغذائية بصورة جيّدة. لنتخيّل الآن أنّ الهند تريد تزويد سكّانها بحلول عام ٢٠٥٠ ببرّادات كهربائية، بحيث يخدم البرّاد الواحد أربعة أشخاص، متجاهلين الطاقة اللازمة لصنع هذه البرادات (الصغيرة والاقتصادية التي لا تتضمّن مجمّدًا)، ومسلّطين اهتمامنا على ارتفاع استهلاك الكهرباء نتيجة تشغيلها فقط لا غير، وهذه عملية حسابيّة يسيرة؛ لأنّ البرّاد الصغير يستهلك متوسطًا يقارب الثلاثين (واط)؛ أيْ أنّ استهلاك الكهرباء سيزيد حوالى ٨ (واط) للفرد الواحد (فثمّة برّاد واحد لكل ٤ نسمات)؛ أيْ ما يعادل على صعيد مجمل السكان زيادة قدرها ٨ غيغاواط على الدوام، وهذا ما يعادل الاستهلاك الإجماليّ للكهرباء في بلد مثل النّمسا.

يظهر هذا المثال الأثر المزدوج لتنامي تعداد السكان ونمو الاستهلاك للفرد الواحد، مهما كان يسيرًا. تجدر الإشارة إلى أنّه في المثال الذي اخترناه (وهناك العديد من الأمثلة الأخرى)، لا يتعلق الأمر باستهلاك نافل، أو حتّى استهلاك لتأمين رفاهية بحتة. هو استهلاك مشروع لكلّ دولة نامية، وأيّ حديث- بما في ذلك المختصّ بالمناخ وتغيّره- لا يمكن أن يسوّغ لسكان هذه الدول ذلك القصور أمام موت أطفالهم؛ فالأضرار المحتملة الناجمة عن إنتاج الطاقة غير متكافئة مع التّداعيات الخطيرة المترتبة على من يعانون من شحّ في موارد الطاقة في الوقت الرّاهن.

ولمّا أنه قد ورد ذكر الهدر المحتمل، فلنقف قليلًا عند اقتصاد الطاقة،

أو بصورة عامّة، ما يعرف أحيانًا «بإدارة الطلب». تقصد هذه السّياسات والتدبيرات إلى التدخّل المسبق على جانب الطلب؛ بغية خفضه قبل العمل على تلبيته، وقد بذلت -ولا تزال تبذل- جهود حثيثة في هذا الصّدد؛ إذ يعمل كلّ صناع القرار والصناعيين على تقليل الهدر الذي قد يضر بالصورة السياسية لبعض منهم، أو تقليل حجم الفاتورة التي تقلل من هامش أرباح بعضهم الآخر، وقد بات المستهلك نفسه واعيًا بهذه المسألة؛ بفضل حملات التوعية أو الملصقات المختلفة.

لا بدّ من الإشارة هنا إلى أمرين مهمّين. أولًا: ربّما يكون ترشيد التكاليف الاقتصادية المتعلق بالطاقة حقيقيًا بالنسبة إلى دولة ما، لكنّه مضلل من منظور الكرة الأرضية؛ فأكثر من ثلث، بل تقريبًا، نصف ما وفرته الولايات المتحدة من تكاليف مختصّة بالطاقة ناجم عن نقل بعض أوجه النشاط البالغة الاستهلاك للطاقة إلى خارج الولايات المتحدة، مقابل تطوير نشاطات قطاع الخدمات في داخل البلاد. تتبع أوروبا النّهج ذاته كما يتّضح من الإحصاءات الرسمية. ثانيًا: وبمراعاة كلّ ما توافر على صعيد الطاقة من تكاليف دون تمييز، نلاحظ تنامي استهلاك الطاقة بصورة بالغة في الدول المتقدّمة، وهي زيادة تناهز الطلب، بل وستزيد في المستقبل القريب على ما توفّر من استهلاك الطاقة. لا يزال حلم خفض استهلاك الطّاقة للفرد الواحد من سكّان الدول المتقدمة بعيد المنال؛ لذا، خلص عدد من الخبراء- استنادًا إلى كلّ ما سبق- إلى توقّع تضاعف الطلب العالمي على الطاقة مرة واحدة على الأقل بحلول عام ٢٠٥٠.

بالنظر- حصريًّا- إلى الطلب على الطاقة الكهربائية، في ظلّ الإطار العالمي الذي ارتسم حتّى الآن، من المتوقّع أن نشهد زيادة عظمى، وذلك ما دام تطوّر استهلاك الكهرباء (مثل تطوّر وسائل النقل) مرتبطًا ارتباطًا وثيقًا بالنموّ الاقتصاديّ؛ فقد ارتفع استهلاك الطّاقة الكهربائيّة من ١٩٢٠ إلى ١٩٦٠ بمعدّل زاد ٦٪ سنويًّا على الصّعيد الإجمالي لكوكبنا، راسمًا قانون «التضاعف كلّ عشرة أعوام». هذه الحقبة التي شهدت بلا شكّ تشييد تطبيقات كبيرة للكهرباء، تكاد تكون قد انتهت في الدّول المتقدّمة، ومع ذلك يقدّر النموّ في الطلب في هذه الدول بحوالى ٢٪ سنويًّا وذلك لعقود قادمة، وبالرغم من تعزيز برامج ترشيد استهلاك الطاقة، ودون مراعاة أوجه استخدام أخرى، مثل تطوير السيارات

الكهربائيّة بصورة بالغة.

يمكـن القـول إذن، دون احتمـال الوقوع في خطـأ في التقديـر، إنّ ثمة طلبًا حقيقيًّا على الطّاقة الكهربائيّة، وإنّ هذا الطلب قوي، ومسـتمرّ، ومضـمون حتّى في الدول المتقدمة. كما بتنا على علم مسبق أنّه طلب لن تسهل تلبيته.

٢. جانب العرض

إذ كان الطلب على الطاقة، ولا سـيّما الطلب علـى الطاقة الكهربائية، أمرًا عالميًّـا بطبيعتـه، فإنّ طبيعة العرضـ تتغيّر على وفق المكان والزمـان. نهتمّ فيما يلي بوضـع أوروبا تحديدًا بحلول الأجل المذكور (٢٠٥٠م)، ولا ضيم في ذلك، ولا سيّما أنّها الداعم الرئيسي للأعمال البحثيّة المختصّة بالاندماج، وينبغي بموجب ذلـك أن تكون المسـتفيد الأول من ثمارها. كما يجب التنويـه هنا إلى أنّ اليابان، ذات الحاجـة الأكـثر إلحاحًـا إلى الطاقـة، قد أبـدت التزامًا جديًّـا بدعم هذا المجال البحثيّ.

ما التوقّعات التي يمكن أن ترسـم الواقع بحلول ٢٠٥٠م؟ نستند إلى وثيقتين رسـميّتين نشرتا مؤخّرًا، إحداهما صـادرة عن المفوضيّة الأوروبيّة، والأخرى عن الحكومة الأمريكيّة، وتقصـد هذه الوثائق التي كانت محلّ نقاش عام ٢٠٠١، إلى رسـم اسـتراتيجيّة الطّاقة للسـنوات المقبلة (أي قبل ٢٠٥٠). أصل هذه الوثائق يذكرنـا في حدّ ذاتـه بحقيقة بديهية: هي وثائق سياسـية، وبذلك فهي خاضـعة لخيـارات وأيديولوجيات كلّ حكومـة منها، إلّا أنّها تعرض ملامح واقع مشـترك لا يمكن تجنبه، واقع يتجاوز حتّى الأيديولوجيات، وهو أهمّ ما ينبغي أن نعيه.

أول ملاحظة تسـتهل «الكتاب الأخضـر» «Livre vert» المختصّ بالمفوضية الأوروبيـة، هي أن العرض في حدّ ذاته ضـعيف؛ أي أنّ اعتماد أوروبا على غيرها في مجـال الطاقة كبـير، وإن كان أقلّ من اليابان الذي يسـتورد ٧٥٪ من الطاقة التي يسـتخدمها. تسـتورد أوروبا اليـوم ٥٠٪ من الطاقة التي تسـتهلك، في حين لا تسـتورد الولايات المتحدة إلّا ٢٥٪ من اسـتهلاكها، وإن بقيت المستهلك العالميّ الأكبر. ينطوي هذا الواقع على عائقين جسيمين: فهو يسفر أوّلًا عن تحويل ثروات طائلة (٢٤٠ مليار يورو بالنسـبة إلى أوروبا عام ١٩٩٩) لصـالح الدول المنتجة، والأهم أنه يولد حالة اعتماد سياسي إزاءها، وإزاء الدول التي تأوي مرافق العبور

(الموانئ، خطوط أنابيب نقل الغاز وخطوط أنابيب نقل البترول)، وإذا كانت الصادرات تعوّض تحويل الثروات، فإن الركون السياسي مستمرّ وذو أهمية بالغة كما يتبين من عدد الصراعات التي تنشب قرب مناطق الإنتاج، أو التي تمسّ دول العبور، بل يبدو أنّ هذا الاعتماد السياسي لا يزال يتعاظم؛ فالتوقعات السياسية تقدّر معدّل الاعتماد لتأمين الحاجة من الطاقة إلى ٧٠٪ خلال العقود الثلاثة القادمة. هو واقع قائم، ولم تعد المفوضيّة الأوروبيّة تبحث للعمل على هذه البيانات؛ بل جعلت تقليل المخاطر المترتبة على ذلك، هدفًا لها.

شعرت أوروبا بمدى اعتمادها على الخارج في ميدان الطاقة، والتبعات الاقتصادية لذلك الاعتماد بشدّة في أثناء الأزمة البترولية الأولى؛ وقد أسفرت في ذلك الوقت إلى تطوير الطاقة الناجمة عن الانشطار ومصادر الطاقة المتجددة، ولا يزال هذان النوعان من الطاقة في الواقع حتّى اليوم يمثّلان المنافذ الوحيدة الممكنة؛ فحتّى التوقعات الأكثر تفاؤلًا تعلن استنزاف موارد بحر الشّمال في ٢٠٣٠. يمكن للاندماج حينئذ أنْ يتحوّل إلى مصدر جديد، وأنْ يخفّف الضغوط المتعلّقة بتأمين مواطن الحاجة من الطاقة. فمن شأن استخدام جسم مستقى من البحر –وقودًا– لعملية توليد الطاقة أن يمدّ أوروبا بحقل طاقة شاسع ناجم عن إرادتها السياسية البحتة.

أمّا الملاحظة الثانية، التي ستؤثر بلا شكّ في تطور قطاع الطاقة، فمختصّة بتغير المناخ الذي أذيعت أسبابه وآثاره بصورة كبيرة؛ حتّى باتت معروفة لدى الجمهور، وقد أسفرت هذه الدراسات حاليًّا عن استنتاج يسير: ينبغي ترشيد استهلاك الوقود الأحفوري، مثل الفحم والنفط والغاز، بصورة بالغة، وبأسرع وقت ممكن، حتّى وإن توافر مخزون عظيم منها، والواقع غير ذلك. إنّها مسألة خطيرة تقتضي حلولًا طارئةً. وهذا أمر معلوم بالطبع، ولكن ليس بقدر تعقيد هذه المسألة.

ويكفي، للإحاطة جيّدًا بهذه الناحية، دراسة موقف أوروبا بصورة دقيقة بعض الشيء؛ فقد التزمت المفوضية الأوروبيّة، باسم أعضائها كافّة، في هذا السياق إلى حدّ التوقيع على اتفاقيات ملزمة رامية إلى تقليل انبعاثات غازات الدّفيئة بقدر يصل إلى ٨٪ (ثاني أكسيد الكربون، الميثان، إلخ...) موازنة مع معدّلات ١٩٩٠، وقد جهد الأوروبيون لدعم هذه الاتفاقات، وكثيرًا ما وجّهوا اللوم

للأمـم التي كانت تمتنـع عن التعهّد بمثل هـذه الالتزامات، ولكـن، ما الملاحظ بشـأن ذلك؟ لم يتحقق التقدّم اليسـير المحرز إلّا لأسـباب دورية أو عابرة، مثل إغلاق المصـانع المفرطة في التلويث في ألمانيا الشـرقية السـابقة؛ فالاتجاه الذي تسير فيه أوروبا ليس بالمحافظة على المستويات الراهنة من الانبعاثات أو تقليلها، بل تسـير نحو ارتفاع شـديد في انبعـاث غازات الدفيئة، بنسـبة تزيد على ٣٠٪، وذلك حتّى ٢٠٣٠، وذلك على وفق المفوضـية الأوروبية ذاتها؛ فهي التي أصـدرت هـذا الإحصـاء! إمّا أن نحكـم إذن على أوروبـا بالازدواجيّة، أو أن نضـطرّ إلى الإقرار بالإخفاق في تطبيق اتفاقية كيوتو، وأنّ التغير المناخي ماضٍ لا محالة.

في الوقـت الراهن، وحده اسـتخدام الطاقـة الناجمة عن تقنية الانشـطار ومصادر الطاقة المتجددة، قادر على تقليص انبعاث ثاني أكسيد الكربون. فحتّى لـو أدى تشـييد مرافق من هذا القبيل إلى انبعاث بعضـ الكميّات من هذا الغاز، فإنّ الكميـات الناجمة لا تقارن بتلك الناتجة عن التشـغيل اليومي للمرافق التي تسـتخدم الوقود الأحفوري أيًّا كان. في المسـتقبل، وللأسباب نفسها التي واجهت تقنية الانشطار أو مصادر الطاقة المتجددة، لن يتسبب استخدام الاندماج إلا في انبعـاث قدر محدود من غازات الدفيئة، بل إن تطبيـق هذه التقنية أمر مرغوب فيه عاجلًا غير آجل، والمستقبل كفيل بتعزيز هذه الحجّة كما بات يدرك الجميع.

يمكـن الآن الانتقـال إلى الجانـب الثالث وهو الأخـير؛ ذو الأهمّيـة المتعلّق بجانـب العرض، وهو مسـتقبل هذا العرض كما يتصـوّر الآن، للعقـود القادمة، ونسـتند هنـا في تحليلنا إلـى النتائج الواردة عـن مختلف النمـاذج التي تحاول اسـتقراء المسـتقبل، على صـورة سـيناريوهات محتملة. الجدير بالذكر أنّ هذه السـيناريوهات تعكس إلى حدّ ما الخيارات السّياسـية التي تقوم على أساسـها؛ لـذا ينبغـي توخّي الحرص والحذر عند تحليلها والموازنة بينها. بيد أنّ ثمة سـمة مشـتركة تتميز بها كلّ هذه الدراسـات: وهو أنّ النصـيب المتوقّع للطاقة المولدة بالانشـطار ومصادر الطاقة المتجددة يبقى محدودًا؛ وذلك بالرغم من المميّزات المتأصّلة التي ذكرناها آنفًا. هذه المميزات لا تكفي وحدها لضمان اختراق السوق بصـورة قويّة، ويمكن، من خلال تحليل هذه الحالة وتسليط الضوء على معوّقات تطوير هذه المصادر، تقويم وضع الاندماج بصورة فضلى.

لنقف أوّلًا على وضـع الطاقة المولدة بالانشطار، وهي محلّ جدل محتدم بلا

شـك، إلّا أنّنا لا نهتمّ بتقويم وجهات النظر المختصّـة بهذا الشـأن، بل سـنكتفي بالقـول إنّ أوجه الاعتراض على تطوير طاقة الانشـطار كما هي الآن قائمة على تداعيـات حادث خطير محتمل، وعلى إدارة النفايات علـى المدى البعيد، إلّا أنّنا نوّهنا في الفقرة المختصّـة بأمـان المفاعلات، إلى أنّه في حالـة الاندماج، ونظرًا لخصائصـه تحديدًا، فإنّ هذه التساؤلات غير مطروحة. بل إن الأعمال الجارية في الوقت الراهن تسـعى تحديداً إلى تسـخير الخصـائص المتأصّلة في الاندماج وترجمتها بصـورة ملموسـة جدًّا إلى حقائق؛ فمستقبل الاندماج يرتسم ويتنظم على وفق هذا التصوّر.

حرصًـا على الوضوح التّام، ينبغي أن نضـيف هنا أنه قبل تطوير مفاعلات الاندمـاج المـزودة بالمواد المناسـبة على الصـعيد الصـناعي، يجّب بنـاء بعض المفاعلات في مختلف أرجاء الكرة الأرضـية باسـتخدام مواد تقليدية أكثر، ولن تنتـج هـذه المواد رمـادًا مشـعًّا؛ لأن عملية الاندمـاج لا تنتج موادّ مشـعة، لكنها سـتخلف في نهاية حياتها موادّ هيكلية منشـطة، وينبغي الإشـارة إلى أنّ كميّات هـذه المـواد لا تقارن بما ينجم من موادّ مشـعّة عن احتراق الفحم، وهي وسـيلة شائعة جدًّا لإنتاج الكهرباء في كلّ أنحاء العالم.

كما فعلنا للانشـطار، لندرس الآن ما يعوق تطور مصادر الطاقة المتجدّدة؛ للخروج ببعض الدروس العامة. جعلت المفوضية الأوروبية تطوير مصادر الطاقة هـذه أولويّة لها، فالتشـخيص واضـح: إذا اكتفينـا بدعمنا الراهن المخصّـص لهذا القطاع، لن تصـل حصّـة معظم أنواع الطّاقة المتجددة من إجمالي الاتحاد الأوروبي إلى ١٠٪ في ٢٠٣٠. لتصـحيح هذا الوضـع، تقترح المفوضـيّة الأوروبيّة عددًا من الإجراءات: مثل اسـتثمارات مكثّفة تصـل إلى حوالى ١٦٥ مليار يورو، ودعم البحث والتشغيل المختصّ بهذه التقنية، ونظام ضريبيّ يعاقب أنواع الطاقة الأخرى، والتزامات الشراء وحصص التوزيع، والتعديلات التشريعيّة والتنظيميّة ذات الصـلة بشـروط إنشـاء المرافق، إلخ...، وكلّ هذه الجهود ترمـي إلى تعزيز حصـة مصـادر الطّاقة المتجـدّدة إلى ١٢٪ -بمـا في ذلك المائية- من محصّـلة الطاقة الأوروبية. بذلك تتّضح تمامًا الصعوبات القائمة.

ميّـزت الوثائق المختصّـة بهذه المسـألة كافّة ثلاثة محاور من الصـعوبات: صعوبات هيكليّة، وماليّة وتنظيميّة.

لنبدأ أوّلًا بالصعوبات الهيكلية، وهي التي تبرز لدى الانتقال من نموذج الإنتاج والاستهلاك الذاتي إلى السعي إلى دمج مصادر الطاقة الجديدة في الشبكة الراهنة؛ إذ يعيق بصفة خاصّة شغل مساحات شاسعة أو الحاجة إلى تحويل دفق الكهرباء الطبيعي مكامن الحقول تحديدًا، بدلًا من مواطن الاستهلاك التّطوير الفعال لمصادر الطاقة المتجددة، ولن يضر هذا النوع من المعوقات تطوير الاندماج؛ ذلك أنّ مفاعل الاندماج، على الأقل من منظور خارجي، بمرجله وتُربيناته ومنوباته، شديد الشبه بالوسائل المستخدمة في الوقت الراهن، وحتّى إذا اقتضت الحاجة إلى جهد؛ لتحقيق تكييف متبادل للشبكة الراهنة أو الطاقة الجديدة، فلن يكون تأثير هذا العائق إلا محدودًا.

بالانتقال الآن إلى الصعوبات المالية المحدقة بتطوير مصادر الطاقة المتجدّدة، يجدر التمييز بين الصعوبات ذات الصلة بالاستثمارات اللازمة، وتلك المتعلقة بالقيمة السوقية للإنتاج.

تمثل الاستثمارات المطلوبة معضلة حقيقية. تشترك مصادر الطاقة المتجدّدة وتقنية الاندماج بكلفة إنتاج ناجمة بصورة شبه كليّة عن استهلاك رأس المال المستثمر لدى تشييد المرفق. بمعنى آخر، يدفع المستثمر مسبقًا ثمن كلّ كيلوواط ساعي سينْتج، وهذا وضع غير محبّذ إطلاقًا؛ لأنه يفترض حشد كثير من رؤوس الأموال والمبادرة بمخاطرة جسيمة، والنقيض لهذا المشهد تمامًا- كما نلاحظ- هو سرّ نجاح المحطّات الحرارية التي تعمل بالغاز الطبيعي؛ إذ تتطلب استثمارًا محدودًا، ويتحمّل المستهلك المخاطر الماليّة، التي لا ترتبط إلا بتكلفة الغاز. حال مصادر الطاقة المتجدّدة وتقنية الاندماج هنا إذن واحدة؛ فإنشاء مرافقها يقتضي استثمارات جمّة؛ ما يُعدُّ من المساوئ دائمًا بالموازنة مع مصادر الطاقة الأخرى الأقل تكلفة.

ما الذي يمكن قوله بشأن الصعوبات المحتملة ذات الصلة بالقيمة السوقية للإنتاج؟ يعادل كلّ كيلوواط ساعي ٣,٦ ميغا جول، إلّا أنّه لا يساوي على الدّوام القيمة السوقية نفسها؛ إذ يرتفع ثمن الكيلوواط الساعي قدر انخفاض العرض وارتفاع الطلب؛ لذلك فإنّ الإنتاج المرهون بظروف جوية، مثل الريح والشمس، ذو مكانة في السوق أقلّ قوة من الإنتاج القادر على التكيف مع الطلب، وهذه نقطة كثيرًا ما يستهان بها، بيد أنّها تلعب دورًا محوريًّا على الصعيد العملي، وعادة

مـا تقـلّ مثل هذه المخاطر؛ بإنشـاء مخزون مثبّـت، إلّا أنّ هذا الحـلّ يكاد يكون مسـتثنى تمامًا عندما يتعلّق الأمر بالطاقة؛ ذلك أنّ إضـافة نظام تخزين واسـع النطاق لوسيلة لإنتاج طاقة متجددة غير ممكنة معظم الأحيان، وحتّى لو أمكنت لنجمت عن تعزيز ثمن الكيلوواط الساعي-المكلف بطبيعة الحال-بصورة بالغة. كمـا أنّ مخزونًـا من هذا القبيـل قد يؤدي إلى نتائج بيئيـة غير محمودة، ويكفي الرجوع بهذا الخصوص إلى الكهرباء المائية وسبل تخزينها؛ أي السّدود العظيمة التي باتت محل اعتراضـات عديدة لأسـباب بيئية، وحتّـى في حال تخزينها على هـذا النحو، يبقـى إنتاج الكهرباء المائيـة رهن ظروف المطريات إلـى حدّ بعيد. أمّا الاندماج؛ ولأنه يعتمد على وقود يمكن تخزينه بصـورة فصـليّة، بل وسـنويّة بمنتهـى السـهولة، فبعيـد كلّ البعد عن هـذه التبعية للطقـس، ويحتفظ لإنتاجه بأعظـم قيمـة تجارية ممكنة، وهو قادر بذلك على مؤازرة مصـادر الطاقة ذات الإنتاج المتقلّب بطبيعتها.

يتعلّق محور الصـعوبات الأخير بالقيود التنظيمية. صحيح أنّ التاريخ سجّل نماذج عديدة من الأنظمة الرسمية والعبثيّة تمامًا في آن واحد، مثل القانون (في بداية حقبة السـيارات) الذي كان يقتضـي أن يسـبق كلّ مركب ذي محرّك رجل علـى قدميه يلوح بعلم أحمر (قانون العلم الأحمـر Red Flag Act) لكنّ المجتمع الذي يسن مثل هذه القوانين قادر كذلك على إبطالها، وبدلًا من البحث العشوائي في أنظمة افتراضـية مسـتقبلية، سـنكتفي بوجهة نظر ربما يعدّهـا بعض الناس متفائلة: في مسـألة بمسـتوى أهمية الطاقة، يمكن التأمّـل في أن يتجنّب المجتمع أسـر نفسـه، وأن يرسم أنظمة تنمية منسـجمة، نائيًا بنفسه بصورة معقولة عن المصالح الخاصّة والمخاوف غير المنطقية.

بالإجمـال، ثمّـة شـكوك عديـدة تحيط بمصـادر الطاقـة نفسـها؛ نتيجة التغيّر المناخيّ وواقع الاحتياطي الموجود، بل إنّ ثمة ارتيابًا حتى بشـأن المصـادر التـي يمكن اسـتخدامها دون خوف، وربما يصـبح التطـوّر الإرادي مرغوباً فيه؛ لذلـك، وفيما يتعلق بوسـائل النقل، فإنّ خيار تطوير الوقـود الحيوي أو المركبات الكهربائية، وحتّى المركبات الهيدروجينية، ليس خيارًا محايدًا لمسـتقبل مصادر الكهرباء. في جميع الأحوال، لا شـكّ في أن الاندماج يتميز بخصـائص سـيكون لهـا دورها الطبيعيّ. كما يتمتع الاندمـاج باحتياطي هائل، وهو لا يؤثّر في المناخ،

ولا يتأثّـر بـه، ويتجنـب الاندماج الملوّثـات الأخـرى التي تعرف بهـا كل عمليات الاحـتراق (بما في ذلك الكتلة الحيوية والغازات)، المسـؤولة عن عوارض التلوّث الضوئيّ الكيميائيّ المفرطة الحدوث في واقعنا الراهن.

قـد لا يكون الاندماج هـو التّرياق، لكنـه، مقترنًا بآليات أخـرى، قادر على الإسـهام في إيجاد حلّ للمسـألة البالغـة التعقيد، والمتعلقة بعرض ما يكفي من الطاقـة؛ لموازنـة الطلب المشـروع عليهـا، وفي الختام، نذكـر أنّ القـرن الواحد والعشرين استهلّ بأزمة خطيرة في الطاقة، أزمة في التموين، ولم يكن البلد الذي أصـابته هذه الأزمة في إفريقية أو آسـيا، بل كاليفورنيا التي عرفت تقنين الطاقة الذي لم يخطر بالبال. لنحرص على أن تكون هذه الأزمة درسًا نحسن استيعابه، بدلًا من أن تكون نذير شؤم للمستقبل.

٢. إلى أين نمضي الآن؟

تسـير الأبحاث الخاصـة بالاندماج في اتجاهين كما رأينا: اندماج الحصر المغناطيسـي، واندماج الحصـر العطالي. يتفرّع هذان الاتجاهـان إلى خيارات مختلفـة، مفاعـل التّوكامـاك و سـتيلاراتور بالنسـبة إلـى اندمـاج الحصـر المغناطيسي، وأجهزة الليزر ومعجلات الأيونات لاندماج الحصر العطالي. مهما اختلفت المسـارات، فهي تشـترك في حاجتها لمعدات كبيرة لكي تتطـوّر يومًا إلى مفاعل. تسـفر هذه الحقيقة اليسـيرة عن نتيجة جذريّة، وهـي أنّها تجبرنا على تمييز مسار بحثيّ واحد فقط لا غير.

١. اختيار نظام الاندماج

لنبدأ أوّلًا بفحص الوضع النسبيّ لكلّ من الاندماج العطالي واندماج الحصر المغناطيس. يمكن القول إنّ الاندماج العطالي يتطوّر بصورة رئيسة في إطار عمل عسكري، وإن استفاد في الواقع من إسهامات أكاديمية الأصل؛ فالقصد من هذه الجهـود البحثية هو محاكاة الأسـلحة النوويـة، وهذا يملي التكتّـم قدر الإمكان بهذا الخصـوص، وفي مثل هذه الظروف، كيف يمكن تصور قبول أيّ بلد بتقاسم معرفته المكتسبة لتشييد جهاز مشترك مع غيره؟ وكيف يمكن لهذا البلد أن يلتزم وحده بتولّي تطوير معدّات لأغراض مدنيّة؟ تظهر هذه التسـاؤلات- ذات الطابع

8 من أقوال إل. أرتسيموفيتش، أبو مفاعل التوكامالك، أثناء مؤتمر عام 1961.

السياسي الحصريّ- أنّ البحث المختصّ بالاندماج العطالي لن يخرج، على الأقلّ في المدى القريب، من المختبرات المصنفة بـ «العسكرية السّريّة»، وهذا لا يمنعنا من التّساؤل عمّا إذا كان الاندماج العطالي في متناول اليد، الأمر الذي سيؤثّر بلا شك في المساعي البحثية الأخرى الموازية له. لكن الأمر ليس كذلك. فالنظامان يستهدفان الإشعال: بقدر ما قد يكتفي اندماج الحصر المغناطيسي بالاقتراب منه، على الاندماج العطالي الذهاب إلى أبعد منه لتعويض ما يستثمر من الطاقة في كلّ مرة ولكلّ هدف، ولا يكفي في سياق التطبيقات المدنيّة أن يبدأ هدف بالاشتعال، بل ينبغي أيضًا أن يكون الجزء المحترق كبيرًا؛ لذلك فإن اندماج الحصر المغناطيسيّ أقرب إلى الهدف النهائي؛ أي المفاعل، من الاندماج العطالي؛ فالمفاعل الذي يقترحه الاندماج العطالي يقتضي بالفعل تحقيق تطوّر جذري؛ تطوّر يذهب إلى أبعد من مجرّد تطوير أو تعزيز التجارب الراهنة؛ تطور يرتقي إلى الابتكار. كما ذكرنا سابقًا، ينبغي التخلّي عن أجهزة الليزر الراهنة، وأن نستبدل بها أجهزة ليزر أو معجلات ينبغي ابتكارها. كما ينبغي تغيير عملية تصنيع الوقود جذريًّا بغية تقليل تكلفتها، وزيادة معدّل الإنتاج بصورة بالغة، ولا تصبّ هذه العوامل المجتمعة في صالح تطوير سريع لتقنية الاندماج العطالي لإنتاج الطاقة. تجدر الإشارة إلى أنّه لن يتخلّى تمامًا عن هذا المسار البحثيّ لقيمته العسكريّة الكامنة؛ وهذا يفسح المجال لاحتمال استغلال الفرص التي قد تتبلور.

تسود قدرات إعداد مفاعل التّوكاماك وتنظيمه إلى حدّ كبير على البحث في مجال اندماج الحصر المغناطيسيّ، الذي أوضحنا المبدأ الذي يقوم عليه آنفًا، والذي سنفصّل لاحقًا تنفيذه بصورة مفصلة، وقد بات المفاعل الذي رسم هذا النمط من الإعداد ملامحه محددًا بصورة جيّدة، ويمكن التأكيد من الآن بكامل الثقة على ما يتّسم به من خصائص جذّابة، سواء على صعيد الأمان أم التكلفة أم الأثر في البيئة. هناك سببان يغذّيان هذه الآمال. أوّلًا: يضمن العدد الاستثنائي الذي أجري من التجارب على التّوكاماك ترسّخ قوانين الفيزياء التي تسمح بتحديد نمط جهاز جديد من هذا النوع وأبعاده. ثانيًا: استكشفت العديد من التجارب الميادين المختصّة بتشغيل المفاعل كلّها، ومنها على وجه التحديد التجربتان النموذجيتان في صميم البرنامج الأوروبي:

جيت JET وتور–سوبرا Tore-Supra.

لقد أشـرنا سـابقًا إلى أن جيت (مفاعل توكاماك) ولّـد نتائج ذات أهمية، ولا سـيّما باسـتخدام مزيـج الدوتريوم/ترتيـوم. للحصـول على هـذه النتائج، تكوّنـت دائرة لمعالجة التّرتيـوم، والتحكّم من بعُد بأدوات داخل الجهاز، علمًا أنّ هذه التطورات تخصّ تشغيل المفاعل وصيانته.

أقيمت التجربة الثانية (تور–سـوبرا) في جنوب فرنسـا، في حين لا تسـتمر التجارب الأخرى أكثر من بضـع ثوان، تصل التجارب التي تجرى مع تور–سوبرا إلـى دقيقـة وأكثر، الأمر الذي يحملنا على توقّع تشـغيل مسـتمر للمفاعل، وهذه نتيجـة فيزيائيـة ذات أهميـة كبيرة، نتيجة لم يتم التوصـل إليها إلا باسـتخدام تقنيـات لا غنـى عنهـا للمفاعل المرتقـب، خاصّـة اسـتخدام اللّفائـف الفائقة الموصلية، التي أعطت لهذه التجربة اسمها.

٢. السياق

شاقّة هي بحوث الاندماج، إذ تتطلب جهودًا حثيثة واستثمارات كثيفة، وهذا ليس أمرًا جديدًا؛ فذلك كان شأن بحوث اندماج الحصر المغناطيسي في الماضي، ويجدر هنا التذكير بنوع الإجابة التي فضلت عندئذ: التعاون الدولي.

مـن البديهـيّ أن تكـون أبحـاث الاندمـاج معقـدة، وإذا اسـتثنينا بعض التصريحات المتفائلة، والملائمة بلا شك وإن لم تتسم بالواقعية، سرعان ما أدرك خـبراء الفيزياء بأنّ عليهـم «البقاء طويلًا على الأعراف قبل بلوغ جنّة عدن». بل إن رفع السـرية عـن الأعمال البحثية الأمريكية والسـوفيتية عـام ١٩٥٨ لم يكن إلا نتيجـة إدراك هـذه الحقيقـة، وكانت الإجابة العفوية عن مسـتوى تعقيد هذه الأسـئلة العلمية إذن انفتاحًـا أكبر، تعزيز التبادل المعـرفي، وتعاونًا أوثق، وذلك في أثناء الحرب الباردة، وفي تلك المرحلة أيضًـا، أسّست أوروبا برنامج الاندماج المختصّ بها، في صـميم معاهدة أوراتوم، وهي المعاهدة التي أنشـأتها الجماعة الأوروبيّـة للطاقة الذريّة. كان هنا أيضًـا للتنسـيق دور أساسـي؛ إذ سـرعان ما فقدت البرامج الوطنية اسـتقلالها؛ لينتهي بها المطاف في قطاع البحث الأوروبي الأكثر اندماجًا؛ قطاع البحث الذي سيحتل على مدار السنين مكانة ذات أولوية.

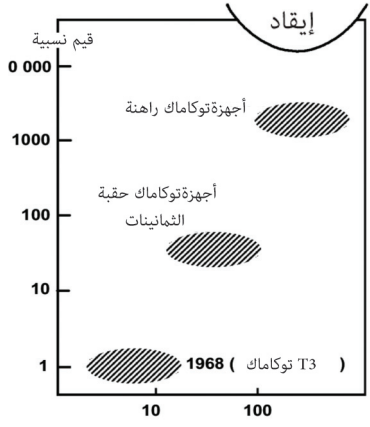
يتيح التعاون الدولي النفاذ إلى أفضل الخبرات في الميادين كافّة، وهذه نقطة بالغة الأهمية، لكنها ليست الوحيدة.

لقد رأينا أن ثمة حاجة لمعدّات ثقيلة، وهنا تطرح مسألة القدرات نفسها، وهنا أيضًا يكون التعاون على صعيد دوليّ أمرًا حاسمًا، بدءًا بتقاسم وسائل الاختبار المتوافرة؛ للتحقّق من الحلول التقنية، دون الحاجة إلى تعدّد المرافق المحدّدة، ووصولًا إلى التشارك في المسؤولية والتكلفة الناجمة عن هذا التنفيذ، في نموذج وحيد، للأدوات العلمية التي لا غنى عنها. فهذا النمط من التعاون، الذي يسمح بتقاسم تكاليف الاستثمار والتشغيل يقلل الهدر، بما يفرض من شفافية وما يجنّب من تنافس شرس.

تبقى الإشارة إلى نقطة أخيرة، وهي المتعلقة بالمدة. فقد يتعذر سياسيًا على الدول كافة الالتزام لمدى بعيد، إلّا أنّ هذا هو تحديدًا مربط الفرس؛ ففي مجال بحثيّ يستثنى منه تحقيق أي عوائد سريعة على الاستثمار، لا يمكن تحقيق الجهد المطلوب من غير إدراك دولي للتحديات القائمة وتوفير الوسائل السياسية والمالية في آن واحد. مجددًا يعدّ التعاون منذ تصور الأداة وحتى التشارك بالنتائج شرطًا لا غنى عنه لمثل هذه المبادرات، وهذا الشرط المكتسب منذ مدّة بعيدة لدى مختبرات الاندماج كافة، وبخاصّة لدى المختبرات الأوروبيّة، هو شرط محدد لأيّ نجاح يمكن تحقيقه للمستقبل.

يعدّ مسار البحث في حصر الاندماج المغناطيسي، وبخاصّة المختصّ بالتّوكاماك، أكثر مسار واعد، وبتنا ندرك أنّ الإطار الدولي وحده الملائم للأعمال البحثية في طاقة الاندماج، وإذا تحقق هذا الشرط إضافة إلى الشّروط السابقة، يمكن حينئذ اعتزام إنشاء مفاعل يولد الطاقة على أساس مفاعل الاندماج النووي.

وأحيانًا ما تتردّد ملاحظة تحمل بعض العتب: «لا يزال الأجل بعيدًا». لنعد مجددًا إلى الماضي، منذ إنشاء التّوكاماك عام ١٩٦٨، فقد تعزّزت أوجه أداء المختبرات بما يزيد على ١٠ أضعاف كلّ عشرة أعوام. فهذه هي الوتيرة التي اقتربنا بها من معيار الإشعال الذي يعادل ٣ أضعاف ناتج ضرب درجة الحرارة والكثافة وزمن الحصر.



درجة الحرارة)ملايين ادرجات(- حيث أداء التوكاماك الأول يعتبر هو المرجع
بالنسبةT3 : درجة الحرارة*الكثافة*زمن الحصر=1

رسم توضيحي ٨. التقدم المحرز

لم يفقد أحد مكانته إذن. لكن ما الوضع اليوم، وكيف يتوقّع أن يبدو الغد؟ لا يزال علينا اليوم اكتساب معامل يقلّ ١٠ أضعاف، إلّا أننا نعلم كيفيّة تحقيقه، لكن الأمر سيستغرق أكثر من عشرة أعوام. لا تتعلّق الأسباب هنا بفيزياء الأوساط البلازميّة، بل بالتأخير الذي لا يمكن تفاديه؛ نتيجة إجراء تجربة واسعة النطاق، بتصوّر فرق دوليّة وتشييدها. بعد هذا التأخير، تكون الفيزياء قد تأكّدت، إلّا أنه لا يزال علينا- عندئذ- تطوير التقنيات، القادرة وحدها على تحقيق أهداف الاندماج كافّة؛ الأمر الذي من المتوقع أن يستغرق، حسب ما نملك من تجارب، عقدين أو ثلاثة عقود. ففي نهاية المطاف، يحدّد هذا التأخير المتراكم أجل هذه الأعمال البحثية، وإذا كان من الطبيعي أن نرغب بقطف ثمار البحث الجاري بأسرع وقت ممكن، فهل ينبغي لهذا السبب اعتبار تعوّق الاندماج مرفوضًا؟ تشير تجارب الماضي، ولعلّ استكشاف الفضاء أفضل نموذج لذلك، إلى نجاح سريع وانتقال لا يقلّ سرعة من المختبر إلى ميدان الصناعة، وهذا مثال رمزيّ بلا شكّ، إلّا أنّ هناك العديد من الأمثلة المخالفة لذلك، بدءًا بالبحث في أمراض السرطان الذي استفاد في لحظات ما من المميزات نفسها

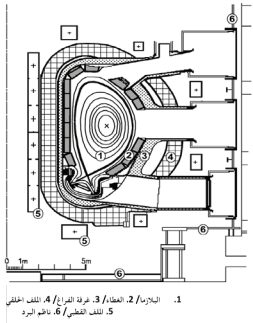
التي يعود إليها نجاح أبحاث الفضاء، وفي سياق الطاقة، اكتشف كلّ من الأثر الضوئي الفلطائي وبطارية الوقود في العام نفسه، منذ أكثر من ١٥٠ عامًا، ولا تزال الأبحاث مستمرة في هذا المجال، وثمّة أمثلة أخرى تبيّن أنّه لا يمكن تسريع عجلة الزمان على وفق أهوائنا فيما يتعلّق بالموضوعات المعقّدة. بناءً على ما سبق، لا بدّ من التحلّي بالصبر، ولا فضيلة في هذا السياق تعلو على المثابرة.

٣. الخطوة القادمة

نفترض الآن أننا نودّ البدء بتطبيق الاندماج: ما التجربة التي ينبغي الإقدام عليها الآن؟ للحصول على إجابة دقيقة، لا بدّ من توجيه هذا السؤال للخبراء المختصّين في هذا المجال؛ فهم الأعلم بالصعوبات التي ينبغي تجاوزها، وبالوسائل التي ينبغي تطبيقها لتعزيز إحاطتنا بهذا الموضوع، علمًا أن اللجوء إلى الخبراء لا يعطّل قدرتنا على تكوين رأي مختصّ بنا، بل سنخصّص لذلك الوقت اللازم لتكوين وصف جيّد لما هو مقترح، ويبقى كلّ حر بتكوين رأيه المختصّ به. يرغب المجتمع العلمي في بناء المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبيّ الدوليّ أيتر ITER، وفيما يلي خصائص هذا المشروع الرئيسة.

١. وجهة نظر المصمّم

لنقم أولاً بوصف تصور المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي أيتر، بالاستعانة بالرسم التوضيحي التالي.



رسم توضيحي ٩. رسم قطاعي للمفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي

يبيّن الرسم أعلاه مقطعًا رأسيًّا للجهاز المعنيّ، أو بالأحرى نصف مقطع؛ لأنّ المحور العمودي للجهاز يقع على اليسار، ولا يبيّن هذا الرسم سوى الجزء الواقع على يمين هذا المحور، وسنتخيل أنّ الجزء الأيسر متناظر مع الجزء الأيمن، ولأغراض التسهيل، يلاحظ أنّ الرسم أهمل المكوّنات المساعدة كافّة، مكتفيًا بتوضيح المكوّنات الوظيفية الرئيسة.

تحيط المكونات المادية للتّوكاماك بالجزء المركزيّ الذي رسمتْ فيه خطوط تمثّل قطاع الأسطح المغناطيسية التي تحصر البلازما؛ إذ يلاحظ أنّ مقاطع الأسطح المغناطيسية التي تكون في المركز عبارة عن منحنيات مغلقة إهليلجية الصورة إلى حدّ ما، وعلى الأطراف منحنيات مفتوحة تؤدي إلى جدار. إنّ البلازما محصورة بالحيّز الذي فيه المساحات المغلقة. ثمة سطح خاص: وهو السطح الفاصل الذي يرسم حدود منطقة الحصر (بالخطّ الداكن)؛ إذ تكون الكثافة ودرجة الحرارة مرتفعة، علمًا أنّهما تهبطان بشدّة خارج نطاق هذا الحيز، ويمتدّ الفراغ العازل للبلازما من السطح الفاصل وحتّى الجدار الأول.

لنتتبع المسار الذي يرسمه المفاعل، انطلاقًا من قلب الوسط البلازمي؛ إذ يتخذ هذا الأخير شكلًا مقطعيًّا شبيهًا بالحرف D، الذي يرتبط به (أسفل الشكل) ملحق يصل البلازما بجهاز يقوم بدور المرمد؛ إذ يجمع بالضخّ رماد الهيليوم الممزوج بالغازات غير المحترقة عند اجتيازها السّطح الفاصل، ويحتلّ الوسط البلازمي من جهته معظم الحيز الواقع في المركز، باثًّا طاقته باتجاه الجدران المحيطة به. لدى الابتعاد عن البلازما، نصادف أولًا قطع البلاط الصغيرة للغطاء، والغلاف المواجه للبلازما، الذي يؤدّي دور الجدار الأول، وقد أعدّ غطاء مفاعل أيتر؛ بحيث يطرد الحرارة وينتج التّرتيوم، ويمتدّ الجدار المزدوج، الذي يمثل غرفة الفراغ الضرورية للحفاظ على البلازما، حتى مؤخرة الغطاء، ويمكن النفاذ إلى داخل الغرفة من خلال ٣ مجموعات من الكوى الممثلة عند نهاية شبكات الأنابيب؛ إذ تسمح هذه النوافذ بإضافة المكونات الداخليّة وإزالتها: التّسخين، والغطاء، والمرمد (الذي يعرف أيضًا بالمحوّل divertor).

وراء غرفة الفراغ حيّز مغلق آخر يحتوي ملفّين من اللّفائف التي توجد عادة التّوكاماك، وقد وصفنا لفائف التّوكاماك في الفقرة المختصّة بالتقنية؛ لذا نكتفي هنا بسرد خصائصها في المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبيّ الدوليّ،

علمًا أنّ هذه البيانات هي مثل الأبعاد الدّنيا للمفاعل. تتألّف المجموعة الأولى من اللّفائف، وهي اللّفائف الحلقية، من ١٨ ملفًا عموديًّا في صورة الحرف D، محيطة بغرفة الفراغ، وتضمن هذه اللّفائف أن يصل الجزء الأساسي من الحقل المغناطيسي إلى قيمة ٥ تسلا، وتتكوّن المجموعة الثانية من اللّفائف، وهي لفائف قطبيّة، من ملف أسطواني مركزي تكمله ٦ لفائف دائرية موضوعة أفقيًّا، مقطعها ممثل في الرسم التوضيحي بمستطيلات تتوسّطها إشارة +. تتيح هذه اللّفائف وحدها للبلازما البقاء أزمنة تزيد على ٤٠٠ ثانية، علمًا أنّ التشغيل المستمر سيتم بوساطة وسائل تسخين مساعدة، وكما شأن المفاعل الذي ترسم هيكله، تتّسم هذه اللّفائف (١٨+١+٦) بالموصلية الفائقة، والحفاظ عليها عند درجات حرارة منخفضة يملي وضعها في فراغ عازل؛ إذ تنأى بها غرفة الفراغ عن الحرارة المنبثقة من الوسط البلازمي، في حين يقيها الغطاء من التدفّق النتروني، وينبغي- أيضًا- حمايتها من الحرارة المحيطة؛ لذا يوجد جدار أسطواني جديد يعرف بناظم البرد أو الكريوستا الذي يكسو كل الجهاز، الذي يحمي كذلك من حرارة الخارج بفعل الفراغ الذي نوجده فيه. الجدير بالذكر أنّ الرسم التوضيحي لا يبيّن إلّا جزءًا من هذا الجدار؛ فغرفة الفراغ الأولى المشار إليها فيما سبق قابعة في غرفة فراغ أخرى ممثّلة بناظم البرد؛ وهذان «الفراغان» منفصلان عن بعضهما بعضًا؛ حيث تكمن البلازما في الفراغ الأول، واللفائف في الثاني.

يجب ألّا يغيب عن أذهاننا الأبعاد والأوزان التي نحن بصددها؛، فقطر ناظم البرد يساوي ٢٨ م، وارتفاعه ٢٤م، في حين تبلغ كتلة ملّف حلقيّ نحو ٣٠٠ طن، ويكاد حجم البلازما يصل إلى ١٠٠٠ م٣ (أقلّ بقليل)، بيد أنّ كثافته أقلّ بنحو مليون مرّة من كثافة الهواء، ووزنه حوالي غرام واحد.

٢. الأهداف

صمّم الجهاز الموصوف سابقًا لتحقيق بعض الأهداف الهائلة، وبخاصّة الأهداف الرئيسة التّالية:

- يطمح خبراء الفيزياء إلى بلوغ مرحلة إنتاج قدر عال من الطاقة؛ أيّ صنع وسط بلازميّ يكون فيه التسخين السائد ناجمًا عن عملية الاندماج نفسها،

ولا يمكـن تحقيق ذلك إلّا بجهاز يفوق حجمه أبعـادًا معيّنة، ومن المتوقّع أن ينتج بلازمـا المفاعـل النـوويّ الحـراريّ التجريبيّ الـدّوليّ ٥٠٠ ميغـاواط من طاقة اندماج؛ أيّ ما يعادل عشـرة أضعاف الطاقة التي تغذيه. كما أنّ الحفاظ الذاتي على درجة حرارة البلازما، وهو ما سـمّيناه سابقًا الإشعال، ليس بعيدًا من منال المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبيّ الدوليّ، وإن لم يكن من أهدافه المعلنة. أضف إلى ذلك- على سـبيل الذكر- أنّ الحرارة التـي يولّدها المفاعل النوويّ الحراريّ التجريبـيّ الـدّوليّ لـن تتحـوّل إلى كهربـاء، ولا سّـيما أنّ ذلك المفاعـل النووي الحراري التجريبي الـدوليّ لم يرتق بعْد ليكون مفاعلًا مولّدًا للكهرباء، وإن كان قد خرج من حيّز التجربة البحتة، وهذا التحوّل الشائع في هذا القطاع الصناعيّ الذي لا ننتظر منه اكتسـاب معرفة محدّدة، يفرض على تشـغيل المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي حدودًا ربّما تعوق استخدامه العلمي.

- يتوقّع المهندسـون من المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي أن يؤكد توافر التقنيات الضـرورية للاندماج (الموصلية الفائقة، إلخ...) وأن يختبر لدى تشـغيل المفاعل أغطيتـه المسـتقبلية المولدة للتّرتيوم. كما سـينْظر إلى تصـنيع المكوّنات وظروف الاسـتفادة منها وموثوقيّتها الحقيقية على وجه الدقة، لتحديد الجدوى الصناعية والاقتصادية لتقنية الاندماج النووي.

- بصـفة عامّة، ينبغي أن يظهر المفاعـل النووي الحراريّ التجريبيّ الدوليّ الفائدة الحقيقيّة للاندماج النوويّ على صعيدي: إنتاج الطاقة والتأثير في البيئة.

هـذه الأهداف الطموحة هـي التي تحدّد الوضـع الراهن للبحـوث المتعلّقة بالاندمـاج النووي، ذلك أنّـه -تعريفًا- إذا انطوت أهـداف تجربة ما على نتائج لم تتوصّـل إليها الأبحاث بعد، فإنّ هذه الأهداف هي التي يعدّها المجتمع العلمي في متناولها.

٣. الوسائل اللازمة

لا يمكن التطرّق جدّيًّا إلى تجربة بحجم المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي دون التّسـاؤل، وإن كان بالإيجاز، عن حجم الاسـتثمارات التي تفرضها، ومدّة تحقيق عوائد على هذه الاستثمارات:

- حـدّدت تكلفة هذه التجربة بدقّة بالغة، وقد تطور هذا المشـروع على وفق

هـذه التكلفة، وبعد تجويـد متعدّد وتعديـل للأهداف، تقدّر تكلفة الاسـتثمار في المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي بـ٣,٥ مليار يورو.

– يمكن وصـف الإطـار الزمني على هذا النحو؛ فزمن التشـييد؛ أي الوقت الذي سينصـرم منذ لحظة اتخاذ القرار وحتّى الحصول على أول وسط بلازمي سيصـل إلى ٩٦ شـهرًا؛ أيّ ٨ أعوام، ومن ثمّ يبدأ التشغيل بصورة تدريجيّة؛ أي اختبار الجهاز مدّة ٣ سـنوات، وصـنع الوسـط البلازمي المنتظر، وسيستخدم، خلال هذه السنوات الثلاثة، الهيدروجين العادي، ولن نجري إذن تفاعل الاندماج النووي. بعد هذه المرحلة الأولى، وطوال عام واحد، سيسـتخدم الدّوتريوم النقي بغية الحصول على تحسينات نهائية.

– سـتُنتج أولى تفاعلات الاندماج؛ مما سيسـفر عن إنتاج كميات محدودة من النّترونات، وسيسـمح بضـمان تشـغيل دفق نترونيّ رمزي. بعـد إجراء هذه العمليات سيسـتخدم مزيـج الدوتريوم–ترتيوم، والبحث مدة ثلاث سـنوات عن أوجه الأداء الأفضـل. بعد ذلك، سيسـتخدم هذا الجهاز أكثر من دراسـته، كما سيسـتعمل لأغراض متعدّدة، مثل: دراسـات الموثوقيّة، أو دراسات تميّز مكونات مفاعـل المسـتقبل، وقد يتغـيّر هذا النشـاط الأخير علـى وفق النّتائـج المحقّقة ومقتضيات الضّرورة.

٤. بعض الأفكار اليسيرة

بعد هذا الوصـف الذي يسّـهل إكماله، ولا سيّما أنّ المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي بات في ميدان النفاذ العام، لنتناول هذا المشهد برمته، ونحدّد، بعيدًا عن التفصيلات التقنيّة، أهمّ ما ينبغي الخروج به من هذا البحث.

يلاحظ أوّلًا، أنّه وبعد خمسين عامًا من الجهد الحثيث، ينتظر علماء فيزياء البلازما التّجْربة الأخيرة الحاسـمة؛ إذ تصـبح البلازمـا أخيرًا منتجةً للطاقة، وعندئـذ يكون الإنسـان قد أنس وقد النجوم، ولا يعـتري أنفس العديد من علماء الفيزيـاء أيّ شـك إزاء هـذه النتيجـة المرغوب فيهـا، وإن لم تحْـظ بعد باليقين التجريبيّ.

ثمّـة ملحوظة أخرى بديهية في هذا السـياق، لكنهـا لا تخلو من الدقة، وهي أنّنا بصـدد تجربة جسـيمة، توظـف طيفًا متنوعًـا من أحدث التقنيـات البالغة

التعقيد، وثمة نتيجتان لهذه الملاحظة. سبق أن تناولنا سابقًا العلاقة بين الحجم والتعقيد، وتكلفة الطاقة المنتجة. أمّا فيما يتعلّق بتكلفة التجربة في حدّ ذاتها، تجدر الإشارة إلى أنّ هذه التجربة رسمت منذ بداياتها في إطار تعاون كوكبي بالفعل؛ لذا كان ثمّة تآزر في تحمّل هذا العبء المالي، الذي لا يمثل بذلك معوقًا حقيقيًّا، ولا حاجة، للعودة هنا مجددًا، إلى جهد التعاون الدولي الجاري بصورة يوميّة على صعيد المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي، وقد أوضحنا مدى أهميته التي لا تنتهي عند مشاطرة الإمكانات، بما في ذلك للجمهور العامّ.

كلّ ما قيل إلى الآن بشأن طبيعة التّجربة المختصّة بالمفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي، يصل بنا إلى نتيجة أخرى؛ فإجراء تجربة من هذا القبيل يتيح فرصةً حقيقية، ولا نقصد هنا الخوض في مجال الاستخدام الصناعي؛ فبعد إجراء التجربة النهائية، سيكون بناء مفاعلات الاندماج النووي رهن قرار آخر، وحتّى إذا زودنا «الأيتر» بالمعرفة، فهو لا يخدش في شيء حريّة الخيارات المتعلّقة بالطاقة.

٤. البرنامج المرافق الذي لا غنى عنه

وحده خبير فيزياء البلازما قد يكتفي بتجربة لا تقصد إلّا إلى الاقتراب من الإشعال، إن لم يكن تحقيقه، ومن شأن تجربة من هذا القبيل، مكملة ومستوعبة بصورة جيّدة، أن تفوق توقّعات الباحث، لكن الاندماج النووي يحمل أهدافًا عمليّة على نحو أكثر بكثير. كأنّنا حين نكتفي بالبرهان الفيزيائي، نرضى بالألعاب النارية في الوقت الذي نتوقع فيه إطلاق أقمار صناعية! فبالنسبة إلى عالم الفيزياء، يقيم صاروخ الألعاب النارية، تمامًا كما مطلق الأقمار الصناعية، مبدأ الدفع بفعل التفاعل، إلّا أنّه لا جدوى من موازنة قيمة من هاتين التجربتين، كما أنّه من غير المرجّح أن تحشد تجربة الاندماج- مهما حقّقت من نجاح- الاهتمام الشّعبيّ ذاته الذي تثيره الألعاب الناريّة؛ لذا ينبغي الذهاب إلى أبعد من ذلك، وتوقّع التطبيق العملي للمبدأ محلّ الدراسة، أي بإعداد المفاعل.

توقّع المفاعل، في الوقت الذي يثبت فيه الأيتر الدليل التجريبي على إمكانية وجود هذا المفاعل، أمر يستدعي بعض التوضيح؛ فمن المغري- إن لم يكن من الطبيعي- انتظار البرهان قبل المبادرة. لنحاولْ بالرّغم من ذلك التفكير

فيمـا بعد المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي، وما يمكن أن يحصـل عند الانتقال من التجربة الفيزيائية إلى التنفيذ الصناعي.

سـنتناول هذه المسـألة من منظور ربّما لا يسـتنفد هذا الموضوع، لكنه يبيّن العديد من الصـعوبات التي ربما تواجهنا. لا يمكن تشييد مفاعل صناعي إلا بعد أن تتحقق السـلطات من سـلامته وتثبتها، ويحصل الصـناعي الذي خصص له استثمارًا بخصوص أجل المرفق وظروف تشغيله، وتسمّى مسألة معالجة النفايات الناجمة عن التشغيل والهدم. السّلامة، الصيانة والهدم: إنّ الحاجة المطلقة إلى معرفة مفصّـلة ومعمقة بخصـائص المواد التي ستستخدم في تشييد المفاعل هي صـميم الإجابة عن كلّ هذه الأسـئلة. إلّا أننا أوضحنا سابقاً أن المفاعل هو الذي سيصنع هذه المواد، وهنا تكمن المعضلة التي سنبحثها عن كثب.

لا بـدّ لابتكار خليـط معدني جديد من البدء بحفـظ تركيب محدّد. في هذه المرحلة، لا شـكّ في كون بعض الأصـعدة النظرية والتجربة المكتسـبة مرشـدًا لا غنى عنه يمكننا من تفادي ضـررٍ بالغ، إلّا أنه لا يمكن تحديد تكوين مادة مثالية «على الورق». كما ثمّة حاجة للمسات التّحسين ذات درجات متباينة من الأهميّة. بعد مرحلة التعريف، يكون الانتقال إلى سـكب مادّة جديدة، ومن ثمّ إلى تصنيع عينـات ينبغي إخضـاعها لتجارب عدة. بذلـك تميّز المادّة مـن منظور قدراتها الميكانيكيّة، ومقاومتها للتآكل، وسـلوكها عند التعرض للإشعاع، إلخ...، وغالبًا ما يكون بعد هذه المرحلة رجوع إلى تعريف المادة وتكوينها، ومن ثمّ تمييزها، وهكذا وصـولًا إلى الخصـائص المطلوبة. لا شكّ في تعقيد هذه المحاولات، مثل تلك التي تدرس الأثـر الآني في عـدّة معالم، مثل أثر وسـط حاتّ على المعـدن المعرض في آن واحد لضـغوط ميكانيكيّة، ودفق من الإشـعاع النـتروني، وثمّة تجارب أخرى سـتكون طويلة بالضـرورة، مثل التجـارب الرامية إلى ضـمان مـدة حياة المواد التي سـتتعرض لجهود دورية (اختبارات الإجهـاد). عملية تطوير خليط معدني جديد هي باختصـار عمليّة طويلة جدًّا، ولا سـيّما حين يكون المعدن الذي تنطلق على أساسـه هـذه العملية غير معروف جيدًا، كما هـو حال عدة خلائط محتملة للاندماج. صـنع نوع من الصّلب أسـهل من خليط محدد من الفاناديوم لم يُنْتج إلى الآن سـوى بضـع أطنان منها، وكانت محلّ العديد من الدراسـات، ولا تزال العديـد من التجارب التي ينبغي إجراؤها بشـأنه. من الأهمية بمكان إذن القيام

بهـذا النوع من الأعمال خـلال الزمن المطلوب؛ للتمكن مـن تجريبها في المفاعل النووي الحراري التجريبي الدولي، ولقاء النتائج الفيزيائية التي ربّما تبقى بغير ذلك دون أن تستغل.

وقفنا ببعض التّفصيل على مسألة المواد؛ لأنّ هذه الدّراسات هي التي تحدّد مواعيـد الإنجـاز الأخرى والبعْـد. بيْد أنّه بالنظـر إلى البيئة التقنية المختصّـة بالمفاعل، تتبادر إلينا موضـوعات أخرى تقتضـي تحقيق تقدّم كبير أيضًا؛ إذ إنّ الأعمـال البحثيّة المختصّـة بالاندمـاج لا يمكن- ولا ينبغـي- أن تختزل بتجربة واحدة، مهما كانت عظيمة. إنها تملي برنامجًا لتطوير تقنيات المفاعل.

وهـذا يتوقّـف علـى حقيقة ثابتـة في تاريـخ كلّ هـذه الأبحـاث؛ فالاندماج النـووي فكرة مبتكرة، عازت كل مرحلة من مراحل تقدمه تطورًا تقنيًّا صـاحبت الاكتشـافات الفيزيائية، فكانـت أوّلًا أوجه التغذية الكهربائية المتخصّصـة، ثمّ اللّفائف المغناطيسـية النحاسـية، واللفائف الفائقة الموصـلية للمجالات الكثيفة الكبيرة الحجـم، ومؤخّرًا تطوير أدوات التحكم عن بعْد، أو المواد المقاومة للدفق الحراري المرتفع. أسـفرت كلّ التجارب الكبيرة عن بحوث تقنية، وكانت النتائج مرتبطـة ارتباطًا مباشـرًا بالابتـكارات المسـتخدمة، وقد تولّى المفاعـل النووي الحراري التجريبي الدولي مسـؤولية تطوّراته المختصّـة به، فيما يخص اللّفائف الفائقة السـرعة أو التحكم عن بعد، لكنّه لن يكون إلا منصّـة تجريبية للحصول علـى مفاعل. بتنا اليوم علـى مقربة من إنتاج حقيقي للطاقة، وينبغي إعداد هذه المرحلة بحيث لا تكون النتيجة الفيزيائية المنتظرة مثار فضـول علمي، بل ينبغي تسـجيلها في الواقع الصناعي اليوميّ، وهذا في ضـوء أهمّيّة هذا المسعى البحثي للمصلحة العامة.

خاتمة

أدركنـا أنّ الطاقة التي تصـل إلينا من الشّـمس والنجـوم النائية، تنبع من تفاعـل بات معروفًـا تمامًا: الاندماج الحـراريّ النوويّ، وقد أيقنّـا بعد التجربة أنّـه يمكن إجراء هـذا التفاعل على كوكبنـا؛ إذ تتحرّر حينئـذ كمّيات هائلة من الطّاقـة. لكنّ الأمر الذي يحظى بالقدر نفسـه من الوعي هـو أنّ المختبرات التي تجرّب الأبحاث بهذا الخصوص قادرة على تصوّر جهاز لإنتاج الطاقة، على وفق ذات المبدأ، واسـتنادًا إلى تجربة راسخة، وفي هذا النظام المبتكر لإنتاج الطاقة، عظيمة هي الموارد، ومستقلّ هو الإنتاج عن الظّروف الجوّيّة أو السياسية، كما هو ضعيف التلوّث الناجم عنه.

يفرض تطوير هذه العمليّة تأكيدًا تجريبيًّا على صعيد الواقع في جهاز مشيّد لهذه الغاية، وينبغي أن يصـاحب هذه التجربة برنامج دعم تقني، يسمح بتطوير المواد والتقنيات اللازمة لضمان الفائدة الاقتصاديّة، ولدى إجراء هذه التجربة، يكون الإنسان قد تمكّن من الاندماج، وإن بقي عليه ترويضه، بكلّ ما تحمله الكلمة من معنى، ومن الممكن أن يتمّ التنفيذ الصّناعي قبل منتصف القرن بقليل، حين يستشعر العالم بشدّة عبء استنفاد الموارد، ومغبّة نمطه الاستهلاكي على المناخ.

لن تكفّ مواطن الحاجة العالمية إلى الطاقة عن التنامي، وستسـتمرّ وسائل تلبية هذه الحاجة بالتناقص. إن التحدّيات جسـيمة، وينبغي أن يسهم الاندماج النـووي- إلى جانب مصـادر الطاقة الأخرى- في مواجهة هذا التحدّي بصـورة واقعيّـة. إنّ تكاليف هذا البحث ومخاطره مشـتركة على صـعيد كوكبنا؛ لذا فإنّ الجهْد المطلوب جهد أدنى. لذلك- وفيما يتعلّق بالطاقة- ربّما لا يكون من العبث، بـل ربّمـا يكون من دواعـي الواجب الأخلاقيّ أو المنطق بكلّ سـذاجة، أن نسـعى لنورّث أبناءنا كوكبًا لا يكون مستنفد الموارد ومثقل الغلاف الجويّ، ولهم الحرية في كيفية التصرّف بهذا الإرث.

مراجع

فيزياء البلازما والاندماج

مؤلف تعريفي

بي.-إتش. ريبو، طاقة النجوم. الاندماج النووي المحكم، أوديل جاكوب.

P.-H. Rebut. L'énergie des étoiles. La fusion nucléaire contrôlée. Odile Jacob.

مؤلفات فنية

الاندماج الحراري النووي المحكم بالحصر المغناطيسي، مجموعة. «مفوضية الطاقة الذرية والطاقات البديلة، سلسلة علمية». ماسون.

La fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique. coll. « CEASérie scientifique». Masson.

الاندماج الحراري النووي العطالي بالليزر، مجموعة. « مفوضية الطاقة الذرية والطاقات البديلة، سلسلة تحليلات»، تحرير ر. دوتريه و جاي بي واتو، ماسون.

La fusion thermonucléaire inertielle par laser. coll.« CEA Série Synthèses».édité par R. Dautray et J.-P. Watteau. Masson.

الأمان والأثر البيئيّ الخاص بالاندماج، الاتفاقية الأوروبية لتطوير الاندماج إس. أر إي-١ ، أبريل ٢٠٠١م.

Safety and Environmental Impact of Fusion. EFDA S-RE-1. April 2001.

بحث اجتماعي-اقتصادي خاص بالاندماج، الاتفاقية الأوروبية لتطوير الاندماج أر إي أرإي، يوليو ٢٠٠١م.

Socio-Economic Research on Fusion. EFDA RE-RE. July 2001.

السياسات الخاصة بالطاقة، ومبرراتها

الولايات المتحدة

طاقة موثوقة، يسيرة التكلفة وسليمة بيئياً لمستقبل أمريكا، تقرير مجموعة تطوير السياسة الوطنية، مايو ٢٠٠١م.

Reliable. Affordable and Environmentally Sound Energy for America's Future.Report of the National Policy Development Group. May 2001.

أوروبا

الكتاب الأخضـر: نحو استراتيجية أوروبية لأمن الإمداد بالطاقة، المفوضية الأوروبية كوم، ٢٠٠٠، ٧٦٩ نهائي.

Livre vert : Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnementénergétique. Commission européenne COM. 2000. 769 final.

عام

تقرير بشـأن تقويم حجم التغيرات المناخية، أسـبابها وأثارها المتوقعة على جغرافية فرنسـا بحلـول ٢٠٢٥، ٢٠٥٠ و٢١٠٠، إم. دونو،المكتب البرلماني لتقويم الخيـارات العلمية والتقنية، مجلس الشـيوخ، رقـم ٢٢٤، الجمعية الوطنية، رقم ٣٦٠٣.

Rapport sur L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques. de leurscauses et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon2025. 2050 et 2100. M. Deneux. OPECST. Sénat. no 224. Assemblée nationale.no 3603.

تقرير بشـأن الوضـع الراهن والأفاق التقنية للطاقات المتجددة، سي. بيرو و جـاي. إي. لو ديو، المكتب البرلماني لتقويم الخيارات العلمية والتقنية، الجمعية الوطنية، رقم ٣٤١٥، مجلس الشيوخ، رقم ٩٤.

Rapport sur L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables.

C. Birraux et J.-Y. Le Déaut. OPECST. Assemblée nationale. no 3415.Sénat. no 94.

السياسات الخاصة بالطاقة، ومبرراتها

الولايات المتحدة

طاقة موثوقة، يسـيرة التكلفة وسليمة بيئياً لمستقبل أمريكا، تقرير مجموعة تطوير السياسة الوطنية، مايو ٢٠٠١.

Reliable. Affordable and Environmentally Sound Energy for America's Future. Report of the National Policy Development Group. May 2001.

أوروبا

الكتاب الأخضـر: نحو استراتيجية أوروبية لأمن الإمداد بالطاقة، المفوضية الأوروبية كوم، ٢٠٠٠، ٧٦٩ نهائي.

Livre vert : Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique. Commission européenne COM. 2000. 769 final.

عام

تقرير بشـأن تقويم حجم التغيرات المناخية، أسـبابها وأثارها المتوقعة على جغرافية فرنسـا بحلـول ٢٠٢٥، ٢٠٥٠ و٢١٠٠، إم. دونو، المكتب البرلماني لتقويم الخيـارات العلمية والتقنية، مجلس الشـيوخ، رقـم ٢٢٤، الجمعية الوطنية، رقم ٣٦٠٣.

Rapport sur L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques. de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025. 2050 et 2100. M. Deneux. OPECST. Sénat. no 224. Assemblée nationale. no 3603.

تقرير بشـأن الوضـع الراهن والأفاق التقنية للطاقات المتجددة، سي. بيرو و جـاي. إي. لو ديو، المكتب البرلماني لتقويم الخيارات العلمية والتقنية، الجمعية الوطنية، رقم ٣٤١٥، مجلس الشيوخ، رقم ٩٤.

Rapport sur L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables.

C. Birraux et J.-Y. Le Déaut. OPECST. Assemblée nationale. no 3415.Sénat. no 94.

المـــــحتويـات :

المقدمـة	٥
الفصل الأول	٧
البلازما والاندماج النووي	٧
١. المبادئ الرئيسية	٧
١. ما الحرارة؟	٧
٢. انعطاف صغير عند النجوم	١٠
٣. عودة إلى الأرض	١٢
٤. مسارا البحث	١٥
٥. القياس	١٧
٢. التسخين	١٩
١. التسخين الأومي	١٩
٢. التسخين بالحقن بذرات متعادلة	٢١
٣. التسخين باستخدام الموجات العالية التردد	٢٤
٣. الحصر	٢٧
١. دور الجدران المادية	٢٧
٢. الحقل المغناطيسي	٢٩
٣. حركة الجسيم	٣١
٤. اضطرابات السمت	٣٣
٥. النتائج التي يتوصل إليها وقوانين المقادير الأسية	٣٥
٤. المفاعل وإنتاج الطاقة	٣٨
١. مبدأ المفاعل	٣٨
٢. الأمان	٤٢
٣. التكلفة.	٥٢
٤. الموارد	٥٦

الفصل الثاني ٥٩
الجوانب التقنية ٥٩
١. اندماج الحصر العُطالي ٦٠
١. الغرفة ٦٠
٢. الهدف ٦١
٣. متجه الطاقة ٦٢
٢. اندماج الحصر المغناطيسي ٦٣
١. اللفائف ٦٤
٢. المكونات المواجهة للبلازما ٦٦
٣. التحكم عن بعد ٦٨
الفصل الثالث ٧١
مستقبل البحث في طاقة الاندماج ٧١
١. التعطش إلى الطاقة ٧١
١. جانب الطلب على الطاقة ٧٢
٢. جانب العرض ٧٥
٢. إلى أين نمضي الآن؟ ٨١
١. اختيار نظام الاندماج ٨١
٢. السياق. ٨٣
٣. الخطوة القادمة ٨٦
١. وجهة نظر المصمّم ٨٦
٢. الأهداف ٨٨
٣. الوسائل اللازمة ٨٩
٤. بعض الأفكار اليسيرة ٩٠
٤. البرنامج المرافق الذي لا غنى عنه ٩١
خاتمة ٩٤
مراجع ٩٥
فهرس ٩٨

عن الكتاب:

تزويد كوكب الأرض بمصدر نظيف ومستديم للطاقة انطلاقاً من مبدأ اهتياج النجوم... كان هذا هو حلم مختبرات فيزياء البلازما لعقود من الزمن. وقد ولدت هذه العملية منذ ذلك الحين جرعات أولى من الطاقة، وتؤازر المختبرات اليوم جهودها لتشييد مفاعل أولي.

باستطاعة كل قارئ لهذا الكتاب بالغ الوضوح أن يتفهم طبيعة هذا المصدر الجديد لتوليد الطاقة الذي ربما يحل يوماً مكان الوقود الأحفوري: الاندماج النووي.

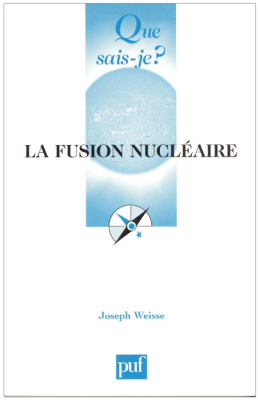
المؤلف:

جوزيف فايس خريج الكلية متعددة التقنيات، بوليتكنيك، وقد ساهم في العديد من الأبحاث الخاصة بفيزياء البلازما، قبل العمل على تنسيق الجانب الفرنسي من البرنامج الأوروبي لتقنية الاندماج. وهو الآن مستشار علمي لدى مفوضية الطاقة الذرية والطاقات البديلة.

المترجم:

أ.زينا مغربل

حاصلة على بكالوريوس في إدارة أنظمة المعلومات من جامعة مريلاند الأمريكية. تعمل في تعريب وترجمة العديد من المؤلفات مثل الكتب والمجلات من اللغات الإنجليزية والفرنسية، وبخاصة في مجالات العلوم والتقنية.



مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST

تعمل مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية على توفير المعرفة للقارئ العربي. فقامت في هذا الإطار بنشر سلسلة من الكتب والمجلات العلمية وأتاحتها للقراء دون مقابل بصيغتيها الرقمية والورقية. فجميع إصدارات المدينة متاحة على موقعها الإلكتروني ليتمكن المتصفح من تحميلها أو قراءتها على الإنترنت.

هاتف: ٠١١ ٤٨٨٣٤٤٤ - ٠١١ ٤٨٨٣٥٥٥
فاكس: ٠١١ ٤٨٨٣٧٥٦
ص.ب. ٦٠٨٦ الرياض ١١٤٤٢
المملكة العربية السعودية
مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية

رقم الوثيقة: 05P0026-PKT-0001-AR01

الموقع الالكتروني: www.kacst.edu.sa
إصدارات المدينة: publications.kacst.edu.sa
البريد الالكتروني: awareness@kacst.edu.sa

مطابع مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
رقم: ٣٥٠٢٠٣
ردمك: ٢-٦٦-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨