NO. 136

عالم الذرّة

مجلة هيئة الطاقة الذرّية السورية

مجلة عالم الذرّة

مجلة دورية تصدر ست مرات في السنة عن هيئة الطاقة الذرّية في الجمهورية العربية السورية.

وتهدف إلى الإسهام في نشر المعرفة العلمية باللغة العربية في الميدانين الذرّي والنووي، وفي كل ما يتعلق بهما من تطبيقات.

المدير المسؤول

أ. د. إبراهيم عثمان

المدير العام لهيئة الطاقة الذرّية

هيئة التحرير

(رئاسة هيئة التحرير)

أ. د. عادل حرفوش

أ. د. محمد قعقع

(الأعضاء)

أ. د. أحمد حاج سعيد

أ. د. مصطفى حمو ليلا

أ. د. نجم الدين شرابي

أ. د. فوزي عوض

أ. د. فواز كرد علي

أ. د. توفيق ياسين

الإخـــراج الفنـي

بشار مسعود

نبيل إبراهيم

مهند البيضه

أمل قيروط

المتابعة والتنسيق

حسان بقلة

التدقيق اللغوي

نوال الحلح

ريما سنديان

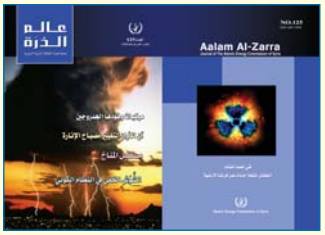
التنضيد

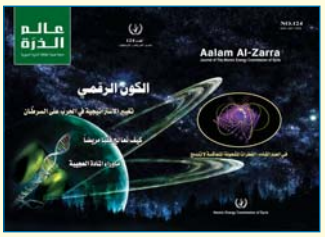
هنادي كنفاني

غفران ناوروز

التوزيع

عتيبة المنعم





المحتويات

مقالات

5 حدود الميْز المكاني الحالية

يظهر التقدم في مجاهر المسبار الماسح تحطيماً مستمراً للرقم القياسي لأصغر ما يمكن أن نرى، مع مقدرتنا الآن على إمكانية التمييز بين تفصيلات تقل المسافة بينها عن 100 بيكومتر، تقيس هذه المجاهر في الوقت نفسه مقدرة تأثر رأس الإبرة مع السطح. يفسّر فيليب موريارتي P. Moriarty كيف تمكننا هذه الأدوات من اكتشاف العالم النانوي، وما نقصده فعلاً «بالرؤية».

12 الطريق إلى انعدام المقاومة الكهربائية

منذ اكتشاف الناقلية الفائقة قبل مئة عام وفهمنا لها يتقدم بشكل أبعد ما يكون عن السلاسة. يشرح بول ميكائيل غرانت لماذا ما تزال هذه الظاهرة الجميلة والأنيقة والعميقة تحير فيزيائيي المادة الكثيفة وتربكهم حتى يومنا هذا.

22 القراءة السريعة

بوصول المنافسة لجائزة X آركون جينوميكس إلى 10 مليون دولار أمريكي، بدا أنه قد يكون للفيزيائيين الكفة الراجحة في المسعى لسلسلة الجينوم البشري بسرعة وبأقل كلفة، كما يشرح فيليب بول P. Ball.

28 من وقود اليورانيوم العالي التخصيب إلى المنخفض التخصيب في مفاعلات الأبحاث

أخبار علمية

37 وقود حيوي من حُثالة خضراء

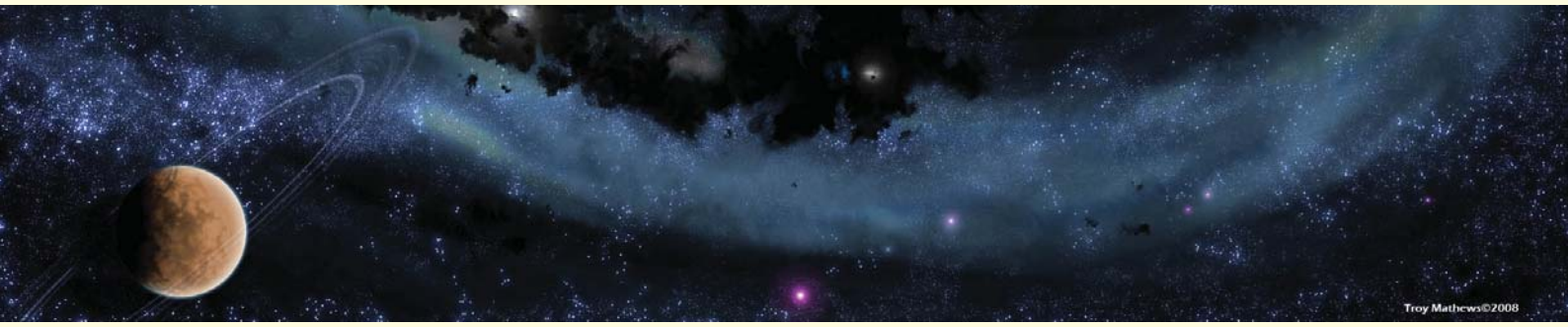
40 تقنية جديدة لفحص مرض ألزهايمر

42 علماء الاندماج في المستقبل

44 المصادم البشري الكبير

49 من النظائر إلى النجوم

52 الكبريت



أعمال الباحثين في هيئة الطاقة الذرّية السورية،
نشرت هنا كما وردت من مكتب الأمانة العلمية في الهيئة

ملخصات ورقات البحوث

58 التحليل بالتنشيط النتروني لعينات كبيرة الحجم من النفايات الصلبة المحلية باستخدام النترونات الضوئية لمفاعل منسر المطفأ

58 R-ISSR بوصفه أداة فعالة لتعقب مواقع وراثية جديدة عند النوع Arthrocnemum macrostachyum

59 محاكاة مونتي كارلو للوسطاء الفيزيائية لقلب مفاعل البحث السوري منسر

59 مميزات الامتصاص في محاليل:
Disperse Blue 1/Dioxane

60 تأريخ فخار سوري مستخرج من موقع تل سكا وتصنيفه باستخدام التألق الحراري والطرق الإحصائية لعدة متغيرات على أساس تحليل البروتون المحرِّض لإصدار أشعة إكس (PIXE)

ملخصات تقارير علمية

61 أنماط الأمواج السوليتونية في وصلة جوزفسون اللاخطية الطويلة

61 أثر الإحماء على البنية والتحولات الطورية لأغشية أكسيد التنغستين WO_3

62 التضخيم الليزري باستخدام بخار النحاس وفق مخطط هزاز-مضخم

62 محاكاة السلوك الدينامي لليزر غازي ضمن إطار نموذج نصف كلاسيكي بهدف الوصول إلى حساب دينامي مباشر لطيف الليزر

62 توصيف الأكسجين الذرّي في جهاز بلازما الانفراغ الراديوي للمهبط المجوف ودراسة فعاليته

63 الكسر الضوئي المضاعف لبعض الجمل البوليميرية البصرية اللاخطية

63 استعمال البيتومين في حفظ النفايات المشعة الناتجة من الصناعة النفطية المحتوية على الراديوم ^{226}Ra

شروط الترجمة والتأليف للنشر في مجلة عالم الذرّة

1- تُرسل نسختان من مادة النشر باللغة العربية مطبوعتان على وجه واحد من الورقة، وبفراغ مضاعف بين السطور.

2- يُكتب على ورقة مستقلة عنوان مادة النشر واسم الكاتب وصفته العلمية وعنوانه مع ملخصين لها أحدهما بالعربية والآخر باللغة الإنكليزية حصراً، في حدود عشرة أسطر لكل منهما، ويطلب من كل من المؤلف أو المترجم كتابة اسمه كاملاً، باللغتين العربية والأجنبية، ولقبه العلمي وعنوان مراسلته.

3- يُقدم المؤلف (أو المترجم) في ورقة مستقلة قائمة بالعبارات التي تشكل الكلمات المفتاحية "Key Words" (والتي توضح أهم ما تضمنته المادة من حيث موضوعاتها وغايتها ونتائجها والطرق المستخدمة فيها) وبما لا يتجاوز خمس عبارات باللغة الإنكليزية وترجمتها بالعربية.

4- إذا سبق نشر هذا المقال أو البحث في مجلة أجنبية، ترسل الترجمة مع صورة واضحة عن هذه المادة المنشورة ويستحسن إرسال نسخة الأصل المطبوع والأشكال (الرسوم) الأصلية إن وجدت، ولو على سبيل الإعارة.

5- إذا كانت المادة مؤلفة أو مجمعة من مصادر عدة، يذكر الكاتب ذلك تحت العنوان مباشرة كأن يقول "تأليف، جمع، إعداد، مراجعة" وترفق المادة بقائمة مرقمة للمراجع التي استقاها منها.

6- إذا تضمنت المادة صوراً أو أشكالاً، ترسل الصورة الأصلية وكذلك الأشكال مخططة بالحبر الأسود على أوراق مستقلة، إلا إذا كانت موجودة في المادة المطبوعة بلغة أجنبية (كما جاء في الفقرة "4") مرقمة حسب أماكن ورودها.

7- يُرسل مع المادة قائمة بالمصطلحات العلمية العربية المستخدمة فيها مع مقابلاتها الأجنبية إذا لم تكن واردة في معجم الهيئة للمصطلحات العلمية والتقنية في الطاقة الذرية الذي تم نشره في أعداد المجلة (2-18).

8- تكتب المصطلحات وكذلك أسماء الأعلام باللغتين العربية والأجنبية عند ورودها في النص أول مرة ومن ثم يكتفى بإيراد المقابل العربي وحده سواء أكان هذا المقابل كاملاً أو غير كامل وتستعمل في النص المؤلف أو المترجم الأرقام العربية (1، 2، 3، ...) أينما وردت مع مراعاة كتابتها بالترتيب العربي من اليمين إلى اليسار وإذا وردت في نص معادلة أو قانون أحرف أجنبية وأرقام نكتب المعادلة أو القانون كما هي في الأصل الأجنبي.

9- يُشار إلى الحواشي، إن وجدت، بإشارات دالة (★، +، x، ...) في الصفحة ذاتها، كما يشار في المتن إلى أرقام المصادر والمراجع المدرجة في الصفحة الأخيرة، وذلك بوضعها ضمن قوسين متوسطين [ ].

10- ترقم مقاطع النص الأجنبي والنص العربي بترتيب واحد في حالة الترجمة.

11- يرجى من السادة المترجمين مراعاة الأمانة التامة في الترجمة.

12- تخضع مادة النشر للتقييم ولا ترد إلى أصحابها نشرت أم لم تنشر.

13- يمنح كل من الكاتب أو المترجم أو المراجع مكافأة مالية وفق القواعد المقررة في الهيئة.

جميع المراسلات توجه إلى العنوان التالي:

الجمهورية العربية السورية- هيئة الطاقة الذرّية - مكتب الترجمة والتأليف والنشر - دمشق : ص.ب: 6091

هاتف (+963)11-6111926 فاكس (+963)11-6112289

E-mail: tapo@aec.org.sy

الإعلانات

تود مجلة عالم الذرّة إعلام الشركات والمؤسسات العاملة في قطاع التجهيزات العلمية والمخبرية كافة والصناعات المتعلقة بها عن فتح باب الإعلان التجاري فيها، للمزيد من الاستفسار حول رغبتكم بنشر إعلاناتكم التجارية يرجى الكتابة إلينا أو الاتصال بنا وفق العنوان الوارد أعلاه.

رسوم الاشتراك السنوي

يمكن للمشتركين من خارج القطر إرسال رسم الاشتراك إلى العنوان التالي:

المصرف التجاري السوري - فرع رقم 13، مزة جبل - دمشق - ص.ب: 16005، رقم الحساب 2/3012 أو بشيك باسم هيئة الطاقة الذرّية السورية

يمكن للمشتركين من داخل القطر دفع قيمة الاشتراك بحوالة بريدية على العنوان التالي:

مجلة عالم الذرّة - مكتب الترجمة والتأليف والنشر - هيئة الطاقة الذرّية السورية - دمشق - ص.ب: 6091 مع بيان يوضح عنوان المراسلة المفضل.

أو يدفع رسم الاشتراك مباشرة إلى مكتب الترجمة والتأليف والنشر في الهيئة: دمشق - شارع 17 نيسان

- رسم الاشتراك من داخل القطر: للطلاب (200) ل.س، للأفراد (300) ل.س، للمؤسسات (1000) ل.س.
- رسم الاشتراك من خارج القطر: للأفراد (30) دولاراً أمريكياً، للمؤسسات (60) دولاراً أمريكياً.

سعر العدد الواحد

سوريا: 50 ل.س مصر: 3 جنيهات لبنان: 3000 ل.ل الجزائر: 100 دينار

الأردن: 2 دينار السعودية: 10 ريالات وفي البلدان الأخرى: 6 دولارات

يُسمح بالنسخ والنقل عن هذه المجلة للاستخدام الشخصي بشرط الإشارة إلى المرجع، أما النسخ والنقل لأهداف تجارية فغير مسموح به إلا بموافقة خطية مسبقة من الهيئة.

حدود الميْز المكاني الحالية

يظهر التقدم في مجاهر المسبار الماسح تحطيماً مستمراً للرقم القياسي لأصغر ما يمكن أن نرى، مع مقدرتنا الآن على إمكانية التمييز بين تفصيلات تقل المسافة بينها عن 100 بيكومتر، تقيس هذه المجاهر في الوقت نفسه مقدرة تآثر رأس الإبرة مع السطح. يفسّر فيليب موريارتي P. Moriarty كيف تمكننا هذه الأدوات من اكتشاف العالم النانوي، وما نقصده فعلاً «بالرؤية».

فيليب موريارتي أستاذ فيزياء في جامعة نوتنغهام، المملكة المتحدة.

أعلن إرنست رذرفورد، قبل قرابة قرن مضى في حفلة عشاء مساء أحد أيام الآحاد، مبتهجاً «إنني أعرف كيف تبدو الذرّة» معتمداً على مقدرته الفذة في استخلاص نتائج سلسلة من نتائج تبعثر صعبة ومتعبة ليضعها في نموذج ذرّة أنيق مقبول. مع ما قدمته الثورة في فهمنا للذرّة التي أتى بها ميكانيك الكم، ما يزال نموذج رذرفورد المتوّج حاضراً. إذ إن غير العلماء وعدداً قليلاً من العلماء أيضاً، ما يزال متمسكاً بتصور رذرفورد وبور للذرّة، وليس توزعات كثافة الاحتمال للمداريات s, p, d ومداريات أخرى.

ففي عقول الكثيرين ليست الذرّة أكثر من منظومة شمسية بالغة الصغر.

نستعمل المجهر طبعاً لرؤية الأشياء الصغيرة. في الواقع، إن كلمة مجهر في الأصل اليوناني تعني «رؤية الصغير». غير أن المجاهر التقليدية البصرية التي يستعملها العديد منا لجعل البنى الصغيرة في المحرق واضحة تعاني من مشكلة أساسية لدى الوصول إلى ميْز يقارب شيئاً صغيراً بقدّ الذرّة: إذ إن طول موجة فوتون الضوء المرئي ضخم جداً في المقاس الذرّي. يشغل الضوء

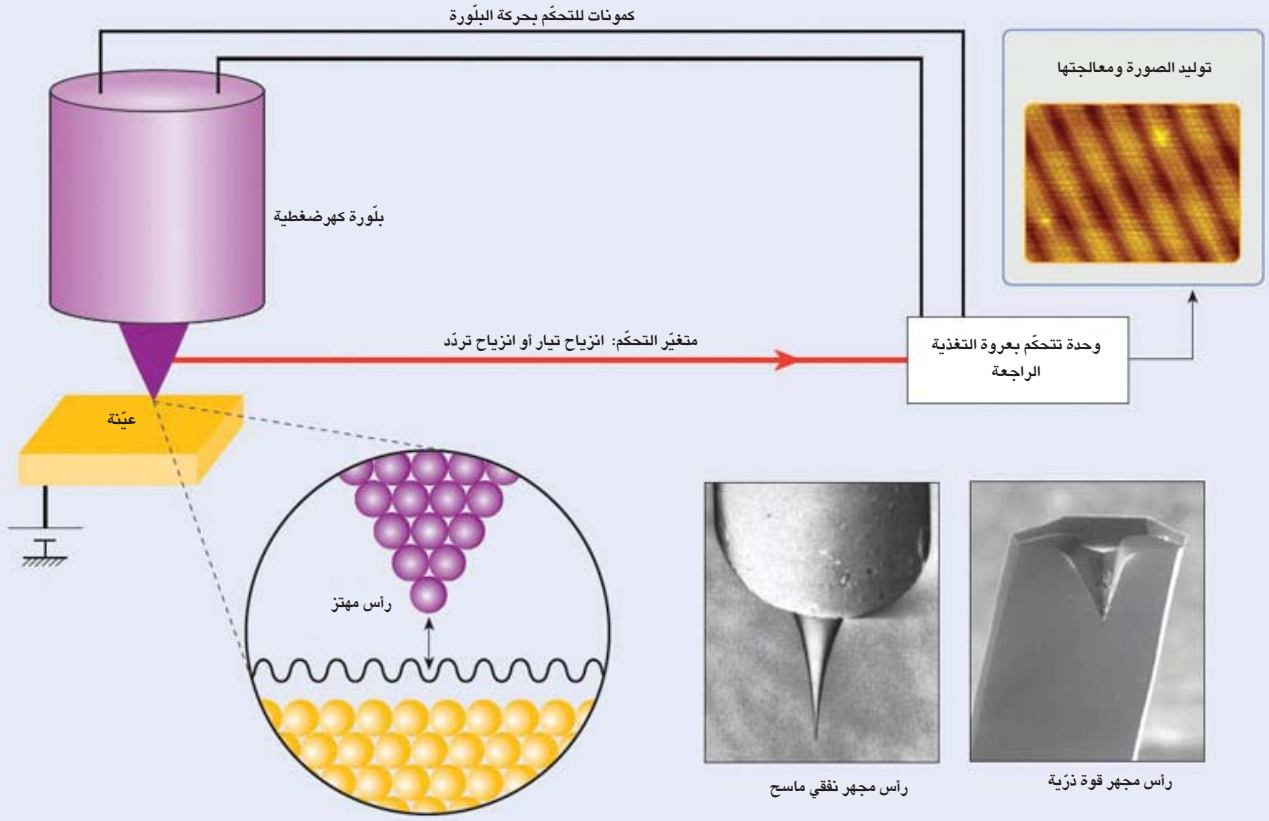
المرئي مجالاً من الأطوال الموجية يقع بين 400- 700 نانومتر، ويوجد حدٌّ أساسي –هو حدّ حدوث الانعراج– يملي علينا صغر الجسم الذي يمكن تمييزه عند استعمال فوتونات بهذه الأطوال الموجية. فقد تبيّن أن أفضل ما يمكن القيام به باستعمال المجاهر التقليدية البصرية هو إمكان التمييز بين أجسام تقارب في عرضها 200 نانومتر –أي ما يقارب ثلاث مراتب عشرية أكبر من قطر الذرّة.

ولكي نقترب قرباً مناسباً لتصوير أطوال من مقاسات ذرّية، فإن ذلك يتطلّب منّا مقاربة مختلفة اختلافاً جذرياً، قد تكون إحدى درجاتها المنطقية هي إنقاص طول موجة الضوء. نحتاج عندئذٍ، إلى الأشعة السينية للوصول إلى ميْز النانومتر وما دونه، وقد حصلت فعلاً خروقات باهرة في مقدرة ميْز مجاهر الأشعة السينية في السنين الأخيرة. على سبيل المثال، تدبّر باحثون السنة الماضية كسر حاجز ميْز العشرة نانومتر لأول مرة.

غير أن الفوتون ليس الجسيم الوحيد المتوفر لنا طبعاً. إذ يمتلك الإلكترون طولاً موجياً أقصر مما يمتلكه الفوتون، وتوجد تطورات مذهلة تدفع لتصغير ميْز المجاهر الإلكترونية النافذة (TEMs). فمنذ قرابة سنة مضت، ذُكر في تقرير مجموعة رائدة بمختبر بيركلي الوطني في كاليفورنية الوصول إلى ميْز دون 50 بيكومتر باستعمال أحدث مجهّر إلكتروني نافذ مجهز ببصريات إلكترونية مصحِّحة للزيوغ. إلا أنه من غير الواضح تماماً أن الخيال المتشكل في المجهر الإلكتروني النافذ لا يُظْهِر «مباشرة» أماكن الذرّات. وعوضاً عن ذلك، فإنه يسجل المعلومات من مستوي المجهر الإلكتروني النافذ على شكل أنماط تداخلية من الأمواج الإلكترونية. ويمكن باستعمال خوارزميات ونماذج معقدة قلب «التابع الموجي المسجل عند مستوي خرج المجهر «إلى صورة البنية الذرّية. عندئذٍ يبقى السؤال مطروحاً للنقاش حول إمكان وصف الصورة الناتجة كصورة للذرّات بالمعنى المألوف أم لا، (انظر المؤطر).

غير أنه ما الوضع فيما إذا أمكننا تصميم مجهر «لا يحتاج» عدسات أو أي عناصر بصرية أخرى كي يعمل؟ يتلخص الجواب في المؤطر المعنون «مجهر المسبار الماسح» (SPM). توجد المجاهر السابرة التي يصل ميْزها ليس فقط إلى الأبعاد الذرّية بل إلى أبعاد دون ذرّية، في أشكال عدة متباينة. غير أنها جميعها تستعمل

الشكل 1 : قس وقم بتغذية راجعة وعدّل ثم أعد



تعتمد جميع مجاهر السبر الماسحة عروة تغذية راجعة ثابتة. فعند قيام الرأس الماسح بمسح سطح عيّنة خطا بعد خط جيئة وذهاباً لتكوين صورة طبولوجية ثلاثية الأبعاد، تغذّى المعلومات راجعة عبر وحدة تحكم لضبط موضع الرأس نسبة إلى العيّنة. ويحتاج الرأس أن يكون قريباً قرباً كافياً ليتآثر مع ذرّات العيّنة، ولكن دون أن يقترب قرباً يجعله يصدم السطح. تقيس المجاهر النفقية الماسحة التيارَ المارَّ بين العيّنة والرأس، في حين تقيس مجاهر القوة الذرّية الماسحة الانزياحات في الترددات التجاوبية لرأس مجازة (كابول) مهتز.

مفهوماً مختلفاً كلياً عما ذكر حتى الآن عن المجاهر: إذ يولّد مجهر المسبار الماسح صورته بقياس التآثر بين رأس حادّ مع سطح –فلا توجد عدسات ولا مرايا ولا عناصر بصرية. لدينا الآن عائلة من تقنيات المسبار الماسح تستفيد من تآثرات محلية مختلفة بين رأس وسطح. يتضمن ذلك جدّ grand تقنيات المسبار الماسح– مجهرية المسح النفقي (STM)، التي تعتمد قياس التيار بين الرأس والعيّنة. لتأتي بعدها مجهرية القوة الذرّية (AFM) التي اختُرعت بعد دخول المجهرية النفقية بقليل، فحفّزت تقنيات مشابهة مختلفة لتتناول مجالاً من القوى المتبادلة، متضمنة القوة الكهرساكنة والقوة المغنطيسية وقوة الاحتكاك. غير أن مقدرات مجهر القوة الذرّية لتصوير الذرّات اعتماداً على سبْر القوى الكيميائية ذات المدى القصير هي التي تفوقت على المجاهر النفقية الماسحة لتصبح التقنية المختارة لمجهرية التمييز بين الذرّات.

أصبح تمييز الذرّات الفردية أو الجزيئات باستعمال مجهرية متقدمة حادثاً عادي الحدوث في الكثير من مختبرات البحث، وقد يقول البعض بضرورتها التي لا غنى عنها. غير أن مقولة رذرفورد ما زالت تستأهل منا عناية حذرّة: إذ كيف تبدو الذرّة أو حتى الجزيئة فعلياً؟ وما إمكان تمييز تفاصيلها؟ وإلى أي مدى تعطي عيّنة معينة مع نوع المجهرية المستعملة، إضافة إلى المعالجات الرقمية المتزايدة "فنياً" تعريفاً ليس لشكل الذرّة فقط في صورة محددة، بل علينا البحث في كيفية تلقي الجمهور العريض عالم الذرّة وعالم الجزيئة ذلك؟

أثر النفق أمامك

لقد لوحظ أول خيال للذرّات لأول مرة في أحد أيام خريف عام 1955، عندما أجهد طالب الدكتوراه كانور باهادور K. Bahadur والمشرف عليه الأستاذ إروين موللر E. Muller عيونهما، في عتمة مختبر مظلم، بالنظر نحو شاشة متفلورة لمجهر الحقل الأيوني (FIM) باحثين عنها. كان هذا تتويجاً لجهود استمرت أكثر من عقدين قام بها موللر، بدأت مع اختراع مجهر الإصدار الحقلي (FEM) في ثلاثينيات القرن العشرين وما تبع ذلك من تطويرات للمجهر الأيوني عندما كان يعمل في معهد القيصر ويلهام ببرلين.

يستعمل كلا نوعي المجاهر رأساً معدنياً حادّاً بمثابة العيّنة لهما. فقد جعل موللر رأس مجهره منحازاً بجهد عالٍ يصل بضعة كيلو فولط للحصول على حقول كهربائية ضخمة، من مرتبة 10^{10} V.m^{-1}. وفي النماذج الأولية لهذا المجهر –أي المجهر FEM– مكّنت الحقول الكهربائية تلك الإلكترونات من العبور نفقياً وفق ميكانيك الكم من الرأس إلى الخلاء، لتخترق الحاجز الكموني الذي يحصر حركة الإلكترونات في المعدن، متبعة ظاهرة معروفة باسم "الإصدار الحقلي". يتبع هذا التحرّر تسريع للإلكترونات الصادرة وفق خطوط الحقل الكهربائي باتجاه شاشة متفلورة لتعطي خيالاً مكبراً لنهاية الرأس. غير أن موللر لم يستطع بلوغ الميْز الذرّي إلا عندما انتقل إلى استعمال أيونات الغاز مكان الإلكترونات.

على الرغم من الابتهاج الذي ولّدته صور المجهر الأيوني وعدم تحمّل مجتمع المجهريين لما كان يتوقع منهما، لم يحصل موللر، الذي توفي عام 1977، على جائزة نوبل. ومُنحت جائزة نوبل مكان ذلك عام 1986 لعمل استفاد من أثر النفق الكمومي بطريقة مختلفة لإنتاج صور للذرّات: ذلك هو اختراع المجهر الماسح النفقي الذي قدّمه جيرو بينينيك G. Binning وهنريش. روهر H. Rohrer عندما كانا يعملان في زوريخ IBM. (لقد شاركا الجائزة مع إرنست روسكا E. Ruska لتطويره أول مجهر إلكتروني).

ثورة المسح

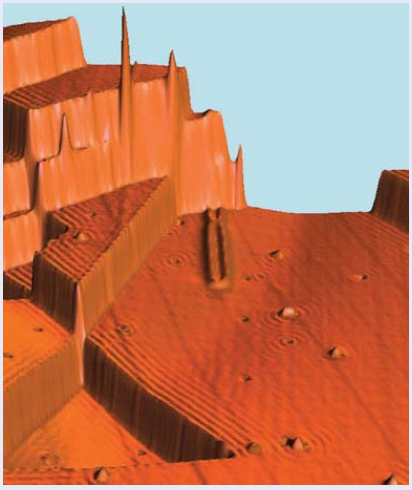
أصبح ممكناً مع اختراع مجهر المسح النفقي عام 1981 –بعد انقضاء قرابة 25 عاماً من تمييز الذرّات لأول مرة بالمجهر الأيوني– رؤية الذرّات والجزيئات فرادى أينما وجدت على سطح صلب، وليس فقط الذرّات الموجودة عند الرأس المؤنف. لقد استعمل الرأس هذه المرة مجسّاً ماسحاً يتجول عرضياً عبر سطح العيّنة ليرسم طبوغرافية في ثلاثة أبعاد (الشكل 1). يبيّن الشكل 2a صوراً مأخوذة بالمجهر النفقي الذي يمتلك أعلى ميْز حتى اليوم لسطح يستعمله معظم العاملين بالمجهرية النفقية لاختبار صحة مجسّات مجاهرهم النفقية –ذلك هو سطح السليكون (111) المعاد بناؤه وفق (7×7). يدلّ القوس (7×7) على حقيقة تشير إلى أنه عند قطع السليكون وفق المستوي (111) وإحمائه فإن ذرّات السطوح الجديدة ستعيد ترتيب نفسها، كي تنقص من طاقتها، وفق نمط فسيفسائي كالألماس –تظهر "خلايا الوحدة" للسطح المعاد ترتيبه في الشكل 2b. إن المتجهتين اللتين توصّفان خلايا الوحدة تلك هي أكبر بسبع مرات من تلك التي توصّف فواصل الذرّات في المستوي

نظرة سريعة : مجهرية المسبار الماسح

- تولّد مجاهر المسبار الماسحة صوراً مستفيدة من التآثر بين رأس حادّ وسطح .
- تستفيد مجاهر سبر مختلفة تآثرات مختلفة –بدءاً من الإلكترونات النفقية الكمومية في المجاهر النفقية الماسحة وصولاً إلى القوة المتبادلة بين نهاية الرأس المؤنفة وذرّات سطح في مجهرية القوة الذرّية.
- لا تقتصر مجهرية المسبار الماسح على تصوير ذرّات مفردة وجزيئات، بل تميّز بين معالم دون جزيئية ودون ذرّية ناجمة عن مداريات إلكترونية.
- إن كلّ صورة مسبار ماسح هي تلافيف تعكس بنية الرأس والعيّنة. يمكن الاستفادة من هذا الأثر لتصوير التناظرات المكانية لمداريات إلكترون الرأس وامتداداتها.

يبقى السؤال، إلى أي مدى تمثل صور المسبار الماسح، مع مقدرتها على تمييز ملامح تصل المقاسات فيها إلى ما دون الذرّية ودون الجزيئية، صورة "حقيقية" أو صورة دقيقة للواقع؟ فهل تبدو الذرّات والجزيئات فعلياً كما تُظهرها صور المسبار الماسح؟ للإجابة عن هذا السؤال وأسئلة مشابهة، عقدت ورشة عمل في حزيران/يونيو من هذا العام بعنوان "الأخلاقيات والجماليات في عصر هندسة الرؤية المتقدمة" نظمها معهد العلوم والمجتمع بجامعة نوتنغهام، فجمع معاً علماء وعلماء اجتماع وعلماء نفس وفنانين. يحاور بعضهم ممن كانوا أبرز المناقشين في هذا المجال قائلاً بأننا لن نستطيع أبداً "رؤية" الذرّات بمجهرية المسبار الماسح لأنها تستعمل مقاربة مختلفة كلياً، أي مقاربة بدون عدسات ولا فوتونات، للتصوير مقارنة بالمجهرية العادية (وأعيننا). بناءً على ذلك، لا يمكن الادعاء بأن هذه التقنية تزودنا بتمثيل دقيق للذرّات والجزيئات. كما يشير المنتقدون أيضاً إلى استعمال الألوان الزائفة، وإلى استعمال النسب الباعية المبالغ فيها والتظليل الصنعي لتعطي تشويهات مزعجة ومقلقة لما يتلقاه عامة الناس عن العالم الذرّي.

عليّ أن أعترف أنني وجدت مثل هذه النقاشات غير مريحة وغير مقنعة. فصحيح نحن لا نستعمل المجهرية البصرية العادية لتصوير الأعضاء الداخلية في جسمنا وأنسجته، لكن قليلاً منا من يدّعي أن هذه الصور التي تعطيها الأجهزة فوق الصوتية والمقطعية الماسحة ليست تمثيلاً دقيقاً لما يجري داخلنا. نعم يوجد صعوبات بالتلقي مرافقة لتلافيف ما يعطيه الرأس المؤنف ولحالات العيّنة في صورة أية مجهرية مسبار ماسح (SPM)، لكنه يصعب القول بأن صورة البنتاسين، على سبيل المثال، في الشكل 4c هي تمثيل خاطئ للجزيئة. وإنني واثق من أن هذه الصورة بالتحديد، ستظهر في الكتب الجامعية الأولى على أنها تبيان لتوافق بين صورة مجهر القوة الذرّية غير التلامسي ونموذج الكرات والقضبان للبنتاسين وأن هذا التوافق مميز.



أمواج إلكترونية تتدحرج على سطح نحاسي جميلة ومفيدة

إن استعمال معالجة الصورة لتحسين الاستقبال الجمالي للبيانات العلمية ليس محدوداً بالطبع لصور المجاهر. إذ يوجد على الطرف المقابل من المقياس، الصور المدهشة القادمة من مقراب هابل الفضائي المعزّزة باستعمال أنماط ألوان زائفة وبتعديلات تباين إضافية. فالادعاءات بأن هذه تؤدي إلى إعطاء عموم الناس معلومات غير دقيقة هي في غير محلّها في رأيي. مع أنه من الضروري أن تكون معالجة الصور والمعلومات في حدّها الأدنى، إن وجدت ضرورة لذلك، عند النظر في العملية الأساسية، فإن هذه المعلومات الخام لا تتمتع بالمظهر الجمالي لتجذب غير العلميين. وإنه لا يفسد في الأمر شيئا إن كنا فقط لا نستطيع أو لا ننجز رؤية المنظر نفسه بدقة عبر المجهر البصري أو عبر المقراب وبالتالي نقول بعدم صحته.

(111) – ومن هنا جاءت الأبعاد (7×7). لقد ركّز بينينك وروهر جهودهما لتصوير هذا السطح بالذات، الذي يُعدُّ نموذجاً أولياً لدراسات المجسّات الماسحة في شروط خلاء عالية جداً.

مع أن مجاهر الإصدار الحقلي والأيوني الحقلي والماسح النفقي جميعها تستعمل رأساً حادّاً يمكن أن تصدر الإلكترونات منه وفق عبور نفقي كمومي، فإن المجهر النفقي الماسح يختلف عن البقية اختلافاً كبيراً في أن الإلكترونات تعبر نفقياً ليس من الرأس إلى الخلاء، بل تعبر فاصلاً صغيراً مخلى بين الرأس والعيّنة. ويمكن للإلكترونات أن تسير إما من الرأس إلى العيّنة، أو، مع تغيير في جهة قطبية الجهد، من العيّنة إلى الرأس. ويزداد احتمال أن تعبر الإلكترونات نفقياً زيادة أسّية مع تناقص الفاصل بين الرأس والعيّنة.

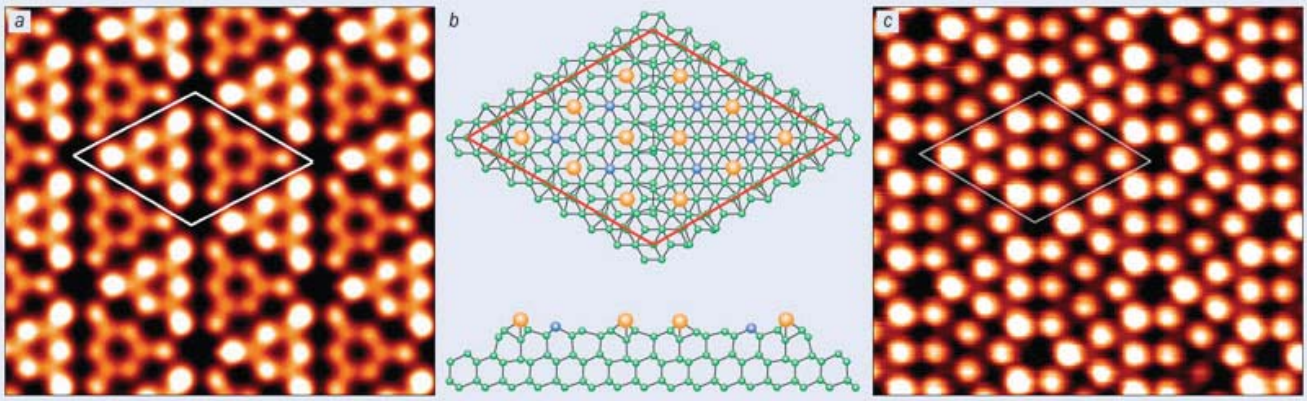
نستطيع تعيين موقع الرأس في المجاهر SPM بدقة تصل إلى دون الأنغستروم فوق السطح باستعمال مفعّلات كهرضغطية. تعتمد هذه الأدوات في عملها بلّورات كهرضغطية لإنتاج جهد كهربائي عندما تضغط ميكانيكياً –هو أثر يألفه كثيرون منا بسبب الاستفادة منه لتوليد شرارة في قدّاحات الغاز والسجائر. وبالعكس، فإن البلّورة الكهرضغطية ستتشوّه عند تطبيق جهد بين طرفيها. وإن هذه الظاهرة الأخيرة هي التي يُستفاد منها في مجاهر المسبار الماسح. إذ باستعمال منابع جهد منخفضة الضجيج ومفعّلات كهرضغطية عالية النوعية يمكن التحكّم بوضع الرأس حتى مستويات مسافة البيكومتر.

رؤية الذرّات؟

ماذا تمثل إذن نهاية عظمى في شدة صورة مجهر نفقي ماسح؟ فأصل كل قمة تيار يسري بين الرأس والعيّنة، تتعين قيمته بمقدار التراكب بين دوال الأمواج الإلكترونية للرأس والعيّنة. فصورة مجهر نفقي ماسح هي في الواقع خريطة لكثافة الحالات الإلكترونية الموضعية ضمن نافذة طاقة معرّفة بجهد الانحياز المطبّق على الرأس أو العيّنة. يسبب التراكب بين الدوال الموجية للرأس والعيّنة في تلافّ (convolution) لبنية الرأس والسطح، وإن إزالة تلافّ أحدهما عن الآخر، بصورة عامة، ليس بالأمر السهل أبداً.

يوجد في حالة سطح السليكون (111)-(7×7) تناغم بالصدفة بين مواقع الذرّات السطحية وقمم صورة المجهر النفقي الماسح، ويعود السبب في ذلك غالباً لوجود مداريات رابطة متدلية لذرّات سطح السليكون متوجهة عمودياً نحو خارج السطح. مع ذلك يمكن لجهود كهربائية مطبقة مختلفة أن تسبّب تغييرات واضحة في تباين الصورة (الشكل 2c) لأن نافذة الطاقة المتاحة لعبور الإلكترونات النفقية قد عُدّلت. لذلك فإننا لا نرى في المجهر النفقي الماسح

الشكل 2 : سطح السليكون (111)-(7×7) الألماسي أفضل صديق للعاملين في المجهرية النفقية الماسحة



(a) أفضل صورة، من حيث الميْز، أُخذت بمجهر نفقي ماسح لسطح سليكون (111)–(7×7) حتى تاريخه. (b) يمكن التمييز بين طبقة الذرّات العلوية (الممثلة بالدوائر الصفراء في نموذج البنية) والطبقة من الذرّات الواقعة تحتها فيما يسمى طبقة الذرّات الساكنة (الدوائر الزرقاء). (c) يؤدي تغيير جهد الانحياز المستعمل إلى اكتساب صورة لتعديل مجال طاقة الإلكترونات العابرة نفقياً، وبالتالي يسبِّب تغيّراً ملحوظاً في تباين الصورة.

الذرّات رؤية عين، أي إننا لا نرسم خريطة لمواقع الذرّات، بل نرسم خريطة تغيّرات الكثافة الإلكترونية.

وفي مجال التصوير الجزيئي، نجد صور تغيّرات الكثافة الإلكترونية عالية الميْز مدهشة حقاً. وإن جزيئة فلورين باكمنستر، جزيئة C_{60} التي تشبه كرة القدم، كانت مثيرة للنقاش حقاً في هذا الصدد، حيث بيّنت دراسات المجهر النفقي الماسح عليها البنية الإلكترونية الداخلية. إذ ينشأ التباين ضمن الجزيئي في صور المجهر النفقي الماسح من التوزع المكاني للكثافة الإلكترونية لمداريات الجزيئة. (ينفرد المجهر النفقي الماسح بقدرة رسمه المداريات الممتلئة بالإلكترونات والخالية منها بميْز دون النانومتر). يظهر في الشكل 3 مثالٌ ملفتٌ ومدهشٌ لذلك. أُخذ هذا المثال من عمل الباحثين جيلوم شول G. Schull وريتشارد بيرندت R. Berndt العاملين في جامعة كريستيان ألبرختس في كييل بألمانية، حيث تظهر البيانات تغيّر التباين ضمن الجزيئي في صور المجهر النفقي الماسح مع تغيّر توجهات الجزيئة بالنسبة للسطح.

تحسّس القوة

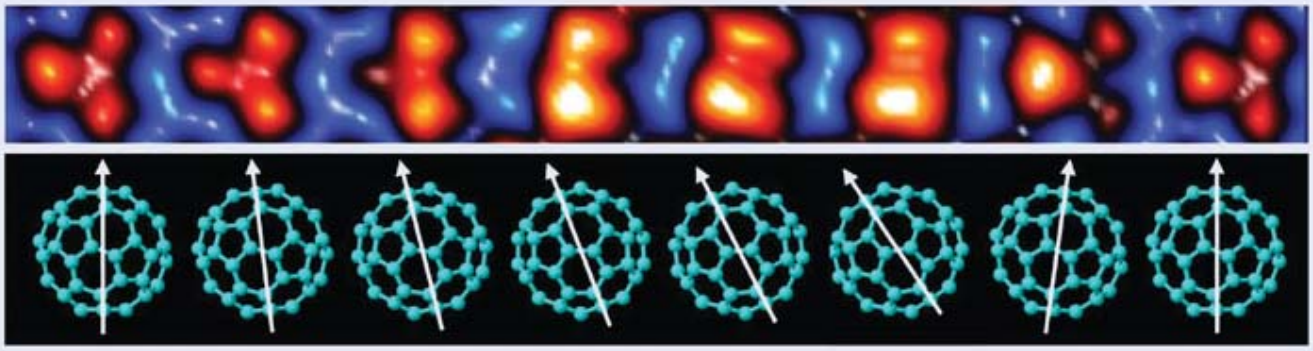
لسنا مقيدين باستعمال التيار النفقي المار بين الرأس والعيّنة. فقد قام بيننغ وروهرر ملهمين في أعقاب محاضرة، ألقاها جون بيشيكا J. Pethica في أول ورشة عالمية تناولت مجهرية المسح النفقي عام 1985، بتوسعة عمل المجهر النفقي الماسح ليكشف عن القوى الذرّية باختراعهما مجهر القوة الذرّية عام 1986. إن أحدث تقدم حصل في التصوير العالي الميْز مؤخراً نَجَم عن مجهر قوة ذرّية محسّنٍ يستعمل ما يُعرف بالنمط «اللاتلامسي» non-contact (الشكل 4).

يُعدُّ مجهر القوة الذرّية اللاتلامسي NC-AFM مثالاً ممتازاً يطبّق معلومات فيزياء السنة الأولى من الدراسة الجامعية –في هذه الحالة، في مجال الاهتزازات والأمواج– على علم متقدم يستعمل آخر ما توصلت إليه آخر التقنيات. ففيه يوجد الرأس المؤنف الذي هو جزء مشترك بين جميع مجهرية المسبار الماسح، في نهاية مجازة (كابول) يهتز عند تردده الخاص. ففي حين يكون متحول التحكّم في المجهر النفقي الماسح هو التيار النفقي، نجد المتحول المشاهد في المجهر NC-AFM الرئيسي هو انزياح التردد –أي الفرق بين تردد التجاوب في «الفضاء الحرّ» للمجازة عندما يكون بعيداً عن العيّنة وتردد التجاوب عندما يتآثر الرأس مع السطح. فكما أن التردد التجاوبي المرافق لكتلة معلقة بنابض ينزاح عند تغيّر الكتلة، فإن الانزياح في التردد المشاهَد في المجهر NC-AFM ينشأ عن القوة التي يتبادل تأثيرها الرأس والسطح. وأصبح الآن ممكناً قياس القوة الناجمة عن رابطة كيميائية مفردة بين ذرّتين مباشرة بدقة تصل إلى مسافات دون ذرّية.

تقع الأبحاث على المجهر NC-AFM في الوقت الحاضر في قسمين عريضين. إذ تستعمل بعض مجموعات البحث مجازات «مرنة» إلى حدٍّ ما، من السليكون ذات ثوابت نابضية صغيرة نسبياً (من مرتبة عشرات النيوتن لكلّ متر) في حين يركّز آخرون على تطبيقات مجسّات الشوكات التجاوبية الكوارتزية القاسية، تماماً كتلك المستعملة في ساعات الكوارتز والميقاتيات الكوارتزية بغية الحصول على صورة عالية الميْز.

ففي نوع جديد من المجاهر NC-AFM المسمى كيو بلس qPlus رائده فرانز غيسيبل F. giessibl الذي يعمل حالياً في جامعة ريغنزبورغ، يلصق الرأس بفرع من فرعي شوكة رنانة من الكوارتز

الشكل 3 : ميْز دون جزيئي في مجهرية المسح النفقي



إن كلّ ملمح برتقالي يُرى في هذه الصورة المأخوذة بالمجهر النفقي الماسح (STM) هو جزيئة C_{60}. وإن تضاريس STM التي تظهر لكلّ جزيئة ذات بنية معقّدة، تُظهر إما شكلاً ذا عروتين أو شكلاً ذا ثلاث عرى مع تغيّرات كبيرة في تباين الجزيئة المصورة. ينشأ التغيّر في التباين دون الجزيئي عن المداريات الجزيئية لكرات بوكي، حيث يعتمد شكلها في صورة المجهر النفقي الماسح على توجهات الجزيئة فوق سطح الذهب السفلي اعتماداً قوياً.

بغية الحصول على مجازة متينة جداً (من مرتبة 1800 نيوتن لكلّ متر). وبما أن المجازة متينة لدرجة عالية يمكن استعمال سعات اهتزازات صغيرة جداً تصل عشرات من البيكومتر، مما يجعل التقنية حسّاسة جداً لمجال القوى صغيرة المدى المصادفة في الربط الكيميائي. ويمكن لمجازات سليكونية إعطاء نتائج ممتازة أيضاً: فقد قام أوسكار كوستانس O. Custance وسيزو موريتا S. Morita من معهد اليابان القومي لعلوم المواد ومن جامعة أوساكا على الترتيب، بسلسلة من التجارب الأخاذة الخارقة على المجاهر NC-AFM لا تتضمن فقط تحديد هويات المستويات الذرّية، بل تتعداها لمنابلة الذرّات فرادى على سطوح أنصاف النواقل.

ظهرت العام الماضي نشرة مهمّة في مجلة العلوم Science جذبت الأنظار إليها في عالم الدعاية، حيث استعمل ليو غروس L. Gross وزملاؤه تقنية NC-AFM qPlus لتمييز بنية البنتاسين، محققين أعلى ميْز لجزيئة حتى الآن (الشكل 4a). تكشف الصورة المدهشة «معمارية» جزيئة البنتاسين، مميْزة بوضوح الروابط الداخلية مفصّلة ما أعطاه المجهر النفقي الماسح من تضاريس (طبوغرافية) بتعريته كاملاً، وهذا يظهر في الشكل أيضاً. تطلب ذلك تقدُّمين مفتاحيين حتى تحقق هذا الميْز غير المسبوق. الأول، استعمال جزيئة أول أكسيد الكربون ملصقة بالرأس عوضاً عن استعمال رأس بسيط، مما عزّز الميْز تعزيزاً مهماً. الثاني، كان من الضروري وضع الرأس قريباً جداً من الجزيئة، حتى الوصول إلى الجزء التنافري العائد لمبدأ باولي من كمون التفاعل، بغية تحقيق

إنه لإنجاز عظيم أننا لا نستطيع الآن قياس التأثرات (التفاعلات المتبادلة) المرافقة لرابطة كيميائية وحيدة فقط ، بل نستطيع أيضاً رؤية توزعات القوة الناشئة عن مداريات ذرّية وجزيئية كلٍّ على انفراد .

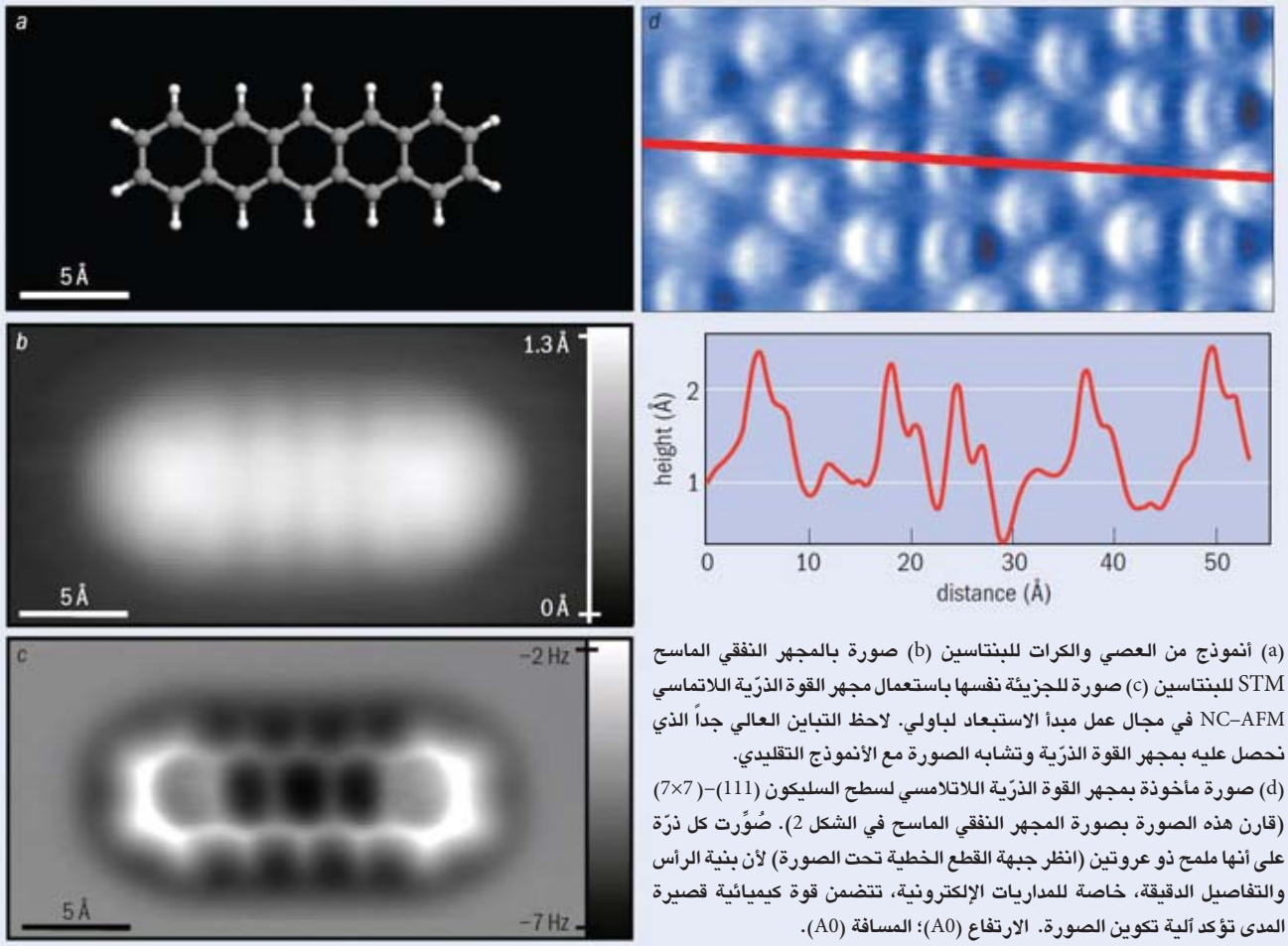
الميْز ضمن الجزيئي عالي الميْز. في غضون ذلك، بيّن باحثون من مركز يولش للأبحاث وجامعة أوسنبروغ بقيادة روسلان تيميروف R. Temirov إمكان الحصول على تصوير عالي الميْز في نطاق جزء باولي المذكور باستعمال المجهر النفقي الماسح أيضاً.

تصوير المداريات

كما ذكر سابقاً، على المرء أن يتذكر دائماً أن أية صورة مأخوذة بمجهر المسبار الماسح، تتضمن عند مستوى معين تلافاً لبنية الرأس والعيّنة. وبكلام آخر، فإن الشيء الحادّ، وهو الرأس في الحالة المثالية، هو الذي يقوم بالسبر في حين أن ما يصور هو الشيء العريض، أي السطح في الحالة المثالية. غير أنه عند أصغر مقاسات الطول، قد تأخذ المداريات الذرّية لسطح العيّنة امتداداً مكانياً أصغر من الامتداد المكاني للرأس. هذا يعني إمكان تضمين صورة بمجهر المسبار معلومات دون ذرّية عن البنية الإلكترونية للمسبار، مثل تناظر المداري والامتداد المكاني. قدّم غيسيبل وزملاؤه دليلاً لهذا النوع من التصوير المداري على مدى العقد الماضي، وفي حين كان تفسير الصور مثار جدل إلى حدٍّ ما، إلا أن تكرارية التجارب وحسابات نظرية عالية المستوى زودتنا بدعم لادعائهم، أي أنه يمكن استخلاص معلومات عن المداريات من بيانات المجهر NC-AFM. (استعمل هنا مصطلح «تصوير المداري» استعمالاً فضفاضاً جداً –إذ إن المداريات ليست خصائص قابلة للملاحظة تجريبياً طبعاً، وإنما نميّز توزع القوة المرافق لمداري معين في صورة المجهر NC-AFM).

لقد استطاع غيسيبل وزملاؤه باستعمال رؤس محددة الحصول على صور لسطح السليكون (111)-(7×7) يظهر فيها ملمح ذو بنية ناعمة لكل ذرّة (الشكل 4d). وقد فسّروا هذه البنية دون الذرّية بأنها ناشئة عن مداريات رابطتين متدليتين للذرّة عند نهاية الرأس،

الشكل 4 : تباين دون ذرّي وتباين دون جزيئي في مجهر القوة الذرّية



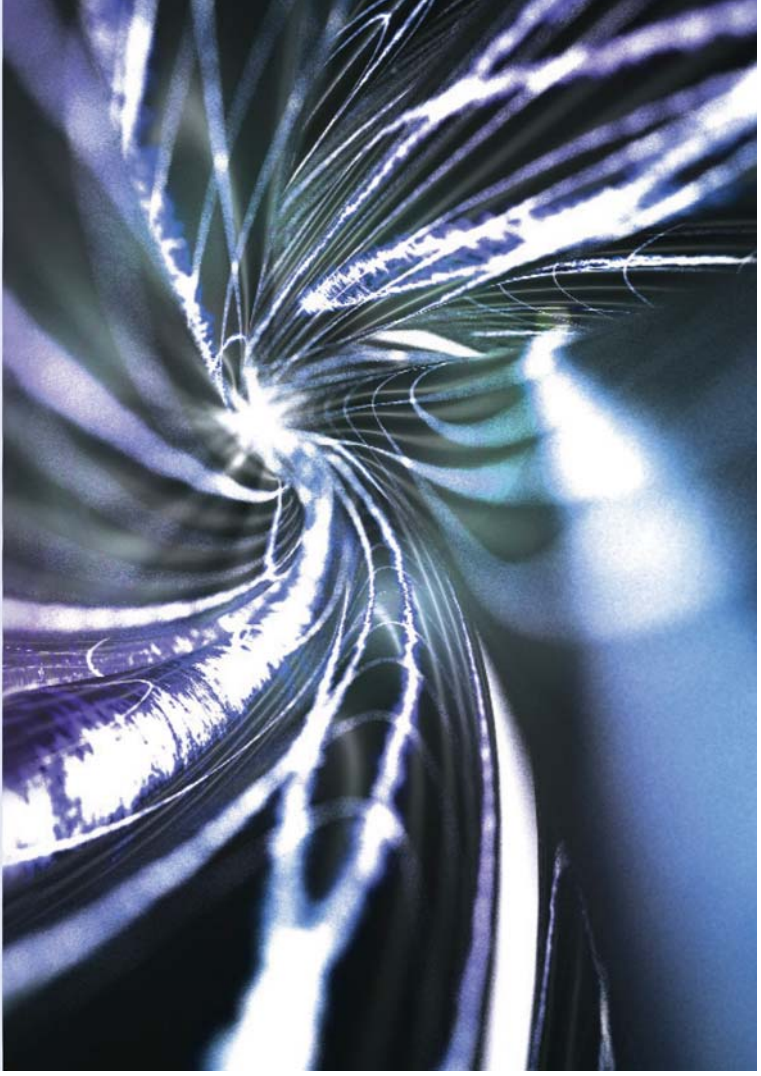
(a) أنموذج من العصي والكرات للبنتاسين (b) صورة بالمجهر النفقي الماسح STM للبنتاسين (c) صورة للجزيئة نفسها باستعمال مجهر القوة الذرّية اللاتماسي NC–AFM في مجال عمل مبدأ الاستبعاد لباولي. لاحظ التباين العالي جداً الذي نحصل عليه بمجهر القوة الذرّية وتشابه الصورة مع الأنموذج التقليدي.
(d) صورة مأخوذة بمجهر القوة الذرّية اللاتلامسي لسطح السليكون (111)–(7×7) (قارن هذه الصورة بصورة المجهر النفقي الماسح في الشكل 2). صُوِّرت كل ذرّة على أنها ملمح ذو عروتين (انظر جبهة القطع الخطية تحت الصورة) لأن بنية الرأس والتفاصيل الدقيقة، خاصة للمداريات الإلكترونية، تتضمن قوة كيميائية قصيرة المدى تؤكد آلية تكوين الصورة. الارتفاع (A0)؛ المسافة (A0).

تستطيع أيٌّ منهما التآثر مع مداريات ذرّة على السطح. وقد صوّر غيسيبل وفريقه منذئذ ملامح تُفسَّر أنها ناشئة عن المداريات الذرّية 4f, 3d, 3p للمجسّ عند مسح سطح السليكون (111)-(7×7) برؤوس مصنوعة من السليكون والكوبالت والسماريوم على الترتيب. وحصلوا أيضاً على صور بميْز دون ذرّي عند ملاحظتهم ملامح يبعد بعضها عن بعض 77pm (بيكومتر)، أصلها ناشئ من تغيّرات مكانية لكثافة الشحنة لرأس التنغستين المستعمل لتصوير شبيكة الغرافيت.

إنه لإنجاز عظيم أننا لا نستطيع الآن قياس التآثرات (التفاعلات المتبادلة) المرافقة لرابطة كيميائية وحيدة فقط، بل نستطيع أيضاً رؤية توزعات القوة الناشئة عن مداريات ذرّية وجزيئية كلٍّ على انفراد. لكن السؤال أين يمكن أن تأخذنا مجاهر المسبار الماسح بعد هذا؟ على الأغلب فإن أكثر المواضيع إثارة للدهشة وذات تحديات كبيرة بالتأكيد تتمثل في إمكان جمع مقدرات الميْز المكانية الموصوفة في هذا المقال مع تحسينات ميْز زمنية معاً. في الوقت الحاضر، إن مجهرية المسبار الماسح بميْز ذرّي هي عملية بطيئة جداً. ومع ذلك، يوجد تطويرات حديثة مشجعة لتقنيات عالية السرعة، منها التقرير اللافت للانتباه الذي ظهر، عندما كنت أكتب هذه المقالة، لسيباستيان لوث S. Loth وباحثين يعملون في شركة IBM بمركز أبحاث ألمادن بكاليفورنيا.، وفيه نتائج قياسات أزمنة استرخاء سبينية باستعمال تقنية المجهر النفقي الماسح ذي المسبار المضخوخ بميْز زمني يقع في مجال النانو ثانية.

غير أنه حتى لو لم تضف مشجعات التصوير العالي السرعة، تبقى صور مجاهر المسبار الماسح ذات جذب مرئي وتزودنا برؤية معمقة مدهشة لتعقيد يعكس عالم الكمّ ويستمر في إدهاش العلماء وغير العلماء أيضاً. وقد تتجاوز صور المداريات الذرّية النفيسة في أذهان الجمهور نموذج رذرفورد المشابه للنظام الشمسي مصغّراً.

نشر هذا المقال في مجلة Physics World, November 2010، ترجمة د. فوزي عوض، هيئة الطاقة الذرّية السورية.



الطريق إلى انعدام المقاومة الكهربائية

الكلمات المفتاحية: ناقلية فائقة، مادة كثيفة، أنصاف النواقل.

منذ اكتشاف الناقلية الفائقة قبل مئة عام وفهمنا لها يتقدم بشكل أبعد ما يكون عن السلاسة. يشرح بول ميكائيل غرانت لماذا ما تزال هذه الظاهرة الجميلة والأنيقة والعميقة تحير فيزيائيي المادة الكثيفة وتربكهم حتى يومنا هذا.

من بين جميع اكتشافات فيزياء المادة الكثيفة في القرن العشرين، يطلق بعض الناس على الناقلية الفائقة اسم «جوهرة التاج». في حين يدعي آخرون أن أنصاف النواقل أو حل بنية الـ DNA تستحق هذا الشرف، وذلك نظراً للفوائد التي قدمها هذان الاكتشافان للإنسانية. ولا ينكر أحد حتى الآن أنه منذ مئة عام عندما اكتشف فريق بقيادة هايكة كامرلينغ أونس الناقلية الفائقة (وهي الغياب التام للمقاومة الكهربائية) في مختبر في لايدن–بهولندا، فإن المجتمع العلمي أصيب بدهشة كبيرة. إذا علمنا أن: الإلكترونات عند نقلها للتيار الكهربائي تتصادم بلا توقف مع الشبكة البلورية التي تمر من خلالها فإن إمكانية نقل التيار بدون تصادمات كانت ولا زالت ظاهرة معجزة خارقة.

لقد كان اكتشاف الناقلية الفائقة تتويجاً للسباق بين أونس والفيزيائي البريطاني جيمس ديوار لأنهما كانا يتنافسان للحصول على درجة حرارة الصفر المطلق وذلك باستعمال تقنيات غاية في التعقيد لتمييع الغازات. وقد فاز أونس بهذا السباق بعد أن نجح بتمييع الهيليوم حيث برّده لدرجة 4.2 K وحصل نتيجتها على جائزة نوبل للفيزياء لعام 1913 (إن الرقم القياسي العالمي الحالي لأخفض درجة حرارة هو 10^{-15} K. ونذكر بأنه من المستحيل ترموديناميكياً الحصول على الصفر المطلق). هذا ولم يكن الحصول على درجات حرارة منخفضة هو غاية بحد ذاتها للعلماء. ما كان يهمهم هو معرفة تغير سلوك المواد وبالأخص الناقلية الكهربائية في شروط قرّية. في عام 1900 خمّن العالم الألماني بول درود (وهو الذي قدّر، واقترح بناء على تجارب جول تومسون ولورد كلفن، أن الكهرباء تتطلب جريان جسيمات مشحونة صغيرة) أن مصدر مقاومة النواقل الكهربائية تأتي من هذه الجسيمات المشحونة عندما تصدم بشكل غير مرن الذرات المهتزة. إذاً ماذا يمكن أن يحصل للمقاومة الكهربائية لمعدن مغمور في الهيليوم السائل الذي تم الحصول عليه حديثاً؟ لقد كان للفيزيائيين ثلاثة توقعات:

يقول التوقع الأول إن المقاومة الكهربائية ستستمر بالانخفاض بصورة مستمرة لتصل إلى الصفر.

أما التوقع الثاني فيقول إن الناقلية ستستقر عند قيمة منخفضة وذلك نظراً لوجود شوائب تصطدم بها الإلكترونات.

في حين كانت أكثر الأفكار شعبية –والآتية من تصور المدارات

الذرية المتمركزة– أنه سيتم أسر الإلكترونات في النهاية، وهذا يؤدي إلى مقاومة لا نهائية. إلا أنه قبل أن يتم التأكد من أي من هذه الفرضيات، كان لا بد من الحصول على معدن عالي النقاوة.

قد كانت فكرة الباحث جيل هولست وهو من معهد أونس نفسه في جامعة لايدن بأنه قد يكون من الممكن الحصول على عينة عالية النقاوة من معدن الزئبق بتقطيره مرات متعددة وذلك لتنقيته من الشوائب التي تسيطر على تصادمات الإلكترونات في درجات الحرارة الأخفض من درجة حرارة 10 K. وقد كان لمخبر لايدن تجارب عديدة بتصنيع مقاومات من الزئبق لاستخدامها مقاييس للحرارة، وقد اقترح هولست بوضع الزئبق ضمن أنابيب شعرية والإغلاق عليه لحفظه نقياً لأطول فترة ممكنة وذلك قبل تغطيسه بالهيليوم السائل. وهذا ما حصل في نيسان 1911 (التاريخ الدقيق غير معروف وذلك لكون مفكرة أونس غير واضحة وليست موثّقة) حيث اكتشف هولست وفني المخبر جيرت فليم أن مقاومة الزئبق السائل المبرّد لدرجة 4.2 K وصلت قيمة صغيرة لدرجة لا يمكن قياسها. هذه الظاهرة – الغياب الكلي للمقاومة الكهربائية – كانت هي السمة المميزة للناقلية الفائقة. وللمفارقة لو أن فريق عمل لايدن قد قام باستخدام قطعة من الرصاص بدلاً من الزئبق لكانت مهمته أسهل بكثير لأن الرصاص يعبر إلى حالة الناقلية الفائقة بدرجة حرارة أعلى تبلغ 7.2 K. وبالفعل، وبعد ثلاث سنوات وباقتراح من الباحث بول إهرنفست تمكن باحثون في مخبر لايدن من توليد «التيارات الدائمة» وقياسها (تلك التيارات التي كان يمكن أن تستمر لمليار عام) في حلقة من الرصاص.

لقد أعطى التاريخ لأونس الفضل الوحيد باكتشاف ما سماه هو بالإنكليزية – supra conduction [يصعب معرفة أين نشر العمل في المرة الأولى إلا أن أول تقرير باللغة الإنكليزية نشر في المجلة الهولندية: Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden 120b 1911].

من المؤكد أن هذا الاكتشاف لم يكن ليحصل بدون أونس، إلا أن نشر النتائج بدون أسماء زملائه بوصفهم مشاركين لا يمكن تصوره اليوم. على الأقل، كان ينبغي أن يتضمن إعلان الاكتشاف اسم كل من أونس وهولست. إلا أن الحياة قد كافأت هولست، الذي أصبح فيما بعد المدير المؤسس لمخابر فيليبس البحثية في أندهوفر وأستاذاً متميزاً في لايدن. ولكن ذلك لا يعني أننا يجب أن ننساه هو ومن ساهم معه عندما نحتفل بمرور قرن على اكتشاف الناقلية الفائقة.

مطابق لما هو معهود

بعد الاكتشاف في عام 1911 كان البحث في الناقلية الفائقة ضعيفاً لعقود عدة، لأن نسخ تقنيات لايدن كان بشكل أساسي صعباً ومكلفاً. ولكن البحث قد توقف أيضاً لأن حالة المقاومة المعدومة كانت تختفي عند تعرض العينة لحقل مغنطيسي حتى لو كان ضعيفاً. لقد كانت المشكلة أن معظم النواقل الفائقة المكتشفة في البدايات كانت مجرد عناصر معدنية –أو ما يعرف اليوم بالنوع الأول– تنشأ حالة الناقلية الفائقة فيها ضمن ميكرونات محدودة من السطح. ومن ثمَّ فإن السهولة التي تعود فيها هذه المواد لتصبح نواقل «عادية» مسحت الأحلام المبكرة التي أعلنت مباشرة من قبل أونس وآخرين وهي أن الناقلية الفائقة سوف تحدث ثورة في الشبكة الكهربائية لأنها تسمح بتمرير التيار الكهربائي بدون أي ضياع في الطاقة.

في هذه الأثناء قامت بعض المخابر في أوربا ولاحقاً في شمال أمريكا أيضاً ببناء منشآت قرّية لتمييع الهيليوم، وبدأ شيئاً فشيئاً يتحطم احتكار لايدن ومنه عاد الاهتمام بالناقلية الفائقة مما أدى إلى تقدمها. ففي عام 1933 لاحظ كل من والتر مايسنر وروبرت أوشسنفيلد بأن الحقل المغنطيسي يطرد بشكل كلي خارج الناقل الفائق بمجرد تبريد هذا الناقل لدرجة حرارة أقل من «درجة حرارته الحرجة» T_C، التي تنعدم عندها مقاومته الكهربائية. فخطوط الحقل المغنطيسي التي تعبر في الحالة الطبيعية بشكل مستقيم ضمن هذه الأجسام، عليها الآن أن تتجنب المرور ضمن الناقل الفائق لتمر فتلتف حوله دون اجتيازه (انظر الشكل 1).

وقد أعقب هذا الاكتشاف المفاجئ ملاحظة أخرى لكل من وليم كيسوم وج. كوك هي أن مشتق الحرارة النوعية لناقل فائق يقفز فجأة عندما يبرد الجسم لدرجة حرارة أخفض من T_C. وتعد هاتان المشاهدتان في يومنا هذا (وهي الطرد الكلي للحقل المغنطيسي وشذوذ الحرارة النوعية من النوعية الأولى) أساساً ذهبياً لإثبات وجود الناقلية الفائقة بوصفها حالة ترموديناميكية (ويروى أيضاً أن هذه القياسات قد قامت بها زوجة كيسوم التي كانت أيضاً فيزيائية ولكن لم يتم الإشارة إليها في ذلك الوقت).

كما شهدت أواسط ثلاثينيات القرن الماضي اكتشاف ليف شوبنيكوف للناقلية الفائقة في الخلائط المعدنية –حيث يكون الحقل المغنطيسي الحرج لهذه المواد أكبر بكثير منه في المعادن العنصرية البسيطة (نذكر أن الحقل المغنطيسي الحرج هو الحقل المغنطيسي الذي تختفي فوقه الناقلية الفائقة). وقد سيطرت الدراسة النظرية والتجريبية لهذه المواد (والتي سميت النوع II) سريعاً على البحث العلمي في الناقلية الفائقة، بالأخص في الاتحاد السوفييتي وذلك بقيادة كل من بيوتر كابيتزا وليف لانداو وشوبنيكوف نفسه. وقد استمر النشاط النظري السوفييتي في الميكانيك الإحصائي للناقلية الفائقة (وفي الظاهرة القريبة وهي الميوعة المفرطة Superfluidity) خلال الحرب العالمية الثانية والحرب الباردة، حيث كانت الريادة لكل من فيتالي غينزبورغ، وألكسي أبريكوزوف وليف غوركوف.

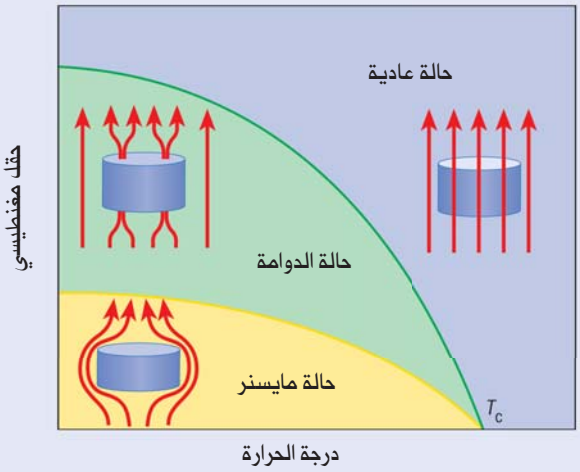
مع أن كثيراً من هذه الأبحاث لم تكن معروفة للغرب في ذلك الزمان إلا أن نموذج غينزبورغ – لانداو – أبريكوزوف – غوركوف المعروف بـ GLAG هو الأساس لكثير من تطبيقات الناقلية الفائقة. ويعد هذا النموذج مفيداً لأنه مبنيٌّ على الاختبار وترموديناميكي بطبيعته، ومن ثم فهو لا يتعلق بالفيزياء المجهرية المتضمنة تحولاً طورياً من المرتبة الثانية سواء كان مغناطيسياً، أم حالة ميوعة مفرطة أم ناقلية فائقة.

نحو نظرية BCS:

لقد كان التقدم باتجاه النظرية الأساسية التي تفسر ظاهرة الناقلية الفائقة أكثر بطئاً. فقد اقترح كل من فريتز وهينز لندن في عام 1935 نوعاً من "التعديل" لمعادلات ماكسويل التأسيسية وذلك لإدخال مفهوم "عمق الاختراق" لحقل مغنطيسي خارجي مطبق تحت سطح ناقل فائق.

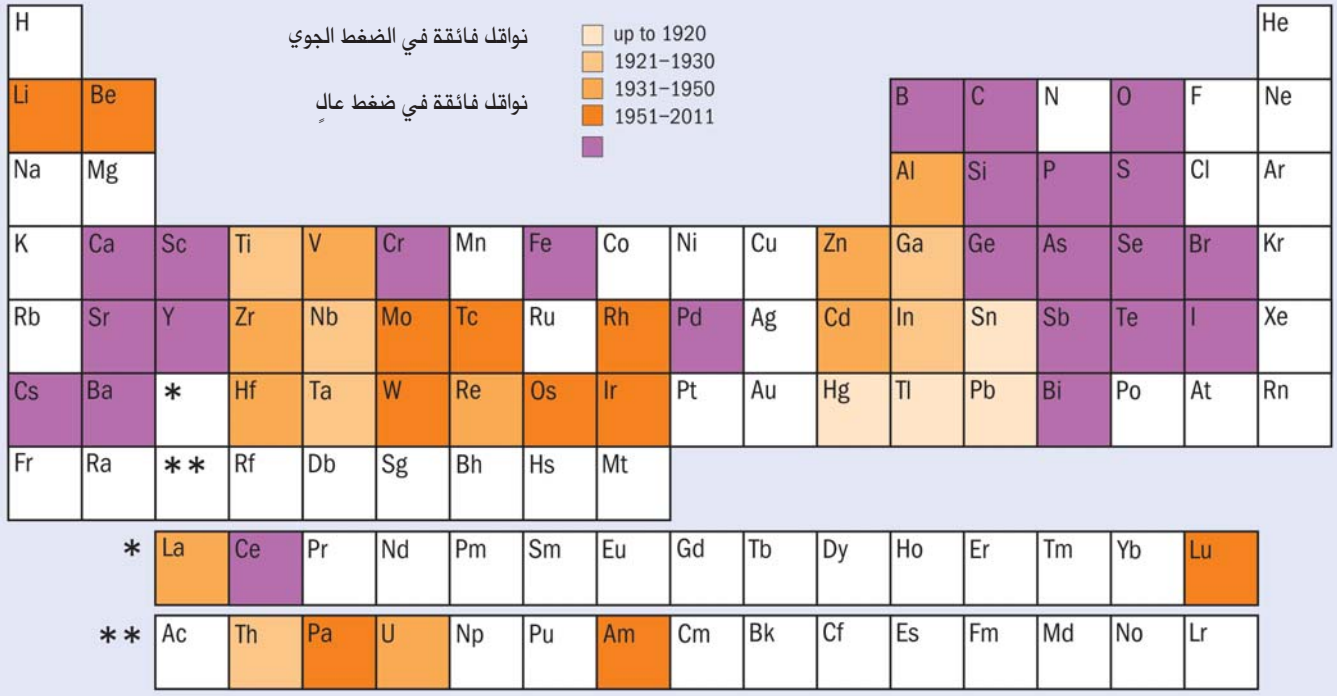
لقد كان من الواجب أن ننتظر حتى منتصف الخمسينيات للكشف عن سر الناقلية الفائقة، بعد محاولات يائسة من قبل ألمع فيزيائيي القرن العشرين بمن فيهم ديراك، وأينشتاين، وفَيْمان وباولي. وقد تم ذلك على يد كل من جون باردين، ليون كوبر وروبرت شريفر حيث وضعوا نظرية تدعى اليوم BCS استحقوا عليها جائزة نوبل للفيزياء لعام 1972. لقد كان المفتاح هو فكرة أن غازاً من الإلكترونات يكون مستقراً بوجود تجاذب بسيط مما يؤدي لتشكل أزواج من الإلكترونات مرتبط بعضها ببعض، وتحقَّق فيما بعد باردين وطالبه شريفر أن الحالة الكوانتية الناتجة من ذلك يجب أن تكون جهرية وإحصائية الطبيعة.

الشكل 1 : اخرج و ابق في الخارج :



أحد أهم خصائص المواد ذات الناقلية الفائقة غير الاعتيادية هو ما يحصل عند وضعها بالقرب من حقل مغنطيسي. في درجات الحرارة العالية وحقول شديدة (المنطقة الزرقاء) تمر خطوط الحقل بشكل مستقيم ضمن المادة كما هو متوقع. ولكن، كما اكتشف كل من والتر مايسنر وروبرت أوشسنفيلد في عام 1933، عند تبريد ناقل فائق إلى درجة حرارة أخفض من درجة حرارته الحرجة، وهي الدرجة التي يمكن عندها للتيار الكهربائي أن يمر بدون مقاومة فإن خطوط الحقل المغنطيسي تطرد من المادة وتجبر أن تلتف حولها– وهو ما يدعى فعل مايسنر. (المنطقة الصفراء). بعض المواد ذات الناقلية الفائقة التي تعرف بالنوع الثاني يمكن أن توجد بحالة تدعى حالة الدوامات (المنطقة الخضراء) حيث توجد مناطق ذات مقاومة كهربائية ومناطق ذات ناقلية فائقة معاً. تستخدم عادةً تجارب الحمل (الرفع) المغنطيسي التوضيحية النواقل الفائقة من النوع الثاني لأن الدوامات المغنطيسية تلتصق بالعيوب البلورية مما يجعل المغنطيس مستقراً ولا ينزلق لأي من الجانبين.

الشكل 2 : تنشر جناحيها :



خلال المئة عام الأخيرة، تبين أن عدداً كبيراً من العناصر في الجدول الدوري تملك حالة ناقلية فائقة. يبين الشكل العناصر التي تملك حالة ناقلية فائقة في الضغط الجوي. حيث يدل اللون عن الفترة التي اكتشفت فيها هذه الخاصة. أما العناصر الملونة باللون الأرجواني فهي العناصر التي تظهر حالة ناقلية فائقة تحت ضغطٍ عالٍ..

ولكن من أين يأتي تأثر التجاذب؟ لقد نوّه إمانويل ماكسويل من المكتب الوطني الأمريكي للمعايير بأن درجة الحرارة الحرجة للزئبق تنزاح اعتماداً على أي نظير من نظائره قد استخدم في العينة، مما يقوي الفكرة القائلة بأن اهتزازات البلورة، أو ما يدعى بالفونونات، ذات علاقة قوية بالناقلية الفائقة. وقد برهنت نظرية BCS أنه ضمن شروط محددة فإن هذه الاهتزازات، والتي هي عادة مصدر مقاومة المعدن الذاتية، يمكن أن تقود إلى تأثر التجاذب الذي يسمح للمادة بأن تنقل التيار بدون مقاومة.

ببساطة تُعد نظرية BCS من بين أكثر الإنجازات الرائعة في فيزياء المادة الكثيفة. إنها تصف تزاوج فيرميونين بواسطة حقل بوزوني. إن جميع النواقل الفائقة تخضع لفكرة BCS حيث يمكن تلخيصها بعبارة بسيطة هي $T_c \propto \Theta/e^{1/\lambda}$، حيث T_c هي درجة حرارة الانتقال والتي يصبح الجسم تحتها ذا ناقلية فائقة، Θ هي درجة الحرارة المميزة لحقل البوزونات (درجة حرارة ديباي إذا تضمنت فونونات)، أما λ فهو ثابت الاقتران بين هذا الحقل والفيرميونات (الإلكترونات و/أو الثقوب في الأجسام الصلبة). وتعد المواد التي يكون فيها λ كبيراً مرشحة جيدة لنواقل فائقة حتى لو كانت في الحالة الطبيعية معادن سيئة النقل للكهرباء لكون إلكتروناتها تصطدم كثيراً بالشبكة البلورية المهتزة. وهذا يفسر لماذا لا يكون من الذهب، والصوديوم، والفضة والنحاس نواقل فائقة مع أنها معادن جيدة النقل للكهرباء، في حين يكون الرصاص ناقلاً فائقاً (الشكل 2).

إلا أن نظرية BCS هي نظرية وصفية وكيفية وليست كمية. بعكس معادلات نيوتن أو ماكسويل أو نظرية العصابات في أنصاف النواقل والتي تمكّن الباحثين من تصميم جسور ودارات وجذاذات إلكترونية وهم على ثقة بأنها ستعمل كما يتوقعون، فإن نظرية BCS ضعيفة وفقيرة بمعرفة أية مادة أو معدن يجب أن نستخدم ليكون لدينا ناقل فائق. لذلك فإن اكتشافها قد كان عملية "عراك فكري"، وقد كان أفضل من وصف هذه النظرية هو العالم ذو الأصل الألماني بيرندت ماتياس حين قال: "إن نظرية BCS تخبرنا عن كل شيء ولكنها لا تساعدنا أن نجد شيئاً جديداً".

معالم أخرى:

بعد وضع نظرية BCS كانت العلامة المميزة الثانية للناقلية الفائقة في عام 1962، عندما توقع بريان جوزيفسن في جامعة كامبريدج في المملكة المتحدة بأن تياراً كهربائياً يمكن أن يعبر عبوراً نفقياً بين ناقلين فائقين مفصولين بحاجز رقيق عازل أو معدني في الحالة الطبيعية (أي ليس في حالة الناقلية الفائقة). تعرف هذه الظاهرة بمفعول جوزفسون. وقد لاحظها تجريبياً في العام التالي كل من جون يويل وفيليب أندرسون من مخابر بل ونتج منها ما يدعى نبيطة التداخل الكمومي ذات الناقلية الفائقة أو سكويد Superconducting Quantum Interference Devices (SQUID) والتي يمكنها قياس حقول مغنطيسية صغيرة جداً، كما يمكنها

توليد توترات معيارية تفيد في المعايرة في جميع مخابر علم القياس في العالم.

أما العلامة المميزة التالية في الناقلية الفائقة فقد تأخرت أكثر من عشرين سنة عندما لاحظ كل من جورج بدنورز وألكس موللر وبشكل مذهل انعدام المقاومة بدرجة حرارة أعلى من 30 K في أكسيد نحاس متطبق بيروفسكيتي. ولم يقتصر اكتشافهما للنواقل الفائقة ذات الدرجات العالية الذي جرى في مخابر IBM في زيوريخ في عام 1986 على حصولهما معاً على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1987 بل كان أيضاً حافزاً لبدء بحث علمي «مزدهر» في هذا المجال. وفي غضون عام لاحظ كل من م. ك. يو وبول شو ومساعديهما في جامعتي هيوستن وألباما أن مركب أوكسيد الإتريوم – باريوم – النحاس $YBa_2Cu_3O_{6.97}$ والمعروف أيضاً تحت اسم YBCO، والذي لم تعرف تكافُئَيَّتُهُ (ستوكيومتريته) الدقيقة في ذلك الوقت، يمكن أن ينقلب إلى ناقل فائق بدرجة حرارة قدرها 93 K. وبما أن درجة الحرارة هذه أعلى بـ 16 K من درجة حرارة غليان الآزوت السائل فقد سمح هذا الاكتشاف للباحثين بالتفكير للمرة الأولى بتطبيقات الناقلية الفائقة وذلك باستخدام مادة قرّية رخيصة الثمن وسهلة الاستحصال هي الآزوت السائل.

ويبقى الرقم القياسي لدرجة حرارة الانتقال هو 138 K للمركب $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$ وذلك بالضغط الجوي و166 K تحت ضغط قدره 23 GPa.

وبينما كان بدنورز وموللر يحزمان حقائبهما للسفر إلى استوكهولم بوصفهما باحثين يفوزان بجائزة نوبل على عملهما في مجال الناقلية الفائقة، كانت تلك أسعد لحظة لأولئك الذين يعملون في هذا المجال.

وقد نُشرت آلاف الورقات العلمية حول هذا الموضوع في ذلك العام وترافقت بليلة احتفالية أسطورية في مؤتمر March Meeting للعام 1987 والذي أقامته الجمعية الأمريكية للفيزياء ذلك العام في مدينة نيويورك. حيث سُميت تلك الليلة «وودستوك الفيزياء» حيث احتفل كل الذين كان لهم علاقة بهذا الاكتشاف (بمن فيهم كاتب هذا المقال).

تقانة قبل زمانها

إلى جانب التقدم الذي أحرز في علم الناقلية الفائقة، كانت هناك محاولات عديدة لاستعمال الناقلية الفائقة إما لتطوير التقانات الموجودة أو لخلق تقانات جديدة. سواء على مستوى المقاسات الصغيرة مثل محاولة بناء حواسيب عالية السرعة، أم على مستوى المقاسات الكبيرة، وذلك لتوليد الكهرباء. وقد شهدت الفترة ما بين السبعينيات وأواسط الثمانينيات من القرن الماضي تحقيق تجارب تقنية ناجحة في الناقلية الفائقة التطبيقية في الولايات المتحدة الأمريكية وأوربا واليابان.

ففي مجال الطاقة، كان أكثر الأعمال إثارة هو تصنيع كبل ذي ناقلية فائقة لنقل التيار الكهربائي المتناوب بين عامي 1975 و1985 في مخبر بروكهيفن الوطني في الولايات المتحدة، وكان من ممولي المشروع وزارة الطاقة وشركة فيلادلفيا للكهرباء. وقد استجلب هذا الكبل الكثير من الاهتمام وذلك لوجود فكرة استخدامه في محطات ضخمة للطاقة النووية يمكن أن تتطلب نقلاً مكثفاً للطاقة الكهربائية. مع أن هذا الكبل قد عمل بشكل جيد، إلا أنه تبين عدم الحاجة إليه لأن الولايات المتحدة استمرت بحرق الفحم لإنتاج الطاقة كما بدأت تتجه لاستعمال الغاز الطبيعي.

وكذلك في اليابان، فقد قامت شركات بتجارب ناجحة لإنتاج كابلات ومولدات ومحولات كهربائية ذات ناقلية فائقة وكانت كلها جيدة من الناحية التقنية. وكانت هذه المشاريع ممولة من الحكومة اليابانية، التي كانت في ذلك الوقت تستبق ازدياداً كبيراً في الطلب على الكهرباء بسبب النمو السكاني. إلا أن هذا المطلب لم يتحقق وفشل في قيام مشاريع كبيرة لاستخدام الناقلية الفائقة في اليابان، باستثناء سكة قطار ياماناشي للحمل المغنطيسي التجريبية والتي افتتحت في أواسط السبعينيات باستخدام كابلات ذات ناقلية فائقة من نيوبيوم–تيتانيوم.

نشر كاتب هذا المقال في عام 1996 مقالاً بعنوان «الناقلية الفائقة والطاقة الكهربائية... وعود، وعود... الماضي، الحاضر والمستقبل» (IEEE Trans. Appl. Supercond. 7 1053)، توقع فيه مستقبلاً لامعاً للناقلية الفائقة ذات درجات الحرارة العالية. ومرة أخرى تم بناء عدد كبير من التجهيزات الكهربائية التجريبية الناجحة من قبل شركات مختلفة صنعت الكابلات ذات الناقلية الفائقة، ومولدات الكهرباء، ومحولات ومحددات تيار. ومع أن القليل من هذه التجهيزات –إن وجد– قد تحول إلى منتجات عاملة، إلا أن هناك الكثير من الإنجازات التكنولوجية الجيدة التي تستخدم الناقلية الفائقة موضوعة على الرف بانتظار أن نحتاجها في المستقبل. للأسف لم يكن لهذه الإنجازات التكنولوجية أثر يُذكر في مجال صناعة الطاقة والتي توجهها بشكل عام السياسة والنظرة الشعبية أكثر من أناقة المنتج التكنولوجي. أما في الصناعة الإلكترونية، فإن القول الحسم (لأحدث هاتف أو حاسب محمول مثلاً) هي الكفاءة والسعر.

وهـذا ما حصل بالنسبة لتطبيقات الناقلية الفائقة في الإلكترونيات والمثال الأفضل هو الحواسيب المبنية على «وصلات جوزيفسون»، والتي كانت تَعِدُ بأن تجعل وحدات المعالجة المركزية CPU أكثر سرعة وأقل تبديداً للحرارة من تقانة السليكون الثنائية القطب والتي سيطرت منذ الستينيات وحتى بداية الثمانينيات. وقد

راهن كل من شركة IBM والحكومة اليابانية على نجاحها لكونها كانت تقنياً ناجحة، إلا أن اكتشاف ترانزستورات مفعول الحقل المكونة من طبقات معدن –أكسيد– سليكون والمعروفة باسم MOSFET والذي قدم الهدفين السابقين دون الحاجة إلى تجهيزات خاصة بالتبريد جعلها تغض الطرف عن هذا المشروع.

برّد هذه العينة:

في كانون الثاني 2001، أي بعد عام بالضبط من فجر الألفية الجديدة أعلن جون أكيميتسو من جامعة أيوماغاكوين في اليابان في مؤتمر حول أكاسيد المعادن الانتقالية اكتشاف الناقلية الفائقة للمركب ثنائي بوريد المغنزيوم MgB_2 – والذي كان قد رُكب قبل خمسين عاماً تقريباً في معهد كاليفورنيا التقني. لقد كان أكيميتسو وزملاؤه يبحثون في أمر آخر ألا وهو وجود المغنطيسية الحديدية المضادة في هذه المادة ولكنهم فوجئوا باكتشافهم أن MgB_2، الذي يملك بنية متطبقة سداسية ويمكن تصنيعه على مستوى البلورات المكروية بدقة جيدة، يصير إلى حالة الناقلية الفائقة بدرجة حرارة مذهلة هي 39 K. وقد دفع هذا الاكتشاف الكثير من الباحثين لدراسة هذا المركب البسيط وخلال العقد المنصرم تم تصنيع أسلاك MgB_2 ذات كفاءة عالية. إن ميزة MgB_2 الأساسية هي أنه يملك الحقل الحرج الأكبر لأي مادة باستثناء المركب YBCO (الحقل الحرج هو الحقل المغنطيسي الذي يجعل المركب يفقد حالة الناقلية الفائقة من النوع II)، حيث يبين الحساب بأن هذا المركب يحتفظ بحالة الناقلية الفائقة بدرجة 4.2 K حتى تحت تاثير حقل مغنطيسي شدته 200 T.

إن هناك مداخلة طريفة للقصة. ففي عام 1957 قام الكيميائيان روبنسون سويفت وديفيد وايت من جامعة سراكوس في نيويورك بقياس الحرارة النوعية لشبيكة المركب MgB_2 بين 18 و305 كلفن وذلك لمعرفة ما إذا كانت تتغير كمربع درجة الحرارة كما في المركبات المتطبقة. وقد نُشرت نتائجهم، التي لم تظهر تبعيّة لمربع درجة الحرارة، في مجلة الجمعية الأمريكية للكيمياء ليس بيانياً بل جدولاً!.

عند إعادة تحليل نتائجهم بعدما نشر أكيميتسو نتائجه في عام 2001 ورسمها بشكل بياني، فإن بول كانفليد وسيرجي بودكو في جامعة ولاية أيوا تفاجأا بوجود شذوذ ضئيل في الحرارة النوعية بالقرب من الدرجتين 38-39K، مما يدل على العبور نحو الناقلية الفائقة.

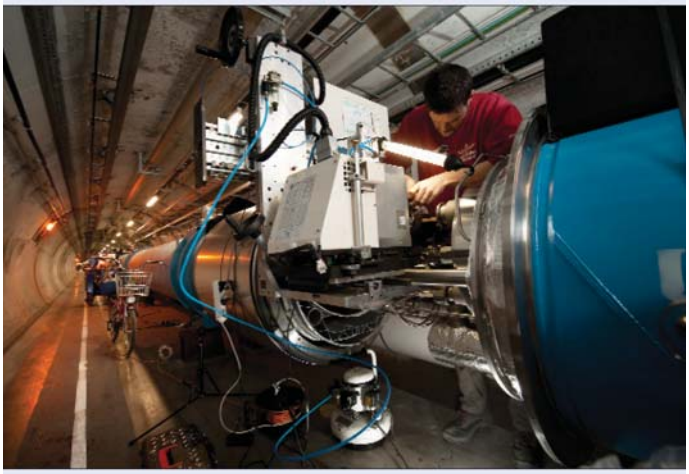
السؤال هو كالتالي: لو أن كيميائيي سراكوس رسموا نتائجهم بيانياً وأروها لزملائهم الفيزيائيين، هل كان تاريخ الناقلية الفائقة سيأخذ منحىً آخر منذ أواسط القرن العشرين؟ بالنسبة للكاتب على الأرجح إن خلائط النيوبيوم – تيتان التي صنعت منها المغانط ذات الناقلية الفائقة المستخدمة في المصادم الكبير (LHC) في CERN لم يكن لها لزوم على الإطلاق، أو حتى تطويرها (الشكل 3). وكانت كل المغانط المولدة للحقول العالية ستصنع من MgB_2 وربما أيضاً حتى كابلات نقل الطاقة والآلات الكهربائية الدوارة المصنعة من هذه المادة العادية ستكون قيد الاستخدام اليوم.

الدرس واضح: إذا كنت تعتقد بأن لديك معدناً جديداً (أو قديماً) ذا بنية أو خصائص كيميائية غير اعتيادية افعل ما فعله هولست وبدنورز وأكيميتسو أي برِّده! مثال آخر: لقد صنع كل من كلود ميشيل وبرنار رافو في جامعة كان – فرنسا مركب YBCO قبل شو بأربع سنوات، ولكن نظراً لعدم وجود وسائل التبريد القرّية في مخبرها وصعوبة الحصول على وسائل التبريد من الآخرين في المركز الوطني الفرنسي للبحوث العلمية (CNRS) خسرا فرصة هذا الاكتشاف الكبير.

وتبقى وبلا شك ظاهرة الناقلية الفائقة أكثر الظواهر جمالاً، وأناقةً وعمقاً من الناحيتين النظرية والتجريبية من بين مجمل اكتشافات فيزياء المادة الكثيفة في القرن العشرين حتى لو أن تطبيقاتها التي دخلت المجتمع تبقى محدودة. كما أن الإطار الذي وضعته نظرية BCS لفهم الناقلية الفائقة يبدو أنه وصل إلى أعماق نجوم نترونية أيضاً، حيث يتم اقتران الكواركات الفيرميونية ضمن الحقل البوزوني للكواركات التي تخضع ويحصل تحول طوري بدرجة حرارة تقع في المجال 109 K.

وبعد قرن من لايدن يأتي تعليق من قبل إللا فيتزغيرالد يقول: «هل يمكنك أن تطلب أكثر من ذلك؟»

الشكل 3 : تدوير المنعطف :



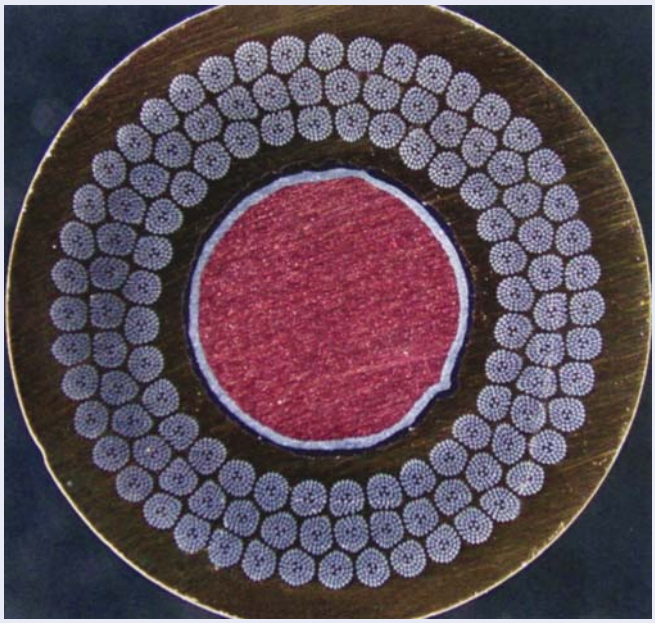
يمكن أن نجد النواقل الفائقة في جميع أشكال التطبيقات، وأحد أشهر هذه التطبيقات هو المغانط القطبانية (ثنائية القطب) في المصادم LHC في سِرْن. يحتوي المصادم على 1232 مغنطيساً طول كل واحد 15m مؤلفاً من ملفات من أسلاك النيوبيوم تيتان ذات الناقلية الفائقة والتي تبرد لدرجة 1.9K باستعمال الهليوم السائل. يمر فيها تيار قدره 13 000 A، ومن ثم تولد هذه المغانط حقولاً عالية الشدة قيمتها 8.3 T تساعد على قيادة البروتونات ضمن محيط المصادم البالغ طوله 27km.

أجمل خمسة تطبيقات

بالرغم من جمال ظاهرة الناقلية الفائقة، إلا أن المواد التي تنقل التيار بدون مقاومة لم تتمكن من تغيير العالم كما يمكن أن يتخيل بعض الناس. سنقدم هنا أفضل خمسة تطبيقات اختيرت بحسب أثرها في المجتمع.

ربما يكون أكثر التطبيقات الممكنة للناقلية الفائقة التي استحوذت على الخيال الشعبي هي القطارات المحمولة مغنطيسياً (MagLev)، حتى أنه يمكن شراء نماذج لعبة منها. وكان هناك أيضاً مفاهيم عن الخيال العلمي لقطار محمول مغنطيسياً تعمل من حيث المبدأ، مظهرة الأنفاق المنحنية عبر معطف الأرض حيث يسقط القطار أولاً على مسار مرفوع مولداً الكهرباء لدى قيامه بذلك من أجل دعم رحلة العودة أو براءة اختراع في هذا المجال لعام 1907 أي أربع سنوات قبل اكتشاف الناقلية الفائقة.

جميع قطارات الحمل المغنطيسي التي بنيت حتى الآن، باستثناء سكة ياماناشي التجريبية في اليابان، قد استخدمت التقانة التقليدية التي تستخدم مغانط كهربائية قوية ذات قلب حديدي. كما أن أعلى سرعة وصل إليها النموذج الأولي لقطار ياماناشي التجريبي الذي يستخدم ملفات ذات ناقلية فائقة هي 581 km/h^{-1}، ومع أنها رقم قياسي لوسيلة نقل تسير على سطح الأرض، إلا أنها لا تزيد إلا بـ 6k m/h^{-1} عن سرعة القطار الفرنسي السريع TGV الذي يستخدم العجلات التي تسير على سكة. الرسالة إذاً واضحة: إن زيادة سرعة وسائل النقل على السطح قد تكون مهمة إلا أنه لا يبدو بأن الناقلية الفائقة تؤدي دوراً مهماً فيها وليس من الظاهر بأنها ستؤدي مثل هذا الدور.



مقطع عرض في كبل نيوبيوم قصدير.

والآن إذا لم تكن القطارات المحمولة مغنطيسياً فما هي إذاً أهم تطبيقات الناقلية الفائقة التي تركت أثراً على المجتمع ؟ يبين هذا المقال أهم خمسة تطبيقات اختيرت من قبل بول ميكائيل غرانت من شركة W2AGZ في سان جوزيه – كاليفورنيا. تأتي في المرتبة الأولى الأسلاك ذات الناقلية الفائقة، ثم تأتي بعدها في المرتبتين الثانية والثالثة المغانط الكهربائية للتصوير الطبي ومصادمات الجسيمات، أما في المرتبة الرابعة فتأتي المحركات ذات الناقلية الفائقة وأخيراً تأتي في المرتبة الخامسة تجربة فريدة حول المادة الخفية. كما أن هناك تطبيقاً لم يشتهر هو استعمال الناقلية الفائقة في المغانط الكهربائية أو دواليب تعديل السرعة لتخزين الطاقة. تقوم مثل هذه الأجهزة ذات النقل الفائق التي تخزن الطاقة المغنطيسية بتخزين الطاقة في الحقل المغنطيسي الذي يولده تيار كهربائي يجري في وشيعة ذات ناقلية فائقة. ولما كان بالإمكان استعادة كل الطاقة بشكل سريع، فإن هذه الأجهزة ستكون فعالة جداً ومثالية لتخزين الطاقة في المنزل إذا اضطررنا إلى الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة غير المتوفرة في كل لحظة.

ولكن لنبدأ بهذه الأسلاك.

1. الكابلات والأفلام الرقيقة

الشيء الأكيد هو أنه ما كان ليكون هناك تطبيقات للناقلية الفائقة لو لم يتم التنسيق بين باحثي علم المواد والفيزيائيين (كما حصل في السبعينيات) وذلك لتطوير أسلاك وأفلام رقيقة من النيوبيوم – تيتان والنيوبيوم – قصدير. يمكن لهذه المواد أن تمرر تياراً كهربائياً شديداً حتى بوجود حقل مغنطيسي شديد وذلك عند تبريدها بالهليوم السائل إلى درجة حرارة أقل من 4.2 K.

تجمع عادة هذه الأسلاك على شكل باقات من أسلاك في مصفوفات مما يسمح ببيعها على أنها أسلاك مؤلفة من أشرطة شعرية أو قلوب صلبة مغلّفة بالنحاس. يمكن لهذه الكابلات أن تتحمل تياراً قدره 50 A وذلك تحت تأثير حقل مغنطيسي خارجي قدره 10 T.

إن هناك شركات مثل American Superconductors, Super Power وZenergy Power تصنع أيضاً أشرطة ذات ناقلية فائقة عند درجات حرارة عالية من أكسيد الإيتريوم–باريوم–نحاس المعروف (YBCO). هذه الأشرطة تملك صلابة سبائك النيوبيوم نفسها ويمكن استعمالها ككابلات لنقل الطاقة ولكن باستعمال الآزوت السائل كمبرد وليس الهليوم. ما تجدر ملاحظته هو أن مركب YBCO هو عبارة عن سيراميك قاس وهشّ مع أن ذلك يمكن تصنيعه على دُفعات بطول يبلغ آلاف الأمتار. يتم ذلك بترسيب فلم متصل منه

على قاعدة «ركازة منسوجة» أعدت خصيصاً – مشابهة لسبيكة فولاذ لا يصدأ مغطى بطبقة من أكسيد المغنزيوم أو زيركون الإيتريوم.

إن التقانة الناتجة عمل مدهش، وبالفعل إن الحقل الحرج الأعلى (وهو الحقل المغنطيسي الأعظمي الذي يمكن لشريط YBCO التعرض له دون أن يفقد ناقليته الفائقة) كبير عند درجة حرارة 4.2 K لدرجة أنه لم يقسه أحد حتى الآن، وربما لن يتمكن أحد من قياسه. إن هذه المواد مثالية للاستعمال ككبلات لنقل الطاقة الكهربائية دون الضياع الذي يحدث لكابلات النحاس التقليدية (تجدر الإشارة إلى أن الناقلية الفائقة تنقل التيار دون ضياع فقط إذا كان تياراً مستمراً أما بالنسبة للتيار المتناوب فهناك ضياع في الطاقة).

وقد ضخت الولايات المتحدة تحديداً الكثير من المال في هذا المجال خلال ما يقارب عشرين عاماً صرفت على جهود البحث والتطوير التي كانت تمولها وزارة الطاقة. وقد انتهت في عام 2010. أما ثمار هذه الأعمال فهي الآن على الرف تنتظر أن تقطفها صناعة المرافق العامة ومزودوها. إلا أنه على ما يبدو لن يتم استبدال الكابلات المعتادة والمستخدمة حالياً بالسرعة التي كان يمكن تصورها. لربما سيحدث ذلك بالتدريج من خلال مشاريع ضخمة (Mega Project) مثل مفهوم الشبكة الفائقة Super Grid الذي يقترح نقل الكهرباء من محطة نووية بكابلات ذات ناقلية فائقة مبردة بالهدروجين الذي تنتجه المحطة نفسها والذي يمكن أن يُستخدم أيضاً كوقود (Physics Word October 2009 – pp37 – 39).

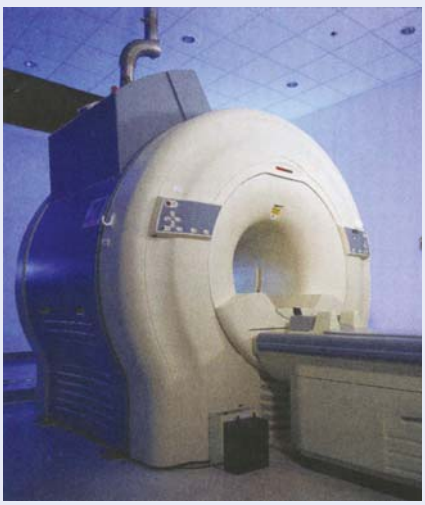
2. التصوير الطبي

إن أحد أهم التطبيقات السلمية التي نتجت من تطوير الرادار في الحرب العالمية الثانية كان اختراع التجاوب المغنطيسي النووي (NMR) الذي يمكّن من تعيين بنية المواد وتركيبها من خلال دراسة كيفية امتصاص نَوى لها سبين غير معدوم مثل الهدروجين للفوتونات، وذلك عندما تكون مغمورة بحقل مغنطيسي. في نهاية الستينيات ومع تطور تقنيات التصوير الطبقي، التي يمكن أن تبني صورة بأشعة X ثلاثية الأبعاد للجسم الإنساني بواسطة «شرائح» ثنائية الأبعاد، أدرك علماء الفيزياء الطبية أنه يمكن استعمال التجاوب المغنطيسي النووي لدراسة توزع نَوى الهدروجين في الأنسجة الحية. في أواخر السبعينيات أنجزت أولى ماسحات التصوير بالتجاوب المغنطيسي لكامل الجسم، والتي كانت تتطلب حقلاً مغنطيسياً ثابتاً ومنتظماً يحيط بالجسم قدره 1 T. وهو شرط ممكن تحقيقه عملياً بسهولة عند استعمال مغانط كهربائية ذات ناقلية فائقة.

وقد أصبحت تقنية MRI منذ ذلك الحين وسيلة التشخيص الأكثر انتشاراً في أنحاء العالم حيث إنه يوجد على الأقل ماسح واحد في كل مشفى كبير. وتحتوي وشيعة MRI عادة على ما يمكن أن يصل إلى 100 km من أسلاك نيوبيوم–تيتان أو نيوبيوم–قصدير المصنعة من أسلاك إفرادية حيث ترتبط كل بضعة كيلومترات منها بوصلات خاصة يمكن للتيار أن يمر فيها دون أي ضياع. تستخدم أغلب هذه المغانط مبردات قرية ميكانيكية (على نسق البراد المنزلي) بدلاً من الهليوم السائل لذا يمكنها العمل بشكل مستمر. كما أن هناك نمطاً من MRI بدأ ينتشر هو التصوير بالتجاوب المغنطيسي الوظيفي [Functional MRI] وهو يحتاج إلى ضعفي الحقل المغنطيسي المستخدم في الماسحات النموذجية أي ما يقارب أحياناً 4 T. وهذه الماسحات تستخدم لمراقبة الحركة في جسم الإنسان في الزمن الحقيقي، مثل تغيرات جريان الدم ضمن المخ كاستجابة لنشاط عصبي محدد.

كما أنَّ هناك تقنية مسح طبي تَستخدِم نبائط التداخل الكمومي ذات الناقلية الفائقة أو السكويدات [SQUIDs] والتي تُبرد لدرجة حرارة الهليوم السائل كي تتحسس الحقول المغنطيسية الصغيرة الناتجة من التيارات الصغيرة جداً في كلٍّ من القلب والدماغ. تُعرف هذه الماسحات باسم مخطط القلب المغنطيسي

مرتبطة ببعضها : يقوم عامل بلحم مغنطيسين ذوَي ناقلية فائقة في مصادم LHC.



خذ صورة: يستخدم ماسح التصوير بالتجاوب المغنطيسي ملفات صغيرة ذات ناقلية فائقة لتوليد حقول مغنطيسية وذلك لإعطاء صور مفصلة لأي جزء من الجسم.

Magnetocardiography (عند دراسة القلب) أو تخطيط الدماغ المغنطيسي Magnetoencephalography (عند دراسة الدماغ) وهي غير مؤذية ولا تحتاج إلى أية تجهيزات تربط مباشرة على الجسم. وإن مخطط القلب المغنطيسي الذي يمكن أن يكتشف شذوذات قلبية لا يمكن لمخطط القلب الكهربائي كشفها قد نجح في تجارب طبية عدة في كلٍّ من الولايات المتحدة وأوربا والصين إلا أنه ما زال غير منتشر في المشافي.

وعلينا ألّا ننسى بأن مغانط كهربائية ذات ناقلية فائقة من نفس حجم المغانط المستخدمة في ماسحات MRI قد كان لها تأثير كبير في فيزياء المادة الكثيفة وعلم المواد. إن أغلب الجامعات والمخابر الصناعية تملك «منظومة قياس خصائص فيزيائية» واحدة على الأقل يمكن استخدامها لإجراء مجموعة من القياسات الكهربائية والمغنطيسية والضوئية والمجهرية من درجة حرارة الغرفة وحتى درجة 1.2 K (أو حتى أقل من ذلك) وذلك تحت حقول مغنطيسية يمكن أن تصل لـ 16 T.

3. فيزياء الطاقات العالية

قد يبدو بحث الإنسان عن أصوله كإنسان مقصوراً على فئة قليلة ولا علاقة له بتأمين حاجيات معيشته، وقد يكون من المتفق عليه بأنه لا يوجد مسعى يتجاوز هذا المسعى لدى البشرية. وقد خصصت كل حضارة جزءاً من إرثها لذلك المطلب، خذ مثلاً أهرامات الجيزة أو تيوتيهواكان، وتتابع اليوم مخابر فيزياء الجسيمات الكبيرة هذا التقليد. إلا أن مصادمات الجسيمات ما كان لها أن توجد لولا المغانط ذات الناقلية الفائقة التي تقوم بحني مسار الجسيمات المسرعة لتأخذ مساراً دائرياً. على سبيل المثال في المصادم تيفاترون Tevatron في مختبر فرمي Fermilab في الولايات المتحدة يوجد مغانط ضخمة لعطف الجسيمات تولد حقلاً مغنطيسياً قدره 4.2 T عند تبريده بالهليوم السائل وذلك بتمرير تيار قدره 4000 A في حين تولد مغانط المصادم الضخم LHC في CERN حقولاً تقارب ضعف هذا الحقل بدرجة حرارة تصل إلى 1.9 K.

إن مصادم تيفاترون، الذي سيغلق هذا العام، يمكن أن يولد طاقة تصادم بالنسبة لمركز الكتلة قدرها 2TeV، في حين أنَّ LHC ينتج طاقة قدرها 7 TeV، وكهدف بعيد الأمد 14 TeV. يمكن لكلا المصادمين، من حيث المبدأ، التحسس لبوزونات هغز وبذلك تتم القطعة الأخيرة من النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات، ولكن يبدو أن مصادم LHC، الذي يعمل بطاقة أعلى ومازال حديثاً نسبياً، يقوم بالمهمة بشكل أفضل.

ولكن ماذا يختبىء وراء هذا النموذج المعياري؟ يعتقد العديد من نظريي فيزياء الطاقات العالية بأن هناك فجوة طاقية واسعة قبل أن يعود ويظهر «شيء مهم». مما يتطلب طاقات تصادم من رتبة 200 TeV – 100 أو أكثر (أي من 50 إلى 100 TeV لكل حزمة). ولكن للأسف في حال كان المصادم الذي يمكن أن ينتج مثل هذه الطاقات من حجم المصادمات التقليدية مثل LHC (أي بمحيط من رتبة 27 km) سوف يفقد معظم طاقته على شكل أشعة سينية (هذه الأشعة السينية مفيدة جداً لتوصيف المواد ولهذا السبب يوجد حوالي 50 مركزاً مخصصاً لإنتاج أشعة السنكروترون في أنحاء العالم ومعظمها يستخدم مغانط ذات ناقلية فائقة).

وقد اقترح بيل فوستر وزملاؤه وهو فيزيائي من مختبر فرمي، إحياء فكرة قديمة تقتضي إشباع مغنطيس حديدي يولد حقلاً قدره 2T باستخدام كبل ذي ناقلية فائقة ذات درجات حرارة عالية مبرد بالآزوت السائل ويحمل تياراً كهربائياً قدره 75000 A. المشكلة هي أن الحصول على طاقة قدرها 50 TeV يستلزم حلقة محيطها 500 km. وقد تكون إقامة مشروع كهذا صعبة في المناطق المأهولة ولكنها ممكنة من حيث المبدأ في الأماكن البعيدة. كما أن المشكلة الأساسية التي تبقى دائماً هي تأمين المال اللازم.

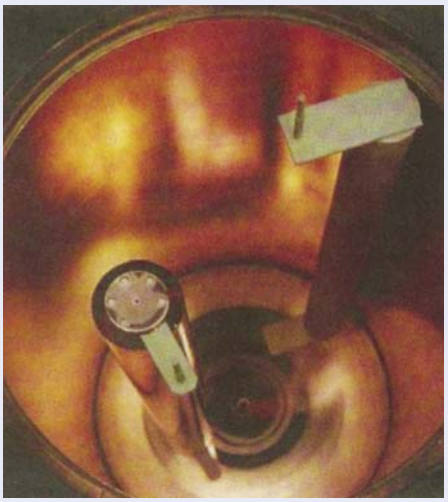
4. الآلات الدوارة

لقد كان من المتوقع أن يكون للمواد ذات الناقلية الفائقة مستقبل لامع في المحركات والمولدات. إلا أن المحركات التقليدية أصبحت ذات مردود جيد بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة دورانية بمردود يصل إلى 95% وذلك من أجل استطاعات تتراوح بين 100 kW و1000 MW للآلات الصناعية وبالتالي فإن استبدال المغنطيس الكهربائي (أي الجزء الدوار) في المحرك بمادة ذات ناقلية فائقة يمكن أن يحسن المردود بمقدار 2% ولكن هذا لن يخلق فرقاً كبيراً.

ومع ذلك، ففي عام 1983 عرض معهد أبحاث الطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة بالاشتراك مع شركة ويستنغ هاوس للكهرباء مولدة باستطاعة 300 MW تستخدم أسلاك نيوبيوم– تيتان وتعمل بدرجة حرارة 5 K. وقد جرت أعمال مشابهة في معهد ماساشوستس التقني. وكذلك في عام 1988 افتتحت الحكومة اليابانية مشروع Super-GM، الذي يهدف لتصنيع مولدات كهربائية ذات ناقلية فائقة وذلك لتلبية حاجات اليابان المتزايدة من الكهرباء. إلا أن حاجات اليابان من الكهرباء لم تبلغ المستوى المطلوب ورغم نجاح المشروع تقنياً لم يستخدم فعلياً في إنتاج الكهرباء في اليابان.

إن الميزة الملموسة الأساسية لاستخدام الأسلاك ذات الناقلية

الفائقة (سواء أكانت ذات درجة حرارة حرجة منخفضة أم مرتفعة) في المولدات والمحركات هي أنها تقلل كمية الحديد المستخدمة كقلب للمغانط الكهربائية ضمن هذه التجهيزات. إذ إن الاستغناء عن الحديد بهذه الطريقة يجعل المولدة أخف وزناً، وأصغر حجماً وأكثر فعالية. لقد اعترف الجيش الأمريكي بهذه الميزات لسنوات طويلة، وهو يعتبر دائماً أن فعالية تقنية ترجح على السعر. ولكن بالرغم من تجارب عديدة ناجحة أجريت من قبل البحرية الأمريكية لمحركات دفع تستخدم نواقل فائقة منخفضة درجة الحرارة الحرجة لم تتبن البحرية هذه المحركات.



هناك قمة في الداخل: تحتوي الحجرة في مركز تجارب الأكسيون للمادة الخفية على مغنطيس ذي ناقلية فائقة من النيوبيوم تيتان.

إلا أن الرياح قد بدأت تغير اتجاهها في البحرية الأمريكية التي وجدت نفسها على وشك استخدام الكابلات ذات الناقلية الفائقة العالية درجة الحرارة الحرجة وذلك لإزالة المغنطيسية على سفنها الخفيفة والسريعة المدمرة لتقيها من التدمير من قبل الغواصات المعادية (حيث تلف هذه الكابلات على شكل ملفات تولد حقلاً مغنطيسياً يعاكس الحقل الناتج من الأجزاء الحديدية من القارب). لا بل أكثر من ذلك، حيث إن المحركات التي تستخدم نواقل فائقة ذات درجات حرارة عالية على وشك أن تستخدم كوحدات خارجية في الغواصات الأمريكية وموارد للهجوم السطحي.

وإذا نجح ذلك فليس من المستبعد أن نرى التجهيزات ذات الناقلية الفائقة في بواخر الرحلات السياحية والبواخر التجارية. وأخيراً فإن المولدات ذات الناقلية الفائقة تبدو كأنها تشق طريقها في عنفات الريح، لكونها تخفف بشكل كبير الأثر البيئي لهذه العنفات.

ربما سنرى في المستقبل البعيد محركات ذات ناقلية فائقة وممكن أيضاً مضخات مائية مغنطيسية مستخدمة لنقل الماء إلى الأماكن الجافة وذلك لتعديل أثر التسخن الحراري.

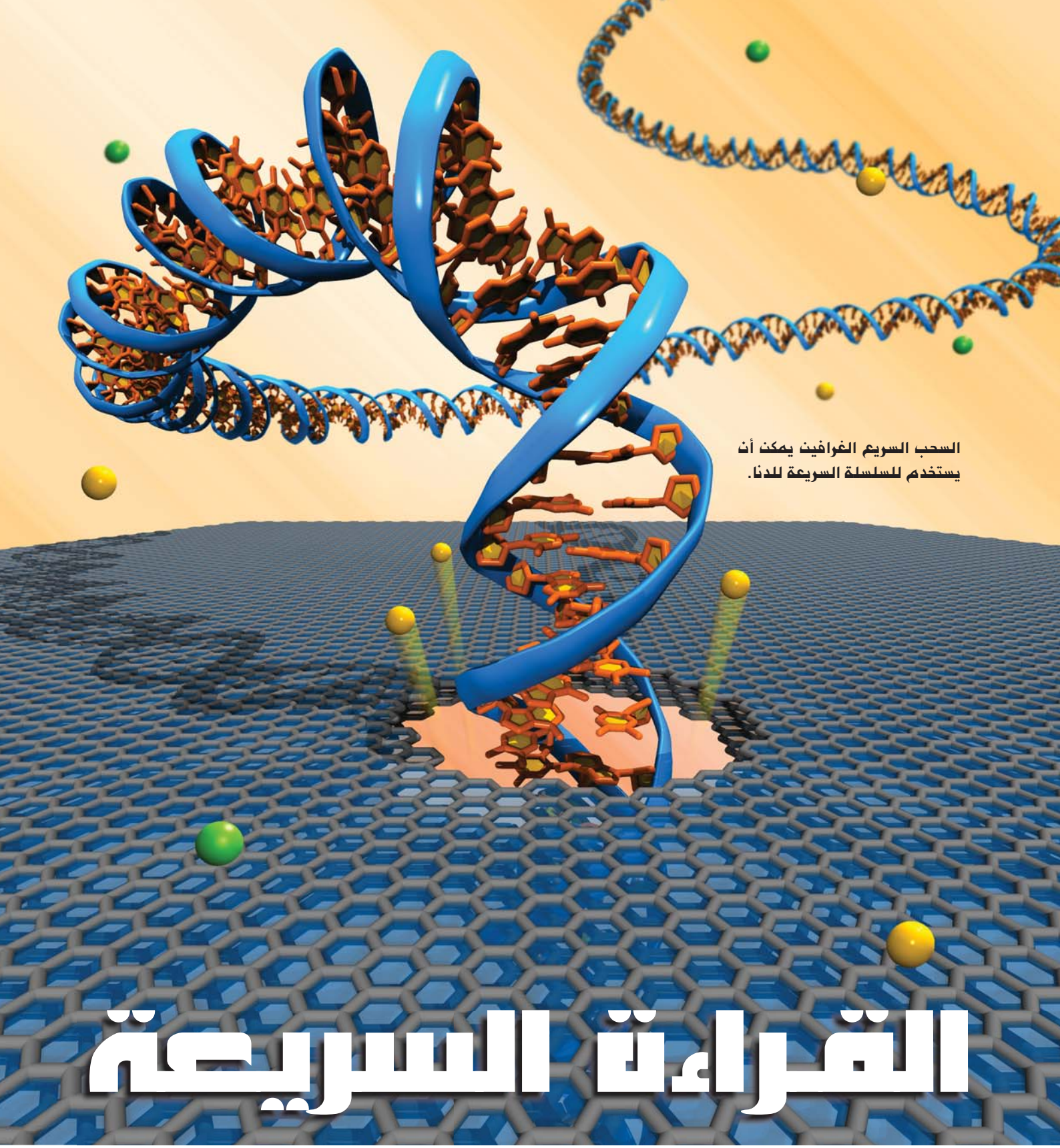
5. المادة الخفية

لا يخفى على القارئ بأن جزءاً كبيراً من الكتلة في مجرتنا لا يمكن رؤيتها. حيث إن علماء الفلك قد لاحظوا انحرافاً في الحركة الدورانية في بعض المجرات التي لا يمكن تفسيرها بمراقبة مادة عادية نشاهدها عن طريق إشعاعات كهرطيسية. وقد تبين فيما بعد أن أربعة أخماس الكون لا يمكن رؤيتها أي أنها «مادة خفية» (إن كل المادة سواء كانت خفية أم مرئية تشكل تقريباً 27% من كثافة كتلة –طاقة للكون، وأما الـ 73% الباقية فهي عبارة عن طاقة خفية، ولكن هذه قصة أخرى...) وما زالت طبيعة المادة الخفية غير مفهومة بعد، مما يعني أن حل هذا اللغز هو تحدٍ كبير للفيزياء وسؤال مركزي حول وجودنا.

إن موضوع المادة الخفية مشحون بكثير من التشويش والنقاش، حتى أنَّ أسماء الجسيمات التي تشكل هذه المادة غريبة مثل ماتشو، رامبو، ومب، كاميليون (تعني حرباء Chameleon) وأكسيون وهذه ليست إلا القليل. ويأتي دور الناقلية الفائقة في البحث عن الأكسيونات التي من المفترض أن تنتج من انتهاك تناظر الشحنة–الندّية تحت تأثير اقتران قوي ضمن النموذج المعياري. الفكرة هي أنه عند دخول أكسيون من كتلة – طاقة ما (في المجال 1 µeV وحتى 1meV) ضمن تجويف أمواج مكروية موضوع ضمن حقل مغنطيسي يتراوح بين 5 و7 تسلا ناتج من وشيعة ذات ناقلية فائقة مبردة بالهليوم فإن هذا الأكسيون سوف يتفاعل مع هذا الحقل ويتحول إلى فوتون. يمكن بعد ذلك تضخيم هذه الفوتونات والكشف عنها باستخدام نبائط التداخل الكمومي ذات الناقلية الفائقة (سكويدات) المبردة لدرجة حرارة 2 K. إن الفكرة من استخدام هذه النبائط هو تخفيض الضجيج ومن ثم ترتفع الحساسية إلى ما يقارب الحد الذي وضعه بلانك.

إن تجارب كهذه ليست ضرباً من الخيال العلمي ولكنها قيد التحضير على أنها جزء من برنامج التعاون Axiom Dark Matter Experiment (ADMX) الذي كان موقعه جغرافياً في مخبر لورانس ليفرمور الوطني وأصبح اليوم في جامعة واشنطن في الولايات المتحدة. ويعد مولد الحقل ذي الناقلية الفائقة قلب التجربة، وهو مصنوع من أسلاك نيوبيوم تيتان ملفوفة 37700 لفة حول القلب الذي يبلغ قطره 60. cm. إلا أنه حتى الآن لم يتمكن ADMX من التحسس لأي أكسيون ونحن نعلم بأن الأكسيونات، إن وجدت، لا يمكن أن تكون كتلتها من رتبة 3.53×10^{-6} eV – 3.3. إن الكشف عن الأكسيونات بأية طاقة وفي أي مكان سوف يؤدي إلى الفوز بجائزة نوبل وبطاقات طائرة إلى ستوكهولم.

نشر هذا المقال في مجلة Physics World, April 2011، ترجمة د. عادل نادر، هيئة الطاقة الذرّية السورية.



السحب السريع الغرافين يمكن أن يستخدم للسلسلة السريعة للدنا.

القراءة السريعة

بوصول المنافسة لجائزة X آركون جينوميكس إلى 10 مليون دولار أمريكي ، بدا أنه قد يكون للفيزيائيين الكفة الراجحة في المسعى لسلسلة الجينوم البشري بسرعة وبأقل كلفة ، كما يشرح فيليب بول P.Ball

الكلمات المفتاحية: جينوم بشري، DNA، رحلان كهربائي، ثقوب نانوية.

فيليب بول هو كاتب علمي وصحفي يعيش في لندن، المملكة المتحدة.

أيهما أصعب: بناء مركبة فضاء تحمل بشراً، أم سلسلة الجينوم (المجين)؟ في آخر مرة وضعت فيها مؤسسة جائزة X التي تقع في الولايات المتحدة الأمريكية مبلغ 10 مليون دولار أمريكي على الطاولة، كانت لاستكشاف الفضاء الخارجي: لبناء مركبة فضائية خاصة تنقل ثلاثة ركاب لارتفاع 100 كم. ولكن المبلغ نفسه مقدم حالياً لتحقيق إنجاز في الفضاء الداخلي. إن مؤسسة جائزة X التي تقدم جائزة تشجيعية ضخمة لإنجازات هائلة في تقانة تفيد البشرية، تسعى لمكافأة أول شركة خاصة تستطيع سَلسلة 100 جينوم بشري بدقة خلال عشرة أيام، وبكلفة أقل من 10000 دولار أمريكي للجينوم الواحد.

بحسب المؤسسة، فإن جائزة X آركون جينوميكس انطلقت منذ العام 2006، وتهدف لتحفيز الابتكار الذي يمكن أن يحدث ثورة في الطب بوصولنا إلى يوم من الأيام حيث «تجلس أنت وطبيبك فيه لمراجعة نسخة من جينومك الشخصي». وهذه ربما تكون صورة مبسطة جداً –في النهاية، نحن ما نزال لا نعرف كيف تعمل معظم المورثات البشرية، ولا كيف تتفاعل (تتآثر) في الأمراض المرتبطة بالمورثات. ومع ذلك، إذا استمرت التحسينات غير العادية في السرعة والتكلفة لسلسلة الجينوم –التي تحفز من قبل مشروع الجينوم البشري (HGP)، فإنه سيكون لها بالتأكيد تأثير عميق على فهمنا للبيولوجيا الوراثية، وبالتالي ليس فقط على العناية الصحية ولكن على مجالات تتراوح بين الأحياء الدقيقة وعلم الإنسان.

ويبدو أنه من الأرجح أن الفيزياء والكيمياء الأساسية ستكون في مركز هذا التقدم. للقراءة الأسرع والأكثر سهولة لسلسلة القواعد في شريطة الدنا (DNA)، هناك حاجة لتقنيات مختلفة كلياً عن تلك المستخدمة في مشروع الجينوم البشري. وهذه يمكن أن تعتمد على مقدرة منابلة (manipulate) الدنا والأنزيمات على مستوى الجزيء المفرد، ومن ثم ستشمل التقانة النانوية. وأكثر من ذلك، أن إحدى أكثر الطرائق وعداً، وهي مرشحة حديثاً، تستخدم المادة التي توصّل إليها حامل جائزة نوبل في الفيزياء هذا العام: ألا وهي الغرافين (رقائق كربونية سمكها ذرّة واحدة).

الخيط في الإبرة

أعلن عن المسودة الأولى لسلسلة كامل الجينوم البشري من قبل مشروع الجينوم البشري في العام 2001، وتم الحصول عليها باستخدام إجراء معقد: يقطع الدنا إلى شدف من قبل أنزيمات، «تضخم» بالتضاعف، وتوسم كيميائياً بصبغات مفلورة، ثم تفصل بتقنية الرحلان الكهربائي على هلامة لقراءة تسلسلات القواعد النيوكليوتيدية. خلال مشروع الجينوم البشري، بُسِّطت هذه الطريقة وأتمتت لتسريعها، وفي السنوات القليلة الفائتة، دعمت بتقنيات جديدة بل وحتى أسرع.

لكن، ومع كل براعة هذه الطرائق، فإنها لا تزال تقدم وسيلة مرهقة وملتوية للحصول على معلومات موجودة في الجزيء كتسلسل خطي بسيط من أربعة «أحرف» (القواعد الكيميائية المرمزة A و T وG وC على كل لبنة بناء نيوكليوتيدي). كم سيكون أفضل إذا استطعنا تكبير الشريطة المفردة للدنا و«رؤية» هذه الأحرف حرفاً حرفاً.

في منتصف التسعينيات، كان الكيميائي ديفيد ديمر D. Deamer من جامعة كاليفورنيا، سانتا كروز واحداً من باحثين عدة لاحظوا أنه يمكن أن توجد طريقة لعمل هذا بالتحديد. تصور ديمر إدخال الشريط المفرد للدنا في ثقب (مسام) صغير جداً يكون بحجم الجزيء. في المحلول الملحي، تسمح الثقوب (المسام) للشوارد المنحلة بالمرور، ويمكن قياس التيار الأيوني الصغير جداً من خلال تقنية «الباتش كلامب» المطورة في نهاية السبعينيات. ولكن إذا سدت قاعدة الدنا الثقب بشكل جزئي، فإن ذلك يخفض التيار الأيوني. ولأن البنية الكيميائية لكل قاعدة دنا تختلف بشكل قليل، فإنه يمكن تمييزها من خلال أثرها المختلف في سد الثقوب: بكلمات أخرى، فإن التيار الأيوني يمكن أن يختلف اعتماداً على أيٍّ من القواعد الأربع يسد الثقب في أية لحظة. إذا سحبت شريطة الدنا بشكل ثابت من خلال ثقب في حقل كهربائي، فإن التغيرات المتدرجة في التيار الأيوني سوف تظهر تسلسلات القواعد.

في العام 1996 توحدت جهود ديمر مع دان برانتون D. Branton من جامعة هارفارد لتوضيح برهان مبدأ هذه التقنية. أظهرت جهودهما أن الشرائط القصيرة لكل من الدنا والرنا تحتوي نوعاً واحداً من النيوكليوتيدات والذي يمكن سحبه من خلال ثقب نانوي

تقنيات لقراءة سلسلة القواعد في شريطة الدنا أسرع وأكثر سهولة قد تعتمد على المقدرة لمنابلتها على مستوى الجزيء الواحد، ومن ثم ستشمل التقانة النانوية

يقع في مركز بروتين غشاء بكتيري يسمى ألفا هيمولايسين (α-HL)، وهو جزيء له شكل الفطر الأجوف مع رقبة أسطوانية ضيقة يمكن أن تثبت في طبقة غشاء ليبيدية. لقد وجدا أن التيار الأيوني انخفض عند مرور شريطتي الدنا والرنا خلاله، وأنه كلما زاد طول الشريطة طالت الإعاقة. ومع تحسينات أكثر، صرح الباحثان بجرأة في ذلك الوقت بأن "هذه الطريقة يمكن أن تقدم من حيث المبدأ كشفاً مباشراً وبسرعة عالية لتسلسل القواعد في جزيئات الدنا أو الرنا المفردة". ولكن هذه الطريقة لكشف سلسلة الدنا كانت راديكالية لدرجة أن عدداً قليلاً من علماء الوراثة انتبه لها. "العديد اعتقدوا أنها كانت جنوناً"، يقول برانتون.

وفي الوقت نفسه، كان عالم الكيمياء البريطاني هاغان بيلي H. Bayley في جامعة تكساس A&M، والآن في جامعة أوكسفورد، يستكشف استخدام α-HL ككاشف للمواد التي تقع بداخل الثقب. وذكرت مجموعته في العام 1999 أنه عندما يجهز الثقب بمهايئ –جزيء السكر سيكلوديكسترين ذي الشكل الحلقي والذي يتناسب بشكل محكم مع الفتحة– يمكن استخدام التغيرات في التيار الأيوني لتمييز جزيئات عضوية صغيرة متنوعة. ومع أن بيلي كان على دراية بملاحظة ديمر عن سلسلة الجينوم من خلال الثقب النانوي، فإنه يقول بأنه قَبِلَ التحدي فقط في العام 2004 عندما أعلنت المعاهد الوطنية الأمريكية للصحة (NIH) عن مبادرة لتطوير تقنيات تستطيع أن تقدم سلسلة الجينوم البشري مقابل 1000 دولار أمريكي للجينوم. وبمنحة مقدمة من NIH في العام 2005، أظهر بيلي وزملاؤه أن قواعد الدنا يمكن أن تتميز من خلال التوهين المختلف للتيارات الأيونية عندما تمرر شريطة الدنا من خلال α-HL.

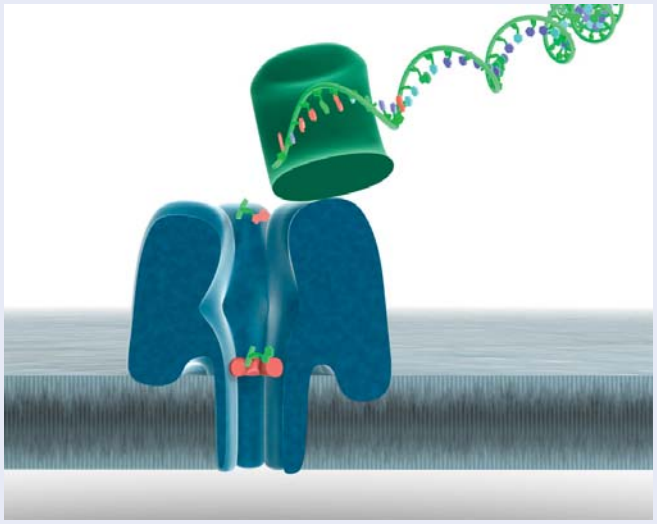
حدود السرعة

ولكن من المحتم أن سلسلة الدنا مع α-HL ليست بهذه البساطة. فمن جهة، إن الرقبة الضيقة لـα-HL تبلغ حوالي 5 نانومترات طولاً، وهذا أطول بكثير من ارتفاع الـ 4 أنغستروم لزوج قاعدي واحد على الدنا، مما يعني أن هناك حاجة لحوالي 10-15 قاعدة لسد الثقب في أية لحظة. ومن جهة أخرى، فإن الرحلان الكهربائي يمسح شريط الدنا بمعدل حوالي 1-10 ميكروثانية لكل قاعدة، وهذا يجعل من المستحيل جمع إشارة كافية لتحديد كل قاعدة بشكل موثوق. وباختصار، هناك حاجة لضبط أكبر لكل من الثقب ذاته وحركة الدنا من خلاله.

يمكن تقليل سرعة مرور الدنا بلصق حبات عليه لخلق قوة سحب أو بتخفيض درجة حرارة المحلول الأيوني. ولكن أحد أكثر الطرائق وعداً يستخدم شرطة السرعة الطبيعية: ما يسمى أنزيمات الدنا الإصلاحية؛ وهذه بروتينات تلتحم مع الدنا وتنتقل عبر الشريط قاعدة قاعدة لتقوم بمهمات مثل الإصلاح، قطع أو تعديل كيميائي. إذا انتخبت هذه الأنزيمات لفحص كل قاعدة بالدور وليس بالضرورة عمل أي شيء لها، فإنها تتقيد بحجم فتحة الثقب، وبالتالي فإن الدنا لا يستطيع المرور عبر الثقب بشكل أسرع من الأنزيم. وبشكل نموذجي، فإن بضعة أجزاء من الألف من الثانية لكل قاعدة، سيخفف الدنا سرعته ثلاث مراتب في القيمة. يقول برانتون: لفرض حدود سرعة على الدنا، فإن "استخدام أنزيمات الدنا الإصلاحية في فم (فتحة) الثقب أو قربه هو أفضل خيار متوفر أعرفه اليوم".

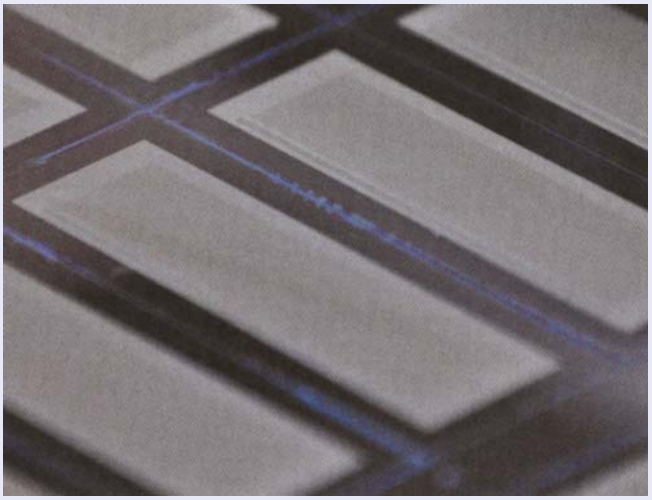
استنبط بيلي طريقة أكثر شدة لضبط السرعة، والتي يمكن أيضاً أن تحل مشكلة وجود قواعد عدة محشورة في الثقب بأية لحظة. بدلاً من سحب شريطة الدنا، يقترح أنها يمكن أن تقص ببعض أنزيمات قطع الدنا المسماة بالنيوكليز الخارجي exonuclease، التي تقطع النيوكليوتيدات من النهاية واحداً بعد الآخر. إذا ربط بالنيوكليز

الشكل 1: منشر (قَضْم) الدنا:



تمسك شريطة الدنا من قبل بروتين النيوكليز الخارجي exonuclease، الذي يقص القواعد الفردية الواحدة تلو الأخرى. ثم تغذى هذه القواعد إلى جزيء بشكل الفطر يدعى α–HL، الذي يتوضع داخل طبقة دهنية مزدوجة مقاومة كهربائياً، ومن خلال جزيء السيكلوديكسترين الأصغر الملتصق بداخلها. تعطي قواعد الدنا المختلفة انقطاعات مميزة في تدفق الأيونات في المحلول الملحي عند عبوره الثقب النانوي. القطبان الكهربائيان المتموضعان أعلى الطبقة الدهنية المزدوجة وأسفلها يسوقان ويكشفان التغير في هذا التيار الأيوني البالغ الصغر، بما يجعل تحديد سلسلة الدنا ممكناً.

الشكل 2: جهاز الثقب النانوي:



هذه الرقاقة السليكونية المطورة من قبل شركة أوكسفورد نانوبور تكنولوجيز تحوي صفيفاً من آبار مكروية، كل منها يعدّ قناة إلكترونية يمكن الوصول إليها بشكل منفرد. عندما تستخدم في جهاز، يُملأ كل بئر مكروي بمحلول ملحي ويغطى بطبقة دهنية مزدوجة، ويدخل إليها معقد من ثقب نانوي– أنزيم، كما يظهر في الشكل 1. الثقوب النانوية الفردية يمكن أن تستخدم كمحسات إلكترونية بالزمن الحقيقي للدنا.

الخارجي قريباً بشكلٍ كافٍ من مدخل الثقب برابط كيميائي، فإن النيوكليوتيد الحر سوف لن يكون أمامه إلا الذهاب باتجاه الثقب (الشكل 1). في العام 2006 أظهرت مجموعة بيلي أن ثقب α-HL المواءم مع مهايئ (مشتق كيميائي من السيكلودكسترين) يمكن أن يميز أياً من النيوكليوتيدات الأربعة المعزولة عن بعضها بعضاً من خلال أثر كل منها في منع التيار الأيوني.

في العام 2005 وقبل هذا الاكتشاف، أسس بيلي بالمشاركة شركةَ أوكسفورد نانوبور تكنولوجيز التي تهدف لتطوير أبحاثه الأساسية في استشعار الثقوب النانوية لسلسلة الدنا والتطبيقات الأخرى. وفي الوقت الذي كانت الشركة تستكشف كل الخيارات، بدا أن إجراء السلسلة الخارجية exosequencing هو الأقرب للاستثمار التجاري (الشكل 2)، بالرغم من احتراسها من نشر أي تفصيلات حتى الآن. الميزة الأخرى لحساس بيلي α-HL هي أن المهايئ في ثقب الرقبة يستطيع خلق حساسية كافية ليس فقط للتمييز بين النيوكليوتيدات، ولكن أيضاً لكشف أي تعديلات كيميائية عليها. بالرغم مما تتضمنه أحيانا جهود سلسلة الجينوم، فإن الرسالة في مورثاتك لا تعتمد فقط على السلسلة، وهذا بسبب أن المعلومات الوراثية تغطى بالتعديلات الكيميائية للدنا، ويسمى ذلك علامات غير وراثية epigenetic tags، وهذه يمكن أن تعدل الطريقة التي تعبر فيها المورثة. وبشكل خاص، إن قواعد السيتوزين C تعدل أحيانا بإضافة مجموعة ميثيل أو هيدروكسيل ميثيل بحيث يصبح بالفعل "ستة حروف وليس أربعة" (القواعد والقواعد المعدلة) في الجينوم غير الوراثي "epigenome". أظهر بيلي وزملاؤه أن كلاً من السلسلة الخارجية والسلسلة بسحب الشرائط يمكنهما من حيث المبدأ تمييز كل الأحرف الستة من الجينوم غير الوراثي. وبما أن بعض الباحثين يعتبرون أن سلسلة الجينوم البشري غير الوراثي ستكون على الأقل بأهمية سلسلة الجينوم الأساسي نفسها، فإن هذه بالفعل ميزة واعدة بشكل كبير.

في شهر آب/أغسطس الماضي، قام فريق بقيادة جينز غوندلاش J. Gundlach من جامعة واشنطن، وهو فيزيائي جمع ما بين اهتمامه بأمواج الجاذبية gravitational وسلسلة الدنا، بإضافة ثقب جديد لِلُعبَة (game) التي لها مزايا محتملة على α-HL. وجد الباحثون أن صيغة مهندسة لبروتين الغشاء من Mycobacterium smegmatis يمكن أيضاً أن تميز بين النيوكليوتيدات الأربعة، مع ميزة أن منطقة الاستشعار في الرقبة الضيقة للثقب تبلغ فقط 5 أنغستروم بالطول، وبالتالي سوف لاتعاني من عيب α-HL المتمثل باحتمال قراءة قواعد عدة بآن واحد.

رقائق مع ثقوب

المشكلة مع البروتين في الغشاء الدهني (الليبيدي) أنه ليس النظام الأفضل لتطويره إلى جهاز. وهذا أحد الأسباب التي تدفع مجموعات الباحثين للبحث في تصنيع ثقوب نانوية مصنعة من مواد غير عضوية مثل نتريد السليكون، منحوت على سبيل المثال بحزمة إلكترونية. ميزة أخرى لهذه الطريقة أنها قد تقدم آلية قراءة جديدة اعتماداً على إلكترونيات دقيقة من أنصاف النواقل. وعلى سبيل المثال، يمكن أن يقيس المرء التيار النفقي الجاري عبر ثقب عازل باستخدام قطبين كهربائيين متوضعين على جهتي الفتحة المتقابلتين: من حيث المبدأ هو نوع التيار نفسه المستخدم في التصوير ذي الميْز الذري atomic resolution imaging في المجهر النفقي الماسح.

تدل الحسابات على أن الأجسام الموضوعة بين قطبين كهربائيين يمكن أن تعدل التيار بطريقة تعتمد على طبيعتها

في بداية عام 2010، ذكرت ثلاث مجموعات بحثية وبشكل مستقل أنها سحبت الدنا من خلال ثقب نانوي محفور على صفيحة من الغرافين

الكيميائية الدقيقة. بالواقع، في بداية العام 2009 ذكر ستيوارت ليندسي S. Lindsay وزملاؤه من جامعة ولاية أريزونا تجارب أظهرت أنه يمكن تمييز القواعد الأربع للدنا بهذه الطريقة.

وبالرغم من التحديات التقنية الرهيبة، يحاول فريق أوربي بقيادة رادومير زيكيك R. Zikic من معهد الفيزياء في بلغراد، صربيا مع مجموعات أخرى من سويسرا، وإيرلندا، استنباط أداة تستخدم مبدأ الكشف هذا. تخيلوا سحب الدنا من خلال ثقب نانوي من نتريد السليكون أثناء رصد التيار بين قطبين كهربائيين –عبارة عن أنبوبين نانويين كربونيين، جرى الوصل الكهربائي الدقيق بواسطة الغرافين الملفوف.

حتى الآن، استطاع الباحثون وضع الأنابيب النانوية على غشاء الركازة والحفر باتجاه إشارة التجمع assembly بحزمة إلكترونية. ولكن ليكون هناك إمكانية التمييز بين القواعد الأربع باستخدام تيار الأنبوب، يجب أن تكون نهايات الأنابيب النانوية قريبة جداً من بعضها وأن يكون قطر الفتحة ذاتها ليس أكثر من نانومتر واحد أو اثنين، إذا كان الثقب واسعا جدا، فإن قواعد الدنا يمكن أن تدور، مما يجعل تحليل البيانات أمراً صعباً. تقول ألكسندرا رادينوفيتش A. Radenovic، من معهد البوليتكنيك الفيدرالي السويسري في لوزان (EPFL)، إن الباحثين يفكرون بإضافة مجموعات كيميائية لنهايات الأنابيب النانوية لربط القواعد وجمعها ببعض بثبات، وليخففوا من سرعة الدنا، فإنهم يهدفون لمسك الشريطة بمصيدة ضوئية. وتعترف رادينوفيتش «أنه طريق صعب، ويمكن أن لا يعمل». لكن درجة التحكم في الحركة الجزيئية التي يمكن تحقيقها في هذه الأداة من الممكن أن تكون ذات قيمة في الدراسات الأساسية للبيولوجيا الجزيئية مثل التفاعلات بين الدنا والبروتينات، حتى ولو لم تثبت أنها الطريقة الأفضل للسلسلة السريعة.

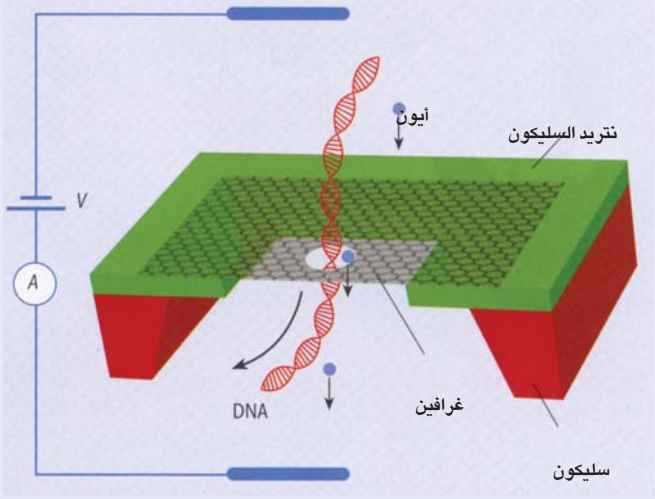
أحد التحديات مع الثقوب النانوية بالحالة الصلبة أن الصفائح التي تثقب عليها هي ثخينة نوعاً ما، وبالتالي سيشغل عدد كبير من النيوكليوتيدات الثقب بآن واحد معاً. المشكلة الأخرى هي أنه من الصعب أن تصنع ثقوباً محددة بالدقة نفسها وبشكل قابل للإعادة من حيث الحجم والشكل. انضم بيلي مؤخراً مع فريق الفيزيائي سيز ديكر C. Dekker، من جامعة ديلفت التقنية في هولندا، لجمع مزايا الطريقتين العضوية واللاعضوية بأسر α-HL داخل ثقب نانوي لاعضوي على نتريد السليكون. أولاً ربط الباحثون جزيء α-HL في نهاية الشريطة المزدوجة اللولبية للدنا والتي تخدم هنا لسحب الدنا من خلال ثقب ضيق جداً لسحب البروتين من خلاله وبالتالي تستقر في الفتحة. يقص بعدها الدنا بعيداً.

الغرافين للإنقاذ؟

ولكن يوجد الآن خيار جديد يولد الكثير من الإثارة. في بداية هذه السنة، ذكرت ثلاث مجموعات بحثية وبشكل مستقل أنهم سحبوا دنا من خلال ثقب نانوي حفر على صفيحة غرافين (الشكل 3): صفيحة من الكربون النقي ترتبط فيها الذرات مع بعض بترتيب مسطح من الأشكال السداسية. عزلت الدنا للمرة الأولى في عام 2003 من قبل أندري غيم وكونستانتين نوفوسيلوف من جامعة مانشستر بالمملكة المتحدة، واللذين تشاركا في جائزة نوبل للفيزياء للعام 2010 لجهودهما، وجرى الترحيب بالغرافين كأحد أكثر المواد إثارة في عصرنا، وهو: ناقل كهربائي عالٍ، فائق الرقّة، قوي وغير مكلف. يقول بيلي: «إنها مادة لاتصدق». السُمْك الفعال لطبقة أحادية من الغرافين التي تبلغ 6 أنغستروم فقط تعني أن قاعدة أحادية ستستقر في الثقب عند سحب الدنا.

سحب الدنا من خلال ثقب نانوي من الغرافين وما يتبعه من توقيف للتيار الأيوني، تم ذكره في الوقت نفسه من قبل فريق ديكر في ديلفت، ومن قبل مجموعة من جامعة بنسلفانيا، ومن قبل برانتون وزملائه في جامعة هارفارد. وبالرغم من أنه لم تتمكن أي من المجموعات حتى الآن من إظهار أن إيقاف التيار الأيوني يمكن أن يميز بين قواعد الدنا، إلا أنهم يشعرون أن الغرافين قد يثبت دوراً مهماً في التقانة. «أنا أؤمن أن الغرافين قد يكون حقاً مغيّر اللعبة»، تقول ماريا درنديش M. Drnaic من فريق بنسلفانيا.

الشكل 3: الثقب النانوي الغرافيني:



يمكن أن يقدم الغرافين بديلاً مثيراً عن طرائق البروتين التي سيطرت حتى الآن على سلسلة الدنا. هنا يسحب الدنا من خلال صفيحة غرافين مفردة، والتغير الناجم في التيار الأيوني يكشف من خلال مقياس الأمبير.

أيضاً، تقترح مقدرة التوصيل العالية للغرافين طرقاً جديدة لسبر طبيعة الدنا في الثقب. يشكك بيلي بأن قياس التيار النفقي المستعرض سيكون طريقة جيدة، لأنه من المحتمل أن يكون حساساً بشكل حاد لعوامل غير قابلة للضبط مثل التوضع الدقيق للنيوكليوتيدات. ولكنه يفكر بأن معلومات السلسلة تتأثر بسبب التشويش من إحدى خصائص الغرافين الغريبة المتمثلة بالنقل الإلكتروني الثنائي الأبعاد. والأكثر من ذلك، يقول، بأنه يمكن تعريف الثقوب بشكل أفضل من تلك التي تفتح في مواد لاعضوية أخرى: على سبيل المثال، يمكن أن تنعم حواف الثقب بتعديلات كيميائية. حتى أنه من الممكن استخدام طرائق كيميائية لبناء ثقوب دقيقة من المرة الأولى، على سبيل المثال، عن طريق قطع عدد محدد بدقة من الأشكال السداسية من صفيحة الغرافين –وهذا العمل هو بالضبط الذي تقوم به مجموعة ديكر الآن.

يربح من يتجرأ

يقول بيلي إن أصبح أي من هذه التقنيات حقيقة تجارية، فإن السرعة ربما تكون على الأقل بذات أهمية التكلفة. وهذا أحد الأسباب لهذا الزخم بالدفع لتطوير نظم على التوازي بشكل كبير يكون فيها مئات وربما آلاف من الثقوب تقرأ قطعاً من الدنا في الوقت نفسه. بما أن طرائق الجزيء المفرد ذات معدلات خطأ أعلى من تقنيات الوسم التقليدية، فإن كل قاعدة في الجينوم ربما عليها أن تقرأ 10 أو 20 مرة منفصلة لإزالة الأخطاء. يستطيع مشروع الثقوب النانوية في أوكسفورد الآن وبشكل روتيني إنتاج رقائق صلبة تحوي العديد من الآبار التي يحوي كلٌّ منها جزيئاً مفرداً من α-HL يتموضع في الغشاء الليبيدي. يتنبأ بيلي بأنه سيأتي يوم لا تستغرق فيه سلسلة جينوم الفيروس وقتاً أكثر مما يحتاجه المرء للضغط على الزر ووضع العملية بالحركة، بينما ربما تأخذ البكتيريا بضع ثوان وحقيقيات النوى الأكثر تعقيداً عشرات الدقائق. وهذا سيكون ذا قيمة هائلة للتشخيص اللحظي للإصابات المرضية، على سبيل المثال.

وللغرابة، يبدو أن كل الأشياء بمتناول الباحثين لدرجة أن مصيدة الـ 10 مليون دولار أمريكي المقدمة من جائزة X آركون جينوميكس لم تجعل لعاب العديد من الباحثين يسيل عليها. يقول بيلي: "حتى أنني لا أعرف حقيقة أي شيء عنها"، بالرغم من أنه يعترف أن شركة أوكسفورد نانوبور تكنولوجيز يمكن أن تضع إصبعها في السباق حالما تتوصل لنظام يعمل (الشركة الآن لا تستطيع البوح حول وقت حدوث ذلك). والآخرون العاملون في التقانة، مثل ديكر وبرانتون، يقولون إنه لا يتوفر لديهم لا الموارد ولا الصبر اللازم للعمل المضني بتحويل الاكتشافات المبتكرة إلى أدوات تجارية ذات وثوقية. «كباحثين أساسيين لا نفكر بأن هذا السباق المحموم سوف يجعلنا نحن أو أي مختبرات بحثية أخرى أكثر إنتاجية»، يقول برانتون، ويصنف: «جائزة الـ 10 مليون دولار أمريكي ببساطة لا تحفزنا».

كان أول من دفع الـ 1000 دولار أمريكي على أنها رسوم تسجيل للدخول في سباق الجائزة X في تشرين الثاني/نوفمبر عام 2009، شركة تقانة حيوية في تايوان تطور طريقة وَمَضان الجزيء المفرد. انضمت إليها الآن شركات أخرى عدة، ولكن التقانة تتطور بشكل سريع لدرجة أن هناك شائعات أن مؤسسة الجائزة X قد تبدل الهدف. يقول بيلي «على الأرجح أن الطرائق الموجودة قد وصلت إليه»، ولكنه مثل العديدين الذين يعملون على تقانات مرشحة للسلسلة الفائقة السرعة، يشعر أن الجائزة الحقيقية ليست وعاءً من الذهب، ولكن الضجة من تحويل الجينومكس إلى فرع من المعرفة يستطيع حقاً أن يبدأ في شرح كيف خلقنا.

نُشر هذا المقال في مجلة Physics World, December 2010 ، ترجمة د. نزار ميرعلي، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

من وقود اليورانيوم العالي التخصيب إلى المنخفض التخصيب في مفاعلات الأبحاث

منذ سبعينيات القرن الماضي، ما تزال الجهود العالمية مستمرّة ليحل الوقود المنخفض التخصيب (^{235}U 20% >)، ذو الكثافة المرتفعة، محل الوقود العالي التخصيب (^{235}U 90% >) UAlx، ذي الكثافة المنخفضة، في المفاعلات البحثية. يكمن الدافع وراء هذه الجهود في محاولة للحدّ من الاستخدام المدني للمواد العالية التخصيب لما تحمله من مخاطر الانتشار والتهديدات الإرهابية. أطلقت المبادرات الأمريكية، مثل المبادرة العالمية للحدّ من التهديد Global Threat Reduction Initiative (GTRI) وبرنامج التخصيب المنخفض لمفاعلات البحث والاختبار Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR)، تطوير أنماط وقود منخفض التخصيب مناسبة لهذه المفاعلات، يمكن أن تحلّ محلّ الوقود العالي التخصيب دون فَقد في الكفاءة. حصل النجاح الأهم مع الوقود المبدّد (المشتّت) U_3Si_2، الذي يستعمل حالياً في العديد من مفاعلات الأبحاث في العالم. ومع ذلك، فإن الجهود ما تزال تبذل لاستبداله بوقود أعلى كثافة، الأمر الذي سيسمح أيضاً بتحويل بعض مفاعلات الأبحاث الشديدة التدفق التي لا يمكن لها في الوقت الراهن استعمال U_3Si_2 (مثل BR2 في بلجيكا)، وتتوجه هذه الجهود حالياً بشكل أساسي نحو وقود U(Mo) خليط بنسبة 7-10% وزناً من Mo.

تقدم هذه المقالة لمحة عامة عن الجهود السابقة وتعرض الوضع الراهن لتطوير U(Mo).

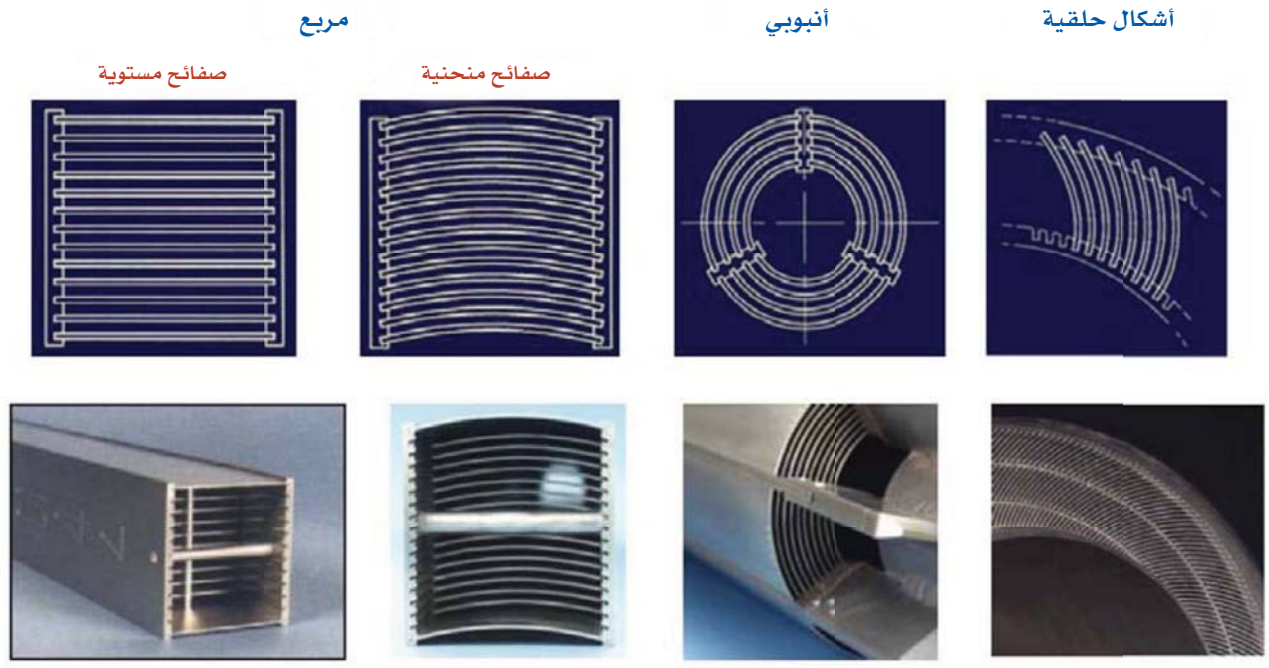
* نُشر هذا المقال في مجلة RGN N° Novembre-Décembre 2010، ترجمة د. عادل حرفوش، رئاسة هيئة التحرير.

1. مقدمة

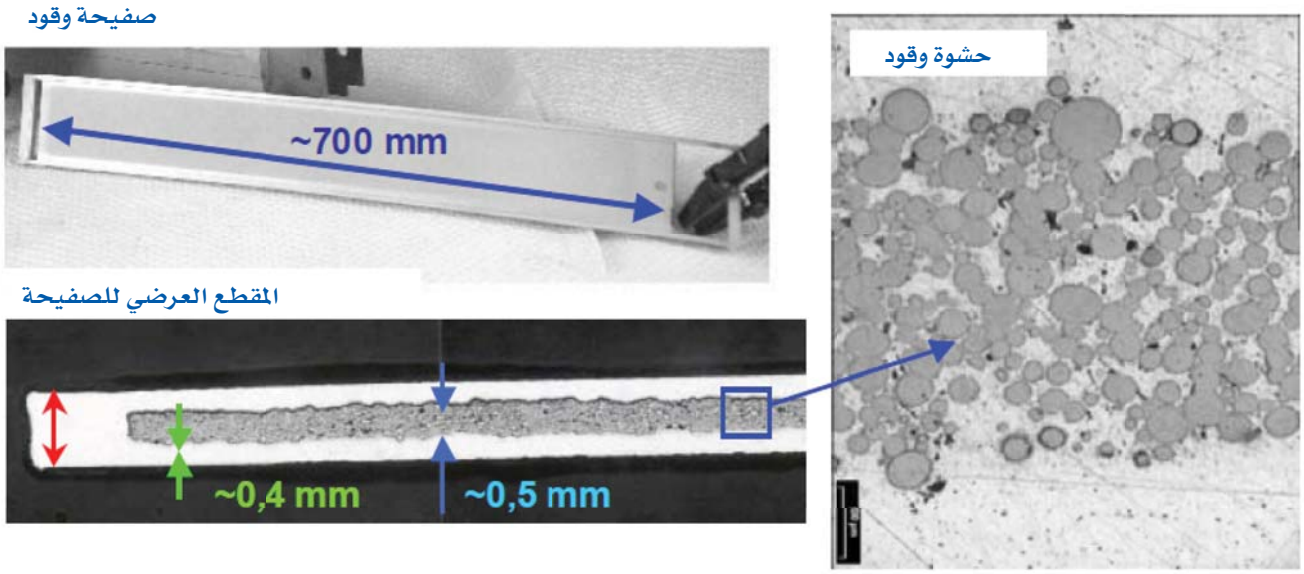
عندما نتحدث عن وقود نووي، فإن معظم الناس في الصناعة النووية سيفكرون بكريات سوداء من السيراميك، مكونة من أكسيد اليورانيوم أو خليط من أكاسيد اليورانيوم والبلوتونيوم (موكس MOX)، ذات تخصيب من مرتبة 5%^{235}U أو 7%Pu. هذا هو في الواقع الوقود المفضل لجميع مفاعلات الطاقة في العالم تقريباً (مفاعلات الماء الخفيف LWR). ومع ذلك، تتمّ تغذية معظم مفاعلات الأبحاث مع نوع مختلف من الوقود. تاريخياً، تمّ تطوير مفاعلات الأبحاث أساساً لسببين: توليد النترونات لاستخدامها في تجارب أنابيب الحزم beamline خارج المفاعل (مفاعلات أنابيب الحزمة، مثل RHF في ILL، في غرونوبل بفرنسا أو FRM-II في TUM، في ميونخ بألمانيا) أو توليد النترونات لتشعيع المواد في قلب المفاعل (مفاعلات اختبار المواد أو MTR، مثل BR2 في SCK•CEN، في Mol في بلجيكا أو FRM-II في ATR في INL، بإيداهو في أمريكا). وفي كلتا الحالتين، فإن الهدف الرئيس هو إنتاج أكبر عدد ممكن من النترونات في أصغر حيّز ممكن. والطريقة الأفضل لتحقيق ذلك هي زيادة تخصيب الوقود، وهذا هو السبب تاريخياً في تشغيل عدد كبير من مفاعلات الأبحاث بالوقود المخصّب (>90%^{235}U).

تختلف تصاميم الوقود من مفاعل إلى آخر (انظر الشكل 1)، ولكن يمكن أن تصنف على أنها من نمط الدبوس pin-type أو نمط اللوحة plate-type. ففي أوربة، تستخدم معظم مفاعلات الأبحاث وقوداً من نمط–لوحة، حيث يتمّ فيه ترتيب مجموعات من لوحات رقيقة (مسطّحة أو منحنية، تحتوي على مادة انشطارية، مرتبة في تجمعات (من نمط العلبة أو الأنبوب أو حتى من أنواع أكثر تعقيداً). معظم الوقود هو وقود مبدّد تكون فيه المواد الانشطارية مبدّدة في ركازة، غالباً ما تكون من الألمنيوم (عدا استثناءات قليلة، مثل الزركونيوم وهدريد الزركونيوم، وغير ذلك)، مع كساء من سبيكة الألمنيوم. وكانت المواد الانشطارية المستخدمة في الوقود العالي التخصيب من UO_X أو UAl_X بشكل أساسي. وللحصول على وقود مبدّد من نمط الدبوس (وبعض الأنماط الأنبوبية الروسية)، استعملت عملية البثق بالضغط extrusion لإنتاج هذا الوقود، في حين جرى تصنيع الوقود من نمط اللوحة باستعمال عملية الربط بلفافة ساخنة hot roll-bonding process. ففي عملية الربط بلفافة، يوضع تجمّع للوحة مغلفة تحيط بإطار صورة وضع فيه خليط مضغوط من خليط ركازة وقود ويرتب التجمع في لوحة الوقود في حجمها الكلي بحيث تتناوب أجزاؤها باردة وساخنة على التوالي. يسمى الجزء الوسطي من اللوحة، الذي يحتوي على المادة الانشطارية، «الحشوة meat» (انظر الشكل 2).

وبسبب المخاطر المرتبطة بانتشار المواد الانشطارية العالية التخصيب المستخدمة، بدأت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة برنامجاً للتخصيب المنخفض لمفاعلات الأبحاث والاختبار (RERTR) في عام 1978 من أجل الحدّ من الاستخدام المدني لليورانيوم العالي التخصيب ومن ثمّ استئصاله في آخر المطاف. كان الهدف الرئيس من هذا البرنامج، وما يزال، تطوير التقانة المطلوبة، بما في ذلك الوقود، لتحويل مفاعلات الأبحاث من اليورانيوم العالي التخصيب (HEU) إلى اليورانيوم المنخفض التخصيب (LEU). بطبيعة الحال، يطلب من مفاعلات الأبحاث تحقيق الأداء نفسه (في التدفق النتروني) مع اليورانيوم المنخفض التخصيب كما هو الحال مع اليورانيوم العالي التخصيب. وفي جوهره، يركز الهدف على زيادة تركيز اليورانيوم في الوقود من خلال خفض تخصيبه بحيث تبقى كثافة ^{235}U نفسها. يمكن تحقيق ذلك عن طريق زيادة نسبة الوقود إلى الركازة (يتضمن الوقود العالي التخصيب عادة ما قيمته 1.7 g_U/cm^3) أو تغيير مادة الوقود إلى مادة أخرى تحتوي على كثافة أعلى من اليورانيوم. وكمادة وقود بديلة، تمّ تطوير U_3Si_2 و U_3Si، وبفضل الأخير منهما فقط تمّ الوصول إلى القيود الأكثر أهمية وهي أن نمط الدبوس فرض نفسه كوقود، من خلال تخفيض الانتفاخ. جرى فحص لوحات وقود U_3Si_2 بتركيز وصل إلى 4.8 g_U/cm^3 مبدّد في الألمنيوم، ووجد أنه مستقر تحت الإشعاع في تشكيلات نمط اللوحة، الأمر الذي قاد في نهاية المطاف إلى تقرير حول تقييم السلامة NUREG-1313 صادر عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في العام 1988، مما أدى إلى المصادقة على هذا الوقود للاستخدام العام. ومنذ ذلك الحين، تحول عدد كبير من مفاعلات الأبحاث إلى الوقود U_3Si_2 المنخفض التخصيب باليورانيوم-235، لكن بعض المفاعلات ما تزال حتى الآن غير قابلة للتخلص من الوقود العالي التخصيب دون أن تفقد من كفاءتها. توصّف هذه المقالة بشكل أساسي الجهود الحالية العاملة على تطوير الوقود المعتمد على سبيكة U(Mo) من أجل تحويل ما تبقى من مفاعلات التدفق العالي التي لا يمكنها حالياً التحول إلى اليورانيوم المنخفض التخصيب.



الشكل 1. أمثلة لتصميمات وقود مفاعلات بحثية مختلفة



الشكل 2. تركيب صفيحة وقود مبدّد بأبعاد نموذجية: يظهر المقطع العرضي الجزء المركزي للصفيحة، المحتوي على المادة الانشطارية المتبددة في ركازة الألمنيوم النقي.

2. التطوير المُبكّر لـ U(Mo)

من أجل السماح لتحويل المفاعلات الأكثر تدفقاً نترونياً في العالم، يتطلب الأمر وجود وقود من اليورانيوم المنخفض التخصيب بتركيز قدره 8-10 g_U/cm^3. لنتذكر أن النسبة بين هذا الحدّ العلوي العملي من الوقود وحجم الركازة، المتعلقة بالناقلية الحرارية والتصنيع، هي 55% في عملية الإنتاج الحالية، إذ يجب استعمال كثافة >14.5 g/cm^3 في مرحلة الوقود للوصول إلى التركيز المطلوب. فقط اليورانيوم المعدني (أو سبائك خفيفة منه) أو مركبات من النمط U6Me (Me هو معدن انتقالي) تمتلك ما يكفي من الكثافات العالية، لكن الأخير أثبت وجود سوية منخفضة جداً من الإشعاع. أما اليورانيوم المعدني، من المعروف أن البنية البلّورية ذات المعيَّن المستقيم لطور اليورانيوم في درجة حرارة الغرفة تظهر عدم استقرار بُعديّ مهم تحت تأثير التشعيع، ناجم عن نموٍ لا متناحٍ وانتفاخ. ويمكن عند تطبيق كبحٍ كافٍ على الوقود عن طريق تغليفه، إيقاف هذه الظاهرة فقط بفضل قابلية انضغاط الوقود. لا تفلحُ هذه التقييدات عند استعمال هذا الوقود لعناصر من نمط اللوحة.

وبإدخال كميات صغيرة من عناصر الخلط مع اليورانيوم المعدني، يمكن للمرء أن يخمّد طور غاما العالي درجة الحرارة ويستخدم γ-U المكعّب في درجة حرارة الغرفة. فقد أظهر إدخال نسبة من 6-10% وزناً من Mo لإنتاج سبيكة الطور غاما إحداث انتفاخ بسيط وسلوك تشعيعيّ مستقر في تجارب مسح كانت قد نفذت عند درجة حرارة منخفضة. وقد تبين أن أي كمية متبقية من γ-U في الوقود، كانت قد تحولت بفعل التشعيع. كما تمّت ملاحظة بعض التفاعلات بين جسيمات الوقود مع الركازة، ولكن مثل هذه التفاعلات كانت موجودة أيضاً لدى استعمال الوقودين الناجحين UAl_X-Al و U_3Si_2-Al. وعلى هذا النحو، فقد اختيرت سبائك U-Mo من أجل تطوير لاحق لوقود مبدّد من نمط اللوحة لليورانيوم المنخفض التخصيب والعالي الكثافة، مع حمولات تصل إلى 8 g_U/cm^3.

تظهر التجارب الإضافية، عند استطاعات ودرجات حرارة أعلى، أن التفاعل بين جسيمات الوقود U-Mo وركازة الألمنيوم يؤدي إلى استهلاك في الركازة أسرع مما كان متوقعاً في الاستقراء الناجم عن الملاحظات الأولية في التجارب الأولى. ومع ذلك، فإن تشكل هذه الطبقات التفاعلية لا ينتج في تردّي سلوك التشعيع، الذي بقي مستقراً وقابلاً للمقارنة مع أنواع الوقود الموجودة. إن التأثير السلبي الوحيد لتشكل الطبقة هو تناقص تدريجي في الموصلية الحرارية للوقود عند نفاد ركازة الألمنيوم. يحدث ذلك وفق تأثير رجعي، نظراً لأن معدل تشكل التفاعل مرتبط أيضاً بدرجة الحرارة.

حتى ذلك الوقت، أجريت جميع التجارب في الولايات المتحدة على ما يُسمّى لوحات مصغَّرة miniplates، وهي لوحات وقود ذات أبعاد مخفضة بالمقارنة مع لوحات وقود مفاعل حقيقي. تمّت ملاحظة تفاعلات مهمّة وتشكيل بعض المسامات فقط في هذه الطبقات حتى ذلك الحين. وعندما أُجريت الاختبارات من قبل روسيا أيضاً على لوحات كاملة القدّ وعالية الاستطاعة (أنابيب الوقود IVV-2M) وفرنسا (تجربة IRIS-2 في OSIRIS وتجربة المستقبل في مفاعل BR2 البلجيكي)، كشفت عن أن المساميّة المتشكّلة بين طبقة التفاعل U(Mo)-Al وركازة Al تؤدي إلى انتفاخ منفصل عند اشتعال شديد، مما أدى إلى توسّد لوحة الوقود (انظر الشكل 3). يظهر ذلك بوضوح أن تبدّدات جسيمات U(Mo) في ركازة Al نقية لا يمكن استعمالها كوقود في شروط استطاعات عالية دون وجود حلٍّ للخصائص الفقيرة لطور تفاعل U(Mo)-Al، ولاسيما فيما يتعلق باحتباس غازات الانشطار.

وفي موازاة ذلك، كان يمكن العثور على حلٍّ لهذه المفاعلات (مثل HFIR و ATR و FRM-II) التي تتطلب كثافات وقود أعلى (>8 g_U/cm^3). ونظراً لوضوح عدم تلاؤم هذه المفاعلات مع مفهوم الوقود المبدّد، فقد تمّ إدخال الوقود الأحادي القطعة monolithic fuel. وفي هذه الأنواع من الوقود، تستبدل حشوة خليط ركازة الوقود the fuel-matrix mixture meat في الوقود المبدّد برقاقة من مادة وقود نقي، مثل U(Mo) النقي. أثبتت اختبارات المسح الأولية (تشعيع RERTR-4) أن هذا المفهوم واعدٌ، لكن، ونظراً لكون تغليف لوحات الوقود هذه ما يزال متشكلاً من خليطة ألمنيوم، فالتفاعل بين رقاقة الوقود والغلاف أظهر مشاكل طبقة

الشكل 3. فشل صفيحة الوقود المتبدد U(Mo) في تجربة المستقبل

تفاعل مماثلة لمشاكل طبقة الوقود المبدّد. وبالإضافة إلى حلِّ هذه المسألة، ما تزال عمليات تصنيع رقاقات الوقود وإدخالها في كامل حجم لوحات الوقود من المهام غير الواضحة، ويرجع ذلك أساساً إلى الخصائص المعدنية النوعية لـ U(Mo)، مما يجعل من الصعب لفّه دون تمزُّق.

3. الوقود المبدّد

1.3. سبب الإخفاقات

منذ إخفاقات الوقود المبدّد U(Mo)-Al في العام 2004، كُرّس الكثير من الجهد في البحث عن السبب الجذري لهذه الإخفاقات، والأهم من ذلك، العلاج. ومن المقبول عموماً الآن أن خصائص طبقة التفاعل المتشكلة بين حبات الوقود U(Mo) وركازة Al، التي ثبت أنها غير متبلورة، هي على الأقل عاملٌ مهمٌ في الإخفاقات.

إن طبيعة عدم التبلور لطور التفاعل بحدّ ذاتها غير كافية كسبب لدورها في فشل لوحة الوقود، لأنه من المعلوم والثابت أن أنواع وقود ناجحة أيضاً، مثل U_3Si_2 و UAl_x بالذات، تصبح غير متبلورة تحت التشعيع وتكون منتجات تفاعلها مع الركازة هي أيضاً غير متبلورة. في الواقع، إن تركيب منتج تفاعل U(Mo) مع Al قريب من تركيب UAl_x ذاته وبالتالي قد يميل الواحد منا إلى التفكير بوجود Mo كتفسير للسلوك الضعيف.

يمكن وصف الطور غير المتبلور لـ U-Mo-Al، في جوهره، كزجاج معدني. ومن المعروف من الدراسات المنفذة على الزجاج المعدني، أن الحيّز الفارغ في زجاج معدني يتأثر بالتغيرات التركيبية. ونظراً لأن الحيّز الفارغ في المادة غير المتبلورة يؤثر بشكل مباشر في الخصائص الفيزيائية الكيميائية، مثل الانتشارية واللزوجة، وما إلى ذلك، يمكن الافتراض أنه قد يكون هناك اختلاف في الحيّز الفارغ بين مرحلة تفاعل U-Mo-Al وجسيمات الوقود U-Al غير المتبلورة، ويعود هذا الاختلاف إلى وجود Mo.

مع ذلك، وإلى حدٍّ كبير، لا يُظهر الوقود UAl_x تشكُّل فقاعة غاز انشطارية تصل إلى استحراق عالٍ نسبياً في ظروف تشغيل عادية، إذ لا تلاحظ فقاعات داخل مرحلة التفاعل في حالة U(Mo) أيضاً. وعلى وجه الدقة، تتشكّل الفراغات المعتبرة مسؤولةً عن توسيد لوحة الوقود بين طبقة التفاعل والركازة ويمكن اعتبارها ناتجة من انتقال الغاز من حبات U(Mo) عبر طبقة التفاعل. ولما كان قد ثبت أن شبكة من فقاعات نانوية لغاز انشطاري تتشكل في حبات U(Mo) ومع الأخذ بالاعتبار استحالة وجود مثل هذه الشبكة في الطور الزجاجي، يمكن التطلع إلى أن انتقال فقاعات نانوية وتكتلها في الفراغات الملحوظة يمثل تفسيراً مقبولاً.

وإذا نظرنا إلى UAl_x و U_3Si_2 و U(Mo)، فإن الفرق الأساسي بين U(Mo) والوقودين الآخرين يكمن في عملية تبلور جسيمات الوقود، ولما كان تشعيع الأشكال الثلاثة من الوقود في درجة حرارة منخفضة يعيدها جميعها إلى حالة عدم التبلور، بدرجات متفاوتة من الحيّز الفارغ، ونظراً للعثور على جميع طبقات التفاعل في حالة غير متبلورة (تتشكل بصورة لا بلورية في المفاعل)، فإن الطبيعة البلورية لـ U(Mo) تحت التشعيع قد تصبح جزءاً من سبب السلوك الجدلي لهذا النوع. يبدو واضحاً أنه مع وقود غير متبلور مثل UAl_x، تتشكل طبقة تفاعلية غير متبلورة مماثلة جداً، كما في حالة U(Mo)-Al، لا تنتج التأثير نفسه في تشكيل فقاعات على سطوح بينية في حبيبات الركازة، حتى مع وجود غاز انشطار بنسبة كبيرة (وقود HEU). وإن إضافة وقود يحتفظ بتبلوره، وتشكل فيه غازات الانشطار شبكة فقاعات نانوية منتظمة، إلى منتج تفاعل غير متبلور، لا تستطيع فيه هذه الفقاعات البقاء في الشبكة، قد يشكل جوهر الموضوع.

2.3. استعمال إضافة السليكون إلى الركازة Al

استناداً إلى بعض الملاحظات التي تبدّت أثناء تحاليل الوقود وطبقة الإكساء لصفيحتين دقيقتين من ناتج التشعيع في RERTR، حيث لوحظ موضعياً انكماش سمك طبقة التفاعل الذي اعتبر عائداً إلى وجود السليكون في خليط طبقة الإكساء Al6061، تمّ اقتراح إضافة كمية من السليكون إلى الركازة Al لتحسين خصائص طبقة التفاعل. إن استعمال السليكون للحدّ من التفاعل بين U و Al لم يكن اكتشافاً جديداً، لأنه سبق استعماله أيضاً في إنتاج وقود المفاعلين ORNL X-10 و BR1.

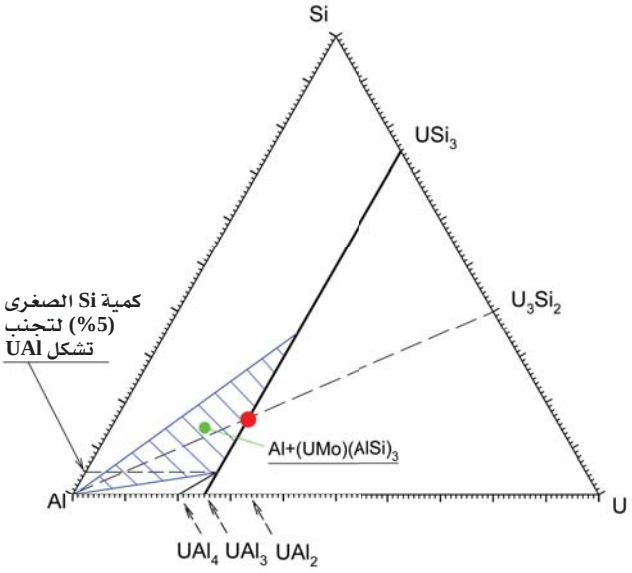
وبالنتيجة، فإن إضافة السليكون إلى ركازة الألمنيوم كان قد طبق لتخفيف مخاطر مشكلة التفاعل في U(Mo)-Al. وحتى الآن، فإن التأثير الإيجابي للسليكون على معدل تشكل طبقة التفاعل وخواصها قد أُثبت بوضوح. كما أن إجراء تجربتين مترافقتين للانتشار قد أدى أيضاً إلى استنتاجات مماثلة. وفي نمط انتشاري للسلوك، فإن ألفة اليورانيوم للسليكون هي التي سمحت للسليكون بإيقاف التفاعل بين اليورانيوم والألمنيوم. ففي داخل المفاعل،

يمكن لروابط السليكون التشاركية أن تخفّض حجم الحيّز الفارغ في مرحلة تفاعل U-Al(Mo) غير المتبلور وذلك بحدّ ذاته يحسّن خصائص الزجاج المعدني.

ومنذ ذلك الوقت، نُفِّذت برامج تشعيع عديدة، بما في ذلك تشعيع كل من اللوحات المنمنمة واللوحات المكتملة القدّ. ففي البداية تمّ اختبار تراكيز متزايدة من السليكون وصلت إلى 2% وزناً، أما مع قليل من اللوحات المنمنمة فقد جرت اختبارات بتراكيز أعلى (4.8% وزناً مع الركازة 4043). وحتى الآن، فقد سمح ذلك فقط بتأكيد الأثر الإيجابي للسليكون وصياغة قوانين حول السلوك، ولكن لم يوفر تأثيراً كبيراً بشكلٍ كافٍ ليسمح بتوصيف ذلك الوقود في ظروف استطاعات كبيرة يتطلبها تشغيل المفاعلات ذات الطاقات العالية.

ويظل السؤال قائماً فيما يخص كمية السليكون المطلوبة لاستقرار سلوك صفائح الوقود في ظروف تشغيل المفاعلات. وعلى الرغم من عدم وجود إجماع محدّد حول الكمية المطلوبة، يمكن تبني احتمال استعمال تركيز يتراوح بين 4 و 6% وزناً. تعتمد هذه التقديرات على كمية السليكون اللازمة لتجنب تشكل مركّبات من نمط UAl_x في التشكيلة الثلاثية U-Al-Si، التي تمتلك حيز فراغ أكبر والتي، استناداً إلى المخطّط الثلاثي (الشكل 4)، لا تتشكل عندما يكون تركيز Si في الطور U-Al-Si أعلى من 5%، مع إهمالنا تأثير Mo في هذه الحالة. يجب أن تكون كمية Si المضافة إلى الركازة محدودة قدر الإمكان، لأن Si هو عنصر غير مرغوب فيه في عملية إعادة معالجة صفائح الوقود. سينفذ الاختيار الرئيس لتأثير التراكيز العالية لـ Si من قبل مجموعة LEONIDAS (وهي تجمع يشترك فيه كل من هيئة الطاقة الذرّية الفرنسية CEA و CERCA الكندية و ILL و SCK•CEN البلجيكي بدعم من وزارة الطاقة الأمريكية) في التشعيع E-FUTURE في المفاعل BR2، الذي صمّم ليوفر تشعيعات لصفائح الوقود ذات القدّ الكامل في حالة الوقود المتبدّد U(Mo)-Al(Si) مع ركازة يتراوح تركيز Si فيها بين 4 و 6% وزناً كما صمّم ليؤدي إلى تشعيع مُؤَهّل في هندسة منحنية.

من ناحية أخرى، عندما يضاف السليكون إلى ركازة الألمنيوم فهو يوجد على شكل ترسبات. ولكي ينتقل Si إلى منطقة السطوح البينية في حبيبات الركازة، يتطلب الأمر تدخل قوى الألفة الكيميائية لـ U-Si والحركية المتولّدة بفعل شلالات انزياح منتج



الشكل 4. مخطط ثلاثي الأبعاد لمنظومة U-SI-Al، يظهر الخلفية المنطقية للتركيز 5% لـ Si اللازم في الطبقة المتفاعلة.

الانشطار. وبشكل فعلي، أظهرت اختبارات عديدة اختفاء ترسبات Si حول حبيبات الوقود في منطقة الارتداد وفي اختبارات خارج المفاعل، تظهر أن الحرارة هي المسؤولة عن الحركية، وقد وجدت المناطق الخالية من الرسابة على هيئة أزواج منتشرة. ومع ذلك، لوحظ وجود ترسبات Si بعد التشعيع داخل منطقة الارتداد حول الحبيبات، وقد وجد أيضاً عدم تجانس ملحوظ في توزع Si داخل طور التفاعل. إضافة لذلك، أظهرت فحوصات أن المناطق التي أبدى فيها Si الفعالية الأهم هي تلك التي يكون فيها Si بحالة تماس مباشر مع حبيبات الوقود U(Mo) عند بدء التشعيع. وغالباً لا تتشكل طبقة تفاعلية في تلك المناطق ويتمّ استهلاك رسابة Si أثناء التفاعل مع الحبيبات.

من الممكن إحداث نقل حراري لجزء من Si الموجود في الركازة إلى سطوح حبيبات الوقود خلال عملية التصنيع، وذلك من أجل إنتاج طبقات غنية بالسليكون بشكل مسبق حول جسيمات الوقود. ولكن، يحتاج ذلك إلى درجات حرارة تتراوح بين 400 و 500°C، وهي منسجمة مع عمليات تصنيع خلائط أغلفة لوحات الوقود Al-Mg-Si (6061)، إلاّ أنها لا تتناغم مع خلائط أغلفة لوحات الوقود Al-Mg، التي هي أخف. يمكن لعملية تصليب تلي التصنيع أن تقدم حلاً، لكنه تبين أن خصائص هذه الطبقات المصنّعة مسبقاً وتراكيبها تتعلق بدرجات الحرارة المستعملة لتوليد هذه الطبقات وكذلك بكمية Si الموجودة في البدء.

علاوة على ذلك، إن استعمال Si في الوقود النووي غير مرحب به عندما يتعلق الأمر بإعادة معالجة الوقود. ومع أن حلولاً تقنية قد تكون موجودة أو يمكن تطويرها، إلا أنها تتطلّب استثمارات إضافية وتكاليف معالجات لكمية بسيطة من وقود مفاعلات الأبحاث الواجب إعادة معالجته. وبالتالي، فإن إيجاد بديل لـ Si قد يكون خياراً مهمّاً، غير أنه من المفضل أن يدخل في الوقود بطريقة مماثلة للطريقة التي طوِّر بها Si لتجنب تكرار العديد من جهود التطوير. وإذا ما تعذر استبدال Si، فينصح على الأقل بتخفيض الكمية المضافة لتحسين قابلية إعادة المعالجة في المحطة.

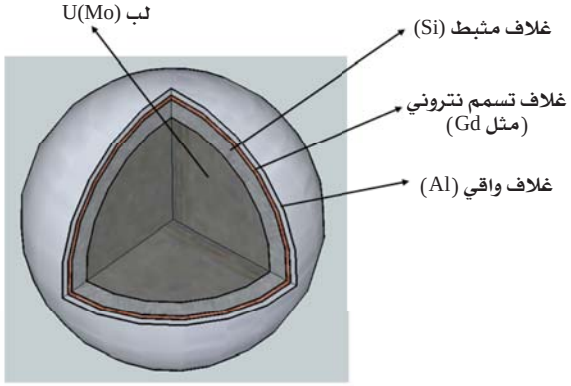
3.3. مشروع SELENIUM: أغلفة Si للوقود U(Mo)

يتمّ حالياً في مشروع SELENIUM وهي الأحرف الأولى من العبارة Surface Engineering of Low ENrIched Uranium Molybdenum fuel التي تعني الهندسة السطحية لوقود يورانيوم موليبدينيوم منخفض التخصيب المنفَّذ في مركز الأبحاث النووي البلجيكي (SCK•CEN)، تطوير حبيبات وقود مغلفة، يطبق فيها Si بشكل مباشر في مكان يستطيع فيه القيام بدوره: أي عند السطح البيني لحبيبات الركازة، أي كطبقة مغلِّفة لحبيبات الوقود. يجنِّب هذا العمل الحاجة لنقل Si إلى هذا المكان، سواء حرارياً خلال التصنيع أم في المفاعل أم عبر مسارات انزياح منتج الانشطار. وهذا ما يسمح بتخفيض كمية Si، لطالما أن الكمية بكاملها ستكون فعّالة وأنه بالإمكان إضافة الكمية القليلة المطلوبة. يسمح استعمال الحبيبات المغلفة أيضاً للمصنع بالحفاظ على مفاهيم مسار التصنيع الحالية جميعها، وذلك لأن الحبيبات هي وحدها التي تُعدَّل وليست اللوحة. أخيراً، إذا كان بالإمكان وضع Si على سطح حبيبات الوقود، فيجب أن تتحقق إمكانية استعمال التقنية نفسها لوضع مواد أخرى أيضاً، مما سيسمح بتبديلات سريعة من كابح inhibitor لآخر دون إحداث تبديلات في عملية تصنيع لوحات الوقود. إن ذلك يتيح إمكانات أخرى، مثل التغليف مع سموم نترونية أو أغلفة وقائية من Al (الشكل 5).

يمكن أن تتمّ عملية التغليف على سطح ما عبر تقنيات عديدة، ويمكن لكلٍّ تقنية مقترحة أن تصلح لتطبيقات عديدة. بعض الطرائق تستعمل تفاعلات بالحالة الصلبة أو الحالة المائعة (معدن أو ملح منصهر) لإنجاز التغليف، لكن معظم عمليات التغليف تتمّ باستعمال البخار أو الحالة الغازية. تقسم تقنيات توضّع البخار عادة إلى صنفين اثنين: توضّع بخاري فيزيائي Physical Vapor Deposition (PVD) وتوضّع بخاري كيميائي Chemical Vapor Deposition (CVD). ففي التقنية الأخيرة، يُعرَّضُ سطح العيّنة إلى ما يُسمّى المُولِّد الطليعي precursor، الذي غالباً ما يكون مركباً عضوياً معدنياً غازياً. وفي حالة ترسيب Si، يستعمل السيلان (SiH_4). يتفكك المُولِّد الطليعي لدى امتزازه على سطح العينة بفعل الحرارة أو بفعل تعرّضه إلى عامل مختلف، مثل بخار الماء. إن أول مرة جُرِّب فيها CVD لتغليف حبيبات U(Mo) كانت من قبل باسكواليني Pasqualini. ومن بين أفضل تقنيات PVD، تُعدُّ الفرقعة طريقة التّوضّع الأكثر شيوعاً، حيث يتمّ فيها قذف دريئة بأيونات الأرغون بوجود خلاء شديد، مما يسبب فرقعة ذرّات الدريئة وانطلاقها خارجاً، ليتمّ بعد ذلك توضّعها على سطح العيّنة.

وبسبب العوائق الحاصلة لدى استعمال CVD من أجل ترسيب Si، وبخاصة الطبيعة الانفجارية للسيلان، الناجمة عن الحاجة إلى التسخين (عادة بين 550 و 650°C، التي تقود إلى الأكسدة واحتمّال تفكك U(Mo) وإطلاق أشعة غاما)، واحتمال هدرجة U(Mo) عند تحرر الهدروجين وصعوبة التوضّع لعدد من المواد بسبب نقص غازات المولد الطليعي أو ارتفاع أسعارها، فقد جرى اختيار توضّع بالرشرشة بالنّبذ الأيوني (المغنطرون) ذي التيار المستمر DC magnetron sputter deposition. توفر هذه الطريقة تكلفة منخفضة ومرونة عالية في تبديل مادة الدريئة وإمكانية الترسيب المشترك وترسيب طبقات عديدة وتجنب تسخين المادة أو الركازة.

أما الصعوبة الإضافية لدى تغليف المساحيق بالمقارنة مع السطوح المستوية فإنها تكمن في الحاجة إلى التحريك المستمر



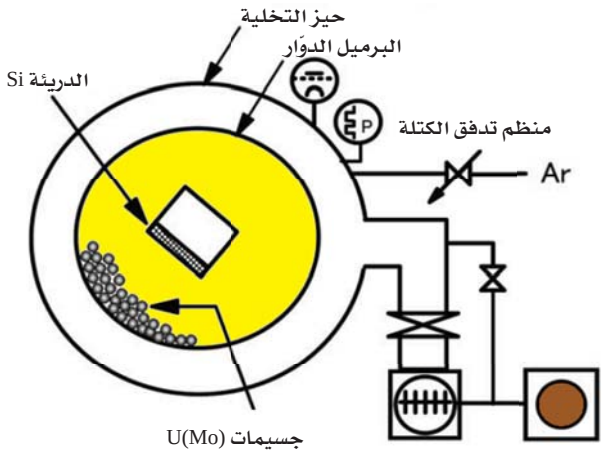
الشكل 5. تمثيل تخطيطي لجسيم الوقود في مشروع SELENIUM. لم يجر تحديد لمقاسات الطبقات، لأن سمك طبقة (المثبط) سيكون 1% فقط من قطر الجسيم.

للمسحوق وذلك كي تحصل الحبيبات جميعها على تغليف متجانس من حيث الثخانة. يمكن الحصول على هذه الميزة باستعمال محور دوّار في غرفة التخلية. تعرف هذه التقنية بـ «برميل الترسيب بالفرقعة» التي تظهر تخطيطياً في الشكل 6.

جرى تصميم هذا النموذج وبناؤه بالتعاون مع جامعة غنت Ghent خلال العام 2009. استكملت وحدة التغليف بالرشرشة في كانون الأول/ديسمبر عام 2009، ونقلت إلى مخابر SCK•CEN في شباط/فبراير عام 2010. يظهر الشكل 7 صورة لهذا الجهاز. لقد خُطّط لكي ينتج هذا الجهاز في نهاية العام 2010 دفعات من حبيبات مغلفة من وقود U(Mo) منخفض التخصيب مع أغلفة مختلفة الخصائص. لم يتمّ حتى الآن اتخاذ القرار القطعي بالخصائص المختارة لأغلفة الحبيبات. ستدخل هذه الحبيبات بأحجام مكتملة ضمن صفائح وقود مستوية ستشعّع في مفاعل BR2 في العام 2011. كما خطّط ليتمّ فحص الصفائح المشعّعة في العام 2012.

4. وقود أحاديّ

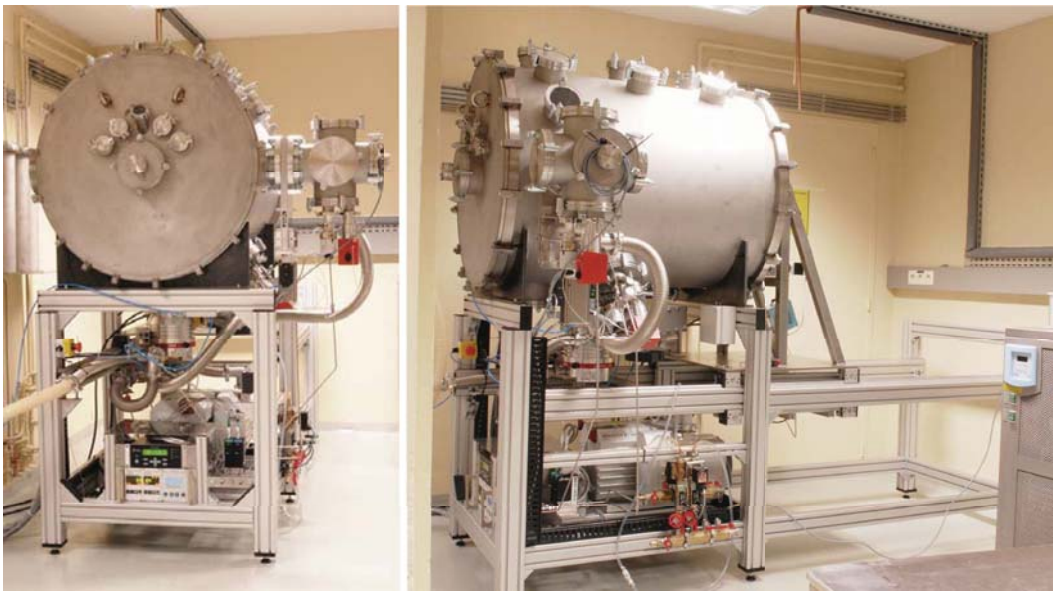
قدمت التشعيعات القديمة للوحات منمنمة أحادية monolithic miniplates (تشعيع RERTR-6) دليلاً على مبدأ لتصميم الوقود، لكن طبقة التفاعل المتشكلة بين وريقات الوقود والغلاف، حتى لو احتوى الغلاف على Si في حالة الغلاف Al6061، لا تزال تحتفظ بتأثير ضار على أداء الوقود وقد يقود إلى انهيار اللوحة. وعلاوة على ذلك، لا يمكن للتصنيع المعتمد على الطّي التقليدي توفير رابطة بين الغلاف ورقاقة الوقود، مما يؤدي إلى ترقّق السطوح



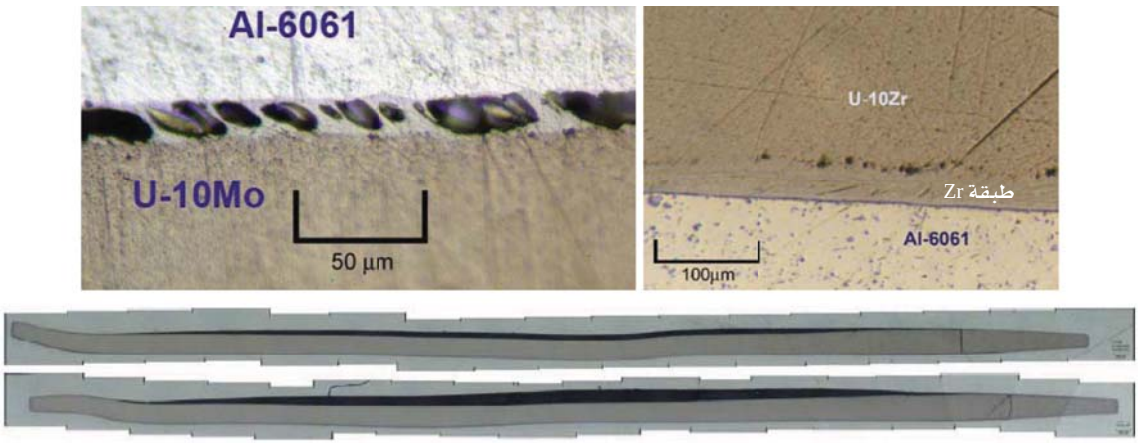
الشكل 6. تمثيل تخطيطي لبناء توضع برميل الفرقعة

بين الوقود والغلاف، وبالتالي كان لابد من تطوير طرائق بديلة. إذ إن تشكل فجوة بين رقاقة الوقود والغلاف يولّد حاجزاً حرارياً وموضعاً لتجمّع غازات الانشطار، مما يسبب تباعداً إضافياً وتقرحاً صفيحياً (انظر الشكل 8 للتعرف على بعض الأمثلة).

ومنذ ذلك الحين، كرّست جهود كثيفة لعملية الإنتاج هدفها تجنب التفاعل بين الغلاف والوقود وتحسين الربط بينهما. قادت جهود تحسين التوافقية بين الوقود والغلاف إلى حدوث انتشار ضئيل لمنتج الانشطار وتشكل حاجز ارتداد بين رقاقة الوقود والغلاف، وفي هذا الصدد تبين أن Zr هو الخيار المناسب (الشكل 8). أنجز ذلك بلفٍّ متزامن لرقاقة من Zr ورقاقات الوقود U(Mo)، وهو ما يؤدي إلى طبقة سُمْكها ~ 25 مكرو متر على



الشكل 7. صور للتركيب المبني في برنامج مشروع SELENIUM.



الشكل 8. صور مجهرية توضح تشكل طبقة التفاعل التي تؤدي إلى إزالة التصفح في السطح البيني في ورقة الوقود والتغليف (الصورة اليسارية العلوية)، دون إظهار طبقة الحاجز Zr (الصورة العلوية اليمينية). تظهر الصورتان السفليتان إزالة التصفح داخل المفاعل العائدة للتصنيع.

سطح U(Mo). وفي جهد تطويري نوعي للوقود من قبل وكالة الطاقة الذرّية الأرجنتينية، CNEA، استبدل غطاء الألمنيوم بخليطة زركونيوم. جُرِّب ربط الغطاء بالوقود بطرائق عديدة، مثل الربط بطور سائل عابر Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) والربط بالاحتكاك Friction Bonding (FB) وبضغط إجهادي حار Hot Isostatic Pressing (HIP) وغير ذلك. وفي نهاية الأمر، تمّ اختيار عملية HIP لتطوير إضافي للوقود، مع أن العمليات الأخرى مستمرة بالتطور. لا يوجد حتى الآن وقود منتج على المستوى نصف الصناعي.

ثمة مفهوم خاص يتعلق بالوقود الأحادي ألا وهو الاستقرار الميكانيكي. ففي حين أن الوقود المبدّد، حيث إن ركازة الألمنيوم هي التي تملي الخصائص الميكانيكية وأنه يمكن بشكل خاص اعتبار اللوحات كلوحات ألمنيوم من وجهة نظر ميكانيكية، نرى أن هذه الحالة غير موجودة في لوحات الوقود الأحادي. إذ إن الإجهاد الذي يطبق على رقاقات الوقود، المتعلق بشكل أساسي بطريقة التصنيع وجزئياً بالاحتراق وبالمظهر الحراري في المفاعل، سيسبب إجهادات ميكانيكية تؤثر على اللوحة بكاملها. ولهذا، فإن قدّ اللوحة ومظهرها، إضافة إلى قوة الربط والتغير البطيء للخصائص تصبح عوامل شديدة الأهمية في السلوك لدى المقارنة مع الوقود المبدّد.

أظهرت النتائج الحديثة للتشعيع أن الوريقات المتشاركة باللّف U10Mo-Zr، المربوطة وفق طريقة HIP إلى الغلاف، تبدي سلوكاً متميزاً تحت التشعيع وتكون عملية التوصيف لتصميم هذا الوقود متطورة أيضاً. ستكون هناك حاجة لتطوير إضافي من أجل إدخال السموم النترونية ومظهر لوحات الوقود وتصنيف لوحات الوقود في بضعة مفاعلات. وحالياً، تمّ بنجاح تشعيع لوحات وقود أحادي بقدّها المكتمل في مفاعل الاختبار المتقدم Advanced Test reactor (ATR) في مختبر إيداهو الوطني.

5. استنتاجات

إن التبنّي العالمي لتحويل الأبحاث الأخيرة ومفاعلات الاختبار المستمرة في العمل حالياً باستعمال اليورانيوم المنخفض التخصيب بدلاً من اليورانيوم العالي التخصيب (^{235}U > 20%) يتطلّب الانتقال من وقود عالي الكثافة إلى وقود كثافته عالية جداً. وللوصول إلى هذه المواصفة، تمّ اختيار خلائط الوقود U-Mo، سواء على شكل رقاقات وقود مبدَّد أم على شكل رقاقات وقود أحادي. وبمقتضى المشاكل الأولية المتعلقة بتفاعل U(Mo)-Al، سواء في الركازة (التبدّد) أم في الغلاف (الأحادي)، فقد حدث الآن تطوير إلى درجة أن توصيف الوقود ما يزال قيد الاهتمام المستمر.

إن إضافة Si إلى ركازة الألمنيوم تمثل وعداً مهمّاً لتصميم الوقود المبدّد وإن دراسات التشعيع تخضع لبرنامج LEONIDAS في مفاعل BR2. يُعقد أمل أكبر على استثمار عملية إضافة Si عبر تقنيات تغليف الحبيبات، الأمر الذي يوفر مميزات عدّة.

يبدو أن استعمال Zr كطبقة فاصلة بين الغلاف ورقاقة الوقود يلطف بنجاح كبير تفاعل تغليف الوقود في حالة الوقود الأحادي. وأظهرت عملية تصنيع الوقود بطريقة HIPing أنها تقود تقنياً إلى لوحات وقود مأمولة، لكن التصنيع في سوية نصف صناعية ما يزال يحتاج إلى إثبات. وستحتاج الخصائص الميكانيكية للوحات الوقود الأحادي إلى تقييم إضافي في المستقبل القريب.

تتطلب مزرعة الطحالب سطحاً واسعاً من المياه لتحويل ضوء الشمس بشكل فعّال إلى زيت يستعمل كوقود حيوي.

وقود حيوي من حُثالة خضراء

تشكل الحثالة الخضراء التي تغطي البرك الضحلة مصنعاً كفوءاً لتحويل ضوء الشمس إلى وقود، إلاّ أن توسيع هذا المصنع على نطاق صناعي سيتطلب إبداعاً.

عندما تتخيل المحاصيل التي ستولّد الوقود الحيوي، ما هي الصورة الأولى التي تخطر ببالك؟ هل هو حقل من الذرة أو قصب السكر؟ ربما بإمكانك تخيّل حثالة بركة بدلاً منهما.

إنها الطحالب التي تشكل مصدراً واعداً للوقود الحيوي، وهي مجرد كائنات حية تغطي بركاً بغطاء أخضر يغلب عليه اللون الأحمر. يقدر الباحثون أن الطحالب يمكن أن تؤدي إلى إنتاج 61000 لتر في الهكتار الواحد، مقارنة مع 200 إلى 450 لتراً لدى استعمال محاصيل مثل الصويا واللفت. ونظراً لارتفاع أسعار النفط، فإن هذا النوع من التوجه يستحوذ على اهتمام الحكومة والصناعة على حدٍّ سواء. ففي العام الماضي، قدمت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة 44 مليون دولار أمريكي لتحضير منتدىً بحثي لتطوير تقانة تحويل الطحالب إلى وقود.

والصناعة أيضاً تدفع بهذا الاتجاه. فقد تسلمت سافير للطاقة Saphire Energy، وهي شركة طاقات متجددة مقرها الرئيسي في سانتييغو بكاليفورنيا، ما مقداره 100 مليون دولار أمريكي من المستثمرين في القطاع الخاص لتطور "خاماً أخضر"، كما تسلمت 104 ملايين دولار من ميزانية التحفيز للعام 2009 في الحكومة الفدرالية. هذا ومنحت شركة النفط إكسو موبيل 300 مليون دولار عبر تصويت ثقة بالطحالب، بالتشارك مع شركة التقانة الحيوية بالاصطناع الوراثي في لاجولاّ بكاليفورنيا. كما ساعدت شركة بوينغ

المصنّعة للطائرات في إنشاء منظمة الكتلة الحيوية الطحلبية Algal Biomass Organization من أجل تشجيع تصنيع وقود نفاث طحلبي algal jet fuel.

إن هذا الاهتمام البحثي الكبير بالطحالب هو عهد جديد لإمكانية إخضاعها. يمكن للكائنات الحية أن تنمو في برك صنعيّة على أرض غير قابلة للزراعة، أي إنها لا تحتاج لمزاحمة محاصيل الأغذية من حيث المساحة، ويمكن زراعتها على سطوح البحيرات أو سطوح ممرات مائية ساحلية، أو في أراضي المياه الراكدة. تتكاثر الطحالب بسرعة كبيرة، وتنتشر فوق سطح المياه خلال ساعات. ويمكن لها أن تنمو بسرعة في أمكنة تشكل فيها حلاً لمشكلة، مثل مشكلة المياه الناتجة من محطات معالجة النفايات ومشكلة معالجة ثنائي أكسيد الكربون المنبعث من مداخن المصانع.

إن معظم الطحالب المستثمرة لإنتاج الوقود الحيوي هي كائنات حيّة وحيدة الخلية تحوّل ثنائي أكسيد الكربون والهدروجين والنتروجين إلى هدروكربونات وليبيدات وبروتينات. كما أن حرمان هذه الكائنات الحية من الغذاء يدفع بآلية التركيب الضوئي للانتقال من زيادة نمو الطحالب إلى تصنيع الليبيدات. وبعد أيام عدة، يُستعمل جهاز الطرد المركزي لفصل الطحالب عن المياه التي نمت فيها. ومن ثمّ سيسمح تحطيم الخلايا باستخلاص زيت بإمكانه التحول إلى وقودٍ معتمدٍ على الهدروكربونات. يمكن تحويل ما تبقى من بروتينات الطحالب والكربوهدرات إلى عقاقير صيدلانية أو استعمالها كغذاء حيواني.

لكن ما هو بسيط في شرحه يمكن أن يكون صعباً في تنفيذه بصورة فعّالة. ولمعرفة ذلك اسأل فقط تقانات الوقود الأخضر Green Fuel Technologies، وهي شركة أُسّست في العام 2001 من قبل باحثين في معهد ماساشوستس للتكنولوجيا Massachusetts In-stitute of Technology (MIT) في كامبردج. أنشأت شركة الوقود الأخضر هذه سلسلة من المحطات الأكبر حتى الآن التي تستعمل الغازات العادمة، كمصدر تغذية للطحالب المنطلقة من محطات الطاقة المنتجة للوقود، ووقعت عقداً قيمته 92 مليون دولار لإنشاء محطات إضافية في أسبانيا. وفي العام 2009 أُغلقت الشركة بسبب نقص التمويلات، بعد إدراكها أن زراعة الطحالب كانت أكثر تكلفة من المتوقع. كما وَجدت دراسة حديثة قام بها معهد العلوم الحيوية للطاقة في جامعة كاليفورنيا في بريكلي، ومولتها شركة النفط BP لإنتاج الوقود الحيوي الطحلبي، أنه ما يزال هناك الكثير من العمل قبل الوصول إلى ربح معركة اقتصادية. وبحسب نيجل كوين Nigel Quinn، المهندس الزراعي في مختبر لاورنس بريكلي الوطني والذي يقود الدراسة، فإن تصنيع الوقود من الطحالب باستعمال التقنية الحالية هو مجرد فَقْدٍ للمال، إلاّ إذا نُفِّذَ بالتزامن مع عملية أخرى، مثل معالجة المياه أو إنتاج مواد ثانوية ثمينة.

وللوصول إلى فترة متميزة، فإن إنتاج الزيت الطحلبي يجب أن يتجاوز عقبات كثيرة. وأولها هي مسألة المساحة: فمن أجل إنجاز التركيب الضوئي، يجب وصول ضوء الشمس إلى الطحالب. فإذا كان سمك طبقة الطحالب أكثر من بضعة سنتمترات، ستقوم الكائنات الحية العلوية بالتعتيم على ما هو تحتها، مما يحجب ضوء الشمس. والبديل هو الانتشار الأفقي، وبصورة واسعة. يقول رونيه ويجفيلز Rene Wijfells وماريا باربوزا Maria Barbosa، وهما تقنيان بيئيان في مركز أبحاث الوقود الحيوي والغذاء بجامعة واشنطن في هولندا: "يجب على الطحالب أن تغطي مساحة قدرها 9.25 مليون هكتار (حوالي مساحة البرتغال) للحصول على ما يكفي من الديزل لسدّ حاجات النقل السنوي الأوربي البالغة 370 بليون لتر".

ويقدر مارك ويغموستا Mark Wigmosta، وهو عالم هيدرولوجي في المختبر الوطني لشمال غربي الأطلسي في واشنطن، أنه، وبصورة عملية، يوجد في الولايات المتحدة حوالي 5.5% فقط من الأرض المناسبة لبرك تنمية الطحالب. وباستعمال التقانة الحالية، يمكن لهذه الأرض أن تنتج 220 بليون لتر من الزيت الطحلبي سنوياً (أي ما يعادل نصف كمية النفط المستورد من قبل الولايات المتحدة للنقل سنوياً). ويضيف ويغموستا أنه إضافة إلى ذلك، ومع طرائق الإنتاج الحالية، يتطلب مثل هذا المشروع الواسع النطاق لزراعة الطحالب ما يقارب ثلاثة أضعاف كمية المياه اللازمة للزراعة في الولايات المتحدة. ولتقييم ما إذا كان بالإمكان تخفيض استعمال المياه، فقد بَحث عن مناطق قادرة على زيادة فعّالية نمو الطحالب المتعلقة بمتوسط السطوع الشمسي والهطول المطري والرطوبة: إنها سواحل الخلجان وجنوب شرق الساحل البحري والبحيرات الكبيرة. لقد وجدت أراض كافية في هذه المناطق لاستبدال 17% من النفط المستورد بوقود حيوي، وذلك باستعمال ما يعادل ربع كمية المياه اللازمة للزراعة فقط (أي ما يقارب كمية المياه نفسها اللازمة لإنتاج الإيتانول الحيوي). اعتمد ويغموستا في هذا التحليل على منظومة تستعمل بركاً مفتوحة عمقها 30 سم ومساحتها 4 هكتارات، زاعماً أنها مزودة بمياه نظيفة. يمكن لأنواع الطحالب التي تنمو على المياه المالحة والمياه العادمة أن تحقق التوازن بشكل أفضل.

ومن الممكن استعمال كمية أقل من المياه من خلال الانتقال من البرك المفتوحة، التي تفقد المياه بفعل التبخر، إلى مفاعلات حيوية

ضوئية مغلقة. ففي مفاعل نموذجي من هذا النوع، ثمة أنابيب زجاجية تسمح بتدوير CO_2 عبر خليط من الطحالب والمياه؛ وتتمثل غاية هذه العملية بتعريض الكائنات الحية كافة إلى ما يكفي من أشعة الشمس. غير أن لمثل هذه المنظومات، الموجودة في الصين، حسبما يقول ويغموستا، مشاكلها الخاصة. فعلى سبيل المثال، ونظراً لامتصاص المفاعلات لأشعة الشمس، فإنها تحتاج للتبريد، مما يتطلب رشها بالمياه بشكل شبه مستمر، وهو ما يمكن أن يلغي الوفورات التي يحدثها تجنب الفَقْد بالتبخر.

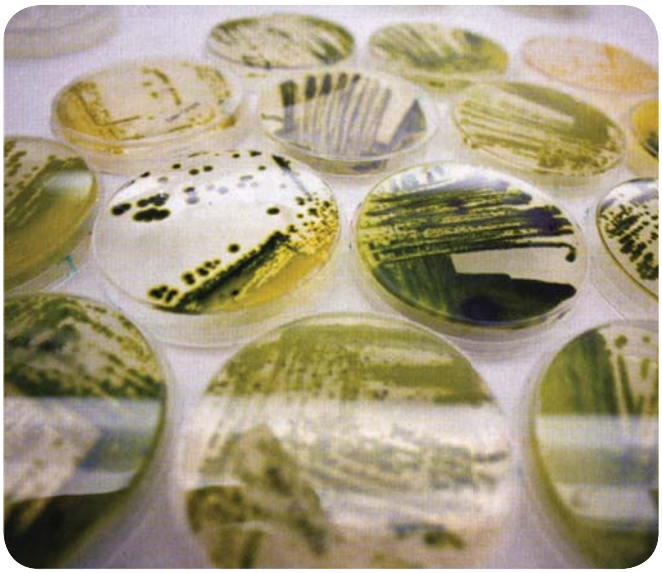
والمُدخَل الآخر الذي تحتاجه الطحالب، إلى جانب المياه، هو CO_2. غير أن خلايا الطحالب لا يمكنها التعامل مع CO_2 الجوي بما يكفي لتعزّز النمو السريع الذي تحتاجه العملية الصناعية. لذا فإن مزارع الطحالب قد تحتاج لتكون قريبة من مصادر CO_2 صنعي، مثل محطات الطاقة المعتمدة على الفحم. ويقول كوين: "إذا لزم نقل CO_2 عبر الأنابيب لمسافة 5 أو 7 كيلومترات فإن تكلفة هذه الأنابيب ستلغي حيوية مسعاكم".

طحالب متقدمة

تحاول شركة زيوت الطاقات المتجددة، سولازيم SOLASYME، تجنب بعض مشاكل تنمية الطحالب عن طريق استبدال الاصطناع الضوئي بالتخمر المستعمل لإنتاج الإيتانول. ويقول رئيس سولازيم ومسؤول مكتب التقانة هاريسون ديلون: "إن الإنتاجية ضعيفة بصورة لا يمكن تصديقها عند تنمية الطحالب وفق عملية اصطناع ضوئي مباشر". إذ تقوم الشركة بعزل الطحالب عن الضوء وتغذيها بالسكر، الذي يمكن اشتقاقه من أي مصدر. ومن ثمّ تحوّل المتعضيات الحيةُ السكرَ إلى زيت. ويتوقع ديلون أنه حتى بغياب الدعم الحكومي ستكون أسعار الوقود الحيوي في هذه الشركة منافسة لأسعار النفط (البنزين). وتقوم شركة سولازيم بتحويل المصانع القديمة لإثبات تقانتها، وقد ارتبطت بعقدٍ تُسلّم بموجبه 570000 لتر من الوقود المشتق من الطحالب إلى وزارة الدفاع الأمريكية هذا العام. وتأمل الشركة ببيع زيت الطحالب في نهاية العام 2013 إلى المصافي التجارية لإنتاج الوقود المعتمد على الهدروكربونات.

كما يرغب جيمس لياو JAMES LIAO، المهندس الكيميائي في مجال الجزيئات الحيوية، بالابتعاد عن الطرائق التقليدية في استعمال الطحالب. والمشكلة الأساسية في الحدّ من التغذية لإجبار المتعضيات على تصنيع الزيت هي زيادة البيع للمنتج الزيتي. فبدلاً من ذلك، أضاف لياو زيادة من المغذيات. وقد نتج عن ذلك انفجار طحلبي صنعي، قاد إلى ضعف في إنتاج الزيت وإنتاج الكثير من البروتين.

وهكذا فقد أصبحت الطحالب خزاناً غذائياً لمتعضيات أخرى، كالجراثيم القولونية ESCHERICHIA COLI، التي تهضم الطحالب وتنتج الكحولات مثل الإيتانول والبوتانول. ويمكن لهذه المنتجات، بالمقابل، أن تدخل في تركيب وقود يعتمد على الهدروكربونات عن طريق استعمال عمليات كيميائية مرجعية. وإحدى ميزات اقتراح لياو هي فعاليته، فيقول لياو: "قد تكون الطريقة الأسرع لتثبيت CO_2". والميزة الأخرى هي أن الاقتراح يتجنب مشكلة أساسية للبرك المفتوحة وغزو متعضيات أخرى لها. قد تعاني السلالات المهندسة وراثياً لإنتاج زيادة من الزيت في منافستها للسلالات الطبيعية التي تدخل إلى المنظومة. والربح في ذلك هو أن عملية التحوّل تنتج الأمونيا كمنتج ثانوي، ويمكن لهذا المصدر النتروجيني أن يستعمل لتخصيب الدورة التالية من النمو.



إنها طحالب في سولازيم محفوظة في الظلام وتتغذى على السكر لإنتاج الزيت.

وثمة مصدر وقود محتمل آخر هو الطحالب الزرقاء المخضرة، التي لا تمثل طحالب على نحو كامل لكنها بكتيريا من نوع البكتيريا السيانيّة. وفي الوقت الذي يجب فيه تخريب خلايا الطحالب للحصول على زيتها، فإن البكتيريا السيانيّة تفرز منتجاتها دون أن تتخرّب. ونتيجة لذلك، فإنه من غير الضروري قتل جيل وتنمية آخر جديد للسماح باستمرار الإنتاج. قام عالم الوراثة، جورج شيرش GEORGE CHURCH، بهندسة البكتيريا السيانيّة لإنتاج جزيئات هدروكربونية وفق أطوال مناسبة للحصول على تنوع في الوقود. ويقول شيرش، الذي أسّس شركة جول غير المحدودة JOULE UNLIMITED في كامبردج في مساشوسيتش لجعل التقانة تجارية: "نحن لم نصنع

زيوتاً، بل صنّعنا شيئاً قريباً من النفط". كما يقول شيرش أيضاً: "إن مرزَ (قرصَ) جينات البكتيريا سوف يجعل المتعضيات في النهاية قابلة لتخزين ثنائي أكسيد الكربون الجوي بشكل فعّال، وهو تطور سيحرر إنتاج الوقود من الحاجة إلى مصدر صنعي لـ CO_2. لقد اختبرت الشركة تقانتها في محطة تجريبية قرب أوستن في تكساس، وتتوقع بدء إنتاج تجاري في العام 2012. كما تؤكد مجموعة جول أن طريقتها ستنتج 140000 لتر في الهكتار الواحد سنوياً.

هناك مجال واسع للتطوير. فالتوقعات الحالية هي أنه يمكن للتركيب الضوئي تحويل ما يقارب 10% من ضوء الشمس الساقط على سطح الأرض إلى طاقة كيميائية؛ إذ يقول ويغموستا أن طحالب الوقت الحالي تحول حوالي 1.1%. يمكن للهندسة الوراثية توليد طحالب قادرة على إنتاج زيت أكثر وتكون أكثر فعّالية في تحويل الطاقة الشمسية إلى كتلة حيوية. ويعمل المهندسون لتحسين تصاميم منظومات النمو، مثل البنى التي تُراكم الطحالب في طبقات للحصول على تعرض أفضل لضوء الشمس، وجني منظومات قادرة على استعمال الأمواج المكروية أو الأمواج الصوتية لاستخلاص الزيت.

ويقول كوين: "يمكن بسهولة أن يستغرق هذا البحث عشر سنوات للحصول على وقود حيوي طحلبي بسوية تجارية مقبولة، لكنه من المؤكد أنه بالإمكان استبدال نسبة مقبولة من النفط الذي نستعمله حالياً". ويقول أيضاً: "لا نعرف بالضرورة المسار المستقبلي تحديداً، لكننا متفائلون".

نُشر هذا الخبر في مجلة Nature,Vol 474, 23 June 2011.
ترجمة د. عادل حرفوش، رئيس هيئة التحرير.

تقنية جديدة لفحص مرض ألزهايمر

يمكن أن تساعد تقنية التصوير في حلّ التساؤلات التي تتعلّق بلويحات الدماغ المرتبطة بالحالة.

إن عامل التصوير الذي يكشف بصمة مرض ألزهايمر في الدماغ –والذي أُعطي دعماً مشروطاً من قبل الاستشاريين لإدارة الأغذية والأدوية الأمريكية (FDA)– يُحتمل أن يكون ذا قيمة كبرى لدى العلماء أكثر منها لدى المرضى.

فالعامل الذي يُدعى فلوربيتابير florbetapir (Amyvid) يمكّن الأطباء من تحديد فيما إذا كان مرض ألزهايمر هو السبب في خَرَف المريض، وربما سيساعدهم، في المستقبل، باكتشاف المرض قبل أن تظهر أعراضه الواضحة؛ وهو الأمل الذي أثار نقاشاً جديداً حول قيمة التشخيص المبكّر لمرضٍ مدمِّرٍ غير قابل للتعامل معه. وإن لجنة الاستشاريين، التي تعطي التوجيه عادة ولكن ليس بشكل دائم، وتتبع إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية (FDA)، صرّحت أيضاً بأن الاختبار يجب ألّا يُعطى موافقة نهائية حتى يبيّن مطوّروه أن الأطباء السريريين يمكن أن يترجموا نتائجه بشكل موحّد.

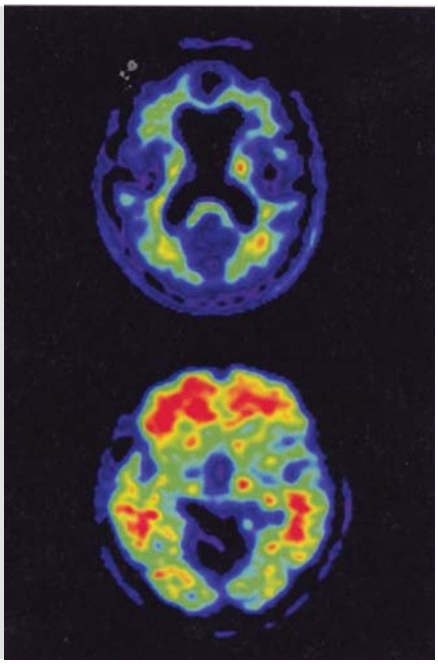
«يُحتمل أن تكون أهمية القرار أكبر بالنسبة للبحث العلمي في المستقبل القريب منها إلى الممارسة السريرية»؛ هذا ما يقوله وليام ثيز W. Thies، الموظف الطبي والعلمي الرئيس لجمعية مرضى ألزهايمر التي مقرها في شيكاغو، إلينوي؛ وهي منظمة غير ربحية تموّل أبحاث مرض ألزهايمر.

يُشخّص الأطباء مرض ألزهايمر فقط بعد تعارض فقدان الذاكرة مع الأنشطة اليومية. ويقول جيل رابينوفيتشي G. Rabinovici، طبيب الأعصاب في جامعة كاليفورنيا، سان فرنسيسكو: «هنالك ضررٌ كبيرٌ جداً لا يمكن التغلّب عليه، ومن المحتمل أن الأمل في المعالجة الفعّالة أصبح بعيد المنال». ويأتي التأكيد الحازم لذلك من خلال تشريح الجثّة، مع وجود إصابات مميزة في الدماغ سبّبتها مجموعات من نشواني الببتيد β–peptide amyloid. ويُفترض أن تكون هذه اللويحات النشوانية هي السبب في فقدان الذاكرة.

هذا، ويستخدم بعض الباحثين كاشفاً يُدعى مركّب بيتسبرغ B Pittsburgh Compound B لتصوير اللويحات النشوانية عند الأشخاص الذين يُشتبه بإصابتهم بمرض ألزهايمر. يرتبط المركّب باللويحات، ويمكن أن يُكتشف نشاطه الإشعاعي باستخدام تصوير طبقي بالإصدار البوزتروني. لكن الكاشف موسومٌ بالكربون–11: بعمر نصف يبلغ 20 دقيقة فقط، فإن استخداماته تقتصر على حفنة من المنشآت التي لديها سيكلوترون في الموقع لتهيئه الكاشف.

وعلى النقيض من ذلك، فإن مركّب الفلوربيتابير موسومٌ بالفلور–18، الذي يمتلك عمر نصف يبلغ ساعتين تقريباً، وهو ما سيكون كافياً إلى حدٍّ بعيد للسماح لمصنّع المركّب، وهي شركة إلي ليلّي E. Lilly التي مقرّها في إنديانابوليس، في ولاية إنديانا، بإرسال الفلوربيتابير مباشرة إلى مستعمليه بدون فقدان الكاشف الكثير من المادة المتفكّكة إشعاعيّاً. والنتيجة المحتملة، كما يقول ثيز، هي المزيد من الدراسات الأكبر والأوسع حول العلاقة بين المركّب النشواني amyloid والمرض.

وإن الدراسة التي نُشرت في شهر كانون الثاني/يناير من هذا العام كانت حاسمة بالنسبة لقرار اللجنة الاستشارية؛ إذ إنها أثبتت أن مسح دماغ المرضى الأحياء الذين أُعطوا الفلوربيتابير يرتبط باللويحات النشوانية التي وجدت عند تشريح جثة المرضى بعد وفاتهم. وإن مبادرة التصوير العصبي لمرضى ألزهايمر Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative، وهو مشروع لتحسين التجارب السريرية للعلاج المرشّح لمرض ألزهايمر، تضمّنت بالأساس مركّب الفلوربيتابير في دراساتها التي أُجريت على مئات



يكشف الفلوربيتابير نمو اللويحات النشوانية (اللون الأحمر) في دماغ بعض مرضى ألزهايمر (في الأسفل)، والتي تختفي في دماغ معافى (سليم) (في الأعلى).

الناس الذين يُشتبه أن لديهم هذه الحالة. ويأمل رابينوفيتشي أن يختبر ما إذا كان الكاشف يمكنه أن يميّز بين مرض ألزهايمر ومرض الخرف الجبهي الصدغي frontotemporal dementia، الذي يسبّب العديد من الأعراض نفسها والتي غالباً لا يمكن تشخيصها.

ويمكن أن يساعد مركّب الفلوربيتابير في حلّ إحدى الخلافات الأساسية التي تتعلّق بمرض ألزهايمر، والتي تتمثّل في تحديد ما إذا كانت اللويحات النشوانية تقتل نسيج الدماغ، أو أن لها تأثيراً جانبياً للإصابة بالمرض. «يخبرني النقّاد دائماً: حسناً، نحن لا نعرف حتى الآن ما إذا كانت الفرضية النشوانية صحيحة»، هذا ما يقوله وليام جاغوست W. Jagust، طبيب الأعصاب في جامعة كاليفورنيا، بيركلي، ويضيف: «لكن هذا المركّب سيسمح لنا في النهاية باختبار مدى أهمية المادة النشوانية».

نُشر هذا الخبر في مجلة Nature, Vol 469, 27 January 2011.
ترجمة حسان بقلة، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

علماء الاندماج في المستقبل

في المواضيع المتعددة الاختصاصات مثل طاقة الاندماج ، يُعدّ تدريب طلاب درجة الدكتوراه (PhD) مهمة معقدة . ويصف ليون مارك إيفانز Llion Marc Evans كيف أن مشاركته في شبكة تدريب طلاب دكتوراه الاندماج قد ساعدته بأن يتقدم ليصبح باحثاً .

فريق العمل لدى ليون مارك إيفانز يبين أن شبكة تدريب للحصول على دكتوراه في الاندماج هي أكثر من مجرد الحصول على درجة الدكتوراه.

كثيراً ما يجادل نقاد تعليم الفيزياء في المملكة المتحدة بأن مناهج الدكتوراه في العديد من الجامعات هي على حدٍّ سواء مختصرة جداً وضيقة جداً في التركيز. في السنوات الأخيرة، قام مجلس البحوث لعلوم الفيزياء والهندسة (EPSRC) بالرد على مثل هذه الانتقادات وذلك بإنشاء مراكز تدريبية لحملة الدكتوراه (DTCs) في حقول عديدة مختلفة، بدءاً من علوم بحوث الطاقة وانتهاءً بعلوم الحياة في الجامعات الموزعة في كافة أنحاء البلاد. إذ إن هذه الجامعات مخصصة ومصممة لتخريج طلاب من حملة الدكتوراه الذين تمّ تجهيزهم تجهيزاً ممتازاً لإنجاز أبحاثهم الخاصة في مهنهم اللاحقة، وذلك بإضافة فترة الدراسة الأولية للتدريب الأساسي على أبحاث درجة الدكتوراه التقليدية التي تبلغ مدتها ثلاث سنوات، وأيضاً جُمِّع الباحثين حول موضوع مهم أو منطقة جغرافية لإحداث مراكز إقليمية ممتازة تجمع النخبة.

إن أحد هذه المخططات هو شبكة تدريب دكتوراه الاندماج (FDTN). ويهدف هذا التعاون بين كلٍّ من جامعات دورهام وليفربول ومانشستر ويورك إلى جمع الطلاب من مختلف المجالات المتعلقة بالاندماج والتي تتضمن الفيزياء، والهندسة وعلم المواد، لإعطائهم صورة أفضل عن الموضوع بشكل كامل، ولمساعدتهم كي يعملوا من أجل هدف مشترك. وكجزء من المخطط، يقضي الطلاب فترة ستة أشهر في جامعة يورك ويأخذون محاضرات في مواضيع عديدة مثل فيزياء البلازما وتقانة الاندماج، وتعلم المهارات كبرمجة الحاسوب والطرق الإحصائية. ويتبع هذا المخطط برنامج بحث للدكتوراه إذ يستمر لثلاث سنوات في الجامعات الرئيسة للطلاب، أو في شركاء الشبكة الصناعية التي تتضمن مختبر راذرفورد أبليتون ومركز كالهام لطاقة الاندماج في أوكسفوردشاير.

تُعدُّ شبكة التدريب للحصول على الدكتوراه في الاندماج (FDTN) مبادرةً جديدةً، إذ اشترك ثمانية طلاب في أول فصل دراسي في تشرين الأول/أكتوبر عام 2009، لذا فإنه من المبكر

جداً أن نقيّم نجاحها. ومع ذلك، فإن تجربتي لكوني أحد أولئك الطلاب قد جعلتني أعتقد أن هذا المجال ذو قيمة كبيرة مقارنة بمجالات وحقول بحث أخرى. إن ذلك يحدث بالفعل إلى حدٍّ ما، ففي عام 2009 موّل مجلس البحوث لعلوم الفيزياء والهندسة (EPSRC) 50 مركزاً تدريبياً جديداً للحصول على الدكتوراه (DTCs) في المملكة المتحدة.

من الفورميولا (1)، سباق السيارات ذات المقعد الواحد، إلى الاندماج

إن خلفيتي الثقافية هي مثال جيد عن المكونات المختلفة التي تشكل علم الاندماج. بعد حصولي على الشهادة الجامعية في الفيزياء من جامعة ويلز–أبيريستويث، بدأت بتحضير رسالة الماجستير (MSc) حول علم تحريك الموائع الحسابي في الكلية الإمبراطورية في لندن. اقتضت أطروحة رسالة الماجستير مني العمل مع باحثين في قسم الفورميولا 1 في فيراري، والذين كانوا مهتمين بنمذجة النقل الحراري في أقراص الكبح (الفرامل). وبعد أن أنهيت رسالة الماجستير أجريت مقابلات تمهيدية في مقر الفيراري في مارانيلو–إيطاليا، ويبدو أنها كانت بداية الطريق نحو حصولي على عمل في سباقات الفورميولا 1.

في ذلك الوقت، ازداد التركيز الإعلامي على انبعاثات الكربون في العالم وظهور أزمة الطاقة. وكنت متحمساً جداً لإيجاد حلول لهذه المشاكل البيئية، فبدأت أفكر بخيارات مهنتي المستقبلية، ووجدت نفسي أنتقل من الفورميولا 1 إلى تحصيل دكتوراه في طاقة الاندماج.

وبعد عقود من البحث، توطدت النظرية الأساسية للاندماج توطُّداً جيداً. تتمثل تأكيدات البحث الحالي بالتركيز على التطبيقات العملية لتصميم محطة طاقة قادرة على توزيع الطاقة الفعالة تجارياً وبطريقة آمنة وملائمة للبيئة. وبعد حصولي على البكالوريوس في الفيزياء والماجستير في الهندسة، شعرت أن هذا المجال سيتيح لي دمج المعرفة النظرية عن كيفية حدوث الأشياء مع طرق الوصول لحل المشاكل العملية في الهندسة.

إن المشروع الذي أعمل عليه في الوقت الحالي في جامعة مانشستر يستخدم تقنية تسمى النمذجة القائمة على الصورة الأساسية لتتنبأ كيف سيكون سلوك المكونات في محيط محطة قدرة نووية تعمل بالاندماج. بدأنا بأخذ مسح طبقي محوري محوسب (CT) لعينة من أحد العناصر. هذه العملية جعلتنا نبني نموذجاً محوسباً يضم شقوقاً، وثقوباً ومظاهر أخرى موجودة في العينة تم إدخالها في عملية التصنيع والتي لا يمكن إدخالها في النماذج التي تستخدم الهندسة المثالية. إن ذلك يؤدي إلى نتائج أكثر دقة في محاكاة سلوك المادة. إضافةً إلى ذلك، وبسبب إمكانية إجراء اختبارات باستخدام عينات متماثلة، فإن هذه المقارنات المباشرة يمكن أن تجرى بين النتائج التجريبية والحسابية.

مناهج الدراسة

بالطبع، لم يكن جميع أفراد مجموعة 2009 لطلاب FDTN في يورك مهتمين بهذا النوع من مشاريع البحث. وإن التحدي الأكبر لأولئك الذين يصمّمون المقررات التعليمية يكمن في تغطية المواضيع المناسبة لكل شخص، علماً أن اهتماماتنا البحثية متنوعة، كاهتمامنا بفيزياء البلازما، وعلم المواد، والنترونيات، والهندسة الإلكترونية وعلم التشخيص. كذلك كان يجب على مصمّمي المقررات التعليمية التوثُّق من أن هذه المقررات تتضمن موادّ ذات علاقة بالاندماج المحصور مغنطيسياً وداخلياً والذي يستخدم حقولاً مغنطيسية قوية وليزرات قوية على التوالي لإيجاد الشروط الضرورية للاندماج.

هذا ويهتم معظم الباحثين في مجموعة الاندماج في جامعة يورك بفيزياء البلازما. أما المواضيع الأخرى، مثل الحساب العالي الأداء، فقد تمت تغطيتها بجلب محاضرين من خارج مجموعات أبحاث البلازما. كذلك دعا البرنامج ضيوفاً محاضرين للفصول التي تستمر أسبوعاً واحداً مثل «تقانة الاندماج» ومؤتمر «حدود الاندماج». إن عدد الطلاب الذين تم قبولهم هذه السنة سيستفيدون من فصل مماثل حول المواد المستخدمة في عملية الاندماج ونحن نرحب بحضورهم أيضاً.

وبالنسبة لي، بدأت فوائد هذه الفترة التدريبية مباشرة. فخلال الأسبوع الأول من بحثي، كان لابدّ أن أقدم في مؤتمر حول التقانة النووية محاضرة حول صناعة طاقة الاندماج وخطط بحثي الشخصي. وبفضل التعليم الواسع الذي تلقيته، فلقد شعرت بارتياح في الإجابة على تساؤلات تجاوزت موضوع بحثي الخاص. ولن أحصل على هذا الشيء من برنامج الدكتوراه التقليدي، إذ إنه لا يتضمن تلك الفترة التدريبية التي مررت بها كجزء من FDTN.

وثمة تأثير إيجابي آخر يتمثل بالإحساس بالانتماء للمجتمع الذي أحدثه البرنامج بين طلبة درجة الدكتوراه من مختلف الفروع والجامعات. بينما كنا نطور مهننا في قطاع اندماج الطاقة، اعتقدت أنا وزملائي السابقين أننا سوف نستفيد من هذه الشبكة العامة وبطريقة ستساعدنا على رؤية الصورة بوضوح. ربما لم يحن الوقت لتفعيل هذه السمة بشكل كبير بعد مرور سنة واحدة فقط. لكن حتى الآن، رغم انتشاره على مواقع عديدة مختلفة، فإننا مازلنا نحن الثمانية على تواصل منتظم في مجال البحث، ممثلين لطاقة الاندماج في المؤتمرات والبرامج المنتشرة في الجامعات.

ومع زيادة عدد طلاب FDTN، تزداد المجموعة. ففي أكتوبر/تشرين الأول بدأ عشرة طلاب جدد دورتهم الدراسية في يورك. وأثناء أسبوعهم الأول قمنا بالانضمام إليهم في «يوم تعزيز الفريق». وكان هذا الحدث الأول بين أنشطة عديدة تم التخطيط لها للسنة القادمة والتي ستساعدنا جميعنا على إنهاء العمل في هذا المجال.

هذا، وتنشأ الميزة الأخيرة لـ FDTN من روابط المشروع الوثيقة بالشركاء الصناعيين. وهذه الروابط تمنحنا عملية لا مثيل لها من الخبرة والمعرفة من أولئك الذين يعملون في الصناعة. بالإضافة إلى ذلك، سيستفيد الطلاب، مثلي، الذين يريدون مواصلة مهنهم في ذلك الاتجاه، من التجربة المباشرة من بيئة العمل في المنشآت كما هو الحال في CCFE.

وبالنتيجة، فقد تم تصميم هذا البرنامج التدريبي ليس لتخريج طلاب الدراسات العليا فحسب، بل أيضاً لتطوير باحثي المستقبل في مجال صناعة طاقة الاندماج. وبوجود توكاماك tokamak، أكبر جهاز اندماج حراري في العالم وهو مفاعل تجريبي نووي حراري دولي (ITER)، وهو حالياً قيد الإنشاء في جنوب فرنسا، (بالإضافة إلى الليزر الأكبر في العالم في منشأة القدح الوطنية والذي يؤدي تجارب ما قبل الاندماج في شمال كاليفورنيا)، فإن هذا النمط من الاستثمار سيكون حاسماً للمستقبل في هذا المجال. وإن تمويل مثل هذه المنشآت يعد شيئاً رائعاً، ولكن بدون وجود عمال مهرة لتشغيلها، فإن أبحاث طاقة الاندماج سوف تتوقف.

نُشر هذا الخبر في مجلة PhysicsWorld, Vol 24, January 2011.
ترجمة نسرين شحادة، هيئة الطاقة الذرّية السورية.

المصادم البشري الكبير

لقد انهمك علماء اجتماع في سِرْن CERN في دراسة أكبر تعاون بحثي في العالم. يكتب زيبا ميرالي Z. Merali عن مشروع فيزيائي شارك فيه 10000 شخص.

«أنا هنا كي أراقبكم» بهذا بدأت عالمة الإنسانيات أربيتا روي Arpita Roy حديثها وهي تقدم نفسها في عام 2007 إلى حشد كبير من فيزيائيي الجسيمات. في ذلك الوقت، كان هؤلاء العلماء يسابقون الزمن لإتمام العمل على أكبر جهاز في العالم، ألا وهو المصادم

الهدروني الكبير (LHC) في سِرْن (CERN)، المختبر الأوربي لفيزياء الطاقة العالية بالقرب من جنيف، بسويسرا.

يحمل LHC آمال أجيال من الفيزيائيين، الذين صمّموه كي يصل إلى طاقات لم يسبق لمصادم سابق أن وصل إليها، ولربما ينتج جسيمات متنوعة جديدة على العلم. لكن المصادم الهدروني الكبير هو أيضاً تجربة إنسانية ضخمة، تجمع عدداً كبيراً من العلماء لم يسبق له مثيل. لذا فقد قام في السنوات القليلة الماضية علماء اجتماع وعلماء إنسانيات ومؤرخون بزيارة سرن ليروا فقط كيف يتعارض هذا الحشد المكتظ من الفيزيائيين، ويتراجعون وأحياناً يسفّه بعضهم آراء بعض.

«يسمح LHC بدراسة اجتماعية فريدة عن الكيفية التي تتطور بها تجربة ما في الزمن الحقيقي: الكيفية التي تتشكل فيها الآراء عند العلماء، ويتخذون قرارات تقنية وينشرون المعرفة في مشروع كبير كهذا المشروع»، هذا ما تقوله أريانا بوريللي Arianna Borrelli، وهي فيزيائية جسيمات وفيلسوفة في الفيزياء في جامعة ووبِرتال في ألمانيا.

إن سيرجيو بيرتولوتشي Sergio Bertolucci، مدير الأبحاث في سِرْن، على علم بأهمية التعاون المتماسك. ويقول بهذا الصدد: «هذه تجربة اجتماعية لا تصدّق»، مع ملاحظة أن ما يقارب 10000 فيزيائي من كل أنحاء العالم يشاركون في تجارب LHC، وأن 2250 منهم موظفون في سرْن. وهو بذلك يظهر فقط حجم التعاون الذي يشارك في إدارته والذي يُسبّب الصداع والمشاكل لبيرتولوتشي. وفي ذلك يقول: «تصور التنظيم اللازم عندما يريد 3000 شخص أن يعلموا مقدماً ما إذا كان بإمكانهم أن يذهبوا إلى بلدانهم في أعياد الميلاد».

«إنها فقاعة معرفية حيث لا يمكنك الهروب- أي لا تريد أن تهرب.»

لقد تحمل المدراء في سرْن سلسلة من المشاكل منذ أقلع LHC في أيلول/سبتمبر عام 2008. وبعد أسبوع وبضعة أيام من وضع المصادم على الإنترنت سبب ربط كهربائي خاطئ انفجاراً أدى إلى توقف المشروع 14 شهراً. لقد أحبطت تلك النكسة الروح المعنوية لدى العلماء في سِرْن، وبخاصة الطلاب الخريجين، الذين كانوا قلقين حول مصير شهاداتهم، كما تقول روي، طالبة الدراسات العليا نفسها، من جامعة كاليفورنيا، بركلي. لقد كانت روي، تقيم في مخيم في سرْن على نحو متقطع لمدة ثلاث سنوات لمراقبة «اللغة، والمحرمات والطقوس في هذا المجتمع الغريب».

استأنف المصادم عمله في تشرين الثاني/نوفمبر عام 2009 وينبغي أن يجمع معطيات سنتين قبل إيقافه في سنة واحدة من أجل التحسينات المقررة في عام 2012. وفي الشهر التالي يُتوقع من المصادم الهدروني الضخم أن يسجل رقماً في الطاقة يبلغ 7 تيرا إلكترون فولط. سيبلغ المصادم هذا الحدّ عن طريق تسريع حزمتين من البروتونات إلى سرعة تقارب سرعة الضوء ثم يرسلهما بعدئذ في اتجاهين متعاكسين في مسار تحت الأرض طوله 27 كيلو متراً تقريباً. تتقاطع الحزمتان في أربع بقع على طول الحلقة، وهنا يحدث العلم الحقيقي، داخل مكاشيف عملاقة تحيط بكل منطقة تصادم. إن تجربة جهاز LHC الحلقي (ATLAS) وتجربة الوشيعة الميونية المتراصة (CMS)، هما في حجم المباني السكنية وتفتخر كلٌّ منهما بفريق مكوَّن من نحو 3000 شخص.

الانفجار السكاني

إن كل جيل من المصادِمات جلب معه قفزة في حجم التعاون (انظر الصورة)، وهو أسلوب يؤمن فرصاً كافية للباحثين المهتمين بالتأثرات الإنسانية. تُعدّ كارين كنور سيتينا Karin Knorr Cetina، وهي عالمة اجتماع بجامعة كونستانس في ألمانيا، واحدة من علماء الاجتماع القلائل الذين شهدوا هذا النمو مباشرة على مدى أجيال عدة. لقد كانت تدرس التعاون في سِرْن لمدة تقارب ثلاثين عاماً.

عندما وصلت كنور سيتينا للمرة الأولى، كان الفيزيائيون هناك يعملون على مصادم أصغر وكانت أفرقة المكشاف أقل من تُسْع العدد الموجود حالياً. وفي هذا الصدد تقول: «في تلك الأيام كان مئة شخص يُعدُّ عدداً كبيراً». تقول كنور سيتينا إنها قوبلت بذهول ودي من قبل فيزيائيي الجسيمات، الذين كانوا مفيدين، لكنهم كانوا يظنون عالم الاجتماع «كأنه ابن عم فقير للعلماء الحقيقيين».

ويستمر اليوم هذا السلوك، تقول روي. وتتابع قولها: «ماذا يمكن أن تقول؟ الفيزيائيون مُزدرون مهنياً».

يقول علماء الاجتماع أنهم يكسبون ثقة الفيزيائيين في سِرْن بغمر أنفسهم في الثقافة، تماماً كما يتمنون مع أي مجتمع آخر. استعملت كنور سيتينا هذه الطريقة لكشف سياسة حفظ السلام بين آلاف العلماء في المختبر.

وتقول كنور سيتينا، عندما بدأت للوهلة الأولى، «كنت أتوقع المنوال نفسه من الأوامر التي نعلمها نحن عن المنظمات الأخرى المعقدة– الصناعة أو الحكومة». لكنها لم تجد في سرْن تلك الهرمية في السلطة. وبالرغم من وجود ناطقين رسميين يشغلون مناصب إدارية في التعاون، فلا توجد فوقية وتحتية في اتخاذ القرار لأنه

مثل تجمع ضخم، أعضاء من تعاون أطلس يعملون ويأكلون ويحتفلون معاً.

يوجد العديد من الأفرقة ذات التخصّصات العالية التي تعمل على أجزاء مختلفة من المكشاف. وتعلق كنور سيتينا عن العمل في سرْن قائلة: «إن النموذج الصناعي لا يمكنه العمل. فشخص واحد لا يستطيع أن يتخذ قرارات تقنية على نطاق واسع كهذا».

تنشأ البنية اللاتقليدية لـ سرْن في جزء منها من تاريخه وفلسفته. أنشئ المختبر على الحدود السويسرية الفرنسية في عام 1954 ليوحد أوربا التي مزقتها الحرب. «إنه مكان للتعاون العالمي، حيث يوجد العلم بعيداً عن السياسة القومية»، كما يقول بيرتولوتشي. أما في المختبر، فإن المثالية تسري في التوترات على إجراء أبحاث فعلية. «فالمفارقة هي أن العلم ليس ديمقراطياً؛ فنحن لا نقرر من هو المحق بالتصويت أو بقرار الأغلبية».

إذا لم يكن العلم صناعة أو ديمقراطية، فما هي بنيته؟ تقول كنور سيتينا أن سرْن يعمل كتجمع (مجموعة من العلماء تتبادل الأفكار بصورة ودية)، فيه ترك علماء الجسيمات أوطانهم بسرور وتخلوا عن فرديتهم ليعملوا من أجل كلٍّ أكبر. إن ما يشجعهم على نمط الحياة التي يحيونها هناك هو حقيقة أن المختبر يقف على أرضه الدولية الخاصة. «حتى الشرطة السويسرية لا تستطيع أن تأتي إلى هنا وتقبض علينا»، يقول بيرتولوتشي. فله مطاعمه الخاصة، وله مركز بريد ومصرف وتسهيلات أخرى خاصة به. تقول كنور سيتينا: «يمكنك أن تعيش في سرْن إلى الأبد، دون الحاجة مطلقاً إلى زيارة جنيف القريبة. إنه فقاعة معرفية لا يمكن الهروب منها –أي لا تريد الهروب منها».

ويقول بيرتولوتشي إن هذا الانغماس أساسي بالنسبة لنجاح سرْن كمؤسسة عالمية. ويقول كيفن بلاك Kevin Black، وهو من العاملين بعد الدكتوراه مع تعاون ATLAS: «الناس القادمون إلى هنا من كلّ أنحاء العالم لا يشعرون كما لو أنهم يزورون بلد شخص آخر، إنهم يشعرون أنهم يأتون إلى بلدهم. ويبدو المختبر بالفعل كمكان تجمع أناس كثيرين قادمين من كل أرجاء العالم للعمل من أجل هدف مشترك».

التضحية بالهوية

الجو ودّي حول حرم سِرْن، والمطعمان التابعان له يعيشان على شهرتهما بتقديم أفضل طعام في أي مطعم للفيزيائيين في العالم. ولكن الأمر يحتاج إلى أكثر من الراحة والوعد باكتشاف جسيمات جديدة لإقناع الآلاف من الفيزيائيين بالانضمام إلى التجمع. تشير كنور سيتينا إلى الهيكل التنظيمي للتعاون بوصفه عاملاً يؤدي إلى تضحية الفيزيائيين بهويتهم للمصادم LHC.

وباعتبارها نافذة في البناء، فهي تصف التطور في التعاون التجريبي الأضخم للمصادم LHC، وهو فريق أطلس ATLAS، الذي كانت قد درسته منذ تشكله في أواخر ثمانينيات القرن الماضي من بقايا المجموعات الأقدم في سرْن. ستبحث مجموعة أطلس، من بين أشياء أخرى، عن جسيم هيغز المراوغ، المفروض فيه أن يعطي جسيمات أولية أخرى كتلتَها.

وخلال «مرحلة الولادة» لتعاون أطلس، كان على إدارة المصادم LHC أن تختار بين مقترحات متنوعة لتصاميم المكشاف التي قدمتها مجموعات متنافسة من جامعات ومعاهد مختلفة. قد يبدو أن أكثر الاستراتيجيات وضوحاً وأكثرها فعالية ستكون لجنة من الخبراء لتتخذ قراراً حول التقانة التي ستستخدم. لكن مجموعة أطلس لم تسلك هذا السلوك، كما تقول كنور سيتينا. وبدلاً من ذلك، كانت مرحلة الولادة عملية شاقة، ففيها كانت تعاد التصاميم مراراً وتكراراً إلى المجموعات المتنافسة كي تعيد اختبار تصاميمها، حتى تتفق جميعها على خطة واحدة. وبهذه الطريقة تجنبوا استعداء مجموعات وتجنبوا فقدان اليد العاملة اللازمة لبناء الكاشف. تقول كنور سيتينا: « إنها استراتيجية مثيرة للاهتمام أن تحصل على قبول مجموعات تخسر، ومع ذلك تبقى ملتزمة بالتعاون».

مما لاشك فيه أن العملية المطوّلة أخرت البناء. ويسخر الفيزيائيون في المختبر ويهزؤون لأنه لا تزال توجد ملصقات في سِرْن تعلن أن افتتاح المصادم LHC قادم في عام 2000 –وهو تاريخ الموعد النهائي والذي تأخر ما يقارب عقداً من الزمن. لقد سببت هذه التأخيرات بلا شك إحباطاً لدى الفيزيائيين ولكنها، في بعض الحالات على الأقل، كانت التكلفة اللازمة للحفاظ على التعاون معاً، وهو ما تقوله كنور سيتينا.

يشير ألبرت دو روك Albert de Roeck، وهو نائب الناطق بلسان تجربة CMS، إلى أسباب عملية أخرى وراء الاستراتيجية. يقول روك: «يُعدُّ الأشخاص الناطقون باسم التجربة بمثابة رؤساء التجربة والمتحكمين فيها، ولكن ليس لدينا بالفعل وسائل لفرض قرارات استبدادية». ويقول أيضاً: «في الصناعة، إذا لم يتفق الناس معك ويرفضون القيام بواجباتهم يمكن أن تطلق عليهم النار، ولكن هذا الشيء لا ينطبق على تعاونات المصادم LHC». ويقول أيضاً: «الفيزيائيون الذين يعملون في تجاربنا تعيّنهم الجامعات، ولسنا نحن من يعينهم».

ويوافق جون كريج John Krige، المؤرخ من معهد جورجيا للتقانة في أتلنتا، الذي درس بنية التعاون في سرْن قبل تشكل أطلس، بأنه ليس بسيطاً اتخاذ قرار من أعلى إلى أسفل في المختبر. ولكنه يشير إلى أن كلمة «مكان تجمّع» تعني وجود تنافس قليل بين أعضاء التعاون. وعلى النقيض من ذلك، حسب قوله، ينجح التعاون بوجود «التنافس المنظّم» السليم بين المجموعات الفرعية التي تعمل لبناء مركبات مختلفة من أجل المكشاف بسرعة وبصورة فعّالة.

والآن حيث المصادم شغّال، فإنه توجد سياسات أخرى داخل التعاونات تقوي الروح الجماعية على الفردية، فتفصل بذلك الفيزيائيين بصورة أساسية عن امتلاك بحثهم، كما تقول كنور سيتينا. إن كل الورقات العلمية التي تحتوي على نتائج تجريبية يجب أن تتضمن قائمة بأسماء كل الأعضاء من آلاف التعاونات القوية مرتبة أبجدياً حسب البلد، مع إعطاء تلميحات قليلة عن الأصلاء الحقيقيين في العمل. تقول كنور سيتينا التي درست أيضاً الحياة في المختبر لعالِم بيولوجيا جزيئية: «لا يمكن أن يحدث هذا مطلقاً في علم الحياة، حيث تكون معظم الخلافات الحادة حول النشر، وتنشأ السمعة لكل عضو من ورقاته المنشورة». كما تقول عالمة الاجتماع ماريا أونغ Maria Ong الموجودة في TERC، وهو مركز تعاوني للبحث التعليمي في كامبريدج، ماساشوسيتس: «وهكذا فالكثير من قصص العلوم هي حول عبقرية الأفراد –حتى لو لم يتقاسم جائزة نوبل سوى ثلاثة أشخاص. المصادم LHC هو المثال المضاد المدهش من هذا النوع».

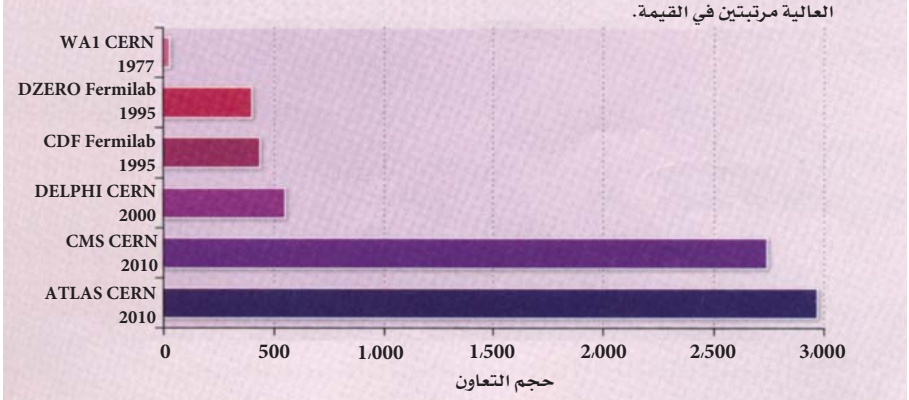
من الذي يستطيع أن يراجع؟

إن التأليف المشترك يثير تساؤلات عن بناء المعرفة في الفيزياء الجزيئية، هذا ما يقول بيتر غاليسون Peter Galison، وهو مؤرخ من جامعة هارفارد بكامبريدج، ماساشوسيتس. في شباط/فبراير، نشر التعاون CMS أول ورقاته العلمية المبنية على تحليل معطيات المصادم LHC التي بيَّنت أن عدداً أكبر من المتوقع من الجسيمات الغريبة، والتي تُعرف بالميزونات، كانت قد نتجت أثناء التصادمات الأولى. تشتمل الورقة 15 صفحة تضم أسماء المؤلفين، يبلغ مجموعهم مابين 2200 و 2300 فرد (رؤساء التعاون غير متأكدين من العدد الصحيح). يقول غاليسون: «هل يمكن القول إن أي شخص يفهم بشكل صحيح كل المعلومات التي تحتوي عليها؟» ويتابع سؤاله: من يستطيع القيام بالمراجعة الخارجية للأوراق الناتجة؟ ثم يقول: «أنت تصل إلى مرحلة يكون الأشخاص الوحيدون المؤهلون فيها لمراجعة الأعمال هم بحق من ضمن التعاون».

يقول روك بأن حجم تعاون فيزياء الجسيمات يؤثر بكل تأكيد على مراجعة الأقران. إن ورقة CMS بقيت أشهراً في التمحيص الصارم والمراجعات أثناء عملية مراجعتها داخلياً؛ في حين أنها لم تبقَ عند المراجع الخارجي النظير من قبل مجلة Journal of High Energy Physics سوى أربعة أيام. ويقول روك أيضاً: «أضحت مراجعة النظير الخارجي أقل أهمية لأنها أقل صرامة من عملياتنا في مراجعة الأقران في الداخل».

صناعة نمو

على مدى ال 35 سنة الماضية، ازداد حجم الأفرقة التجريبية في فيزياء الطاقة العالية مرتبتين في القيمة.



ورغم أن قوة التعاون تأتي من التأكيد على الصالح العام، فالتطورات الحديثة قد ترهق المنظومة. إن عدداً متزايداً من فيزيائيي الجسيمات يتحولون إلى السعي الفردي وراء التدوين blogging. ومع أن معظم الوظائف ليست موضع خلاف، فإن مختبر مسرع فِرمي الوطني (المعروف باسم مختبر فِرمي) في باتافيا، إيلينوي، كان عليه أن يتعامل مع حالات كسرَ الفيزيائيون فيها الرتب والألقاب وسرّبوا معلومات قبل أن يصبح تعاونهم جاهزاً لإطلاقها. يقول الناطق باسم سِوْن جيمس جيلليز James Gillies أنه لا توجد رغبة لدى المختبر الأوربي لمراقبة المدونات، لكنه يقدم توجيهات مباشرة عن الوقت الملائم لمناقشة النتائج.

حتى مع وجود هذه التوجيهات، فظاهرة التدوين لدى سرْن، وما يمكن أن تحدثه من توتر مع خطوط اتصال رسمية، هي من الأشياء التي سوف تتبعها بوريللي بدقة بوصفها جزءاً من فريق مؤلف من أكثر من 20 من المؤرخين والفلاسفة وعلماء الاجتماع، وسيبدأ تحقيقاً في LHC هذا العام بتمويل من مؤسسة البحث الألمانية DFG. تقول بوريللي مازحة: «إنه تعاون ضخم في العلوم الإنسانية».

تقول بوريللي: «ستكون هذه دراسة في الوقت الحقيقي عن الكيفية التي توزع فيها المعرفة في مثل هذا المشروع الضخم الكبير»، إنها مهتمة بشكل خاص بالنشر الفوري للكتب والمجلات التي تصدر عن المجتمع الفيزيائي من خلال مخزن المعلومات على الإنترنت www.arXiv.org، حيث تودع كل يوم مئة أو نحو ذلك من مسودات ورقات في فيزياء الطاقة العالية لم تراجع من قبل مقيم مختص ويمكن الوصول إليها بدون قيود. وتسأل بوريللي «كيف يختار الفيزيائيون الورقات ويوجهون أنفسهم نظراً لهذا الكم الهائل من المعلومات؟».

علماء الاجتماع ينظرون إلى أبعد من الحياة المهنية للعلماء ليقيّموا كيف يؤثر التعاون المشترك في الفيزيائيين على المستوى الشخصي. تقول كنور سيتينا إن العديد من فيزيائيي الجسيمات يعانون من الكوابيس التي تؤدي تصرفاتهم فيها إلى فشل المشروع. وفي ذلك تقول: «هذه هي كوابيس أولئك الذين يرون أنفسهم كحلقة في سلسلة، وليس كفرد».

الإجهاد الشاذ

تجادل كنور سيتينا بأن القلق البادي على فيزيائيي الجسيمات هو أكثر من التوتر الوظيفي المعتاد لأنهم ينصهرون مع المكشاف. وتقول: «هذا شيء بنوه بأيديهم، ولكنهم يصفونه بالصديق». عندما تحدث الفيزيائيون عن كوابيسهم، وصفوا ما تكبدوه جراء الضياع الذي تخيلوه للمكشاف كما لو أنه موت لأحد أفراد العائلة المقربين –وهو شيء لا يرى عادة بين علماء تجريبيين آخرين.

«الأشخاص الوحيدون المؤهلون لمراجعة العمل هم ضمن التعاون».

يقر دو روك بأن الفيزيائيين العاملين في المصادم LHC يقعون تحت ضغط هائل. فكل تجربة مكونة من مجموعات فرعية تراقب مكونات مختلفة من التجربة ولا تريد أي مجموعة فرعية أن تكون الحلقة الأضعف التي تخذل آلاف الناس الآخرين. ولكنه يحذر من جعل معظم العلاقة بين المجرب والمكشاف. ويقول دو روك ساخراً: «لن أذهب بعيداً إذا قلت إن لدى الفيزيائيين بعض المشاكل النفسية حيث يخطئون في المكشاف ويحسبونه صديقاً فيتكلمون معه».

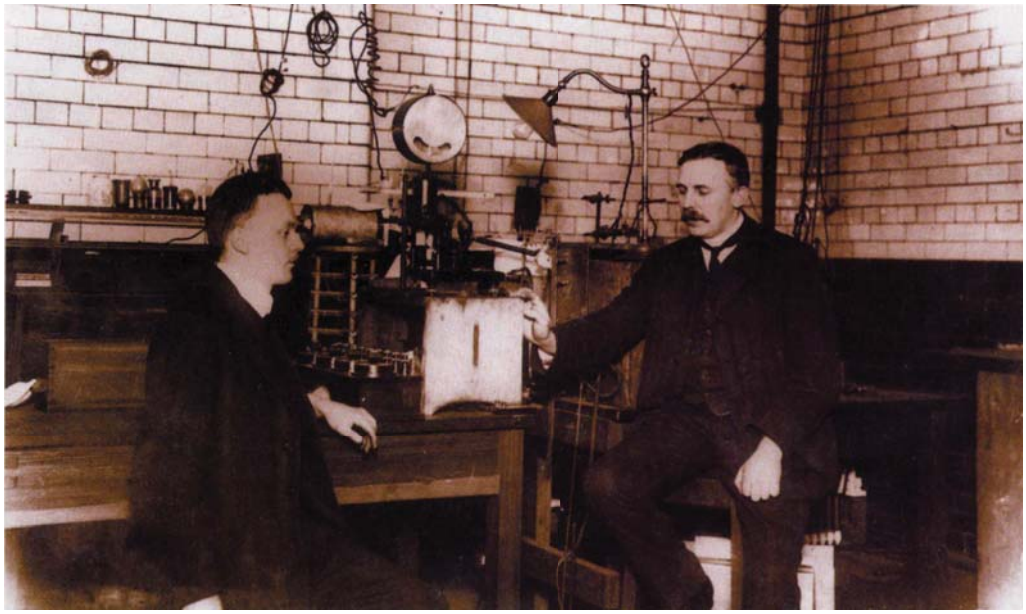
وفي نهاية المطاف، فإن المكاشيف المتزايدة هي المسؤولة عن زيادة حجم التعاون في مجال فيزياء الجسيمات. إن اختراع حجرة الفقاقيع لتتبع مسار الجسيمات في خمسينيات القرن الماضي تطلب مجموعة مؤلفة من 10 فيزيائيين –في الوقت الذي كان يظن فيه أنها تشكل تعاوناً ضخماً.

يضع الفيزيائيون خططاً للجيل التالي من المسّرعات. ولكن هذه قد لا تشكل لعلماء الاجتماع إلا مجالاً جديداً صغيراً للدراسة والاستكشاف. «لن يكون هناك خطوة صعود أخرى في حجم التعاون تصل إلى 25000 فيزيائي» هذا ما يقوله، ويضيف غاليسون «لقد بلغنا أقصى الحدود في عدد فيزيائيي الطاقة العالية».

نُشر هذا الخبر في مجلة Nature, Vol 464, 25 March 2010.
ترجمة د. محمد قعقع، رئاسة هيئة التحرير.

من النظائر إلى النجوم

إن تحضير مزيد من نظائر غريبة سيكشف عن آلية تشكّل الذرّات في النجوم ، وهو ما أوحى به إرنست رذرفورد ، كما يقول ميشيل تونيسّين Michael Thoennessen وبرادلي شيرّيل Bradley Sherrill .



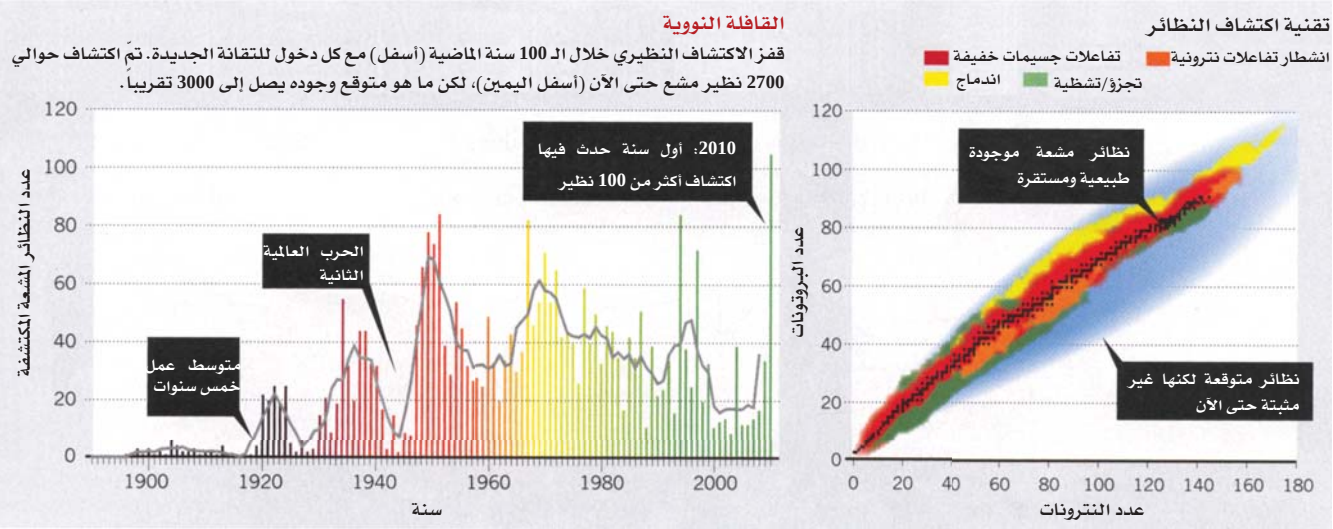
كشف العمل التجريبي لـ هانس غايغر Hans Geiger وإرنست رذرفورد Ernest Rutherford النواة في مركز الذرّات.

مئة عام مضت منذ أن نشر إرنست رذرفورد اكتشافه لنواة الذرّة في أيار/مايو عام 1911، وبدأ رحلته إلى عالم مركز الذرّة. ففي تجربة رذرفورد الشهيرة، توجهت حزمة من جسيمات ألفا نحو صفيحة رقيقة جداً من ورق الذهب. انحرفت بعض الجسيمات عن مسارها بزوايا تشير إلى اصطدامها بمركز ذرّي صغير وكثيف. وردت ملاحظة رذرفورد كما يلي: "كان ذلك على الأغلب كما لو أطلقتم قذيفة نحو قطعة من ورق نسيجي فارتدّت لتضربكم". دعمت التجربة نموذجاً كوكبياً للذرّة –الفكرة هي أن غالبية الكتلة مركزة في نواة– مع إلكترونات أصغر منها تدور حولها مثل الكواكب حول الشمس.

بعد ذلك، وعلى مدى قرن من الزمن توصل العلماء إلى مقاسات أصغر بألف مرة ممّا حققه رذرفورد، وطوروا نموذجاً معيارياً لوصف هذه الجسيمات وتفاعلاتها. تتم قيادة هذا المسعى عبر تجارب تنفذ في مركز سيرن CERN بسويسرا، من أجل فهم طبيعة لبنات البناء الأساسية.

وعلى الرغم من هذا التقدّم، ثمة أسئلة جوهرية ما تزال بدون أجوبة. فليس معروفاً كيف يمكن لنواة رذرفورد أن تتجمع فيها الكواركات وهذه القوة الهائلة. حتى إنه من غير المعروف بشكل تفصيلي كيف تربط القوة الهائلة الكواركات لتشكل النترونات والبروتونات، أو كيف تحصل القوى التي تجمع النترونات والبروتونات معاً في النواة. كما أن ثمة أسئلة بسيطة، هي حالياً بدون إجابات، مثل كمْ من العناصر الكيميائية قد تكون ممكنة في الطبيعة، أو كمْ عدد النترونات التي يمكن لعدد معين من البروتونات أن يرتبط معها؟

لذا، وبعيداً عن صورة مفصلة، وعن الحدّ الأقصى للطاقة، ثمة مجموعة صغيرة من التجهيزات تقدم بشكل هادئ فهماً لنواة الذرّة



من خلال توليد نكليدات جديدة ونادرة، وهي ذرّات تحتوي في نواها عدداً معيناً من النترونات والبروتونات. ففي العام 2010، ولأول مرة، اكتشف في سنة واحدة أكثر من 100 نظير جديد غير مستقر –وهي نكليدات تحتوي أعداداً مختلفة من النترونات (انظر قافلة النكليدات). نتوقع اكتشاف أكثر من 1000 نظير جديد خلال العقد القادم، وقد تتضمن نظائر أكثر أهمية من الناحية العلمية حتى الآن.

في البداية، كان البحث عن نظائر جديدة مدفوعاً بالتنقيب عن المجهول، وذلك بهدف عمل شيء لم يقم به أحد من قبل، وتسريع فهم القوى الكامنة وراءه. لكن ذلك قاد إلى تطبيقات عملية ضخمة أيضاً: في مجالات الطاقة النووية، والتصوير والمعالجة الطبية، والتأريخ بالكربون، والعناصر الواسمة. كما أن الجهود الدولية لتوليد نظائر جديدة سيدفع فهمنا لتشكل الذرّة والنواة إلى سويات جديدة، إضافة إلى إمكانية التوصل إلى تطبيقات.

وحتى قبل تجربة رذرفورد، أظهرت دراسات التفكك الإشعاعي أنه يمكن لعنصر ما أن يوجد بأشكال مختلفة. بيَّن اكتشاف النترون عام 1932 أن نواة الذرّة مكونة من نترونات وبروتونات. وبعد ذلك بقليل استعمل كل من إيرين كوري وفريديريك خوليو جسيمات ألفا من البولونيوم ودريئات من البورون والمغنيزيوم والألمنيوم لتوليد أولى النظائر المشعّة في المختبر. وقد احتوت النظائر الجديدة لكلٍّ من النتروجين والألمنيوم والفسفور نتروناً واحداً أقل ممّا تحتويه النكليدات المستقرة الطبيعية لهذه العناصر.

ومنذ ذلك التاريخ، يفتش الباحثون عن حدود الوجود النووي، من أجل اكتشاف أي عنصر قد يحتوي أعظم عدد من البروتونات وما هو أكبر (وأصغر) عدد من النترونات في عنصر معين. وحتى يومنا هذا، لم يعرف العلماء الحد الذي يصل إليه أكبر عدد من النترونات التي يمكن أن تترابط في عنصر ما إلاّ في أخف العناصر فقط، بدءاً من الهدروجين وحتى الأكسجين. إن ذلك يمثل جزءاً بسيطاً من الحقل النووي المحتمل (انظر "قافلة النكيدات").

هناك ما يقارب 300 نكليد مستقر على الكرة الأرضية، وتمّ تعيين 2700 نظير مشع آخر حتى الآن. ربما يمثل ذلك فقط نصف العدد الكلي المتوقع من النظائر. تمّ اكتشاف ما يقارب الـ 3000 (ربما يرتفع العدد إلى 5000 أو ربما يهبط إلى 2000). وعلى الرغم من عدم تأثير الكتل المختلفة للنظائر على خصائصها الكيميائية، إلاّ أن إنتاج النظائر النادرة ودراستها يُعدُّ حاسماً لفهم عمل الطبيعة الذي أدى إلى تشكل الذرّات في مكان نشوئها.

تولّدت معظم العناصر في الطبيعة في النجوم وأثناء الانفجارات النجمية، وغالباً ما تكون النظائر المتولّدة عند أقصى حدود الاستقرار. سيولِّد الجيل اللاحق من مسرّعات النظائر النادرة، ولأول مرة على الكرة الأرضية، غالبية النظائر التي تشكّلت في البيئات النجمية. وحيث يعوّل الفيزيائيون حالياً على النماذج النظرية المعتمِدة على الاستقراءات، فإنهم سيقيسون قريباً خصائص غالبية هذه النظائر بشكل مباشر. يمكن أن يساعد ذلك في الإجابة على تساؤلات

الفيزياء الفلكية الأساسية الأخرى حول المكان الكوني لنشوء هذه النظائر، ولماذا تنفجر النجوم، وحول طبيعة النجوم النترونية، وماذا كانت تشبه النجوم الأولى في الكون؟

مسيرة الأجهزة

كشفت المسرّعات الأولى للجسيمات، المطورة في بداية ثلاثينيات القرن الماضي، عن كثير من النظائر الجديدة. أعاقت الحرب العالمية الثانية تقدم هذه الاكتشافات ولكن، فيما بعد، استمر تقصي تفاعلات أسرْ النترونات وانشطارها في المفاعلات النووية. وتَمثَّل التقدم التالي في تطوير مسرّعات الأيونات الثقيلة في ستينيات القرن الماضي، الذي أنتج نظائر ثقيلة فقيرة بالنترونات خلال تفاعلات تبخر اندماجي.

وبمساعدة المسرّعات العالية الطاقة في تسعينيات القرن الماضي، تمكن العلماء من توليد كثير من النوى الغنية بالنترونات خلال انشطار بالتطاير أو عبر تشظّي مقذوف من أيونات ثقيلة عالية الطاقة. كانت هذه المسرّعات أفضل السبل إنتاجية لاكتشاف النظائر في الأزمنة الحديثة. غير أنه في العقد المنصرم، انخفض معدل الاكتشاف إلى سويات لم نرها منذ أربعينيات القرن الماضي. فقد بدا واضحاً أن مسرّعات النظائر النادرة المتخصصة كانت ضرورية لإحراز تقدم إضافي.

فأول ما دخل على الخط من هذه المسرّعات في العام 2007 في اليابان هو مصنَع حزمة النظائر النادرة. وفي العام 2010، تمّ الإعلان عن اكتشاف 45 نظيراً جديداً غنياً بالنترونات.

ولضمان أن هذه هي البداية لعصر جديد، وليست مجرد طفرة اكتشاف، لابد من متابعة الجهود عبر العالم بأكمله. ثمة مراكز في طريقها للتطور على المستوى العالمي، مثل محطة البحث عن النترون المضاد والأيونات في ألمانيا وSPIRAL2 في مدينة كان بفرنسا ومحطة حزم النظائر النادرة في الولايات المتحدة. حاول العلماء في الولايات المتحدة خلال ما يقارب عشرين سنة بناء مسرّع نظائر نادرة. جرى توقيف التمويل لمحطة سابقة إثر فترة تقشف سابقة.

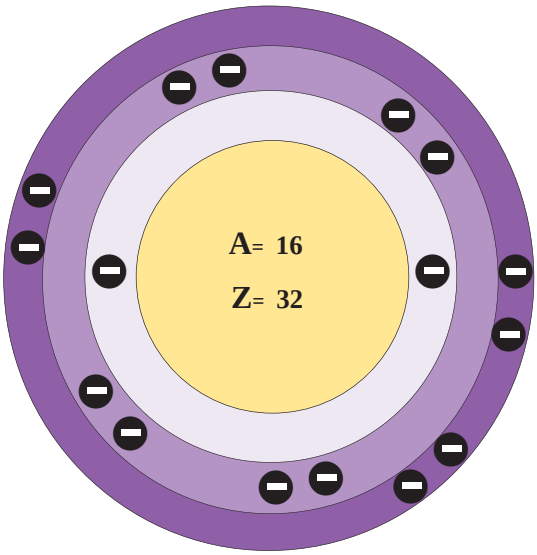
إن الظروف المالية الصعبة الحالية يجب ألاّ تسمح بإيقاف القائمين على بناء المحطة. ما تزال المحطة الألمانية بحاجة لتأمين أموال كافية للبدء باستثمارها في نهاية العقد الحالي. إن اكتشاف النظائر خلال الـ 100 عام المنصرمة كان نتيجة جهد عالمي، ساهم فيه أكثر من 3000 عالم في 125 مختبراً في 27 دولة. وسوف يكون معيباً إذا لم تتقدّم بشكل سريع المحطة الألمانية، التي بدأت بتعاون دولي.

إن دفع العلوم إلى تخومها يحدث المفاجآت. نحن نعلم بشكل مسبق أن النوى النادرة ذات النسب القصوى بروتون/نترون لا تتبع باستمرار السلوك المدون في الكتب الأكاديمية فيما يخص النظائر المستقرة المعروفة. وعلى سبيل المثال، إن قدّ النوى المستقرة متناسب مع كتلتها –ويقاس وفق الصيغة $A^{1/3}$ (حيث A هي العدد الكتلي للنترونات والبروتونات). ومع ذلك، فإن هذه العلاقة البسيطة تتجاهل أية فروقات بين النترونات والبروتونات. أثبتت بعض النوى النادرة فقط الموجودة والسريعة الزوال أنها تفوق هذه القيمة.

ثمة مفاجآت قد تكون غير مكتشفة بعد. ومن قبيل الأمل، ستعطي محطات التوليد اللاحقة أكثر من 1000 نظير جديد، وأن حدّ الوجود النووي سيذهب قدماً نحو عناصر أثقل، تصل إلى الزركونيوم (40 بروتوناً) بل وقد تصل إلى الذهب (79 بروتوناً). ثمة ظواهر أساسية تنتظر الكشف عنها، وسيجد الإنتاج المتزايد للنظائر النادرة طريقه لتطبيقات جديدة في الطب وفي حقول أخرى. نحن واثقون من أن السنوات العشر أو الخمس عشرة القادمة ستوفر النظائر اللازمة للإجابة عن السؤال: "ما هو أصل العناصر في الكون؟" التي يمكن أن تتولد في المختبر لأول مرة. إنه إيحاء محكم قدّمه رذرفورد.

نُشر هذا الخبر في مجلة Nature,Vol 473, 5 May 2011.
ترجمة د. عادل حرفوش، رئيس هيئة التحرير.

الكبريت



الرمز:	S
العدد الذرّي:	16
الكتلة الذرّية النسبية:	32.065(5)
درجة انصهاره:	115.21 °C
درجة غليانه:	444.6 °C
الكثافة:	2.07 $g \cdot cm^{-3}$
حالات الأكسدة:	6, 5, **4**, 3, **2**, 1, -1, -2

ماهيته ومميزاته البارزة:

يُرمَز لعنصر الكبريت بالحرف S، وعدده الذرّي 16. يوجد الكبريت بكميات وافرة، وهو شبه معدن ومتعدد التكافؤات. تشكل ذرّات الكبريت في الشروط النظامية جزيئات حلقية ثمانية الذرة ولها الصيغة الكيميائية S_8. يكون الكبريت العنصري على هيئة بلورات صلبة ناصعة الصفار. ويمكن للكبريت أن يتفاعل كيميائياً إما بوصفه عاملاً مؤكسداً أو مرجعاً، فهو يؤكسد غالبية المعادن والعديد من أشباه المعادن، بما في ذلك الكربون، ويؤدي ذلك إلى اكتسابه شحنة سالبة في معظم مركباته العضوية، غير أنه يُرجِعُ عدة مؤكسِدات قوية مثل الأكسجين والفلور.

يمكن إيجاد الكبريت في الطبيعة بشكل عنصر نقي وعلى هيئة فلزات الكبريتيد والكبريتات. يُنتج معظم الكبريت العنصري حالياً على أنه منتج ثانوي أثناء استبعاد المحتوى الكبريتي الملوث للغاز الطبيعي والنفط. يستعمل الكبريت تجارياً بشكل أساسي في الأسمدة، بسبب حاجة النبات إليه، كما يستعمل في صناعة حمض الكبريت الذي يعدُّ من أهم المواد الكيميائية في الصناعة. وللكبريت استعمالات أخرى في عيدان الثقاب والمبيدات الحشرية والفطرية. تعود الرائحة الكريهة للغاز الطبيعي والثوم إلى مركبات الكبريت الموجودة فيهما. كما تعود رائحة البيض الفاسد إلى وجود كبريت الهدروجين.

يعدُّ الكبريت عنصراً أساسياً لجميع أشكال الحياة، ويستعمل بشكل واسع في عمليات كيميائية حيوية. ففي تفاعلات الاستقلاب، تخدم مركبات الكبريت بكونها مواد لإنتاج الطاقة وفي عمليات التنفس (لحلوله محل الأكسجين) في الكائنات الحية البسيطة. يدخل الكبريت بشكل عضوي في الفيتامينات، ويشكل جزءاً مهماً في الأنزيمات وفي الجزيئات المضادة للأكسدة. هذا ويرتبط الكبريت عضوياً بجميع البروتينات، كما في الحموض الأمينية. وتعدُّ الرابطة المضاعفة للكبريت مسؤولة عن المتانة الميكانيكية وعدم انحلالية بروتين الكيراتين الموجود في الجلد الخارجي والشعر والريش، ويساهم الكبريت في الرائحة المطهرة عند حرق هذه المواد.

خصائصه:

ينصهر الكبريت عند حرقه متحولاً إلى سائل لونه بحمرة الدماء، ويصدر شعلة زرقاء تسهل رؤيتها في الظلمة.

الفيزيائية

يشكل الكبريت جزيئات متعددة الذرّات ذات صيغ كيميائية مختلفة، وأكثر هذه الجزيئات شهرة هو جزيءٌ حلقيٌ ثمانيُّ الذرّات S_8. يكون هذا الشكل من الكبريت هشاً وصلباً بلون أصفر براق وله رائحة خفيفة، مشابهة لرائحة عود الثقاب. ينصهر في الدرجة 115.21 مئوية، ويغلي في الدرجة 444.6 مئوية ويتصعد بسهولة. وفي الدرجة 95.2 مئوية، أي تحت درجة الانصهار، يتغيّر جزيء الكبريت الثماني الذرة من كبريت ثماني ألفا α–octasulfur إلى بيتا متعدد الأشكال β–polymorph. وعملياً لا تتغير بنية الحلقة الثمانية S_8 خلال هذا التغير الطوري، مما يؤثر على التفاعلات البين جزيئية. وبين درجتي الانصهار والغليان، يغير الكبريت الثماني شكله أيضاً، متحولاً من بيتا متعدد الأشكال إلى الكبريت غاما γ–sulfur، وهو ما يترافق مع انخفاض في الكثافة وزيادة في اللزوجة بسبب تشكل بوليميرات. وفي درجات الحرارة الأعلى تتناقص اللزوجة بسبب زوال البلمرة. تكون كثافة الكبريت بحدود 2 غرام بالسنتمتر المكعب، ويتعلق ذلك بشكله. جميع أشكاله المستقرة عوازل كهربائية رائعة.

الكيميائية

يترافق احتراق الكبريت بلهب أزرق مصحوب بتشكل ثنائي أكسيد الكبريت، المشهور برائحته الخانقة المميزة. لا ينحل الكبريت في الماء غير أنه ينحل في ثنائي كبريت الكربون، وإلى حدٍّ أقل في محلات عضوية غير قطبية، مثل البنزين والتلوين. طاقة التأين الأولى والثانية للكبريت هي 999.6 و2252 كيلو جول للجزيء، على التوالي. ومع ذلك، يكون الأيون S^{2+} نادراً، في حين يكون الأيونان S^{4+} وS^{6+} أكثر شيوعاً. تكون طاقتا التأين الرابع والسادس 4556 و8495.8 كيلو جول للجزيء، ويعود التشكل الشائع لهذين الأيونين إلى الانتقال الإلكتروني بين المدارات، وتكون هذه الحالات مستقرة فقط بوجود مؤكسدات قوية مثل الفلور والأكسجين والكلور.

أشكاله:

يوجد الكبريت بأكثر من ثلاثين شكلاً متغايراً allotropes. يمكن أن يشكل حلقات أخرى مختلفة عن S_8. فاستبعاد ذرة من الحلقة الثمانيّة الذرّة يعطي الشكل S_7، الأشد اصفراراً من S_8. يؤدي تحليل الكبريت العنصري بالكروماتوغرافيا السائلة العالية الأداء إلى تشكل خليط متوازن مكون بشكل أساسي من S_8، إضافة إلى S_7 وقليل من S_6. وقد تم تحضير حلقات أكبر، بما في ذلك S_{12} وS_{18}.

ينتج الكبريت اللابلوري أو «البلاستيكي» بوساطة التبريد السريع للكبريت المنصهر، وذلك من خلال غمره بالماء البارد، على سبيل المثال. أظهرت دراسات التصوير البلوري بأشعة إكس أنه يمكن للشكل اللابلوري أن يتمتع ببنية حلزونية مع ثماني ذرّات في الدورة الواحدة. تتسبب الجزيئات البوليميرية الملتفة الطويلة في جعل هذه المادة السمراء مطاطيةً، وفي حالة كتلة كبيرة تفقد عملية التبريد إلى مطاط أشبه بالمطاط الخام. يكون هذا الشكل شبه مستقر في درجة الحرارة العادية وبالتدريج يتحول إلى شكل جزيئي متبلور، غير محتفظ بمرونته. تحصل هذه الظاهرة عبر ساعات أو أيام، غير أنه يمكن تسريعها بالتحفيز.

نظائره:

يوجد للكبريت 25 نظيراً معروفاً، أربعة منها مستقرة: (95.02%) ^{32}S و^{33}S (0.75%) و^{34}S (4.21%) و^{36}S (0.02%). هناك نظائر مشعة أخرى للكبريت لها أعمار نصف أقل من 170 دقيقة باستثناء ^{35}S ذي عمر النصف 87 يوماً والمتشكل من التشظّي الإشعاعي الكوني للأرغون-40.

عند ترسّب الفلزات الكبريتية، يمكن للتوازن النظائري بين الصلبة منها والسائلة أن يسبب فروقات بسيطة في قيم δS-34 للفلزات المتشاركة وراثياً. يمكن استعمال الفروقات بين الفلزات لتقدير درجة حرارة التوازن. ويمكن استعمال δC-13 و δS-34 للكربونات والكبريتات الموجودة معاً لتعيين الـ pH وزوال أكسجين السائل الحامل للفلز أثناء تشكل الفلز.

تشتق الكبريتات في معظم المنظومات البيئية للغابات من الجو في غالب الأحيان. يساهم الطقس المحيط بالفلزات والأبخرة ببعض الكبريت. فيستعمل الكبريت ذو التركيب النظائري المتميز لتحديد مصادر التلوث، كما أضيف الكبريت المخصب كواسم في الدراسات الهدرولوجية. ويمكن استعمال فروقات الوفرات الطبيعية في منظومات يكون فيها اختلاف ^{34}S في مكونات المنظومة البيئية كافياً.

وجوده الطبيعي:

تعود غالبية الألوان الصفراء والبرتقالية في دراسات سلوك الأشكال والبنية والتفاعلات إلى الكبريت العنصري ومركبات الكبريت الناتجة بفعل البراكين النشطة. ينشأ ^{32}S داخل النجوم الضخمة، عند أعماق تزيد درجة حرارتها على 2.5×10^9 كلفن، عبر اندماج نواة السليكون ونواة الهليوم. ونظراً لأن ذلك يشكل جزءاً من عملية

ألفا التي تُنتج عناصر وافرة، يعدُّ الكبريت العاشر بين العناصر الأكثر شيوعاً في الكون.

يوجد الكبريت في أصناف عديدة من النيازك. فهو موجود بشكل طبيعي على هيئة كبريت الحديدي (FeS)، لكن هناك استثناءات، في حالة الغضاريف الكربوناتية الحاوية على كبريت حر وكبريتات ومركبات كبريتية أخرى. تعود الألوان المتميزة في براكين المشتري للأشكال المتنوعة للكبريت الصلب والمنصهر والغازي.

يمكن إيجاد الكبريت على الكرة الأرضية قرب مناطق الينابيع الحارة والبراكين في أجزاء عديدة من العالم، وبخاصة على طول الحلقة النارية في المحيط الهادي، ويجري حالياً استثمار هذه الترسبات في أندونيسيا وتشيلي واليابان. تكون هذه الترسبات متعددة البلورات، وبلغت قياسات أكبر بلورة منفردة تمّ كشفها 11x16x26 سم. لقد كانت جزيرة صقلية أكبر مصدر للكبريت خلال الثورة الصناعية. يمكن أن يكون الكبريت البدائي قد نتج بفعل عمليات جيولوجية فقط.

تتضمن مركبات الكبريت الناتج بشكل طبيعي فلزات كبريتية، مثل الـ pyrite (كبريت الحديد) والـ sinnabar (كبريت الزئبق) والـ galina (كبريت الرصاص) والـ sphalerite (كبريت الزنك) والـ stibnite (كبريت الأنتيموان) والكبريتات، مثل الـ gypsum (كبريتات الكالسيوم) والـ alunite (كبريتات البوتاسيوم والأمنيوم) والـ barite (كبريتات الباريوم).

إنتاجه:

يدلُّ الكبريت على نفسه وقد تم الحصول عليه تاريخياً بشكل مباشر، في حين كان كبريت الحديد مصدراً للكبريت عن طريق حمض الكبريت. استعملت الطريقة الصقلّية في الأزمنة القديمة للحصول على الكبريت من صخور متواجدة في مناطق بركانية في صقلية: كدست أكوام الترسبات في محارق بنيت من الآجر على سفوح منحدرة، مع ترك مسافات بينها. ومن ثمّ، وضع الكبريت المسحوق على سطح الترسبات وأشعل، مسبباً انصهار الترسبات واندفاعها إلى أسفل التلال. أما اليوم فإنتاج الكبريت يتم على هيئة مادة ثانوية لعمليات صناعية في مصافي النفط، حيث ينتج الكبريت غالباً في هذه العمليات على أنه مادة غير مرغوبة، أو مادة ضارة يتم استخلاصها وتحويلها إلى كبريت عنصري. أما بالنسبة للكبريت الموجود على شكل فلز، فيعتقد أن الكبريت البدائي تحت القبب الملحية مجرد مصادر فلزية مستحاثية، نتج من تأثير بكتيريا قديمة على ترسبات الكبريتات. وقد أخرجت الكبريتات من مناجم القبب الملحية هذه بوساطة عملية فراش Frasch process بشكل رئيسي. وبهذه الطريقة، يتم ضخ المياه الشديدة السخونة ضمن رسابة الكبريت البدائية من أجل صهر الكبريت، ومن ثمّ يُخرج الكبريت المنصهر النقي 99.5% إلى السطح بوساطة الهواء المضغوط. وخلال القرن العشرين أنتجت هذه الطريقة الكبريت العنصري الذي لم يتطلب تنقية إضافية. ولكن، بسبب العدد المحدود من هذه الترسبات والتكلفة العالية للعملية، لم تعد تستعمل هذه الطريقة لاستخراج الكبريت في أي مكان من العالم منذ العام 2002.

يستخلص الكبريت اليوم من النفط والغاز الطبيعي والمصادر المستحاثية الخاصة، ويتم الحصول عليه بشكل رئيسي على هيئة كبريت الهدروجين. يمكن زيادة فعالية استخلاص المركبات العضوية الكبريتية، بوصفها شوائب غير مرغوبة في النفط، بتعريضها لهدرجة تزيل الكبريت، مما يؤدي إلى فسخ الروابط كربون–كبريت.

$$R\text{-}S\text{-}R + 2\ H_2 \rightarrow 2\ RH + H_2S$$

يحول كبريت الهدروجين الناتج من هذه العملية، وكذلك الموجود منه في الغاز الطبيعي، إلى كبريت عنصري وفق طريقة كلوس Claus process. تستلزم هذه الطريقة أكسدة بعض من كبريت الهدروجين إلى ثنائي أكسيد الكبريت ومن ثمّ تناسبهما معاً:

$$3\ O_2 + 2\ H_2S \rightarrow 2\ SO_2 + 2\ H_2O$$

$$SO_2 + 2\ H_2S \rightarrow 3\ S + 2\ H_2O$$

يستعمل الكبريت بكونه رابطاً في الإسمنت، ويكون للمنتج الحاصل خصائص مرغوبة عديدة. ارتفع سعر الكبريت بين العامين 2007 و2008، ثم انخفض بعد ذلك.

مركباته:

تتراوح حالات الأكسدة الشائعة للكبريت بين 2- و6+. يشكل الكبريت مركبات ثابتة مع جميع العناصر باستثناء الغازات الخاملة.

كبريتيداته

يؤدي تفاعل الكبريت مع الهدروجين إلى تشكل كبريت الهدروجين. وعند انحلال هذا المركب بالماء، فإنه يكون حمضياً لطيفاً.

$$H_2S \rightarrow HS^- + H^+$$

يعطي إرجاع الكبريت كبريتيدات متعددة، تتكون من سلسلة من ذرّات الكبريت منتهية بمراكز S^-:

$$2\ Na + S_8 \rightarrow Na_2S_8$$

يؤكد هذا التفاعل بشكل قابل للجدل الخاصة الوحيدة الأكثر تميزاً للكبريت ألا وهي ثباته في ربط نفسه عن طريق تشكيل سلاسل. تؤدي برتنة (تفاعلها مع بروتون) هذه الأنيونات المتعددة الكبريت إلى تشكل مركبات مثل H_2S_x حيث $x = 2$ و3 و4. وفي النهاية يؤدي إرجاع الكبريت إلى أملاح كبريتيدية:

$$16\ Na + S_8 \rightarrow 8\ Na_2S$$

يستثمر التحوّل الداخلي لهذه الأنواع في بطاريات كبريت الصوديوم. يمكن أكسدة الكبريت العنصري، على سبيل المثال، للحصول على ثمانيّ الحلقة S_8^{2+}.

أكاسيده وأيوناته الأكسيدية

يتمّ الحصول على أكاسيد الكبريت الأساسية عبر حرق الكبريت:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$2\ SO_2 + O_2 \rightarrow 2\ SO_3$$

وهناك أكاسيد أخرى معروفة، ومثال عليها، أول أكسيد الكبريت وأول أكسيد ثنائي الكبريت وثنائي أكسيد ثنائي الكبريت، لكنها غير مستقرة.

تشكل أكاسيد الكبريت أنيونات أكسيدية عديدة لها الصيغة SO_n^{2-}. يجتمع حمض الكبريت وSO_3 ليعطيا محلولاً من حمض فوق أكسيد الكبريت ($H_2S_2O_7$) في حمض الكبريت.

هالیداته وأُكسي هالیداته

إن فلوريدي الكبريت الأساسيين هما سداسي فلوريد الكبريت، وهو غاز كثيف يستعمل دافعاً للصواريخ غير فعّال كيميائياً وغير سام، ورباعي فلوريد الكبريت، وهو يستعمل بحالات نادرة بوصفه كاشفاً عضوياً شديد السمية. وكلوريداته المقابلة هي ثنائي كلوريد الكبريت وأحادي كلوريد الكبريت. يستعمل كلوريد الثيونيل بوصفه كاشفاً في الاصطناع العضوي.

مركباته مع النتروجين

إن المركب الأهم ذا الرابطة S–N هو القفص رباعي نتريد رباعي الكبريت (S_4N_4). يؤدي تسخين هذا المركب إلى تشكل بوليمير نتريد الكبريت ($(SN)_x$)، الذي يتمتع بخصائص معدنية رغم عدم احتوائه على ذرّات معدنية. تحتوي الثيوسيانات على مجموعة SCN^-. تؤدي أكسدة الثيوسيانات إلى تشكل $(SCN)_2$ وفق ارتباط من الشكل NCS–SCN. تتكون كبريتيدات فسفورية عديدة، والقفصان P_4S_{10} و P_4S_3 هما الأكثر أهمية تجارية بينها.

كبريتيداته المعدنية

تحصل العديد من الفلزات، إن لم تكن غالبيتها، على هيئة كبريتيدات. فالفلزات الأساسية للنحاس والزنك والنيكل والكوبالت والموليبدينوم وعناصر أخرى تكون على هيئة كبريتيدات. تنحو هذه المواد لتكون أنصاف نواقل عاتمة الألوان وليست سهلة التأثر بالماء وبأحماض عديدة. تتشكل هذه المواد جيوكيميائياً وفي المختبر على حدٍّ سواء بوساطة تفاعل كبريت الهدروجين مع الأملاح المعدنية لتعطي كبريتيدات المعدن. كان فلز الغالين (PbS) الأول في ظهوره بوصفه نصف ناقل ووجد له استعمال مبكر في تعديل الإشارة الراديوية بواسطة البلورات. أما كبريت الحديد، المسمى البيريت، والذي أطلق عليه لقب «الذهب الأبله» فله الصيغة FeS_2. إن تحسين هذه الفلزات، عن طريق التحميص عادة، يعدُّ مكلفاً وذا مخاطر بيئية. يؤدي الكبريت إلى تآكل معادن عديدة عبر عملية تسمى إفقاد البريق.

مركباته العضوية

- المركبات العضوية الكبريتية التوضيحية:

– أللیسین Allicin، المادة النشطة في الثوم

– آر–سیستین R-cyestine، حمض أميني يحتوي مجموعة ثيول

– میثیونین Methionine، حمض أميني يحتوي ثيوإيتر thioether

ثنائي فينيل ثنائي الكبريت Diphenyl disulfide، ثنائي كبريتيد ممثِّل

– حمض فوق فلوروأوكتان الكبريت Perfluorooctanesulfonic acid، مميع جدلي

– ثنائي بنزو الثيوفين Dibenzothiophene، واحد من مكونات النفط الخام

– بنسلين Penicillin

ونذكر فيما يلي بعض الأنواع الأساسية لمركبات الكبريت:

- ثيولات أو مِرْكَبْتانات Thiols or mercaptans، وهي مشابهات كبريتية للكحولات، وتُعطي معالجتها بالأسس أيّونات الثيولات.
- ثيوإتيرات Thioethers، وهي المشابهات الكبريتية للإيتيرات.
- أيونات كبريتية Sulfonium ions، ولها ثلاث مجموعات مرتبطة بمركز كبريتي كاتيوني.
- أحماض كبريتية Sulfonic acids، وتستعمل في منظفات عديدة.

تطبيقاته:

حمض الكبريت

يستعمل الكبريت العنصري بشكل أساسي على أنه سلف precursor لمواد كيميائية أخرى. وبشكل تقريبي فقد حوّل 95% منه في العام 1989 إلى حمض الكبريت (H_2SO_4):

$$2\ S + 3\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2SO_4$$

يعدُّ إنتاج حمض الكبريت واستهلاكه مؤشراً على التطور الصناعي الوطني. والاستعمال الرئيسي لهذا الحمض هو استخلاص الفسفات الخام لإنتاج الأسمدة الصنعية. تتمثل الاستعمالات الأخرى لحمض الكبريت في تنقية النفط ومعالجة المياه العادمة واستخلاص المعادن.

كيماويات كبريتية أخرى ذات كميات كبيرة

يتفاعل الكبريت بشكل مباشر مع الميتان معطياً ثنائي كبريت الكربون الذي يستعمل في تصنيع السلوفان والحرير الصنعي. كما يستعمل الكبريت بشكل مباشر لتقسية المطاط، حيث تقوم الجزيئات المتعددة الكبريت في ربط البوليميرات العضوية. تستعمل الكبريتات بشكل كثيف في تبييض الورق ومادة حافظة للفواكه المجففة. تستعمل مئات ملايين الأطنان سنوياً من كبريتات الكالسيوم، الفسفوجبسوم، في صناعة الإسمنت البورتلاندي والأسمدة.

في الأسمدة

يستعمل الكبريت بشكل متزايد على انه مكون للأسمدة. يعدُّ المتطلب النباتي من الكبريت مساوياً لما يتطلبه النبات من الفسفور أو يزيد عنه، أي أنه واحد من المتطلبات الأساسية لنمو النبات وتَشكُّل جذور البقوليات وفي آليات وقاية النبات.

كيماويات حسّاسة

تستعمل المركبات العضوية الكبريتية في المواد الصيدلانية والأصبغة. يشكل الكبريت جزءاً من جزيئات عديدة مضادة للبكتيريا.

مبيدات فطرية وحشرية

يعدُّ الكبريت العنصري واحداً من أقدم المبيدات الفطرية والحشرية. فهو يستعمل على هيئة بودرة بوصفه مبيداً فطرياً في الأعناب والفريز وخضروات عديدة. كما تستعمل بودرة الكبريت العنصري على أنها مبيد حشري عضوي.

دوره البيولوجي:

عوامل مشتركة بروتينية وعضوية

يُعد الكبريت مكوناً أساسياً في جميع الخلايا الحية، فترتيبه السابع أو الثامن من حيث الوزن في جسم الإنسان، وشيوعه مثل شيوع البوتاسيوم وأقل بقليل من الصوديوم والكلور. وكل 70 كغ من جسم الإنسان تحتوي 140 غراماً من الكبريت.

وفي النبات والحيوان، يوجد معظم الكبريت في الحمضين الأمينيين، السيستين والمثيونين. وعليه فإن هذا العنصر موجود في جميع البروتينات ومتعددات الببتيد والأنزيمات المحتوية على هذين الحمضين الأمينيين. السيستين المتجانس والتورين هما أيضاً حمضان أمينيان محتويان على الكبريت ولهما بنية متشابهة، غير أنهما ليسا مكودين في الـ DNA، ولا يشكلان جزءاً من البنية الأساسية للبروتينات.

يُعدُّ التحول الكيميائي الحيوي المتعدد المراحل لثنائي أكسيد الكربون المسار القابع وراء تشكل غالبية الميثان العالمي. يتطلب هذا التحوّل عوامل مشتركة كبريتية عضوية عديدة، بما في ذلك الأنزيم المشترك $CH_3SCH_2CH_2SO_3^-$، وهو السلف المباشر للميتان.

يشكل الكبريت اللاعضوي جزءاً من تجمعات كبريت الحديد إضافة إلى العديد من بروتينات النحاس والنيكل والحديد. والأكثر شيوعاً بين هذه المركبات: دوكسينات الحديدي، التي تخدم بوصفها ناقلات إلكترونية في الخلايا. وفي البكتيريا، تحتوي أنزيمات النتروجيناز المهمة التجمع Fe-Mo-S، وهو حفّاز يقوم بالوظيفة المهمة

لتثبيت النتروجين، محولاً النتروجين الجوي إلى النشادر الذي يمكن استعماله من قبل المتعضيات المكروية والنبات لتشكيل البروتينات والدنا والرنا وأشباه القلويات، إضافة إلى المركبات النتروجينية العضوية الضرورية للحياة.

تدابير وقائية:

يُعدُّ الكبريت العنصري غير سام، لكنه يمكن أن يحترق مشكلاً ثنائي أكسيد الكبريت. وبالرغم من أن ثنائي أكسيد الكبريت آمن بما يكفي لاستعماله على شكل مضاف غذائي بكميات صغيرة، فإن إضافة تراكيز كبيرة منه تؤثر على الرئتين والعيون وأنسجة أخرى.. في حين أن الكائنات الحية غير المشتملة على رئتين مثل الحشرات أو النبات، فإنها لا تخضع لعملية التنفس. يعدُّ ثلاثي أكسيد الكبريت وحمض الكبريت أيضاً شديدي الأثر التآكلي، وذلك بسبب الأحماض القوية التي تتشكل عند تلامسهما مع الماء.

يؤدي احتراق الفحم والنفط في الصناعة ومحطات الطاقة إلى تشكل ثنائي أكسيد الكبريت (SO_2)، الذي يتفاعل مع بخار الماء الموجود في الهواء والأكسجين مشكلاً حمض الكبريت (H_2SO_4) وحمض الكبريتي (H_2SO_3). تُعدُّ هذه الأحماض مكونات للأمطار الحمضية، التي تخفض الـ pH في الترب وتجمعات المياه العذبة، حيث إن ذلك يؤدي إلى أخطار ثانوية في الحالات والبنى البيئية والمناخ الكيميائي. تتطلب معايير الوقود بشكل متزايد ضرورة استخلاص الكبريت من الوقود الأحفوري من أجل تحسين خصائص الأمطار الحامضية. ينقى الكبريت المستخلص ويمثل جزءاً كبيراً من الكبريت المنتج. ففي محطات الطاقة المزودة بالفحم، تتم في أغلب الأحيان تنقية الغازات المتدفقة، وفي محطات الطاقة الأحدث التي تستعمل الغاز الصنعي يتمّ استخلاص الكبريت قبل حرق الغاز.

يتعادل كبريت الهدروجين مع سيانيد الهدروجين من حيث السمية وكلاهما يقتلان وفق الآلية نفسها، مع أن التسمم بكبريت الهدروجين أقل حدوثاً بسبب الإنذار الذي تشعرنا به رائحته الكريهة. ولكن، وبالرغم من أن كمية صغيرة من كبريت الهدروجين تنذر بوجوده، غير أنه سرعان ما يُحدث فقداناً للحسّ بالرائحة، لذا فإن احتمال عدد ضحاياه عن طريق التنفس يكون أكبر.

إعداد: د. عادل حرفوش، رئيس هيئة التحرير

موقعه في الجدول الدوري وتصنيفه

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc							Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y							Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

المعادن القلوية	المعادن القلوية الترابية	اللنثانيدات	الأكتينيدات	المعادن الانتقالية	معادن أخرى	أشباه المعادن	لامعادن أخرى	الهالوجينات	الغازات النبيلة

التحليل بالتنشيط النتروني لعينات كبيرة الحجم من النفايات الصلبة المحلية باستخدام النترونات الضوئية لمفاعل منسر المطفأ

LARGE SAMPLE NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS OF MUNICIPAL SOLID WASTE USING SHUTDOWN MNSR PHOTONEUTRONS

د. خالد حداد، نزار الصمل
قسم الهندسة النووية

ملخص

قد تحتوي النفايات في حالات عدة مواد خطرة، لذا فإنها تتطلب تصنيفاً مناسباً. يمكن تطبيق تقنية التحليل بالتنشيط النتروني للعينات الكبيرة (LSNAA) لمراقبة هذه المواد. أُنجز في هذا العمل LSNAA لعينات نفايات صلبة كبيرة الحجم باستعمال النترونات الضوئية لمفاعل منسر المطفأ بتقنية العيار الداخلي الأحادي. حُصل على توافق جيد بين نتائج هذه الطريقة و طريقة المقارنة العيارية. يسمح هذا العمل بزيادة مدة استثمار المفاعل من خلال استخدام مواقع التشعيع خلال فترة إيقاف المفاعل بوصفها منبعاً نترونياً منخفض التدفق لـ LSNAA.

الكلمات المفتاحية: التحليل بالتنشيط النتروني للعينات الكبيرة، نفايات صلبة محلية، نترونات ضوئية.

نشرت هذه الورقة في مجلة: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Article in Press*.

R-ISSR بوصفه أداة فعالة لتعقب مواقع وراثية جديدة عند النوع Arthrocnemum macrostachyum

R-ISSR MARKER AS A USEFUL TOOL FOR DETECTION OF NEW GENOMIC LOCI IN Arthrocnemum macrostachyum

د. باسل صالح
قسم البيولوجيا الجزيئية والتقانة الحيوية

ملخص

يعد نبات الأشنان Arthrocnemum macrostachyum من الأنجم المعمرة المحبة للملوحة والتي تمثل نموذجاً للسبخات الملحية في حوض المتوسط. هدفت هذه الدراسة إلى تقصي استخدام خلط بعض تراكيب المعلمين RAPD & ISSR في نفس تفاعل التضخيم، وبالتالي، اختبار كفاءة معلمات R-ISSR بهدف تعقب مواقع وراثية جديدة بين ثلاثة طرز من النوع A. macrostchyum المنتشرة في غرب الشاطىء السوري. أعطت تراكيب مختلفة من مرئسات المعلمين RAPD & ISSR معاً حزماً جديدةً لم تظهر بتفاعل التضخيم باستخدام كل من مرئسات الـ RAPD & ISSR على حدة. أشارت النتائج إلى أن استخدام المرئسة ISSR $(AG)_8TC$ قد أعطى قدراً أكبر من المعلومات عند خلطها مع مختلف مرئسات الـ RAPD مقارنة بالمرئسات الأخرى المختبرة. بينما على العكس، أعطت المرئسة ISSR $(GACA)_4$ المختبرة في هذه الدراسة كمية ضئيلة من المعلومات عندما استخدمت بمفردها. استخدمت هذه التراكيب معاً وبنجاح في تفاعل التضخيم بهدف تعقب تنوع وراثي جديد بين طرز النوع A. macrostchyum.

الكلمات المفتاحية: التفاعل السلسلي للبوليميراز، التعددية الشكلية، التعددية الشكلية لمعلمات الـ DNA المضخمة عشوائياً.

نشرت هذه الورقة في مجلة: *BIOLOGIA PLANTARUM, (2011)*.

محاكاة مونتي كارلو للوسطاء الفيزيائية لقلب مفاعل البحث السوري منسر

MONTE CARLO SIMULATION OF CORE PHYSICS PARAMETERS OF THE SYRIAN MNSR REACTOR

د. قاسم خطاب، إسماعيل السليمان
قسم الهندسة النووية

ملخص

طور سابقاً نموذج نتروني ثلاثي الأبعاد لمفاعل البحث السوري منسر، لإجراء التحليل النتروني للمفاعل باستخدام الكود MCNP-4C. حسبت المقاطع العرضية النترونية المستمرة الطاقة من المكتبة ENDF/B-VI. استخدم النموذج في هذه الورقة لحساب الوسطاء الفيزيائية لقلب المفاعل وهي: فائض تفاعلية القلب البارد والنظيف، معايرة قضيب التحكم وهامش إغلاقه، معايرة طبقات عاكس البيريليوم العلوي، توزع التدفق النتروني المحوري في مواقع التشعيع الداخلية والخارجية، حساب زمن الحياة للنترونات السريعة (l_p)، والحصة الفعلية للنترونات المتأخرة (β_{eff}). لوحظ انسجام جيد بين النتائج الحسابية والمقيسة. يدل هذا الانسجام على دقة النموذج المطور لقلب مفاعل البحث السوري منسر، وسيستخدم لحسابات أخرى في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: فائض التفاعلية، قضيب التحكم، طبقات البيريليوم، التدفق، MNSR, MCNP-4C.

نشرت هذه الورقة في مجلة: *Annals of Nuclear Energy, 2011*.

مميزات الامتصاص في محاليل Disperse Blue 1/Dioxane

ABSORPTION CHARACTERISTICS OF Disperse Blue 1/DIOXANE SOLUTIONS

د. بسام عباس، محمد الشيخ خليل
قسم الفيزياء

ملخص

درسنا في هذا العمل خصائص امتصاص الصباغ العضوي disperse blue 1 (DB1) المنحل في المحل العضوي Dioxane في تراكيز مختلفة. شُعِّعت المحاليل المُحضرة بأشعة ليزرية مستمرة عالية الشدة من الأطوال الموجية التالية: 632.8 nm (ليزر He-Ne) 488، 496، 514 (ليزر Argon-ion). أظهرت محاليل DB1/dioxane قدرة خفض ضوئي مميز عند الشدات العالية للطول الموجي الليزري 632.8 nm القريب جداً من الطول الموجي الموافق للامتصاص الأعظمي لهذا الصباغ. و مع ذلك، كان الامتصاص الأفضل عند الطول الموجي 632.8 nm القريب جداً من الطول الموجي الموافق للامتصاص الأعظمي لهذا الصباغ. كانت المحاليل الممددة جداً من مرتبة 10^{-4} M كافية للحد من شدة نفوذ هذا الشعاع الليزري الوارد بنسبة 90%. ومع ذلك، فقد كانت تراكيز المحاليل المناسبة للخفض الضوئي بحدود 7.46×10^{-4} M من أجل ظهور خصائص الخفض الضوئي في حالة الأطوال الموجية الأخرى لليزر أيون الأرغون.

الكلمات المفتاحية: التمحرق وعدم التمحرق الذاتي، بوليميرات و عضويات، محددات، مركبات عضوية و بوليميرات.

نشرت هذه الورقة في مجلة: *B. Abbas and M. Alshikh Khalil, Optica Applicata, XLI, (2011)*.

تأريخ فخار سوري مستخرج من موقع تل سكا وتصنيفه باستخدام التألق الحراري والطرق الإحصائية لعدة متغيرات على أساس تحليل البروتون المحرِّض لإصدار أشعة إكس (PIXE)

DATING AND CLASSIFICATION OF SYRIAN EXCAVATED POTTERY FROM TELL SAKA SITE, BY MEANS OF THERMOLUMINESCENCE ANALYSIS, AND MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS, BASED ON PIXE ANALYSIS

د. الياس حنا بكرجي، مثنى أحمد، نعمان سلمان،
دعد حلوم، ندى بطرس، رنا عبود
قسم الكيمياء

ملخص

استخدمت تقنية التألق الحراري وتقنية البروتون المحرِّض لإصدار أشعة إكس لدراسة العينات الفخارية الأثرية من موقع تل سكا والذي يقع على بعد 25 كيلو متر جنوب شرق مدينة دمشق، سورية. تم اختيار أربع عينات عشوائياً من الموقع، عينتين من المستوى الثالث وعينتين من المستوى الرابع من أجل التأريخ باستخدام تقنية التألق الحراري وكانت النتائج متوافقة مع التأريخ المعطى من قبل الأثريين. جرى تحليل ثماني وعشرين قطعة باستخدام تقنية البروتون المحرِّض لإصدار أشعة إكس وذلك لتحديد الهوية والتركيب العنصري للفخار المستخرج من المستويين الثالث والرابع، باستخدام المسرع 3 ميغا فولط في دمشق. جرى تعيين 20 عنصراً (صوديوم، مغنزيوم، ألمنيوم، سيليكون، فسفور، كبريت، بوتاسيوم، كالسيوم، تيتانيوم، منغنيز، حديد، كوبالت، نيكل، نحاس، زنك، روبيديوم، سترنسيوم، يتريوم، زركينيوم، نيبيوم)، اختير 14 عنصراً فقط للتحليل الإحصائي وهي: (بوتاسيوم، كالسيوم، تيتانيوم، منغنيز، حديد، كوبالت، نيكل، نحاس، زنك، روبيديوم، سترنسيوم، يتريوم، زركينيوم، نيبيوم) وطبقت طريقتا تحليل إحصائي متعدد المتغيرات، التحليل العنقودي والتحليل العاملي المتعدد المتغيرات. صنفت هذه الدراسة القطع الفخارية المدروسة بمجموعتين متميزتين.

الكلمات المفتاحية: PIXE، TL، علم آثار، فخاريات سورية، تحليل إحصائي، Gupix.

نشرت هذه الورقة في مجلة: *journal of Radioanalitical and Nuclear chemistry (2011).*

أنماط الأمواج السوليتونية في وصلة جوزفسون اللاخطية الطويلة

Solitary waves modes in a long non-linear Josephson junction

د. سمير الخواجة
قسم الفيزياء

ملخص

تمت في هذا البحث دراسة الأنماط السوليتونية المتشكلة في وصلة جوزفسون الطويلة (LJJ) بالاعتماد على معادلة sine-Gordon الواصفة لدوامات التدفق المغنطيسي (الفلوكسونات) في كمونات ثلاثة: جيبي متناظر وجيبي غير متناظر مكانياً يتغير باتجاه واحد من نمط ratchet وبئر كمون مزدوج. وانطلاقاً من الهندسة المنسقة للوصلة، جرت نمذجة الجملة واستخرجت المعادلة السوليتونية المضطربة باستخدام نموذج الوصلة المرتبطة تحريضياً والموصولة تسلسلياً. وقد تم من خلال الحلول العددية للمعادلة ومن أجل شروط حدية واحدة مفروضة على الجملة في غياب إثارة خارجية الحصول على الأمواج السوليتونية المميزة لطول الفلوكسونات عند تغيير قيم معامل التبديد α. ثم تبين تغير شدة الموجة ونمطها مع ارتفاع قيمة α وفقاً لشكل الكمون المعتبر، حيث حدث انقلاب في طورها عند $\alpha = 0.5$ مع صمود شكل الموجة. تبقى الطاقة محفوظة في الجملة بسبب التوازن الحاصل بين التبديد واللاخطية بحيث تؤدي إلى ثبات السوليتون مع الزمن كما ناقشنا بالاعتماد على نظرية Mcloughlin-Scott.

الكلمات المفتاحية: سوليتون، وصلة جوزفسون الطويلة، فلوكسون، معادلة sine-Gordon.

أثر الإحماء على البنية والتحولات الطورية لأغشية أكسيد التنغستين WO_3

Influence of Annealing on Structure and Phase Transformations of Tungsten Oxide WO_3

د. أحمد المحمد
قسم الفيزياء

ملخص

لقد دُرس كل من البنية البلورية والتشكّل والبعد الحبيبي والناقلية الكهربائية للمساحيق WO_3 النانوية والأفلام الرقيقة أثناء الإرجاع والتحولات الطورية باستخدام مطحنة كرات عالية الطاقة تحت ضغط محدد وبنظام الترسيب بالمدفع الإلكتروني. تم فحص المساحيق WO_3 النانوية والأفلام الرقيقة باستخدام منظومات انعراج أشعة X عن المسحوق، والمجهر الإلكتروني النافذ، ومجهر القوى الذرّية، وانعراج الإلكترونات العالية الطاقة بالانعكاس. أثناء عمليات الإرجاع، تحولت البنية الأحادية الميل من WO_3 إلى أطوار مانيلي غير متساوية التكافؤ من WO_{3-X} أو إلى بنية شبه سداسية مائية $WO_3 1/3H_2O$، ثم بنية سداسية من WO_3، ثم إلى أطوار غير متساوية التكافؤ من $WO_{2.7}$. وفي النهاية، تتحول إلى أطوار مختلطة من W, WO_2. تبدي الصور المجهرية لأطوار مانيلي WO_{3-X} أهدابا متمايزة جيدة الترتيب البلوري بحيث تعكس مستويات القص، في حين أن دخول ذرات الهدروجين بين ثمانيات الوجوه WO_6 الخاصة بالبنية الأحادية الميل من WO_3 ندفع بالبنية إلى الشكل السداسي مشكلة أطوار WO_3 المائية التي تسرّع عملية الإرجاع. حُسبت طاقة التنشيط باستخدام معادلة أرينوس ووجد أنها تعتمد على ضغط الأكسجين الجزئي أو على نسبة عدد ذرات الهدروجين الموجودة على السطوح. استخدم نموذج العصابات لتفسير هذه السلوكيات في النقل، وهو يفترض أن أماكن الأكسجين المنزوع من السطح تدخل كعيوب معطيات مستويات منح في فجوة نصف الناقل وبالتالي يمكن أن تُنتج الإلكترونات الحرة بسبب عمليات الإرجاع مما يزيد في الناقلية.

الكلمات المفتاحية: الغشاء الرقيق WO_3، محس غازي، مسحوق نانوي، تحول طوري، نمو منضد، ناقليّة كهربائية.

التضخيم الليزري باستخدام بخار النحاس وفق مخطط هزاز-مضخم

Laser amplification using CVL lasers in Master Oscillator & Power Amplifier MOPA - configuration

د. علاء الدين منيع،
د. محمد بهاء الصوص،
محمد النظامي
قسم الفيزياء

ملخص

جرى في هذا العمل تحقيق التضخيم الليزري عند طول موجة 510.6 نانومتر –الخط الأخضر– باستخدام ليزري بخار نحاس وفق مبدأ هزاز–مضخم. جرى تطوير طريقة جديدة لتحقيق التزامن بين الليزرين بالتحكم بشكل مباشر بإشارات الانفراغ المطبقة على صمامي الثيراترون وأمكن الحصول على استقرار للنبضات الليزرية بحدود 1 نانو ثانية. طبقت هذه الطريقة على الليزرين مما أدى إلى تحقيق التضخيم الليزري وأمكن الحصول على استطاعة تضخيم قدرها 14 واط لخطي الإصدار الليزري الأصفر والأخضر معاً و6 واط للخط الأخضر لوحده.

الكلمات المفتاحية: ليزر بخار النحاس، تزامن، تضخيم الليزري، هزاز–مضخم.

محاكاة السلوك الدينامي لليزر غازي ضمن إطار نموذج نصف كلاسيكي بهدف الوصول إلى حساب دينامي مباشر لطيف الليزر

Simulation of the dynamic behavior of gas lasers within the framework of a semiclassical model in order to attain a direct dynamic calculation of the laser spectrum

د. محمد اسكيف
قسم الفيزياء

ملخص

يجسد هذا العمل محاولة لتطوير نموذج معادلات المعدل بشكل يجعله قادراً على تقديم توصيف تفصيلي ومستقل للتطور الزمني لطيف التواتر في الليزرات الغازية. يستعرض العمل مقاربتين بديلتين لإدخال الاستجابة الطيفية للمجاوب إلى صلب معادلات المعدل ويناقشهما من جوانب عدة على ضوء المقارنة مع المعطيات التجريبية المتوافرة لليزر هليوم–نيون، التي تشمل طيف التواتر ومنحني الاستطاعة بتابعية الزمن. يبين الحساب أن عرض الخط يتحدد بالعرض الطيفي للمجاوب في حالة التعريض اللامتجانس لطيف التضخيم، وينتهي إلى الصفر في حالة التعريض المتجانس.

الكلمات المفتاحية: ليزرات غازية، طيف التواتر، نموذج معادلات المعدل، عرض الخط.

توصيف الأكسجين الذري في جهاز بلازما الانفراغ الراديوي للمهبط المجوف ودراسة فعاليته

Characterization of atomic oxygen in a Hollow Cathode Radio-Frequency Plasma and study its efficiency

د. منذر ندّاف،
د. صقر سلّوم
قسم الفيزياء

ملخص

شُخّص الأكسجين الذرّي المولّد في بلازما الأكسجين البعيدة للمنبع HCD-L300، بشكل تام باستخدام تقنيات تقليدية متعددة. وجد أن كثافة الأكسجين الذرّي تتغير ما بين $(1\text{-}10)\times10^{19}\ m^{-3}$، بحسب شروط وبارامترات التشغيل. دُرس تفاعل الأكسجين الذري مع سطوح أفلام رقيقة من الفضة والذهب باستخدام التحليل الوزني والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) ومطيافية الأشعة السينية المتشتتة طاقياً (EDX). ودُرس أيضاً تأثير الأكسجين الذرّي في خواص البلل السطحي والطاقة السطحية للمواد البوليميرية باستخدام تقنية قياسات وتحليل زاوية التماس. من الناحية التطبيقية، يُعتبر إنتاج سطح تفلون فائق الكره للماء، والزيادة الكبيرة في الطاقة السطحية للبولي إيماید والبولي أميد من أهم النتائج التي تم الحصول عليها في العمل الحالي.

الكلمات المفتاحية: بلازما المهبط المجوف، أكسجين ذرّي، بوليميرات، كره فائق للماء، خواص البلل.

الكسر الضوئي المضاعف لبعض الجمل البوليميرية البصرية اللاخطية

Birefringence of some nonlinear optical polymeric systems

د. بسام عباس،
د. محمد الشيخ خليل
قسم الفيزياء

ملخص

قمنا في هذا العمل بتصميم وتنفيذ منظومة تجريبية متكاملة لقياس الانكسارية المضاعفة في الأفلام البوليميرية الرقيقة. جرت دراسة أربع منظومات بوليميرية محضرة على شكل منظومة ضيف/مضيف بنسبة 5% وزناً (ضيف/مضيف). تتألف ثلاثة منها من أصبغة عضوية آزوبنزينية (DSR1, DSR13, DO3)، وينتمي الصباغ الأخير إلى عائلة الأنثراكوينون (DB1). استخدم بوليمير PMMA على أنه مضيف لهذه الأصبغة.

أظهرت النتائج التجريبية أن الانكسارية الضوئية تتبع المتراجحة DB1 > DO3 > DSR1 > DSR13، وذلك ضمن الشبكة البوليميرية. كذلك أظهر الصباغ DB1 خصائص امتصاص مهمّة، وتجلى ذلك في قدرته على الحد من شدة الأشعة الليزرية النافذة للأطوال الموجية 632.8, 514, 496, 488 نانومتر في حالات الشدة العالية.

الكلمات المفتاحية: كسر ضوئي مضاعف، خفض ضوئي، أصبغة عضوية.

استعمال البيتومين في حفظ النفايات المشعة الناتجة من الصناعة النفطية المحتوية على الراديوم ^{226}Ra

The use of Bitumen for storing radioactive waste resulting from oil industry containing Ra-226

د. صلاح الدين تكريتي
قسم الهندسة النووية
د. رياض شويكاني
قسم الوقاية والأمان
د. محمد عبد الحفيظ،
مجيب سلمان
جامعة دمشق

ملخص

جرت دراسة إصدار غاز الرادون المتحرر من نفايات الصناعة النفطية المحتوية على مواد مشعة طبيعية (NORM) من عينات بيتومينية بشكلين مختلفين. مزجت نفايات الـ NORM مع البيتومين للحصول على مصادر صنعية. وأحيطت هذه المصادر بطبقات بيتومينية ذات سماكات مختلفة. كما تم تحضير عينات بيتومينية أخرى بسماكات مختلفة وذلك بوضع نفايات الـ NORM ضمنها بشكل بودرة.

بينت النتائج أن هناك فرقاً في إصدار غاز الرادون المتحرر من العينات المحتوية على المصادر الصنعية وتلك المحتوية على نفايات الـ NORM بشكل بودرة. كما أوضحت النتائج أن إصدار غاز الرادون من العينات البيتومينية يتناقص بشكل طردي مع سُمْك العينة المحيطة بالنفايات (سواء كان مصدراً صنعياً أم بودرة)، على عكس العينات الإسمنتية (للمقارنة).

وقد أجريت بعض التجارب الداعمة لهذا الموضوع، حيث قيست طيوف أشعة غاما للعينات الإسمنتية والبيتومينية التي بينت أن الإسمنت جيد لكونه مادة مخمدة لأشعة غاما في حين أن البيتومين جيد في احتجاز غاز الرادون.

الكلمات المفتاحية: نفايات النورم، غاز الرادون، البيتومين، أشعة غاما، إطلاقات.

Aalam Al-Zarra

Journal of The Atomic Energy Commission of Syria

NO. 136

Managing Editor

Prof. Dr. Ibrahim Othman

Dirctor General of A.E.C.S

Editing Committee

(Editors In-chief)

Prof. Dr. Adel Harfoush

Prof. Dr. Mohammad Ka'aka

(Members)

Prof. Dr. Haj Saeed

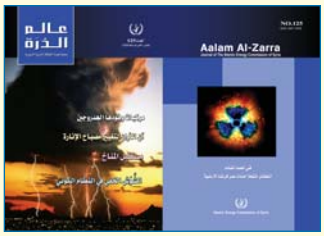
Prof. Dr. M. Hamo-leila

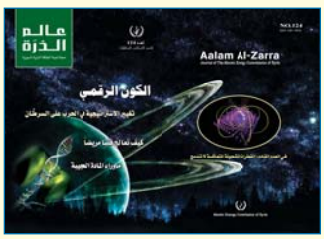
Prof. Dr. N. Sharabi

Prof. Dr. F. Awad

Prof. Dr. F.Kurdali

Prof. Dr. T. Yassin





Aalam Al-Zarra

A journal published in Arabic six times a year, by the Atomic Energy Commission of Syria.

It aims to disseminate Knowledge of nuclear and atomic sciences and of the different applications of Atomic energy.

http://serversmiso.aecs.sy

مكتب نظم المعلومات

هيئة الطاقة الذرية السورية