# كيف تسطع الشمس- الجزء الثاني




**هل تساءلتم يوماً كيف تسطع الشمس؟ نقدم لكم في هذا الجزء الثاني وقبل الأخير قراءة لسبب سطوع الشمس. وفي حال لم تطلعوا على الجزء الأول من السلسلة، ننصحكم لمراجعة الرابط التالي.**

**لمحة عن الحل**

---

حدثت نقطة التحول في المعركة بين علماء الفيزياء النظرية وعلماء الجيولوجيا والبيولوجيا التجريبية عام 1896. في سياق تجربة صُممت لدراسة الأشعة السينية، التي اكتشفها ويلهلم رونتغن **Wilhelm Röntgen** في العام السابق، خزّن هنري بيكريل **Henri Becquerel** بعض الصفائح المغطاة باليورانيوم في درج مكتبٍ إلى جانب صفائح فوتوغرافية ملفوفة بورق داكن.

ولما كان الجو غائمًا في باريس لبضعة أيام، لم يتمكن بيكريل من "تنشيط" (**energize**) صفائحه الفوتوغرافية عن طريق تعريضها لأشعة الشمس كما كان يعتزم. وعند معالجته للصفائح الفوتوغرافية وجد، لدهشته، أطيافًا قوية لبلورات اليورانيوم الخاصة به. لقد اكتشف النشاط الإشعاعي الطبيعي، بسبب التحولات النووية لليورانيوم.

اتضحت أهمية اكتشاف بيكريل في العام 1903، عندما أعلن بيير كوري **Pierre Curie** ومساعده الشاب ألبرت لابورد **Albert Laborde**، أن أملاح الراديوم تبث الحرارة باستمرار، وكان الجانب فائق الاستثنائية من هذا الاكتشاف الجديد، هو أن الراديوم كان يبث الحرارة دون أن تنخفض درجة حرارته إلى درجة حرارة محيطه. لقد كشف الإشعاع المنبعث من الراديوم عن مصدر للطاقة لم يكن معروفًا من قبل، فاقترح كل من ويليام ويلسون وجورج داروين، على الفور تقريبًا، أن النشاط الإشعاعي قد يكون مصدر الطاقة المنبعثة من الشمس.

اكتشف أمير الفيزياء التجريبية الشاب، إرنست رزرفورد **Ernest Rutherford**، الذي كان حينها أستاذًا في الفيزياء لدى جامعة ماكجيل في مونتريال، الطاقة الهائلة الصادرة عن إشعاع جسيمات ألفا من المواد المشعة، وفي العام 1904 أعلن:

**"إن اكتشاف العناصر المشعة، التي تحرر كميات هائلة من الطاقة عند تحللها، ترفع بفعلها ذلك الحد الأقصى الممكن لأمد الحياة على هذا الكوكب، وتسمح بالوقت الذي قدّره علماء الجيولوجيا والأحياء لعملية التطور."**

لقد أتاح اكتشاف النشاط الإشعاعي احتمال أن تكون الطاقة النووية هي مصدر الإشعاع الشمسي. وقد حرر هذا التطور المنظّرين من الاعتماد على طاقة الجذب في حساباتهم. إلا أن الأرصاد الفلكية اللاحقة بينت أن الشمس لا تحتوي على كثير من المواد المشعة، بل إنها، بدلًا من ذلك، تحتوي في الغالب على الهيدروجين في حاله غازية.

علاوة على ذلك، فإن المعدل الذي تبث به الإشعاعيةُ الطاقةَ لا يعتمد على درجة حرارة النجم، بينما توحي مشاهدات النجوم أن مقدار الطاقة المنبعثة من نجم ما حساسة في اعتمادها على درجة الحرارة الداخلية للنجم. هناك شيء آخر غير الإشعاعية يتطلبه إطلاق الطاقة النووية داخل النجم.

في الأقسام التالية، سوف نتتبع الخطوات التي أدت إلى ما نعتقد الآن أنه الفهم الصائب لكيفية سطوع النجوم.

**تحديد الوجهة**

---

أتى التقدم الجوهري التالي، مرة أخرى، من اتجاه غير متوقع. في العام 1905، استنبط ألبرت أينشتاين العلاقة الشهيرة بين الكتلة والطاقة، \(E=mc^2\)، كنتيجة لنظرية النسبية الخاصة. وبينت معادلة أينشتاين أنه من الممكن ـ من حيث المبدأ ـ تحويل كمية ضئيلة من الكتلة إلى كميات هائلة من الطاقة. وقد أدت علاقته هذه إلى تعميم وتوسيع نطاق القانون الثاني لحفظ الطاقة في القرن التاسع عشر، الذي وضعه فون هيلمولتز وماير، ليتضمن تحويل الكتلة إلى طاقة.

**ما هي الصلة بين معادلة أينشتاين ومصدر طاقة الشمس؟** لم تكن الإجابة واضحة. لقد أدى علماء الفلك واجبهم في تحديد القيود التي يفرضها رصد النجوم على التفسيرات المحتملة لتوليد الطاقة النجمية. ففي العام 1919، قدم هنري نوريس رسل **Henry Norris Russell** ، عالم الفلك النظري الأمريكي الرائد، ملخصًا موجزًا للتلميحات الفلكية حول طبيعة مصدر الطاقة النجمية. وأكد رسل على أن

المفتاح الأكثر أهمية، هو درجة الحرارة العالية في باطن النجوم.

في العام 1920، بين آستون أن أربعًا من أنوية الهيدروجين أثقل من نواة الهيليوم

في العام 1920 اكتشف أف دبليو آستون **F.W. Aston** العنصر التجريبي الرئيسي في هذا اللغز. فقد أجرى قياسات دقيقة لكتل كثيرة من الذرات المختلفة، من بينها الهيدروجين والهيليوم. ووجد آستون أن أربعة من أنوية الهيدروجين كانت أثقل من نواة الهيليوم. هذا لم يكن الهدف الرئيسي من هذه التجارب التي أجراها، والتي كان الهدف الأكبر منها هو البحث عن نظائر النيون.

اعترف السير آرثر إدنغتون **Sir Arthur Eddington**، وهو عالم الفيزياء الفلكية البريطانية الألمعي، على الفور بأهمية قياسات آستون. وقد جادل إدينغتون في الخطاب الرئاسي الذي وجهه في العام 1920 للجمعية البريطانية للتقدم العلمي بأن قياس آستون لفرق الكتل بين الهيدروجين والهيليوم يعني أنه من الممكن أن تسطع الشمس بواسطة تحويل ذرات الهيدروجين إلى هيليوم. ومن شأن حرق الهيدروجين إلى هيليوم (وفقًا لعلاقة أينشتاين بين الكتلة والطاقة) أن يطلق ربما نحو 0.7٪ من الكتلة المكافئة للطاقة. من حيث المبدأ، قد يسمح هذا للشمس أن تتألق لحوالي 100 مليار سنة.

**وببصيرة مرعبة النفاذ، تابع إدينغتون التعليق على الصلة بين توليد الطاقة النجمية ومستقبل البشرية**

---

"إن صح أن الطاقة دون الذرية في النجوم تُستخدم بحريّة للحفاظ على آتوناتها الضخمة، فهذا على ما يبدو يقربنا شيئًا ما من تحقيق حلمنا في السيطرة على هذه القوة الكامنة، من أجل رفاه الجنس البشري ـــ أو لانتحاره."

**فهم العملية**

---

الخطوة الرئيسية التالية في فهم كيف تُنتج النجوم الطاقة من الاحتراق النووي، كانت نتيجة لتطبيق ميكانيكا الكم لشرح النشاط الإشعاعي النووي. جرى هذا التطبيق دون أي إشارة إلى ما يحدث في النجوم. وفقًا للفيزياء الكلاسيكية، أيُّ جسيمين لهما نفس إشارة الشحنة الكهربائية سوف يتنافران، كما لو أنهما صدّا بسبب تمييز مشترك لـ **"رائحة فم كريهة"**.

إن احتمال أن يقترب جسيمان لهما شحنة إيجابية من بعضهما كثيرًا هو صفر، تقليديًا. إلا أن بعض الأشياء التي لا يمكن أن تحدث في الفيزياء الكلاسيكية يمكن أن تظهر في العالم الحقيقي الذي تصفه ميكانيكا الكم على المستوى المجهري.

في العام 1928، استنبط جورج جامو **George Gamow**، عالم الفيزياء النظرية الأمريكي الروسي العظيم، صيغة ميكانيكية كمومية نتج عنها احتمال أن يتغلب جسيمان لهما شحنة موجبة على تنافرهما الكهربائي المتبادل والاقتراب من بعضهما البعض. هذا الاحتمال الميكانيكي الكمومي يعرف الآن عالمياً باسم "معامل جامو" (**Gamow factor**). وهو يستخدم على نطاق واسع لتفسير المعدلات المُقاسة لبعض الاضمحلالات المشعة (**radioactive decays**).

في العقد الذي أعقب عمل جامو التاريخي، استخدم أتكينسون وهوترمنز **Houtermans**، ولاحقًا جامو وتيلير **Teller**، معامل جامو لاستنباط المعدل الذي ستنبثق فيه التفاعلات النووية عند درجات الحرارة العالية التي يعتقد بوجودها في باطن النجوم. كانت هناك حاجة لمعامل جامو من أجل تقدير عدد المرات التي ستقترب فيها نواتان لهما نفس إشارة الشحنة الكهربائية من بعضهما بما يكفي لأن تندمجا مولدتين بذلك الطاقة وفقًا لعلاقة أينشاتين بين الكتلة الفائضة وانبعاث الطاقة.

في العام 1938، اقترب سي إف فون فيزيكير **C.F. von Weizsäcker** من حل مشكلة كيفية تألق بعض النجوم. واكتشف دورة نووية، تعرف الآن باسم "دورة الكربون–النيتروجين–الأوكسجين"، أو اختصارًا (**CNO**)، التي يمكن فيها حرق نوى الهيدروجين باستخدام الكربون كمحفز. إلا أن فون فيزيكير لم يتحقق من معدل إنتاج الطاقة في نجم ما بواسطة دورة **CNO**، كما أنه لم يدرس الاعتماد الحاسم على درجة حرارة النجوم.

**دورة CNO**

---

دورة CNO

بالنسبة للنجوم الأثقل من الشمس، تبين النماذج النظرية أن دورة CNO (الكربون–النيتروجين–الأوكسجين) الخاصة بالاندماج النووي، هي المصدر الرئيسي لتوليد الطاقة. ينتج عن هذه الدورة اندماج أربع أنوية هيدروجين (\(1H^\))، والبروتونات) بنواة هيليوم واحدة (\(4HE^\))، جسيمات ألفا)، التي توفر الطاقة للنجوم وفقًا لمعادلة أينشتاين. الكربون العادي، \(C{12}^\)، يلعب دور المحفز في مجموعة التفاعلات هذه، ثم يعاد إنتاجه. ولا يُنتج في هذه الدورة إلا النيوترونات منخفضة الطاقة نسبيًا فقط (\(v\)).

مصدر الصورة: اقتُبس هذا الشكل من مقالة جي إن باكال (J.N. Bahcall)، "النيوتريونات الشمسية"، مجلة العلوم، المجلد 221، العدد 1، يوليو\تموز 1969، ص. 28–37).

بحلول شهر نيسان/ أبريل من العام 1938، كان الأمر يبدو تقريبًا كما لو أن الساحة العلمية قد أُعدت عمدًا لدخول هانز بيتِه **Hans Bethe**، سيد الفيزياء النووية المرموق. كان البروفيسور بيته قد أكمل لتوه مجموعة كلاسيكية من ثلاث ورقات بحثية استعرض فيها وحلل كل ما كان معروفاً آنذاك عن الفيزياء النووية. عُرفت هذه الأعمال بين زملائه باسم "كتاب بيته المقدس". ونظم جامو مؤتمرًا صغيرًا من علماء الفيزياء وعلماء الفيزياء الفلكية في مدينة واشنطن العاصمة، لمناقشة الحالة المعرفية والمشاكل التي لم تُحل، الخاصة بالبنية الداخلية للنجوم.

في غضون الأشهر الست التالية، أو نحو ذلك، استخلص بيتِه العمليات النووية الأساسية التي ينصهر بواسطتها الهيدروجين (أي يندمج) إلى هيليوم في باطن النجم. الهيدروجين هو المقوم الأكثر وفرة في الشمس والنجوم المماثلة، والعنصر الأكثر وفرة في الكون حقًا.

وصف بيتِه نتائج حساباته في ورقة بحثية، مثلت قراءة مذهلة، بعنوان "**إنتاج الطاقة في النجوم**". لقد حلل بجزم الاحتمالات المختلفة للتفاعلات التي تصهر الأنوية، واختار أهم عمليتين نعتقد الآن أنهما المسؤولتان عن إشراق الشمس. إحدى هاتين العمليتين، هي ما يسمى "تفاعل سلسلة بروتون–بروتون" (**p-p chain**)، التي تبني الهيليوم من الهيدروجين، وهي المصدر الرئيسي لطاقة النجوم، من أمثال الشمس والنجوم وغيرها من النجوم ذات الكتل الأقل.

**تفاعل سلسلة بروتون–بروتون**

---

تفاعل سلسلة بروتون–بروتون

تفاعل سلسلة بروتون–بروتون

سلسلة بروتون–بروتون للتفاعلات النووية، المبينة في هذا الشكل، هي المصدر الرئيسي لإنتاج الطاقة في النماذج النظرية للشمس. كل تفاعل موسوم برقم على الزاوية العليا إلى يسار الصندوق الذي يحتويه. في التفاعل رقم 1، دُمجت نواتا هيدروجين (\(1H^\))، والبروتونات) لإنتاج نواة الهيدروجين الثقيل (\(2H^\)، والديوترون). هذه هي الطريقة المعتادة التي يبدأ بها الانصهار النووي في الشمس. في حالات نادرة، تبدأ هذه العملية عن طريق التفاعل 2. الديوترونات (**Deuterons**) التي تنتج في التفاعلات 1 و2 تندمج بالبروتونات لإنتاج عنصر ضوء الهليوم (\(3HE^\)). عند هذه النقطة، تتفكك سلسلة بروتون–بروتون في ثلاثة فروع، التي يحدد الشكل ترددتها النسبية. النتيجة النهائية لهذه السلسلة هي اندماج أربعة بروتونات في نواة هيليوم اعتيادية واحدة (\(4HE^\)) مع إطلاق الطاقة للنجم وفقًا لمعادلة أينشتاين. وتنبعث جسيمات تسمى "النيوتريونات" (\(\nu\)) في عمليات الاندماج هذه. ويبين الشكل طاقات هذه الجسيمات في وحدات من ملايين الإلكترون فولت (**MeV**). أما التفاعلات 2 و4، فلم يناقشها هانز بيتِه.

مصدر الشكل: اقتُبس هذا الشكل من جي إن باكال **J.N. Bahcall**، "النيترونات الشمسية"، مجلة العلوم، المجلد 221، العدد 1، يوليو\تموز 1969، ص. 28–37.

دورة **CNO**، هي العملية الثانية التي أخذها فون فايتسكر بعين الاعتبار أيضًا، وهي الأكثر أهمية في النجوم ذوات الكتل التي تفوق كتلة الشمس. استخدم بيتِه نتائجه لتقدير درجة الحرارة المركزية للشمس وحصل على قيمة بحدود 20٪ مما نعتقد أنها القيمة الصحيحة في الوقت الراهن (16 مليون درجة كلفن)[1].

علاوة على ذلك، بين بيتِه أن حساباته دلت على علاقة بين الكتلة النجمية وإشعاعية النجوم، تتوافق على نحو مُرضٍ مع الأرصاد الفلكية المتوافرة.

في العقدين الأولين بعد نهاية الحرب العالمية الثانية، أُضيفت كثير من التفاصيل المهمة لنظرية بيتِه عن الانصهار النووي في النجوم. وبفارغ الصبر، عاد علماء الفيزياء وعلماء الفيزياء الفلكية البارزون، وعلى وجه الخصوص أي جي دبليو كاميرون **A.G.W. Cameron** ودبليو أي فاولر **W.A. Fowler** واف هويل **F. Hoyle** وإي إي سالبتر **E.E. Salpeter** وإم شوارزشيلد **M. Schwarzschild** وزملاؤهم التجريبون، إلى سؤال: **كيف تُوَلِّدُ نجوم مثل الشمس الطاقة؟**.

**كانت الإجابة معروفة من حيث المبدأ من أعمال بيتِه:** تُنتج الشمس الطاقة التي تبثها بواسطة حرق الهيدروجين. وفقًا لهذه النظرية، فإن باطن الشمس هو نوع من قنبلة نووية حرارية مُحكمة على مقياس عملاق. **[2]** تؤدي هذه النظرية إلى حساب ناجح للألق المرصود من النجوم الشبيهة بالشمس ويوفر الأساس لفهمنا الحالي كيفية تألق النجوم وتطورها على مر الزمن. إن فكرة الاندماج النووي الذي يزود النجوم بالطاقة، هي أحدى الركائز الأساسية لعلم الفلك الحديث، وتستخدم بشكل روتيني من قبل العلماء في تفسير أرصاد النجوم والمجرات.

قاد فاولر، أو "ويلي" ـكما كان معروفًا عالميًاـ فريقًا من الزملاء من مختبر كيلوغ **Kellogg** التابع لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، وألهم علماء الفيزياء في كل أنحاء العالم، لقياس أو حساب التفاصيل ذات الأهمية القصوى في سلسلة بروتون–بروتون ودورة **CNO**. كان هناك كثير من العمل الذي يتعين القيام به، وكانت التجارب والحسابات صعبة. إلا أن العمل أُنجز؛ لأن فهم تفاصيل توليد الطاقة الشمسية كان مثيرًا للاهتمام. وسرعان ما تحولت معظم جهود فاولر وزملائه (إم بوربيج **Burbidge** و جي آر بوربيج وإف هويل وكاميرون) إلى معالجة مشكلة كيفية إنتاج العناصر الثقيلة، التي تتطلبها الحياة، في النجوم.

وللحكاية بقية، تابعوها في الجزء الثالث والأخير من هذا المقال.

### ملاحظات

---

**[1]** وفقًا للنظرية الحديثة عن تطور النجوم، الشمس تُسخن إلى درجات حرارة هائلة يمكن أن يحدث عندها الاندماج النووي بواسطة طاقة الجذب التي تنبعث عندما تنقبض الكتلة الشمسية من سحابة غازية أولية ضخمة. وهكذا، كان كالفن وغيره من علماء الفيزياء في القرن التاسع عشر على حق جزئيًا، انبعاث طاقة الجذب أشعل توليد الطاقة النووية في الشمس.
**[2]** إن اعتماد معامل جامو الحساس على الطاقة النسبية لجسيمين مشحونين هو ـكما فهمنا الآنـ ما يوفر "ترموستات" تنظيم درجة حرارة النجوم.

- التاريخ: 2016–04–16
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#الشمس #سلسلة كيف تسطع الشمس #مصدر طاقة الشمس #الطاقة النجمية #توليد الطاقة الشمسية

### المصادر

- nobelprize
- الصورة

### المساهمون

- ترجمة
  - هدى الدخيل
- مُراجعة
  - سومر عادلة
- تحرير
  - منير بندوزان
  - أسماء إسماعيل
- تصميم
  - علي كاظم
- نشر
  - مي الشاهد