42

التخليق النووي، ونشأة الكون

Nucleosynthesis and cosmic evolution

كيف نشـأت المواد الخام للكون من الانفجار العظيم، وكيف تغيرت بعد ذلك مع مرور الوقت لتخلـق المزيج من المادة الذي نراه في الكون اليوم؟ وتكمن الإجابة في مجموعة متنوعة مـن العمليات المختلفة الموحدة تحت اسم التخليق النووي.

جميـع المادة في الكون اليـوم مكونة من ذرات، وكل ذرة تتكون مـن نواة ذرية (مجموعة من بروتونات ونيوترونات ثقيلة نسـبيًا) محاطة بسـحابة من إلكترونات أخف كثيرًا. وتتميز ذرات العناصر المختلفة عن بعضها البعض بعدد البروتونات الموجودة في النواة بينما يؤثر عدد النيوترونات على اسـتقرارها. لذا فإن تصنيع العناصر في الأسـاس هو مسـألة تكون الأنوية المختلفة في عملية تعرف باسم التخليق النووي.

إنشـاء سلاسـل مختلفة من التخليق النووي كان هو موضوع الفيزيـاء الفلكية في القرن العشرين. على سبيل المثال، داخل نجوم النسق الأساسي منخفضة الكتلة قدمت كل من سلسلة

الخط الزمني

1904م	1930م	1948م
حدد «هارتمـان» وجود غاز بـين نجمي بارد عـن طريق تأثيره على أطياف النجوم.	أوضح «روبـرت ترامبلر» آثار امتصاص الغبار بين النجمي في درب التبانة.	أوضحت الورقـة البحثية ألفر بيتا جامو الطريقة التي يمكن أن تكون العناصر قد تكونت بها في الانفجار العظيم.

تفاعل بروتونات مع بروتونات، ودورة كربون-نيتروجين-أكسجين (انظر صفحتي 115 و116) طرق تحول نواة الهيدروجين (نواة أبسط ذرة، وتتكون من بروتون واحد) إلى هيليوم. وفي الوقت نفسه يسمح تفاعل ألفا الثلاثي (انظر صفحة 169) في العمالقة الحمر لنواة الهيليوم بأن تتحول إلى كربون وأكسجين، ويكمل الاندماج النووي في النجوم العمالقة الضخمة إلى ما هو أبعد من ذلك فتتكون مواد معقدة على نحو متزايد إلى أن تصل إلى الحديد والنيكل (انظر صفحة 181). وأخيرًا تضع انفجارات المستعر الأعظم الدرجة النهائية على السلم الذي يؤدي إلى أثقل العناصر الطبيعية (انظر صفحة 187).

بناء الذرات الأولى

ولكن كيف أتى الهيدروجين نفسه- الدرجة الأولى لهذا السلم- إلى حيز الوجود؟ استنتجت الأساسيات في أواخر الأربعينيات على يد «جورج جامو»، و«رالف ألفر» في

ألفير، وبيث، وجامو

لم يكن للورقة البحثية القصيرة، التي أوضحت لأول مرة عام 1948 التخليق النووي للانفجار العظيم، مؤلفان فحسب، بل ثلاثة، وهم: «رالف ألفر»، و«هانز بيث»، و«جورج جامو». على نحو غريب قام «جامو» بتضمين اسم زميله «بيث» غيابيًّا كلعبة على الحروف الثلاثة الأولى من الأبجدية اليونانية (ألفا، وبيتا، وجاما). «ألفير»، الذي كان طالب دراسات عليا يعمل على تحضير الدكتوراه في ذلك الوقت، اعترف بأنه أعجب بنكتة «جامو» الصغيرة، مع خوفه من أن تحجب مساهمته بسبب مشاركته لاثنين من علماء الفيزياء الفلكية المرموقين وليس واحد. ومع ذلك، ساعد «بيث» من خلال مراجعة الورقة قبل النشر، وساهم بعد ذلك في مواصلة تطوير النظرية.

1952م

اكتشف «فريد هويل»، و«ألفريد فاولر» تفاعل اندماج ألفا الثلاثي لبناء العناصر مثل الكربون.

1957م

شرحت الورقة البحثية B2FH كيف تتكون العناصر الثقيلة في النجوم الأكثر ضخامة والمستعرات العظمى.

1961م

وجد «جيدو مانش»، و«هارلود زيرين» دليلًا على سحب الغاز في الهالة المجرّية وإكليل مجرّة.

1977م

طرح «كريستوفر ماكي»، و«جيرميا أوستريكر» نموذجًا ذا ثلاث مراحل للواسط بين المجرّي.

نظرية تعرف عامة باسم «التخليق النووي للانفجار العظيم». وقد بنى الاثنان على العمل السابق الذي قام به «جامو» لتخيل كرة نارية بدائية تتمدد بسرعة في الكون المبكر، وتتكون كلها من نيوترونات بدأت في الانحلال تلقائيًا إلى بروتونات وإلكترونات عندما قل الضغط المحيط.

وبالتالي أصبح تشكل أنوية أكثر تعقيدًا من الهيدروجين سباقًا مع الزمن- كم عدد النيوترونات التي تستطيع البروتونات اكتساحها لتكوين نواة أثقل قبل أن تنحل النيوترونات نفسها؟.

«نحن أجزاء من مادة نجمية بردت عن طريق المصادفة، إننا أجزاء من نجم ضال.»
آرثر إدينجوتن

وعندما نظر «ألفر»، و«جامو» إلى المشكلة من حيث احتمالات التقاط مختلف الجسيمات للنيوترونات، وجدا أن أكثر العناصر وفرة في الكون حتى الآن هو الهيدروجين، الذي يمثل 75 ٪ من كتلة الكون، والهيليوم الذي يمثل الـ25 ٪ الباقية وتكونت كميات ضئيلة من الليثيوم والبريليوم أيضًا بهذه الطريقة واتضح بعد ذلك أن هذه التوقعات تطابق القياسات الجديدة لوفرة العناصر الكونية. الخطأ الكبير الوحيد في الورقة البحثية كان افتراض مؤلفيها أن جميع العناصر قد تكونت بفعل التقاط النيوترون بهذه الطريقة.

وفي الواقع، هذا مستحيل لأن «فراغات الكتلة» التي فيها الأنوية التي لها تكوينات معينة تتفكك بقدر السرعة التي يمكن أن تتشكل بها. ومثل هذه الفراغات لا يمكن سدها عن طريق إضافة جسيمات خطوة في كل مرة، ويعني هذا أن البريليوم المتوسط هو أثقل عنصر يمكن تكوينه من البداية بهذه الطريقة. وبدلًا من ذلك، يتطلب تصنيع عناصر أثقل قفزة في عدد الجسيمات من النوع الذي لا يمكن أن يوفره سوى تفاعل ألفا الثلاثي.

مواد النجوم

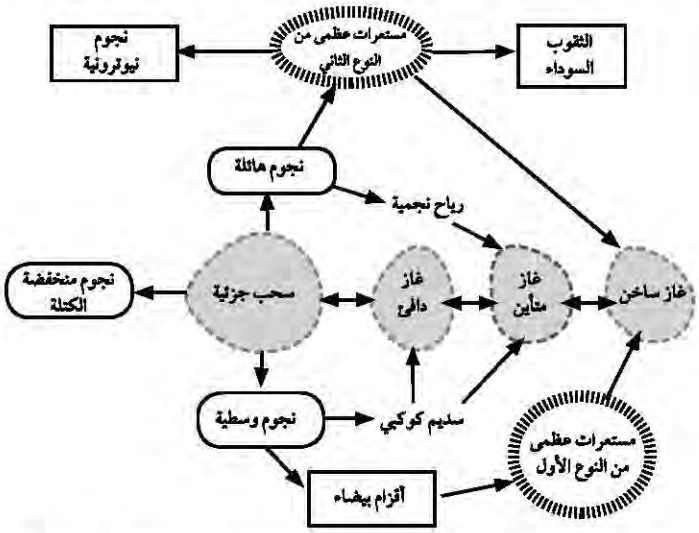
أدى الفهم الأفضل لكيفية تكون العناصر والطريقة التي تتغير بها وفرتها بمرور الزمن إلى نشأة نظرة أكثر انتظامًا بكثير لدورات حياة النجوم وفي الوقت نفسه، كشف عن صورة أعمق للعلاقة بين النجوم والوسط بين النجمي؛ أي المادة التي تحيط بها ومنها تُولَد.

وقد اكتشف دليل وجود سحب كبيرة من المواد بين النجوم في النصف الأول من القرن العشرين. وقد نسب الكثير من الفضل إلى «إي إي برنارد» لتصويره للسدم المظلمة- السحب الغازية والغبارية المعتمة التي لا ترى إلا عندما تظللها خلفية أكثر سطوعًا- لكن عالم الفلك الألماني «يوهان هارتمان» كان أول من يثبت وجود السحب الغازية الباردة غير المرئية عن طريق التعرف على البصمات الباهتة التي تركتها خطوط الامتصاص الخاصة بها على أطياف النجوم الأبعد (انظر صفحة 94).

ومنذ السبعينيات، اشترك معظم علماء الفلك في نموذج ثلاثي المراحل للوسط بين النجمي، بمراحل مختلفة تميزها عن بعضها البعض حرارتها وكثافتها. تتكون المرحلة الباردة من سحب كثيفة نسبيًا من ذرات الهيدروجين المحايد في بضع عشرات الدرجات فوق الصفر المطلق، والمرحلة الدافئة تحتوي على هيدروجين محايد ومتأين أكثر سخونة درجة حرارته آلاف الدرجات، والمرحلة الساخنة تتكون من هيدروجين متأين ومشتت جدًا وعناصر أثقل ودرجات حرارتها مليون درجة أو أكثر.

في نموذج التطور الدوري المسمى بـ«النافورة المجرّية» لا يشارك الوسط بين النجمي في المرحلة الباردة الكثيفة قبل أن يحثها بعض التأثير الخارجي (ربما مقابلة نجم مار من خلال موجة حلزونية كثيفة).

أو موجة صدمية من مستعر أعظم يوشك على الانهيار بسبب جاذبيته ما يؤدي إلى بدء عملية تكون النجم (انظر الفكرة 21). بمجرد أن تظهر النجوم الأولى في الوسط يقوم إشعاعها بتدفئة الغاز المحيط وتأيينه مما يؤدي إلى نشأة سديم نجمي متوهج. عندما تندفع أكثر النجوم المولودة حديثًا نحو نهاية حياتها، تؤدي الرياح النجمية القوية والموجات الصدمية للمستعر الأعظم إلى ظهور فقاعات ضخمة في الوسط بين النجمي، وتسخن بعض المواد كثيرًا حتى يتسنى لها الهروب من قرص المجرة تمامًا ليكون ما يسمى بـ «غاز إكليلي». على مر ملايين السنين، يبرد هذا الوسط بين النجمي الساخن تدريجيًا ويتراجع نحو القرص مما يؤدي إلى إثرائه بالمزيد من العناصر الثقيلة.



هذا الرسم التخطيطي يبين العناصر الأساسية لـ«بيئة المجرة» التي من خلالها تتم معالجة المادة في النجوم وإعادتها إلى الوسط بين النجمي.

هذه مجرد صورة عامة للعملية التي تحدث في مجرة عادية، لكن بتكرر حدوث هذه الأحداث نفسها في أنحاء الكون فإنها تثريه تدريجيًا بكميات متزايدة من العناصر الأثقل. ومع ذلك يبدو أنه من غير المحتمل أن النجوم سينفد وقودها في أي وقت قريب ـ الغاز في الوسط

بين النجمي لمجرتنا اليوم لا يزال به 70 ٪ هيدروجين، و28 ٪ هيليوم بالكتلة، مع نسبة 1.5 ٪ فقط من العناصر الثقيلة تظهر لأكثر من 13 مليار سنة من التخليق النووي النجمي.

الفكرة الرئيسة

كوننا هو مصنع لتصنيع العناصر