18

مصدر طاقة النجوم

The power source of stars

إن السؤال عن مجرد الطريقة التي تولد بها الشمس والنجوم الأخرى ضوأها وحرارتها كان لغزًا طويل الأمد في علم الفلك، وهو لغز لم يمكن حله حلًا مرضيًا باستخدام الفيزياء الكلاسيكية وحدها، ولم يحل لغز الطاقة النجمية إلا مع وصول الفيزياء النووية في القرن العشرين.

إن أقدم النظريات التي حاولت تفسير الشمس باعتبارها جسمًا ماديًا افترضت أن نجمنا ليس أكثر تعقيدًا من مجرد كرة هائلة من الفحم أو بعض المواد الأخرى القابلة للاشتعال تحترق في الفضاء تلقائيًا، وكان استيعاب كيمياء الاحتراق سيئًا، وكذلك استيعاب نقص الأكسجين في الفضاء ومن ثم لم يكن حتى عام 1843 أن أصدر عالم الفلك الأسكتلندي «جون جيمس واترسون» تحليلًا سليمًا للملابسات وقد أوضح أنه إذا كانت الشمس تلمع بشدتها الحالية طوال

«ربما أبسط فرضية هي أنه قد يكون هناك عملية بطيئة لفناء المادة.»

آرثر إدينجوتن

الخط الزمني

1843م	1854م	1856 - تسعينيات القرن التاسع عشر
وضح «واترسون» أن الشمس لا يمكن أن يكون مصدر طاقتها تفاعلًا كيميائيًا مثل تفاعل الاحتراق.	اقترح «هيلمهولتز» آلية من شأنها أن تتيح للنجوم توليد طاقة من الانقباض الجذبي الذي عدله «كلفن» فيما بعد.	وضعت مختلف التقديرات فترة عمر الشمس تحت آلية كلفن ـ هيلمولز عند حوالي 20 مليون سنة.

تاريخها فمن شأنها ألا تحتوي إلا على مادة كافية للاحتراق لحوالي 20000 سنة حتى ولو كان التفاعل الكيميائي فعالًا للغاية.

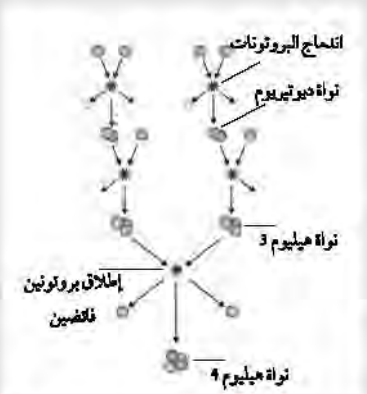
قوة الجاذبية

لم يكن لدى العلماء في ذلك الوقت إلا فكرة قليلة عن العمر الحقيقي لكوكب الأرض، والنظام الشمسي لكن الاكتشافات الجيولوجية والحفرية كانت بالفعل تبدأ في بيان أنه من المرجح أن هذا العمر يقدر بالكثير من ملايين السنين وليس بضعة آلاف السنين كما كان يُستدل على نحو واسع من الإنجيل، لذلك كان البحث مستمرًا عن آلية جديدة لإمداد الشمس بالطاقة وقد اقترح «واترسون» نفسه أن الطاقة يمكن أن يطلقها سقوط شهب صغيرة على السطح لكن هناك نظرية أكثر قبولًا اقترحها عالم الفيزياء الألماني «هيرمان فون هيلمهولتز» عام 1854، فقال إن طاقة الشمس نشأت عن تأثيرات جاذبيتها الخاصة، الأمر الذي أدى إلى تقلصها وزيادة درجة حرارتها على مر الزمن ومع التعديلات التي أضافها العالم البريطاني لورد كلفن، قدمت آلية «كلفن - هيلمهولتز» هذه طريقة الشمس لإنتاج الطاقة عند مستواها الحالي لأكثر من 100 مليون سنة. وهذا يتلاءم تمامًا مع الأفكار حول عمر الأرض، والتي يعتقد الجيولوجيون أن عمرها لا يتجاوز عشرات الملايين من السنين، وإلا كانت المناطق الداخلية بردت وتصلبت.

1926م	1927م	1937م	1939م
اقترح «إدينجوتن» أن الشمس تستمد طاقتها من تفاعل نووي تتحول فيه الكتلة مباشرة إلى طاقة.	نشر «آرثر هولمز» دليلًا على أن كوكب الأرض عمره عدة مليارات من السنين.	حدد «جامو»، و«ويزساسكير» تفاعل اندماج سلسلة بروتون-بروتون وهي المصدر الرئيسي للطاقة للنجوم الشبيهة بالشمس.	اكتشف «بيث» دورة كربون-نيتروجين-أكسجين التي تلعب دورًا رئيسيًا في النجوم الأكثر ضخامة من الشمس.

تفاعل سلسلة بروتون-بروتون

تنطوي سلسلة تفاعل بروتون-بروتون على اندماج نواتي هيدروجين (بروتونات) تتحول إحداهما تلقائيًا إلى نيوترون لتكون نواة ديوتيروم مستقر (هيدروجين ثقيل). والاندماج مع نيوترون آخر ينتج عنه نظير مستقر آخر يسمى هيليوم3-، وفي نهاية المطاف تندمج نواتا هيليوم3- ليتج هيليوم4- طبيعي مما يؤدي إلى إطلاق بروتونين فائضين من العملية. وتطلق الطاقة بكميات متزايدة في كل مرحلة من العملية، وتعرف «بيث» أيضًا على فروع أخرى من التفاعل يمكن أن تحدث وبصفة عامة في النجوم الأكثر سخونة من الشمس من الداخل (انظر دورة كربون-نيتروجين-أكسجين في الصفحة المقابلة).



بدأت نظرية الجاذبية تنهار عند مطلع القرن العشرين تقريبًا عندما كشف اكتشاف العناصر المشعة الجديدة عن طريقة لإبقاء داخل الأرض ساخنًا لمدة أطول. وفي الوقت نفسه اقترحت نظرية «داروين» للتطور أن المجموعة المتنوعة من الحياة الحالية كان من شأنها أن تستغرق عدة ملايين من السنين، إن لم يكن مليارات، لتنشأ عن طريق الانتقاء الطبيعي. لذلك، بحلول الوقت الذي أدار «آرثر إدينجوتن» انتباهه إلى المشكلة في عمله الرائع عن البنية النجمية عام 1926 (انظر صفحة 106) فُتح السؤال عن مصدر طاقة الشمس مجددًا.

الطاقة من الكتلة

لقد قام «إدينجوتن» بحساب أن الانقباض الجذبي من شأنه أن يتسبب في جعل بعض النجوم تظهر تغيرات جذرية في فترات زمنية تقدر بقرون تتناولها التسجيلات الفلكية.

ونظرًا لعدم وجود مثل هذه التغيرات، فإن مصدر الطاقة لا بد أن يكون أطول عمرًا وأكثر استقرارًا. وقد رفض أيضًا نظرية الأثر النيزكي لأنها غير قادرة على التأثير على العمليات التي تحدث في قلب النجم. وبدلًا من ذلك، قال إن مصدر طاقة النجوم الوحيد المعقول كان ذا طبيعة دون ذرية: فعندما تم تحويل الكتلة إلى طاقة في معادلة آينشتاين الشهيرة: الطاقة تساوي الكتلة في مربع سرعة الضوء واتضح أن نجمًا مثل الشمس يحتوي من المادة على أكثر مما يكفي لإشراقه خلال دورة حياة تقدر بعدة مليارات من السنين.

لكن، كيف تحررت هذه الطاقة؟ وضع «إدينجوتن» في اعتباره ثلاثة خيارات رئيسية- الانحلال الإشعاعي للأنوية الذرية الثقيلة (الانشطار)، واتحاد الأنوية الخفيفة لتكوين أنوية أثقل (الاندماج)، و«الفناء» الافتراضي للمادة عند وضع الإلكترونات والبروتونات والتي لها شحنات معاكسة معًا وسرعان ما استنتج أن الاندماج كان هو الآلية الأرجح. وعن طريق البيان العملي أوضح أن نواة الهيليوم كتلتها 0.8 في المائة أقل من أنوية الهيدروجين الأربعة اللازمة لتكوينها («نقص في الكتلة» يمثل الكتلة المنطلقة في صورة طاقة أثناء الاندماج). عندما قبلت أفكار «سيسيليا باين» عن مكونات النجوم (انظر صفحة 109) منذ أواخر عشرينيات القرن الماضي، أدرك علماء الفلك أن الهيدروجين والهيليوم كانا بالفعل العنصرين المهيمنين داخل النجوم.

بناء نموذج الاندماج

كانت المشكلة الرئيسية لنظرية الاندماج لإدينجوتن أن درجات الحرارة في الشمس لم تبدُ مرتفعة بما يكفي لدعم النظرية، فالجسيمات موجبة الشحنة بينهما تنافر متبادل لذلك لا بد أن تكون درجات الحرارة عالية جدًّا حتى تتصادم البروتونات المفردة وتندمج. لكن في عام 1928 استخدم عالم الفيزياء الروسي «جورج جامو» العلم الجديد الغريب الذي يدعى ميكانيكا الكم ليبين كيف يمكن أن تتغلب البروتونات على هذا التنافر وتندمج معًا. بحلول عام 1937،

استطاع هو وزميله الألماني «كارل فريدريك فون ويزساكير» أن يقترحا سلسلة بروتون-بروتون التي فيها تؤدي التصادمات بين أنوية الهيدروجين بالتدريج إلى تكوين الهيليوم- الفكرة نفسها التي لم يأخذها «إدينجوتن» على محمل الجد في عقد سابق.

دورة كربون - نيتروجين - أكسجين

في الظروف الأكثر سخونة من لب الشمس يستطيع الكربون أن يعمل بمثابة عامل حفاز، يسرع من معدل اندماج الهيدروجين مع الهيليوم في حين يبقى هو نفسه بدون تغير. أنوية الهيدروجين (البروتونات) تندمج مع أنوية الكربون لتكوين النيتروجين ثم الأكسجين. وأخيرًا، عندما يحاول بروتون آخر الاندماج مع نواة الأكسجين تنحل وتطلق نواة هيليوم كاملة التشكيل وتستعيد الكربون الأصلي. ومرة أخرى، تتحرر الطاقة في كل مراحل العملية. وتكون دورة كربون - نيتروجين - أكسجين هي السائدة في النجوم الأكثر من 1.3 كتلة شمسية، وسريعة جدًا وفعالة لدرجة أن وجودها أو غيابها في النجوم هو العامل الرئيسي في تحديد فترة عمرها (انظر صفحة 119).

وقد واجهت سلسلة «جامو»، و«ويزساكر» مشاكل خاصة بها، وتحديدًا أنها انطوت على إنتاج نظائر غير مستقرة للغاية (متغيرات ذرية) من شأنها أن تتفكك لحظة تشكيلها بدلًا من أن تبقى متماسكة لمدة طويلة بما يكفي لترتبط ببروتونات أخرى وتنتج هيليومًا مستقرًا. في عام 1938، دعا «جامو»

مجموعة صغيرة من أبرز علماء الفيزياء النووية إلى مؤتمر في واشنطن لمناقشة المشكلة، وقد كان من ضمن المجموعة المهاجر الألماني «هانز بيث». في بداية الأمر كان اهتمام «بيث» بالمشكلة قليلًا لكنه رأى حلًّا حدسيًّا ممكنًا وبسرعة استنتج التفاصيل مع «تشارلز كريتشفيلد». وفي السنة التالية نشر ورقتين بحثيتين لم يوجز فيهما عملية اندماج الهيدروجين التي تسود في النجوم الشبيهة بالشمس فحسب بل أيضًا أوجز عملية بديلة تسمى دورة كربون ـ نيتروجين ـ أكسجين والتي تحدث على الأغلب في الدواخل الأكثر سخونة في النجوم الأضخم (انظر المربع على اليمين). استطاع «بيث»، عن طريق التحليل الدقيق للمعدل الذي عنده تحدث العمليتان في ظروف مختلفة، أن يفسر ليس فقط الطريقة التي تلمع بها النجوم بل أيضًا كيف تؤدي عمليات الاندماج المختلفة إلى نشأة مجموعة متنوعة من العناصر الثقيلة نسبيًّا.

الفكرة الرئيسة

تلمع النجوم بفعل اندماج الأنوية الذرية لإطلاق الطاقة