50

فكرة

يجب أن تعرفها عن

الفلك

تأليف

Giles Sparrow

ترجمة

مجدي صابر محمد

هبة طاهر عبد العزيز

الناشر

المجموعة العربية للتدريب والنشر

2020

حقوق الطبعة الإنجليزية

Quercus

English Edition Copyrights

50 Ideas You Really Need To Know Astronomy

This edition first published in 2016
© 2016 Quercus Editions Ltd.

حقوق الطبعة العربية

عنوان الكتاب: 50 فكرة يجب أن تعرفها عن الفلك

تأليف: Giles Sparrow

ترجمة: مجدي صابر محمد / هبة طاهر عبد العزيز

الطبعة الأولى

سنة النشر: 2020

الناشر: المجموعة العربية للتدريب والنشر

18 شارع أحمد فخري
مدينة نصر- القاهرة- مصر

تليفون: 23490242 (00202)

فاكس: 23490419 (00202)

الموقع الإلكتروني: www.arabgroup.net.eg

E-mail: info@arabgroup.net.eg

E-mail: elarabgroup@yahoo.com

حقوق النشر:

جميع الحقوق محفوظة للمجموعة العربية للتدريب والنشر ولا يجوز نشر أي جزء من هذا الكتاب أو اختزان مادته بطريقة الاسترجاع أو نقله على أي نحو أو بأية طريقة سواء كانت إلكترونية أو ميكانيكية أو خلاف ذلك إلا بموافقة الناشر على هذا كتابة ومقدما.

سبارو، جايلز
50 فكرة يجب أن تعرفها عن الفلك/
تأليف: جايلز سبارو.
ترجمة: مجدي صابر محمد / هبة طاهر عبدالعزيز.
القاهرة: المجموعة العربية للتدريب والنشر،
2020 ـ ط1
312 ص: 17×22 سم
الترقيم الدولي: 2-183-722-977-978
1- الفلك
أ- محمد، مجدي صابر (مترجم)
ب ـ عبدالعزيز، هبة طاهر (مترجمة)
ج ـ العنوان
ديوي: 520
رقم الإيداع: 2216/ 2020

تنويه هام:

إن مادة هذا الكتاب والأفكار المطروحة به تعبر فقط عن رأي المؤلف ـ ولا تعبر بالضرورة عن رأي الناشر الذي لا يتحمل أي مسؤولية قانونية فيما يخص محتوى الكتاب أو عدم وفائه باحتياجات القارئ أو أي نتائج مترتبة على قراءة أو استخدام هذا الكتاب.

المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدمة	7
01 **مكاننا في الكون**	10
02 **رؤية السماوات**	16
03 **مملكة الشمس**	22
04 **نشأة النظام الشمسي**	28
05 **هجرة الكواكب**	34
06 **نشأة القمر**	40
07 **الماء على كوكب المريخ**	46
08 **الكواكب الغازية والجليدية العملاقة**	52
09 **الأقمار المحيطية**	58
10 **الكواكب القزمة**	64
11 **الكويكبات والمذنبات**	70
12 **الحياة في النظام الشمسي؟**	76
13 **شمسنا - نجم عن كثب**	82
14 **قياس النجوم**	88
15 **كيمياء النجوم**	94

16 مخطط هرتسبرنج-راسل 100
17 بنية النجوم 106
18 مصدر طاقة النجوم 112
19 دورة حياة النجوم 118
20 السدم، وتجمعات النجوم 124
21 ولادة النجوم 130
22 النجوم القزمة 136
23 النجوم الثنائية والمتعددة 142
24 البحث عن الكواكب الخارجية 148
25 الأنظمة الشمسية الأخرى 154
26 مناطق جولديلوكس 160
27 العمالقة الحمر 166
28 النجوم النابضة 172
29 العمالقة الفائقة 178
30 المستعر الأعظم 184
31 بقايا نجمية 190
32 النجوم الثنائية المتطرفة 196
33 الثقوب السوداء 202
34 مجرة درب التبانة 208
35 قلب مجرة درب التبانة 214
36 أنواع المجرات 220
37 المجرات المتصادمة والمتطورة 226

38 النجوم الزائفة، والمجرات النشطة........................ 232
39 الكون الفسيح.. 238
40 الكون المتوسع.. 244
41 الانفجار العظيم.. 250
42 التخليق النووي، ونشأة الكون 256
43 النجوم الضخمة والمجرات البدائية........................ 262
44 حافة الكون 268
45 المادة المظلمة 274
46 الطاقة المظلمة 280
47 النسبية وموجات الجاذبية 286
48 الحياة في الكون.. 292
49 الأكوان المتعددة.. 298
50 مصير الكون 304
مسرد المصطلحات 309

المقدمة

بالنظر إلى مدى ندرة تأثير سـلوك الأجرام المنتشرة في السـماء ليلاً بشـكل مباشر على حياة الإنسان، قد يتعجب البعض من الادعاء القائل بأن علم الفلك هو أقدم العلوم. ففي واقع الأمر، تعود جذور علم الفلك إلى الفترة التي سبقت تسجيل علم التاريخ - فأقدم خرائط النجوم المعروفة كانت مرسـومة على جدران أحد الكهوف في لاسكو بفرنسا، وهي التي تعود أصولها إلى منتصف العصر الجليدي الأخير، أي منذ حوالي 17,300 سنة. للوهلة الأولى، تبدو لك هذه الخريطة مجرد رسم جميل لثور هائج، بيد أنه بالفحص الدقيق لها تجد أنها تعرض لك مجموعة من النقاط الموجودة خلف سنام هذا الحيوان. وهذا ما يمكن اعتباره رسمًا جليًّا وواضحًا لمجموعة نجوم الثريا في برج الثور الحديث.

بالنسبة إلى القدماء، لحركة كل من الشمس والقمر والنجوم علاقة مهمة بما يجري على سطح الأرض. وعلى الرغم من أن التكنولوجيا قد قللت من تعرضنا لمختلف تغيرات المواسـم، ولكن بالنسـبة للقدماء، كانت تلك التغيرات بمثابة حياة أو موت. أما في عصرنا الحديث، فلا يزال لعلم الفلك تأثير ولكن بأشـكال أخرى، وغالبًا ما يكون ظاهرًا من خـلال الابتكارات العلمية التي يلهمنا بها (وتشـهد على ذلك كاميرا CCD الموجودة في هاتفك الذكي). ورغم ذلك كله، قد يكمن

الســحر الحقيقي لعلم الفلك في عصرنا الحديث المحير هذا في الحقيقة التي تقول إنه يتعلق بأسرار اللانهائية، حيث إنه قريب أكثر من أي علم آخر من شرح وتفسير نشأتنا وحياتنا.

لذا، يحتفي هذا الكتاب بالأفكار العظيمة والهائلة لعلم الفلك، هذا بالإضافة إلى العقول الذكية الثاقبة غير التقليدية والمتمردة في بعض الأحيان التي ســاعدت في تشــكيل مثل تلك الأفكار. من خلال الخمسين فكرة الموجودة بهذا الكتاب، آمل أن أتمكن من تناول كل ما يتعلق بعلم الفلك، بدءًا من الكواكب المتنوعة والعوالم الأخرى الموجودة في مجرتنا، ومرورًا بحياة وموت النجوم، ووصولًا إلى بنية وأصول الكون نفســه. وتعود أصول بعض النظريات المطروحة هنا لعدة قرون، بينما ستجد بعضًــا آخر منها من العصر الحديث المدهش، وهناك بعض آخــر منها لا يزال قيد الصياغة – وهذا جانب من الجوانب الرائعة والجذابة للفلك كعلم، وهو كونه يمثل الكون نفسه. ومن ثم، لا يمكن أبدًا أن يتوقف ولا يمكن أبدًا أن يظل ثابتًا. إن اختياري لموضوعات هذا الكتاب قائمة على الاختيار الشخصي لا محالة، فقد شكلتها وفقًا لاهتماماتي ومناقشاتي مع مجموعة من علماء الفلك، ولكن آمل أن أقدم في هذا الكتاب ما يجذب انتباه الجميع ويكون مصدرًا لإلهامهم.

جايلز سبارو

01

مكاننا في الكون

Our place in the Universe

إن قصة علم الفلك من القصص التي يمكننا من خلالها تطوير فهمنا لمكاننا في هذا الكون، في الوقت الذي تقل فيه أهميتنا به بشكل تدريجي. حالما نصبح في مركز الكون، سنجد عالمنا قد أصبح مجرد نقطة سوداء وسط هذا الكون الشاسع.

لطالما انشغل الإنسان بالنجوم على مدار التاريخ، ليس فقط بمجرد سرد حكايات عنها وإحاطتها بقدر كبير من الأهمية، ولكنه استخدمها كذلك في أغراض علمية مثل حساب الزمن. على سبيل المثال، كان المصريون القدماء يعلمون اقتراب موعد موسم فيضان نهر النيل عندما كانوا يشاهدون ظهور نجم الشعرى (سيروس)، وهو أكثر النجوم لمعانًا وإشراقًا في السماء، قبل الفجر بوقت قليل. وعلى الرغم من ذلك، هناك فرع مهم آخر من الأفكار القديمة، ألا وهو علم التنجيم، الذي شهد المحاولات الأولى التي شكلت نظرتنا لمكاننا في هذا الكون.

كان فكر المنجمين القدماء قائمًا على فكرة أن السماوات هي مرآة الأرض؛ حيث رأوا أن حركات كل من الشمس والقمر والكواكب السيارة بين النجوم الثابتة التي تُعرف باسم الأبراج لا تؤثر

الخط الزمني

150م	1543م	1608م
أيد كتاب المجسطي للعالم الفلكي بطليموس وجهة النظر التقليدية التي تقر بأن الأرض هي مركز الكون.	نشر كوبرنيكوس فكرته وقال إن الشمس هي مركز الكون.	رسم كيبلر المدارات في صورة قطع ناقص، بدلاً من الدوائر، وهذا ما وضح لنا في النهاية حركة الكواكب.

بالضرورة على ما يحدث على الأرض، ولكنها تعكسها. ومن ثم، إذا وقعت مجاعة كبيرة في فترة تزامن كل من كوكب المريخ وكوكب المشتري (أي في حالة قربهما من بعضهما البعض في السماء) في برج الثور، فمن الممكن أن نتوقع حدوث حدث مشابه في حالة اقتراب هذين الكوكبين ومحاذاتهما معًا في هذا البرج مرة أخرى. والأهم من ذلك، أنه لم يكن من الصعب التنبؤ بحركة الكواكب بشكل كامل. ومن ثم، إذا كان بإمكانك التنبؤ بحركاتها، فبإمكانك التنبؤ بالأحداث التي يمكن أن تحدث مستقبلاً على الأرض.

الأرض مركز الكون

«هذا الكون الشاسع الذي نعيش فيه يبدو كحبة من الرمال وسط محيط شاسع.»

كارل ساجان

لقد كان التحدي الكبير إذن هو التوصل إلى نموذج يتسم بقدر من الدقة يكفي لتفسير حركات الكواكب. وقد أعاقت الفكرة التي كانت سائدة وقتئذٍ والتي كانت تقر بأن الأرض ثابتة في الفضاء معظم الفلكيين القدماء (فنحن لا نشعر بحركتها بأي حال من الأحوال). وفي ظل عدم وجود أي تلميحات أو معلومات ولو بسيطة عن حجم الكون، فقد افترض أولئك العلماء أن القمر والشمس والكواكب والنجوم الأخرى تدور في مسارات دائرية وبسرعات متفاوتة، وبهذا الشكل تنتج لنا الحركات التي نراها ظاهرة في السماء (انظر المربع، انظر ص 12).

ولسوء الحظ، لم يقدم النموذج القائم على فكرة أن الأرض محور الكون، على الرغم من بساطته الجذابة، تنبؤات دقيقة. فسرعان ما غيرت الكواكب من مساراتها المتوقعة في السماء، مما دفع علماء الفلك إلى تقديم العديد من التخمينات التي لم يكن منها فائدة لتصحيح هذه الفكرة.

1781م

قام ويليام هيرشل بعمل أول خريطة لدرب التبانة، وهي التي عرضت مجرتنا في صورة سطح مستوٍ من النجوم.

1924م

وضح إدوين هابل أن السدم الحلزونية عبارة عن مجرات منفصلة تبعد عنا بملايين السنين الضوئية.

1929م

وضح هابل أن الكون يتوسع – وهذا هو أساس نظرية الانفجار الكبير Big Bang Theory.

وقد بلغ هـذا النموذج ذروته في القـرن الثاني الميلادي من خلال عمل عـالم الفلك اليوناني المصري بطليموس في الإسـكندرية. لمزيد من التوضيح، تصور هذا العـالم في كتابه العظيم، المجسطي، أن الكواكب تدور في مسارات دائرية تسـمى أفلاك التدوير، والتـي تقـع مراكزها حول مدارات الأرض. إن النموذج الذي قدمه بطليموس، والذي أيدته الإمبراطورية الرومانية ومـن خلفهـا مـن المسـيحيين والمسلمين، استمر لما يزيد عن ألف عام. واهتم علماء الفلك المعاصرون إلى حد كبير بتعديل وتحسـين طرق حسـاب حـركات الكواكـب أملاً منهم في تعديـل المعامـلات المتنوعة لهـذا النموذج وتحسـين الأمـور التي يمكنه التنبؤ بها.

حركات الكواكب

بوجه عام، تنقسـم الكواكب في سـماء الأرض إلى مجموعتين: الكواكب «الدنيـا»، مثل كوكبي عطـارد والزهرة، وهي التي تدور في مدارات حول الشمس في السـماء، لكنها لا تبتعد أبدًا عنهـا ومن ثم تظهر دائـماً في الغرب عقب غروب الشـمس، أو في الشرق قبل شروق الشـمس. عـلى الجانب الآخر، هناك الكواكب «العليا» – وهي المريخ والمشـتري وزحل وأورانوس ونبتون، وهي كواكب تسير في مدارات تجعلها تلف حول السماء بأكملها، ويمكن أن تظهر على الجانب الآخر من السماء المواجهة للشـمس. بيد أن حركـة تلك الكواكب تكون معقدة بسـبب الحلقـات الارتجاعية، إنها الحلقات التي تظهر عندما تبطئ تلك الكواكب حركتها وتعكسها بشكل مؤقت ناحية الشرق، وهذا ما يجعلها تنحرف عن مسـارها أمام النجوم قبل أن تواصل في النهاية مسـارها المعتاد. إن تلك الحركة الارتجاعية كانت أعظم تحدٍّ لنماذج النظام الشمسي القائم على أن الأرض مركز الكون، وقد أوضـح بطليموس هذا الأمر بأن وضـع الكواكب العليا على مدارات داخل مدارات عرفت باسم أفلاك التدوير. أما في النظام الشـمسي القائم على أن الشـمس مركز الكون، كان من السهل للغاية تفسير هذه الحركة الارتجاعية باعتبارها من الآثار الناجمة عن تغيير وجهـات النظر نظرًا لأن الأرض ذات الحركة الأسرع حلت محل أحد الكواكب العليا.

الشمس مركز الكون

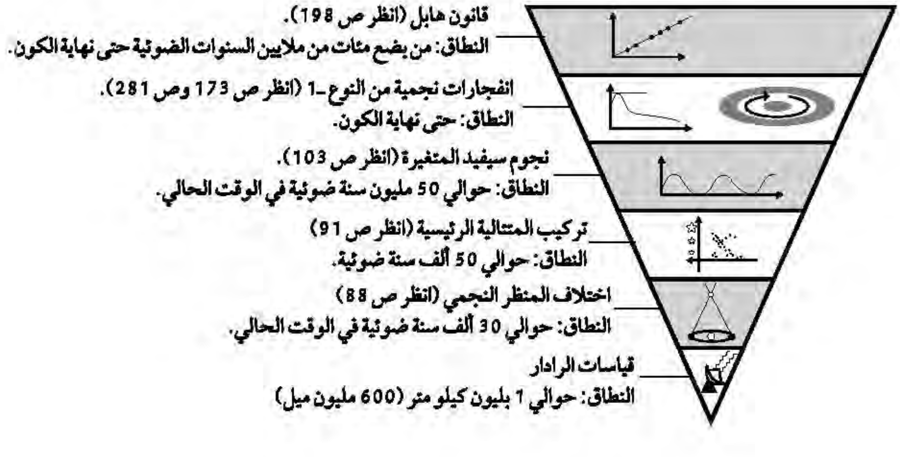
مع بـــزوغ فجر عصر النهضة الأوروبية، بدأت وجهة النظـــر طويلة الأمد التي قامت على أن الحكمة القديمـــة لا يمكن قهرها من حيث الانهيار بين المفكرين في عدد من المجالات، وبدأ بعض علماء الفلك في التســاؤل عــما إذا كان نموذج بطليموس الذي أقر بــأن الأرض هي مركز الكون صحيحًا أم لا في الأســاس. في عام 1514، ألف الكاهن البولنــدي نيكولاس كوبرنيكوس كتابًا صغــيرًا يعرض فيه إمكانية تفســير الحركات الملحوظة لكل ما هو في الســماء بناءً على الفكرة التي تدور حول أن الشــمس مركز الكون. لمزيد من التوضيح، ووفقًا لهذه الفكرة، فإن الأرض ليســت سوى مجرد كوكب ضمن الكواكب العديدة التي تدور في مسارات دائرية حول الشمس، وأن القمر فقــط هو الذي يدور في مداره حول الأرض (إنها النظرية التي قدمها بالفعل العديد من الفلاســفة اليونانيين القدماء). بدأت فكرة كوبرنيكوس تترسخ بعد نشر أهم كتبه والذي تم نشره عقب وفاته، إنه كتاب «ثورات الأجرام الســماوية On the Revolutions of the Heavenly Spheres» في عام 1543، بيــد أن المدارات الدائرية التي تحدث عنها مثلت عقبات عندما تعلق الأمر بمدى دقة التنبؤات. ولم يتم التوصل إلى حل لهذه المشــكلة حتى جاء عام 1608 الذي قدم فيه عالم الفلك الألماني يوهانس كبلر نموذجًا جديدًا قال فيه إن المدارات تتخذ شكل القطع الناقص، وهذا ما نجم عنه حل غموض حركات الكواكب. لقد نفي عالمنا من موقعه في مركز الكون.

وسرعــان ما أدرك علماء الفلك أن الثورة الكوبرنيكية أدت إلى التقليل من مكانتنا في الكون بشــكل أكبر. فإذا كانت الأرض تتحرك من جانب إلى آخر على مدار واسع وشاسع، فمن المؤكد أن تأثير المنظر (أي التحول الظاهري للأجسام القريبة عند النظر إليها من منظور مختلف) لا بد أن تؤثر على أماكن النجوم؟ إن حقيقة عــدم إمكانية رؤية المنظر، حتى في ظل وجود أدوات المراقبة الجديدة كالتلســكوب (انظر الصفحة 16) تشير ضمنيًا إلى أن النجوم كانت بعيدة للغاية بشكل لا يمكــن تخيلــه - أي أنها ليســـت مجرد أجسام كروية مضيئة تدور حول النظام الشمــسي،

ولكنها شـــموس بعيدة قائمة بذاتها. والأكثر من ذلك أن التلسكوبات كشفت عن عدد لا حصر لــه من النجوم غير الظاهرة وغير المرئية، كما أوضحت أن النطــاق القديم لدرب التبانة مكون من سحب نجمية كثيفة.

الكون الأكثر اتساعًا

في أواخر القرن الثامن عشر، بدأ علماء الفلك في وضع خرائط لبنية وهيكل مجرتنا، المســتوى المسطح من النجوم (والذي اتضح فيما بعد أنه عبارة عن قرص ثم شكل حلزوني - انظر ص 208) الذي كان من المعتقد أنه يضم الخلق كله. في البداية، كانت الأرض محظوظة مرة أخرى نظرًا لمكانها القريب من مركز المجرة، ولم يتم التأكد من موقعنا الحقيقي في نظامنا الشمسي حتى القرن العشرين - وهي فترة تقرب من 26 ألف ســنة ضوئية قضيناها في جزء يصعب ملاحظته إلى حد ما في درب التبانة. وبحلول ذلك الوقت، نتج عن تطور فهمنا للنجوم، والذي كان من ضمنه معرفة القياسات الدقيقة لمسافاتها (انظر ص 245) أنه حتى شمسنا لم تكن بهذا القدر من الخصوصية والتميز. بعبارة أخرى، إنها في واقــع الأمر مجرد نجم قزم أصفر اللون يشرق من خلال النجوم البالغ عددها 200 بليون نجم أو أكثر في مجرتنا.



يتم اســتخدام مجموعة كبيرة من الطرق والأســاليب المختلفة لقياس مسافات الأجسام الفلكية القريبة والبعيدة. وعبر تاريخ علم الفلك، كان التقدم درجة على ســلم هذه المسافات غالبًا ما يكشــف لنا عن أدلة حول الكيفية التي يمكننا من خلالها اكتشاف الأجسام الموجودة على الدرجة التالية.

هنــاك تحول هائل أخير حدث في نظرتنا الكونية في عام 1924، عندما أوضح عالم الفلك الأمريكي إدوين هابل أن «الســدم الحلزونية» التي نشاهدها في مختلف أنحاء السماء كانت في الواقع أنظمة نجمية بعيدة بشــكل لا يمكن تصوره. وأن مجرة درب التبانة، التي نشكل جزءًا ضئيــلاً للغاية منها، في حد ذاتها مجرد مجرة من ضمــن مجرات لا حصر لها في هذا الكون (انظر ص 220) - والتي ربما يســاوي عددها عدد النجوم الموجودة في مجرتنا والمنثورة في كل مكان من هذا الكون الشاسع (انظر ص 244). ومن المحتمل ألا تكون هذه هي نهاية القصة: فهناك أدلة متزايدة على أن كوننا نفسه الذي نعيش فيه قد يكون مجرد كون واحد من عدد لا حصر له من الأكوان الموجودة في البنية التي لم يتم ســبر أغوارها بعد والمعروفة باسم العالم المتعدد (انظر ص 298).

الفكرة الرئيسة

كل اكتشاف جديد يُضائل من مكانتنا في هذا الكون

02

رؤية السماء

Watching the skies

لقد غيرت التلسكوبات من الطريقة التي نتفهم بها الكون الذي نعيش فيه، حيث أصبح بإمكان المراصد الأرضية والمدارية اليوم أن تقترب من آخر حدود الفضاء وتكشف تفاصيل الأجسام الموجودة على مسافات شاسعة، في الوقت الذي توجد فيه أجهزة متطورة أخرى تستخدم إشعاعات غير مرئية لتكتشف الجوانب الخفية من الكون.

قبل اختراع التلسكوب، تمثلت أهم الأدوات التي يمكن لعالم الفلك الاستفادة منها في المختبرات الفلكية والرُّبعية وغيرها من الأجهزة المستخدمة لقياس أماكن الأجسام الموجودة في السماء والزوايا التي تفصل بينها. كما تمكنت العين البشرية دون أي مساعدة من وضع حدود طبيعية لكل من درجة إشراق الأجسام التي يمكن رؤيتها والقدر الآخر من التفاصيل التي يمكن مشاهدتها بها. عقب ذلك، وفي عام 1608، قدم صانع العدسات الهولندي هانز ليبرشي طلبًا للحصول على براءة اختراع على جهاز رائع استعان فيه بعدستين (عدسة محدبة وعدسة مقعرة) لعمل صورة مكبرة بمقدار ثلاث مرات. وقد كان هذا هو أول تليسكوب.

الخط الزمني

1609م	**1668م**	**سبعينيات القرن التاسع عشر**
كان جاليليو أول من وجه تليسكوبًا إلى السماوات.	قام إسحق نيوتن بعمل أول تليسكوب عاكس (يعتمد على المرآة).	بدأ ويليام هوجينز في استخدام التصوير الفوتوغرافي والطيفي من خلال أجهزة التليسكوب كأداة بحثية.

رؤية أفضل

سرعان ما انتشرت أخبار الاختراع الهولندي حتى وصلت إلى جاليليو جاليلي في فينيسيا في يونيو عام 1609. ومن خلال الاعتماد على أساسيات هذا الاختراع بنفسه، قام جاليليو بعمل العديد من الأجهزة، التي جمعها فيما بعد في جهاز واحد لم يسبق له مثيل يقوم بتكبير الصورة بمقدار 33x. في عام 1610، تمكن من التوصل لعدد من الاكتشافات المهمة مستعينًا بهذا التلسكوب، ومن ضمنها اكتشاف الأقمار الأربعة المشرقة لكوكب المشتري والبقع الموجودة على سطح الشمس ومراحل كوكب الزهرة. كل تلك الاكتشافات ساهمت في اقتناع جاليليو بأن نظرية كوبرنيكوس التي قال فيها إن الشمس هي مركز الكون كانت صحيحة، وهذا ما أدى إلى الصراع بينه وبين الهيئات المحافظة التابعة للكنيسة الكاثوليكية.

في عام 1611، حاول يوهانس كيبلر التوصل، من الناحية النظرية، إلى الكيفية التي يمكن من خلالها للتلسكوب المزود بعدستين أن ينتج صورًا مكبرة بشكل أكبر وأكبر.

«لا بد أن تستند معرفتنا للنجوم والأجسام الموجودة بينها بشكل أساسي على الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يصلنا.»

ليمان سبيتزر Lyman Spitzer

وبحلول منتصف القرن السابع عشر، أصبح هذا النوع من التلسكوبات الأكثر انتشارًا، وهو ما أدى إلى العديد من الاكتشافات الجديدة. ومن ضمن مخترعي الأجهزة الناجحين على وجه الخصوص العالم الهولندي كريستيان هيجنز الذي استخدم تلسكوبات بعيدة المدى للغاية،

1957م

قام برنارد لوفيل بعمل أول تلسكوب لاسلكي قابل للتوجيه في العالم من ضفة جودريل بإنجلترا.

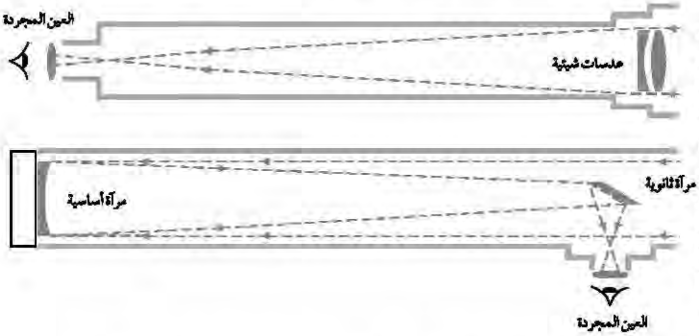
1979م

تم عمل أول تلسكوب متعدد المرايا على جبل هوبكينز بولاية أريزونا.

1990م

أصبح تلسكوب الفضاء هابل أول تلسكوب ضوئي كبير في الفضاء.

وهذا ما جعله يتوصل لاكتشـافات مـن ضمنها قمر تيتان الخاص بكوكب زحل والشـكل الحقيقي لحلقات كوكب زحل (وهي التي قال عنها جاليليو إنها عبارة عن تشويه غريب).



رسومات توضح النوعين الأساسيين من التلسكوب. في التلسكوب الانكساري (الجزء العلوي)، الأشعة الضوئية المجمعة من خلال العدسات الشيئية تكون مقوسة من أجل التركيز، ثم يتم الحصول على صورة مكبرة من خلال العدسات العينية. أما في تلسكوب نيوتن العاكس (الجزء السفلي)، يكون هناك مرآة أساسية مقوسة تجمع الأشعة الضوئية وتردها مرة أخرى للمرآة الثانوية، وهذا ما يتم توجيهه فيما بعد للعدسات العينية.

ومع ذلك، شـهدت أواخر القرن السـابع عشر تطـورًا جديدًا تمامًا في التلسـكوبات. واسـتخدم هذا التصميم العاكس مرآة مقوسة أساسـية لتجميع أشعة الضوء وتركيزها، هذا بجانب عدسـة ثانوية صغيرة لتوجيه هذه الأشعة نحو العدسة العينية. وقد كان إسحق نيوتن من أتم عمل أول تلسكوب عملي بهذا التصميم في عام 1668، وهذا ما نجم عنه ظهور العديد من الأشـكال المتنوعة الأخرى. بوجه عام، تقدم التلسـكوبات لعلماء الفلك قدرة أكبر على تجميع الأشـعة الضوئية وتحسين قدرة التحليل. كما أن العدسات الشـيئية أو المرآة الأساسية تكون بمثابة سـطح لتجميع أضواء النجوم الخافتة أكبر بكثير من محيط العين البشرية الصغير، ومن ثم تكون التلسكوبات بوجه عام قادرة على رؤية الأجسام الأكثر خفوتًا. في الوقت نفسه، تسمح لنا قدرة التكبير التي تقدمها لنا العدسة العينية بتحليل التفاصيل والفصل بين الأجسام القريبة للغاية من بعضها البعض.

التلسكوبات الحديثة

لكل نوع من نوعي التلسكوبات مزايا ومساوئ، ولكن بوجه عام، تحد المشكلات العملية المتعلقة بعمل وتركيب العدسات المحدبة الثقيلة، علاوة على الكميات الهائلة من ضوء النجوم

الذي تمتصه، من حجم أجهزة التلكسوب الانكسارية القائمة على العدسات لتبلغ مترًا واحدًا تقريبًا (أي 40 بوصة). في الوقت نفسه، توقف حجم التلسكوبات العاكسة عند الخمسة أمتار (أي 200 بوصة) في السواد الأعظم من القرن العشرين. على الرغم من ذلك، سمح وجود بعض المواد الجديدة (كالمرايا المصنوعة من أجزاء متشابكة)، والأهم من ذلك إمكانية التحكم الآلي من خلال الكمبيوتر، بزيادة حجم التلسكوبات ليصل إلى 10 أمتار (أي 400 بوصة) بل وأكبر من ذلك أيضًا (انظر المربع).

بطبيعة الحال، لا يتم وضع العين البشرية في الاعتبار عند بناء

التطور المذهل

استفاد الجيل الأخير من أجهزة التلسكوب الكبيرة من إمكانية التحكم من خلال الكمبيوتر والمواد الحديثة في عمل أسطح أكبر حجمًا من ذي قبل لتجميع الأشعة الضوئية. وتتمثل أكبر أجهزة التلسكوب أحادية المرآة في الأجهزة الضخمة المزدوجة 8.4 متر (27.5 قدمًا) من التلسكوب الكبير ثنائي العينين الموجود في مرصد جبل جراهام الدولي في أريزونا، بالإضافة إلى التلسكوب الكبير للغاية المكون من أربع مرايا 8.2 متر (27 قدمًا) الموجود في المرصد الجنوبي الأوروبي (VLT) في شيلي. يستخدم كلا التلسكوبين العدسات النشطة - وهي عبارة عن شبكة من المحركات الإلكترونية التي تعرف باسم المشغلات، وهي التي تدعم تشوهات المرايا والتشوهات الناجمة عن وزنه. هناك أيضًا جهاز آخر يعرف باسم العدسات التكيفية، وهو الذي يقيس انحراف الضوء عن الجسم المستهدف عند مروره عبر الغلاف الجوي، كما أنه دائمًا ما يقوم بضبط المرآة لمواجهة هذا الأمر، وهذا ما ينتج عنه صور تفوق في وضوحها تلك الناتجة عن تلسكوب هابل الفضائي.

من ناحية أخرى، يمكن لأجهزة التلسكوب متعددة المرايا أن تكون أكبر حجمًا. على سبيل المثال لا الحصر، يحتوي تلسكوب جران كاناريياس لا بالما في جزر الكناري على 36 مرآة متداخلة تمنحنا سطحًا واحدًا يعادل في حجمه مرآة بحجم 10.4 متر (34 قدمًا). ويجري التخطيط في الوقت الحالي لمشروعات أكثر تقدمًا وطموحًا، حيث يجري الآن بناء التلسكوب الأوروبي فائق الحجم (E-ELT) في شيلي، وهو الذي تتكون المرآة الأساسية الضخمة به بحجم 39.3 متر (129 قدمًا) من 798 جزءًا مستقلًا.

معظم التلســكوبات الحديثة، ومنذ منتصف القرن التاســع عشر، لعب التصوير الفوتوغرافي دورًا مهمًا في علم الفلك. فلم يقتصر دور الصور الفوتوغرافية على التقاط مجرد مشــاهد وصور للأجيال القادمة، بل عززت من قدرة التلسكوب على تجميع الأشعة الضوئية بشكل أكبر. فإذا ما تم توجيه التلسكوب على النحو الصحيح ولفه ببطء بحيث يتماشى مع تأثير دوران الأرض، يمكــن للصورة المعرضة للضوء لمدة زمنية طويلة أن «تجمع» أضواء النجوم البعيدة لســاعات عديدة. ويهيمن على التصوير الفلكي الآن أجهزة إقران الشحنات الإلكترونية (CCDs)، وهي الأجهزة التي يمكنها تتبع العدد الدقيق من الفوتونات التي ترتطم ببكسل شبه الموصل الواحد. في الغالب الأعم، يمر الضوء القادم من الجســم البعيد عبر المطياف (وهو عبارة عن جهاز ذي شــبكة انحراف ممتازة يعمل بالنحو الذي يعمل به المنشــور) ثم يتم تقسيمه إلى ألوان الطيف، وهذا ما يمكن من خلالــه قياس درجة كثافة ألوان محددة كجزء مــن عملية الفحص الطيفي (انظر ص 94).

الإشعاعات غير المرئية

يمثل الضوء المرئي الذي يصل إلى سطح الأرض من الفضاء مجرد جزء صغير من الطيف الكهرومغناطيسي الكامل. لمزيد من التوضيح، تتألف الإشــعاعات الكهرومغناطيســية من حــزم متذبذبة من الموجات تعرف باســم الفوتونات، وقد خلقت أعيننا لــترى الضوء نظرًا لكونه واحدًا من حزم الإشــعاعات القليلة التي تتمكن من الوصول إلى ســطح الأرض عبر الغلاف الجوي. وهناك أشكال أخرى من الإشعاعات من ضمنها الأشعة تحت الحمراء (وهي عبارة عن «إشــعاعات حرارية» تكــون موجاتها أطول لحد ما من موجــات الضوء الأحمر)، والإشــعاعات اللاســلكية (وهي التي تكون موجاتها أطول). هذا وتغرق الإشعاعات تحت الحمــراء الآتية من الفضاء في حرارة الجو الذي نعيش فيه (بل وفي الحرارة الناجمة عن الأدوات المستخدمة في الكشــف عنها)، لذا، عادة ما يلاحظ استخدام أجهزة تلسكوب خاصة ومبردة

على قمم الجبال أو مراصد نجوم مدارية. في الوقت نفســـه، تمثل عملية الكشف عن الموجات الطويلة من الموجات اللاســـلكية تحديًا - ومن ثم، عادة مـــا يتم اللجوء إلى تجميعها من خلال أطباق مكافئة ضخمة تعمل على نحو يماثل التلسكوبات العاكسة.

على النقيض من ذلك، يكون للأشـــعة فوق البنفسجية أطوال موجية أقصر من الضوء البنفســـجي، وطاقة أعلى منها، بينما لا تزال الأشعة الســـينية وأشعة جاما أقصر وأكثر طاقة. ويمكن أن تكون هذه الأنواع الثلاثة من الإشـــعاعات الكهرومغناطيســـية ضارة بالأنسجة الحية، ولكن لحسن الحظ، غالبًا ما يحجب غلافنا الجوي معظمها عنا. ولم يظهر عصر التطور الهائل لعلم الفلك إلا بعد اســـتخدام التلســـكوبات الفضائية، كما أن أجهزة تجميع الأشعة السينية وأشـــعة جاما والكشف عنها تشـــبه لحد ضئيل تصميمات التلسكوبات المعتادة التي قدمها كل من جاليليو ونيوتن.

الفكرة الرئيسة

تكشف لنا التلسكوبات عن الأسرار الخفية للكون

03

مملكة الشمس

Kingdom of the Sun

يتألف نظامنا الشمسي من الشمس وجميع الأجسام التي تدور حولها، بالإضافة إلى منطقة الفضاء التي تؤثر عليها بشكل مباشر. كما يتكون هذا النظام من ثمانية كواكب رئيسية، منها خمسة كواكب صغيرة معروفة، ومجموعة من الأقمار وعدد لا حصر له من الأجسام الأصغر حجمًا، مع اتسامها بتكوينات صخرية وجليدية.

في الجزء الأكبر من الأحداث التاريخية المسجلة، كان النظام الشمسي يتألف من ثمانية أجسام معروفة فقط – الأرض والقمر والشمس وخمس كواكب ترى بالعين المجردة وهي: عطارد والزهرة والمريخ والمشتري وزحل. يتبع كل منها مساره المعقد في السماء على خلفية ثابتة إلى حد ما من النجوم البعيدة. ظل من المعروف أن كوكب الأرض ببساطة هو ثالث الكواكب الستة التي تدور حول الشمس حتى القرن السادس عشر، وبعدها، بدأ فهم الكيفية التي تتحرك بها الكواكب (انظر ص 12).

الخط الزمني

1543م

قدم كوبرنيكوس وجهة نظر تقول بأن الشمس هي مركز النظام الشمسي، وأن كوكب الأرض واحد من ستة كواكب.

1610م

اكتشف جاليليو أقمارًا لم تكن مرئية من قبل، تدور حول كوكب المشتري.

1781م

اكتشف ويليام هيرشل كوكبًا جديدًا بعد زحل، وهو ما أطلق عليه اسم أورانوس الذي أصبح اسمه فيما بعد.

لا شك أنه اتضح أمامنا الآن أن الشمس كانت الجسم المهيمن في نظامنا الشمسي، وهي التي تمارس قوتها ونفوذها لتجعل جميع الكواكب تدور في مدارات بيضاوية حولها. وفي عام 1687، قال إسحق نيوتن إن هذا الأمر يعد امتدادًا لقوة الجاذبية نفسها التي تجعل جميع الأجسام تنجذب نحو مركز الأرض. وفي وجود هذا النموذج الآن، تمكن علماء الفلك من استخدام التقنيات الهندسية المعززة بقدر أكبر من الدقة، وهذا من خلال التلسكوب الذي تم اختراعه مؤخراً لقياس الحجم الحقيقي للنظام الشمسي (انظر المربع، ص 24).

كان القياس الرئيسي المستخدم يتمثل في متوسط المسافة من الأرض إلى الشمس، والذي تبين أنه يساوي 150 مليون كيلومتر تقريبًا (93 مليون ميل). وقد أصبحت من وحدات القياس المناسبة في حد ذاتها، وأصبحت تعرف باسم الوحدة الفلكية (AU). كذلك، نتج عن التوصل لحجم النظام الشمسي الكشف عن حجم الكواكب الفردية الموجودة به – فقد تم اكتشاف أن كوكب الزهرة يساوي في حجمه كوكب الأرض، وأن كوكبي عطارد والمريخ أصغر إلى حد كبير، بينما تم اكتشاف أن المشتري وزحل كوكبان ضخمان وهائلان بالمقارنة بتلك الكواكب.

«لا بد أن نعتبر النظام الشمسي فناءنا الخلفي، وليس مجرد مجموعةَ منِ الأمور القدرية التي نقوم بها واحدًا تلو الآخر.»

نيل ديجراس تايسون

عوالم جديدة

على الرغم من أن علماء الفلك بدؤوا في القرن السابع عشر في اكتشاف أقمار لم تكن مرئية حتى الآن حول كوكبي المشتري وزحل، ونظام الحلقات الرائع الخاص بكوكب زحل،

1801م

بينما كان يبحث عن كوكب جديد بين المريخ والمشتري، اكتشف جوزيبي بيازي سيريس أكبر الكويكبات حجمًا.

1846م

استخدم أوربين لو فيرير الأمور غير القياسية في مدار أورانوس للتنبؤ بمكان الكوكب الثامن، وهو كوكب نبتون.

1930م

اكتشف كلايد تومبو كوكب بلوتو، وهو عالم جديد ثبت أنه أول جسم معروف في حزام كايبر.

2016م

قال كل من باتيجين وبراون أنهما قد عثرا على دليل على وجود كوكب رئيسي تاسع في مدارات أجسام حزام كايبر.

فإن الأجســام الوحيدة التي تدور حول الشمس نفســها بخلاف الكواكب كان يعتقد أنها عبارة عن مذنبات، كذلك الذي تم حساب مداره من قبل إدموند هالي صديق نيوتن في عام 1705. هــذا وقد تبين أن تلك المذنبات عبارة عن زوار عابرين للنظام الشــمسي الداخلي. بعدها، وفي عام 1781، عندما رصد عالم الفلك الألماني المولد ويليام هيرشــل نقطة خضراء مائلة للزرقة غير واضحة في أثناء قيامه بعمل دراســة إحصائية للنجوم في منزله بمدينة باث الإنجليزية، افترض بطبيعة الحال أنها عبارة عن مذنب. ولكن بعد متابعة الملاحظة، اكتشف الحقيقة. فقد أشارت الحركة البطيئة لهذا الجسم أمام النجوم إلى وجود مسافة تبلغ حوالي 20 وحدة فلكية، وهو ما يشير إلى أنها لم تكن عبارة عن مذنب، بل إنها عبارة عن كوكب حقيقي في حد ذاته - وهو ما يعرفه العالم الآن باسم كوكب أورانوس.

تســبب اكتشــاف هيرشــل في هوس متابعة الكواكب، مع تركيز القدر الأكبر من الاهتمام على الفجوة المتصورة في ترتيب الكواكب بين مدارات المريخ والمشتري. في عام 1801، أدى هذا الأمر إلى اكتشاف سيريس (انظر ص 64)، والذي كان عبارة عن عالم صغير ثبت أنه كوكب غير كامل، ولكنه أول وأكــبر العــدد الكبير من الكويكبات - وهــي أجســام صخرية تدور في المدار عبر النظام الشــمسي الداخــلي، ولكنهــا ترتكز بشكل أساسي على النطاق العريض الواقــع بــين كوكبي المريخ والمشتري.

أرسطرخس يقيس النظام الشمسي

في القرن الثالث قبل الميلاد، اســتعان عالم الفلك اليوناني أرســطرخس الساموسي طريقة بارعة لحساب مسافات القمر والشمس. ومع إدراكه بأن مراحل القمر تنجم عن الأشعة الضوئية المختلفة الآتية من الشمس، قاس الزاوية بين الشــمس والقمر في الربع الأول، عندما يضيء نصف قرص القمر بالضبط، واســتخدم الهندســة لقياس المســافة إلى هذين الجســمين. وبفضل أخطاء عملية القياس، قال إن الشمس تبعد بمقدار 20 مــرة أكثر من القمر (وبالتالي فإنها تكــبره بنحو 20 مرة). ومن ثم، تكــون القيمة الفعلية لدينا هي 400 مرة، بيد أن هذا الفرق لم يكن كافيًا ليقنعه بأن الشــمس، وليس الأرض، لا بــد أن تكون موجودة في مركز النظام الشمسي.

بينما كان اكتشــاف أورانوس والكويكبات صدفة ســعيدة، كانت العمليات الحسابية الصعبة هي التي أدت إلى اكتشاف كوكب كبير آخر في عام 1846. فهنا، قام عالم الرياضيات الفرنسي أوربين لو فيرير بتحليل وثيق للأشــياء غير القياســية الموجودة في مدار أورانوس، علاوة على تحديد حجم ومكان عالم آخر أكثر بعدًا (والذي أصبح يعرف الآن باسم نبتون)، والذي سرعان ما تمكن من رصده عالم الفلك الألماني يوهان جال في مرصد برلين.

البحث عن الكوكب إكس

في أعقاب النصر الذي حققه لو فيرير، جذبت فكرة اكتشاف كواكب جديدة من خلال علم الرياضيات العديد من علماء الفلك. لقد فشل لو فيرير نفسه عندما توقع وجود كوكب آخر يدعــى فولكان يدور حول الشــمس داخل مدار كوكب عطــارد، بينما قدم الآخرون توقعات عاديــة تمثلت في وجود كوكب إكس يدور حول كوكب نبتون. وكان الثري الهاوي بيرسيفال لويل أكثر الأشخاص الذين كانوا يسعون دومًا وراء اكتشاف الكواكب (وهو من المتحمسين كذلك للقنوات التي كان يقال إنها موجودة على كوكب المريخ - انظر ص 46)، وهو الذي أنشأ مرصده الخاص في فلاجستاف بولاية أريزونا، وخصص إرثه كله لاستمرار مثل تلك الأبحاث عقب وفاته في عام 1916. وفي عام 1930، رصد الباحث الشاب كلايد تومبــو، وهو الذي تم تكليفه بعمل بحث جديد وشــامل عن كوكــب لويل، نقطة صغيرة تتحــرك أمام النجوم على طبقتين فوتوغرافيتين تفصل بينهما مســافة أيام. وسرعان ما عُرف هذا العالم البعيد باسم كوكب بلوتو وأعلن عن كونه الكوكب التاسع في النظام الشمسي.

على الرغم مما ســبق، ثبت أن حجم كوكب بلوتو وكتلته صغيران بشكل مخيب للآمال، وقد شــكك بعض علماء الفلك منذ البداية فيما إذا كان يجب حقًّا أن يتم تصنيفه كوكبًا كسائر الكواكب أم لا. بعبارة أخرى، شك العديد منهم في أنه، مثل سيريس قبله، أول كوكب في فئة جديدة تمامًا من الأجســام - عوالم جليدية صغيرة تدور حول كوكب نبتون في مكان ما يعرف

الآن باســـم حزام كايبر (انظر ص 74). بحلول عام 1992، تمكن تلسكوب هابل الفضائي من تتبع جسم آخر في حزام كايبر، بيد أن أعداد تلك الأجسام زادت منذ ذلك الحين، حيث تم تحديد أكثـر من ألف منها حتى وقتنا الحالي. ومع هذا المعدل من الاكتشـافات، كان من المحتم أن يتم التطرق للمكانة الكوكبية لكوكب بلوتو. وفي عـام 2006، قدم الاتحاد الفلكي الدولي تصنيفًا جديـدًا للكواكب ضئيلة الحجم ومن ضمنها كوكب بلوتو وسـيريس والعديد من الأجسـام الأخرى (انظر ص 65).

هل هناك عوالم رئيسية أخـرى لا تـزال تنتظـر اكتشـافها في أعـماق النظام الشمسي الخارجي؟ قد تجعل النماذج الحالية لنشأة وتطور النظام الشـمسي هذا الأمر غير محتمل (انظر من ص 28 حتى ص 41)، بيد أن بعض علماء الفلـك يرون أن رؤية مـدارات بعض الأجسـام الموجـودة على حـزام كايبر قد يكون ناجمًا عن الكواكب الكبيرة غير المعروفة. في عام 2016، قـدم عالمـا الفلك كونستانتين باتيجين ومايك

الغلاف الجوي للشمس

عند مناقشـة حدود النظام الشـمسي، لا يفضل بعض علماء الفلك اسـتخدام مدى جاذبية الشـمس، بل غلافها الجوي، وهي المنطقة التي تسـيطر عليها الرياح الشمسـية على تأثير النجوم الأخرى. لمزيد من التوضيح، الرياح الشمسـية عبارة عن تيار من الجسيمات ذات الشـحنات الكهربية، وتهب من سطح الشمس وتمتد حتى المجال المغناطيسي للشمس في جميع أنحاء النظام الشـمسي. كما أنها مسـؤولة عن بعض الظواهر مثل ظاهرة الشـفق (الأضواء الشمالية والجنوبية) التي تحدث في مختلف الكواكب. تنتقل الرياح بسلاسة بسرعات أكبر من الصوت لتصل إلى مسـافة أبعد من مـدار بلوتو، ولكنها بعد ذلك تنهـار في منطقة الاضطراب الأسرع من الصوت عندما تصادف الضغط المتزايد من الوسط المحيط بين النجوم (انظر ص 259). تعرف الحافة الخارجية للغلاف الجوي للشمس، حيـث يتوقـف التدفق الخارجي للرياح الشمسـية، باسـم الغلاف الشـمسي، وهي التي تمثل الحد الذي يشار إليه عادة عندما يتحدث علماء الفضاء عـن البعثات التي تغادر النظام الشمسي. تمكن مسبار فوياجر 1 الذي أطلقته وكالة ناسا من عبور الغلاف الشـمسي ووصل إلى مسافة تبعد بمقدار 121 وحدة فلكية عن الشمس في أغسطس عام 2012.

براون في كالتيك الاحتمال الأكثر تحديدًا حتى الآن، وهو الذي قال بوجود «كوكب تاســع» له نفس كتلة الأراضي العشرة الموجودة على المدار البيضاوي الطويل. على الرغم من ذلك، وحتى وقتنا هذا، تتمثل الأجســام غير المرئية الوحيدة التي يمكننا التأكد من وجودها في تريليونات المذنبات الموجودة في ســحابة أورت. إن وجود هذه الهالة الكروية الهائلة من المذنبات، والتي تحيط بالشمس على بعد مسافة تبلغ نحو ســنة ضوئية واحدة، يمكن الكشف عنها من خلال مدارات المذنبات التي تسقط في النظام الشمسي الداخلي.

الفكرة الرئيسة

إن حجم ومدى تعقيد نظامنا الشمسي لا يزال في تزايد مستمر

04

نشأة النظام الشمسي

Birth of the solar system

كيف نشـأت الشمس ونظام الكواكب والأجسـام الصغيرة المحيطة به بأكمله؟ على مدار أكثر من قرنين من الزمان، قدم العلماء نظريات مختلفة وناقشـوا العديد من النظريات، ولكن الآن، هناك فكرة جديدة تعرف باسم التراكم الحصوي، وهي التي تبشر بالإجابة عن باقي الأسئلة التي لم يتم التوصل لإجابة لها حتى الآن.

يضم النظام الشمسي ثلاث مناطق متميزة للغاية. يوجد بالقرب من الشمس عالم من الكواكب والكويكبات الصخرية التي تسودها مواد «صهرية» ذات نقاط انصهار عالية إلى حد ما، كالمعادن. كذلك، خلف حزام الكويكبات، توجد الكواكب العملاقة بالإضافة إلى أقمارها الجليدية، وهي التي يتكون معظمهـا من مواد كيميائية متطايرة تذوب في درجات حرارة منخفضة. والمنطقة الأكثر بعدًا من هذه المناطق الثلاث تتمثل في حزام كايبر وسحابة أورط Oort Cloud المكونة من أجسام صغيرة وجليدية.

الخط الزمني

1734م	1755م	1796م
أشار إيمانويل سويدنبورج إلى أن الكواكب التي تشكلت من انهيار سحب الغازات التي أطلقتها الشمس.	أشار إيمانويل كانط إلى أن الشمس والكواكب التحما معًا من سديم أولي.	قدم لابلاس نظرته الخاصة من الفرضية السديمية التي حددت أساسيات العمليات الفيزيائية.

عُرفت النظرية العلمية الأولى التي تناولت أصول نشأة الكواكب، والتي ركزت فقط على توضيح الفـرق بين الكواكـب الصخرية والكواكـب العملاقة الأكثر بعدًا، باسـم النظرية السديمية. في عام 1755، اقترح الفيلسـوف الألماني إيمانويل كانط أن الشمس والكواكب قد تشـكلت جنبًا إلى جنب في أثناء تحطم سـحابة كبيرة من الغازات والأتربة. هذا وقد قدم عالم الرياضيات الفرنسي الرائع بيير سـيمون لابلاس وحده نموذجًا مشابهًا في عام 1796 أوضح فيـه كيف يمكن أن تتسـبب الاصطدامات التي تحدث داخل سـحابة الغازات والحفاظ على الزخم الزاوي بطبيعة الحال في تسـطيح قرص الكوكب المتشـكل ودورانه بشكل أسرع حول مركزه، في الوقت الذي يرغم فيه الكواكب الناتجة على الدوران في مدارات أكثر أو أقل دائرية.

مجموعة من النظريات

«بناءً على تخمين بسيط، ذهبت في رحلة خطيرة ووصلت بالفعل إلى أماكن جديدة لن يتمكن من الوصول إليها سوى من لديهم الشجاعة الكافية للاستمرار.»

إيمانويل كانط Immanuel Kant

بحلول منتصف القرن التاسع عشر، ناقش بعض علماء الفلك فكرة أن السـديم الحلزوني الذي يظهـر في أكـبر التلسـكوبات والصور الفوتوغرافية القديمة قد يكون عبارة عن نظم شمسـية قيد التشـكيل (انظر ص 223). على الجانب الآخر، أعرب البعض منهم عن شـكوكه الكبيرة لا سـيما فيما يتعلق ببطء فترة دوران الشـمس (تقريبًا 25 يومًا) - حيث إن هذا النجم يركز 99,9 في المائة من كتلة النظام الشمسي في مركزه، ومن ثم، فمن المؤكد أنه يدور بسرعة أكبر من ذلك؟

1905م

قدم كل من توماس تشامبرلين وفورست مولتون أول نظرية للتراكم توضح كيف نشـأت الكواكب.

1917م

قـدم جيمـس جينز فرضيـة المـد والجزر لـشرح أصول نشـأة الكواكب.

1978م

أوضـح إيه. جـي. آر. برنتيس كيف يمكن للحبيبات الغبارية الموجودة في السديم الشمسي أن تبطئ من دوران مركزها.

2012م

قـدم كل مـن ميشـيل لامبريشـت وأنـدرس يوهانسـن عملية تراكم الحصى باعتبارها طريقة من الطرق التي تتشكل بها قلوب الكواكب بسرعة.

1. سحابة النجوم الأولية.

2. قرص الكواكب الأولية.

3. تكوّن قلوب الكواكب.

4. تطهر الكواكب مداراتها من المواد.

على الرغم من عدم التوصل لمعلومات مفصلة ودقيقة حول تشكل النظام الشمسي بعد، فإن القصة المعروفة عن هذا الأمر واضحة: فقد بدأت سحابة من الغازات والغبار في الانهيار تحت جاذبيتها وبعدها (1) تسطحت وأصبحت في صورة قرص ذي مركز منتفخ. (2) بعدها، تشكلت الشمس في المركز، بالإضافة إلى تشكل القلوب الصلبة للكواكب الأولية في المدار الموجود حولها. (3) أطلقت هذه الأجسام مواد من الأجزاء المحيطة بها لتنتج بذلك الكواكب الرئيسية الموجودة الآن (4).

ومع ترسـخ مثل هذه المخاوف، تم تجاهل الفرضية السديمية والاهتمام بالنظريات الجديدة التي ظهرت. فلعل الكواكب قد تشكلت من نثار طويل من الغلاف الجوي الشمسي، أو تقطعت من أحد النجوم العابرة؟ أو لعلها نشأت من مواد ملتقطة ظهرت عندما فعلت الشمس الأمر نفسه في نجم آخر؟ أو ربما نشأت من سحابة من «الكواكب الأولية» الموجودة في الفضاء الخارجي؟

لم يبدأ علماء الفلك في إعادة النظر في الفرضية السـديمية سـوى في سـبعينيات القرن الماضي، ويُعزى القدر الأكبر من الفضل في ذلك إلى عالم الفلك السوفييتي فيكتور سافرونوف. كما أن العناصر الجديدة المضافة إلى النظرية سمحت للكواكب بأن تتشكل بكتلة أقل بكثير في القرص الأصلي، وهذا ما قلل الحاجة إلى الدوران السريع للشـمس. وتمثل أسـاس نموذج قرص السـديم الشمسي الذي قدمه سـافرونوف في فكرة التراكم التصادمي – وهي عملية تنشـأ فيها الأجسـام الفردية من حبيبات الغبار وتنمو إلى أن تصبح كواكب أولية في حجم كوكب المريخ، وهذا من خلال عمليات تصادم وتلاحم تتم خطوة بخطوة.

التراكم التصادمي

في الوقت الذي انتشرت فيه أفكار سافرونوف وعُرفت خارج نطاق الاتحاد السوفييتي، تمكن علماء الفلك من معرفة قدر كبير من المعلومات عن النشأة الأولى للنجوم نفسها، وقد اجتمع معًا

هذان الاتجاهان ليكونا لنا في النهاية صورة متكاملة. لمزيد من التوضيح، عندما يبدأ كوكب أولي ناشئ وساخن وغير مستقر في الظهور (انظر ص 130)، فإنه يطلق رياحًا نجمية عاتية تضرب السـديم المحيط، هذا علاوة على الإشـعاع القوي الناجم عن درجة حرارة المناطق الداخلية مـن السـديم. وينجـم عن ذلـك تبخـر المواد الجليديـة المتقلبة بالقرب مـن النجـم، ثـم تهب ناحية الخارج تاركة المواد الحرارية الغبارية خلفها. وتشـهد الاصطدامـات العشـوائية التـي تحدث في بضعة ملايين السـنين نمـو هـذه الجزيئات من مجرد حبيبـات غبارية إلى حصى ومنها إلى كويكبات صغـيرة. وحالمـا تكون كبيرة بدرجـة تكفي لأن تفرض قـدرًا معتدلًا من الجاذبيـة، ينجم عن تلك العملية كـرات ثلجية في تأثير يعرف باسم التراكم الجامح. وتلك الأجسام

التراكم الحصوي

توصـل الخبراء مؤخـرًا إلى نظرية جديدة حول نشـأة الكواكب وتشكلها، وهي التي ساعدت في الكشـف عن الأسرار المتعلقة بهذا الأمر: هـذه النظرية لم توضح فقط كيـف تزايد حجم تلك الأجسـام المتراكمة من الحجـم الصغير إلى الحجـم الكبير، بل أيضًا كيف زاد حجم قلوب الكواكب الغازية العملاقة بقدر من السرعة كان كافيًا للاحتفاظ بالغـازات التي تتطاير بسرعة، هذا بجانب معرفة السـبب وراء كون الكواكب الأرضية تبدو كما لو كانت تشكلت على مراحل زمنية مختلفة. لمزيد من التوضيح، تشير نظرية التراكم الحصوي إلى أن النظام الشـمسي الأول سرعان ما نتج عنه انحرافات هائلة لأجزاء صلبة صغيرة، وتباطأت حركتها وتم التحكـم فيها من خلال الغازات المحيطـة بها. وفي غضون المليوني عام اللذين تليا تكوّن الشمس، زاد حجم هذه الانجرافات بشكل كبير كان كافيًا لأن يجعلها غير مستقرة من ناحية جاذبيتها، وهذا ما أدى إلى انهيارها لتشـكل كويكبات بحجم كوكب بلوتو في غضون أشهر أو سنوات. بعد ذلك، جذبت جاذبية هذه العوالم الحـصى المتبقي بسرعة من المناطق المحيطة بها، تاركة ربما عشرات من العوالم التي يبلغ حجمها حجم كوكب المريخ. بهذا الشـكل، تمكنت الكواكب العملاقة من البـدء في تجميع أغلفتها من الغاز والجليـد في وقت مبكـر، في الوقت الذي كان يكـبر فيه حجم كوكب المريخ بشـكل كامل. ولم تحتج سوى الكواكب الأرضية الأكبر حجمًا، مثل الأرض والزهرة، لمرحلة نهائية من التصادمات التي تحدث عنها سـافرونوف، وهذا على مدار مائة مليون سنة أو نحو ذلك، لتصل إلى حجمها الذي وصلت إليه الآن.

التي يتزايد حجمها، والتي تعرف باســم الكويكبات، تسحب قدرًا أكبر وأكبر من المواد نحوها، عاملة بذلك على تطهير السواد الأعظم من الفضاء المحيط بها إلى أن يتبقى بضعة عوالم، وهي التي ربما تكون في حجــم قمرنا. كما ينجم عن التصادمات التي تحدث بــين هذه الكواكب الأولية إلى ظهور عدد أصغر من الكواكب الصخرية، في الوقت الذي تتســبب في الحرارة الناتجة عن التصادم في ذوبانها، مما يسمح بتمييز أجزائها الداخلية علاوة على تكون قشورها في شكل كروي.

من ناحيــة أخرى، يعد الجزء الخارجي من نظام النجوم أكثــر برودة، حيث تظل الثلوج المتطايرة متجمدة ويســتمر وجــود الغازات، تاركة قــدرًا أكبر من المواد التي تتشــكل منها الكواكب. تستمر عملية تكوّن الكواكب بالطريقة نفسها إلى حد ما ولكن بقدر أكبر، مما ينجم عنه كواكب ذات قلوب أكثر صلابة، وهي التي تسحب فيما بعد الغازات نحوها لتشكل بذلك الأغلفة الجوية الغنية بالهيدروجين. على الحواف الخارجية لمنطقة تكوّن الكواكب، تنتشر المواد بشــكل أقل كثيرًا مشــكلة بذلك الكواكب الكبيرة، وهذا ما ينجم عنه حزام كايبر للكواكب الأولية الذي يتكون من عوالم جليدية ضئيلة الحجم (قزمة).

اســتمر تأثير نظرية سافرونوف لأكثر من أربعة عقود. وقد دعمها اكتشاف أقراص الكواكب المشــكلة الموجودة حول عدد كبير من النجوم الأخرى. وقد اتفق الجميع على دقة هذا الأمر عندما نظروا إلى الصورة الكاملة لهذا التصور. بيد أن بعض علماء الفلك في الآونة الأخيرة بدؤوا في الشك بأن هذه ليســت القصة الكاملة، لا سيما مع وجود شكوك حول نموذج سافرونوف الذي كان يقر باصطدام جســمين. كما ظهر العديد من الأدلة الأخرى على أن العوالم العديدة الموجودة في النظام الشمسي لم يحدث لها أي عملية من عمليات الذوبان الكاملة التي كان يلزم حدوثها في اصطدامات الكويكبات التي تحدث عنها ســافرونوف. وبالقدر نفســه من الأهمية، أدرك العلماء وجود فجوة في سلسلة نشــأة وتطور النظام الشــمسي والكواكب. وعلى نطاق صغير، فإن الشحنات الكهربية الســاكنة الصغيرة الموجودة على حبيبات الغبار لا بد أن تجعلها تتجمع معًا، بينما ستجذب الجاذبية المتبادلة الأجســام كبيرة الحجم معًا. ولكن، كيف يمكن للأجســام الصخرية الكبيرة أن تلتحم

ببعضهــا البعض في الوقت الــذي تنمو فيه من مرحلة إلى أخرى؟ عــلى أي حال، ربما تكمن الإجابة عن كل تلك التســاؤلات في نظرية جديدة معروفة أطلق عليها اسم التراكم الحصوي (انظر المربع)، وهي القائمة على التحام أعداد كبيرة من الأجسام الصغيرة في وقت واحد.

الفكرة الرئيسة

تتشكل الكواكب من خلال التحام الأجسام الصغيرة ببعضها البعض

05

هجرة الكواكب

Planetary migration

حتى وقت قريب، اعتقد معظم علماء الفلك أن كواكب نظامنا الشمسي كانت تتحرك في مدارات مستقرة طوال تاريخها. بيد أن التطورات الحديثة التي طرأت على نظم الحاسب الآلي تبين لنا أن الأيام الأولى للنظام الشمسي انطوت على لعبة كرة ودبابيس كوكبية كبيرة، وهي التي لا نزال نرى عواقبها ونتائجها حتى يومنا هذا.

قبل اكتشاف الكواكب الخارجية الأولى في منتصف تسعينيات القرن الماضي (انظر ص 148)، كان علماء الفلك يرون أن النظم الشمسية الغريبة من الممكن أن تكون شبيهة إلى حد ما بنظامنا الشمسي، حيث تدور الكواكب في مدارات شبه دائرية ومستقرة حول نجومها. على الرغم من ذلك، وحسبما أظهر العقدان الماضيان من الأبحاث، فإن النظم الكوكبية أكثر تنوعًا بكثير مما كان يُعتقد سابقًا، ومن ثم، أشارت التطورات التي طرأت على نظم المحاكاة والتصميمات القائمة على نظرية التراكم التصادمي إلى أن المواد التي تشكلت منها الكواكب قد تلاشت حول مدار كوكب زحل.

الخط الزمني

1950م

حاول إيمانويل فيليكوفسكي في نظرية تصادم العوالم أن يشرح الأحداث التاريخية من خلال نظرية هجرة الكواكب العلمية الزائفة.

1974م

اكتشف كل من تيرا وبابانااستاسيو وواسيربورج أدلة على القصف العنيف المتأخر في عينات الصخور القمرية التي جاءت بها بعثات أبولو.

2005م

تم نشر نموذج نيس The Nice Model من خلال نشر الأبحاث العلمية الثلاثة في مجلة Nature.

حسنًا، كيف نشأ كوكب أورانوس وكوكب نبتون؟ في سعي منهم للحصول على إجابة عن تلك الأسئلة وغيرها، قدمت مجموعة من علماء الفلك في عام 2005 مجموعة نظرية جديدة ومهمة قالت إن أول بضع مئات ملايين السنين من عمر النظام الشمسي شهدت تغيرات جذرية في توزيع الكواكب.

العوالم تتحرك

انتشرت نظريات المدارات المتغيرة للكواكب بمستويات مختلفة منذ القرن التاسع عشر، في الوقت الذي رُفضت فيه تمامًا وتم اعتبارها هراءات كاذبة من قبل الهيئات والمؤسسات المتخصصة في علم الفلك. لا شك أن أفكار «العلماء المستقلين» مثل إيمانويل فيليكوفسكي، الذي رأى أن الكواكب الافتراضية الموجودة حول النظام الشمسي في الآونة الأخيرة نسبيًّا تفسر العديد من الأحداث الأسطورية والتاريخية، قد رفضت بكل سهولة. ولكن ما عرف باسم نموذج نيس، والذي أطلق عليه اسم المدينة الفرنسية التي كان يعمل العديد من المطورين بها في مرصد كوت دازور، يمثل وجهة نظر مختلفة إلى حد كبير. إن نموذج نيس عبارة عن مجموعة من المقترحات المتداخلة القائمة على تصميم الحاسب الآلي تتناول نشأة وتطور النظام الشمسي الأول للتمكن من سبر أغوار بعض الأسرار القائمة منذ فترة طويلة. وفي فترة أقل بكثير من عقد كامل، فتح هذا النموذج مجالاً جديدًا ومهمًّا من الأبحاث في المجال المهمل الذي كان يختص بتحركات النظام الشمسي.

2011م

أشار ديفيد نيسفورني إلى وجود كوكب عملاق خامس في النظام الشمسي القديم، وهذا الأمر كان وسيلة لحل المشكلات التي تعلقت بنموذج نيس.

2011م

أشار بعض الباحثين في نموذج نيس الأصلي إلى نظرية التراكم الكبرى الخاصة بكوكب المشتري محاولين تفسير الحجم الصغير لكوكب المريخ.

2016م

قال صياد الكواكب مايك براون إنه قد عثر على أدلة على الكوكب العملاق الخامس الطريد في مدارات الأجسام الموجودة على حزام كايبر.

نموذج نيس

ويفـترض هذا النموذج أنه عقب تكوين النظام الشـمسي الخارجـي بفترة قصيرة، كان شـكله مختلفًا إلى حد كبير عن شـكله الحالي. وكانت الكواكب الأربعة العملاقة أكثر قربًا من بعضها البعض، مع وجود مدارات شبه دائرية داخل المدار الحالي لكوكب أورانوس (على بعد نحو 20 وحدة فلكية من الشـمس). بالإضافة إلى ذلـك، كان كوكب نبتون، وهو الكوكب الأكثر بعدًا عن الشمس في الوقت الحالي، يدور بشـكل أقرب للشـمس من كوكب أورانوس. وكان حـزام كايـبر الأولي يقع بعـد الكواكب الكبرى – وكان عبارة عن قرص من الأجسـام الجليدية التي كانت عوالمها الأكبر حجمًا في مثـل حجم الكواكب الضئيلة (القزمة) الموجودة حاليًّا تقريبًا، وهي التي كانت موجودة أيضًا داخل المدار الحالي لكوكب نبتون.

«لقد كان حدثًا عنيفًا للغاية وقصيرًا دام لبضعة عشرات من ملايين السنين فحسب.»

هال ليفيسون

وتشـير عمليات المحاكاة بالحاسب الآلي إلى أن مثل هذا الترتيب للكواكب العملاقة من المحتمل أنه كان ثابتًا ومسـتقرًّا منذ ما يقرب من 500 مليون سنة، أي قبل مجموعة اللقاءات القريبة التي حدثت بين كوكبي أورانوس ونبتون والتي أحدثت اضطرابًا في مداراتها وسحبت كلًّا منهما في مسـارات بيضاوية طويلة. وسرعان ما أدت تلك المدارات الغريبة إلى تقريبهما من الكوكبين الأكبر حجمًا بكثير، وهما كوكبا المشتري وزحل، والتي كانت جاذبيتهما القوية تنقلهما إلى مسارات أكبر حجمًا، ولكنها بيضاوية أيضًا، حول الشمس، وأدت إلى مباعدة نبتون ليصبح بعد أورانوس للمرة الأولى. ويعتقد أنه خلال هذا الحدث كذلك، اكتسـب كوكب أورانوس محوره المائل المعروف به حاليًّا، والذي يدور على جانبه ككوكب غازي عملاق، أي يدور كالكرة المتدحرجة على النقيض من حركة «الدوامة» التي تحدث للكوكب الأخرى.

إزاحة حزام كايبر

على الرغم مما سبق، فقد أرسلت المدارات الجديدة لكوكبي أورانوس ونبتون مباشرة إلى حزام كايبر الأولي، حيث حدثت المزيد من اللقاءات مع العوالم الجليدية الصغيرة، والتي ساهمت في تعميم مدارات الكواكب الجليدية العملاقة على مسافات أبعد من الشمس. كذلك، خرجت العديد من العوالم الأصغر حجماً إلى منطقة عرفت باسم القرص المبعثر، بينما أرسلت أجسام أخرى نحو الجزء الداخلي من النظام الشمسي، وهذا ما جعلها تتسبب في الحدث الكارثي الذي عرف باسم القصف العنيف المتأخر (انظر المربع الموجود على اليمين).

إن نموذج نيس من النماذج التي تأسر الألباب، ليس لأنه فقط يعد بالكشف عن بعض الأمور الغامضة مثل ميل كوكب أورانوس،

القصف العنيف المتأخر

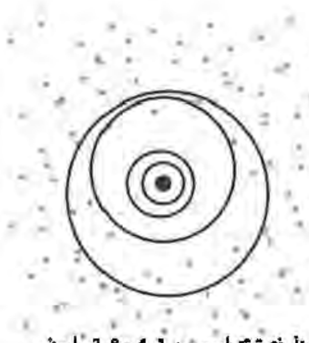
بفضل التأريخ الإشعاعي للصخور القمرية الذي قام به رواد الفضاء في بعثة أبولو، يعتقد العديد من علماء الفلك أن النظام الشمسي الداخلي قد مر بمرحلة صادمة منذ ما يقرب من 3.9 بليون سنة، حيث عانت عوالم مثل القمر من قصف مكثف من الكويكبات الكبيرة. وعلى سطح القمر، تم امتلأت الحفر الناجمة عن تلك الاصطدامات فيما بعد بالحمم البركانية الناتجة عن الانفجارات البركانية، وهذا ما أدى إلى نشأة «البحار» القمرية المستوية المظلمة التي تسود الجانب القريب من القمر في وقتنا الحالي.

عقب اكتشافه في أواخر سبعينيات القرن الماضي، حدث أنه افترض لوقت طويل أن هذا القصف العنيف المتأخر كان ببساطة مجرد مرحلة من مراحل التطهير التي حدثت في نهاية عملية تراكم الكواكب، بيد أن هناك الكثير من الأدلة الحديثة التي تشير إلى أن المرحلة الأساسية من تكوّن الكواكب قد انتهت في وقت مبكر عن ذلك بكثير. فبدلاً من ذلك، أصبحت الاختلالات التي نجمت عن تغيير الكواكب العملاقة لمداراتها في نموذج نيس الآن التفسير المفضل. على الرغم من ذلك، أشار بعض المتشككين إلى أن القصف لم يحدث قط على النطاق الذي تصوره البعض، مدعين بدلاً من ذلك أن القصف قد أدى إلى ذوبان العينات التي جمعها رواد بعثة أبولو والتي نتجت في الأصل عن حدوث تصادم كبير واحد فقط.

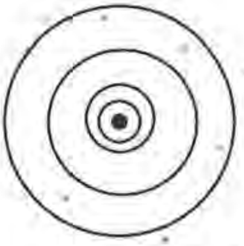
ومكان الكواكب الغازية العملاقــة والقصف العنيف المتأخر، بل لأن بإمكانه تقديم الآليات التي يمكن اتباعها لالتقاط كويكبات طروادة التي تشارك كواكب المشتري وأورانوس وزحل في مداراتها. بيد أنه ليس بالنموذج المثالي: حيث ينطوي على قدر من الصعوبة في تفسير السبب الذي جعل كوكب المشتري ينتهي به الحال مع عائلته الكبيرة الحالية من الأقمار الملتقطة، وكيف أن تأثير الجاذبية المشــترك لكوكبي المشــتري وزحل في فترة الرنين المــداري التي مرا بها (مع الاقترابات الوثيقة التي حدثت لهما) قد تسـبب في حدوث بعض المشـكلات. في واقع الأمر، أظهــرت بعض عمليات المحــاكاة حــدوث آثار عنيفــة مثــل الإقصــاء الكامل لكوكــب المريخ وعدم استقرار الكواكب الأخـــرى - وهـــي موضوعات عــلى درجة كبيرة من الأهمية لدرجة جعلتها تتسبب في تعديل هــذا النمــوذج إلى حد كبير. بالمثل، فقد نتج عن الــتردد الذي نتــج عنه اقتراب كوكبي المشـــتري وأورانـــوس أو نبتـــون والـــذي انتهـــى بإقصاء

منذ 4.5 بليون سنة، كانت الكواكب العملاقة موجودة على المدار الحالي لكوكب زحل، محاطة بحزام كايبر الأولي الكبير.

منذ 4.1 بليون سنة، نجم عن تأثير كل من كوكبي المشتري وزحل طرد كوكبي نبتون وأورانوس إلى المدارات البيضاوية التي بدأت في إحداث خلل في حزام كايبر الأولي.



منذ فترة تتراوح بين 4.1 و3.8 بليون سنة، وصل كل من كوكبي نبتون وأورانوس إلى الحد الأقصى من اللامركزية، وغيرا من ترتيب أماكنهما من الشمس. وتوزعت أجسام حزام كايبر في جميع الاتجاهات، قاصفة النظام الشمسي الداخلي.



منذ 3.5 بليون سنة، أصبحت مدارات كوكبي أورانوس ونبتون دائرية إلى حد ما، واتخذ النظام الشمسي شكله وتكوينه الحالي.

العالم الأصغر حجماً من النظام الشمسي تمامًا أن قام بعض علماء الفلك بالدفاع عن فكرة وجود نظام شمسي قديم معه ثلاثة كواكب جليدية عملاقة.

بصرف النظر عن هذه المشــكلات، فإن نموذج نيس أو أي من النماذج المشــابهة له لا يزال جزءًا أساســيًّا من الأفكار السائدة حاليًّا حول تاريخ نظامنا الشمسي. وهناك علماء فلك آخرون يطبقون الفكر نفسه للتوصل لإجابة عن الأسـئلة الأخرى. مثلاً، لِمَ لم يزد حجم كوكب المريخ ليصبح في حجم كوكب الأرض، ومن أين أتت المياه الوفيرة التي تغطي كوكبنا؟ تكمن الإجابة عن كل هذه الأسـئلة في نظرية التراكم الكبرى (Grand Tack)، والتي اســتندت إلى وجود مسار افتراضي يســير فيه كوكب المشــتري الذي تشــكل مؤخرًا في البيئة الغنية بالغــازات والخاصة بالسديم الشمسي القديم للغاية (انظر ص 31). طبقًا لهذه النظرية، نجم عن التفاعل مع السديم انجراف مدار كوكب المشتري نحو الداخل أولاً ثم نحو الخارج. في هذه العملية، تسببت جاذبية الكوكب العملاق في إحداث خلل في (بل سرقة) قدر كبير من المواد التي تتشكل منها الكواكب والموجودة حول مدار كوكب المريخ، كما أثرت حزام الكويكبات الخارجي بالأجســام الجليدية من أبعد أجزاء النظام الشمسي. وبمجرد إزاحتها، كان من الممكن أن تسقط على الأرض، محضرة معها المياه التي جعلت كوكبنا صالحًا للعيش عليه في يومنا الحالي.

الفكرة الرئيسة

لا تتبع الكواكب دائمًا المدارات نفسها

06

نشأة القمر

Birth of the Moon

مقارنة بالسواد الأعظم من الأقمار الموجودة في نظامنا الشمسي، فإن قمر كوكب الأرض يختلف تمام الاختلاف عنها. فحجمه الهائل بالمقارنة بكوكبنا يشير إلى أنه من المحتم أن أصول نشأته وتكوينه لم تكن عادية إلى درجة كبيرة. بيد أن حقيقة أصول نشأة القمر لم تتضح سوى بحلول ثمانينيات القرن الماضي، ولا تزال هناك بعض الأسئلة التي تتعلق بنشأته لم يتم التوصل لإجابة لها حتى الآن.

إن قمر الأرض ضخم – حيث يبلغ حجمه ربع قطر الأرض، وهو إلى حد كبير يعد أكبر الأقمار لواحد من الكواكب الرئيسية بالمقارنة بكوكبه الأم. بيد أن طبيعتها الغريبة اتضحت بشكل تدريجي في القرون التي تلت اختراع التلسكوب فقط. لم تتمكن نظريات نشأة النظام الشمسي (انظر ص 28) سوى من تفسير عائلات أقمار الكواكب العملاقة باعتبارها أنقاضًا متبقية تجمعت في المدار (وهي نسخة مصغرة من نشأة النظام الشمسي نفسه)، ولكن سرعان ما اتضح أن نموذج «التراكم المشترك» فشل في ذلك عندما تعلق الأمر بالأرض. بصرف النظر

الخط الزمني

1946م	1969 - 1972م	1974م
ر. أ. دالي أول من اقترح أن أصل القمر ناتج عن تأثير نجم عملاق.	تم إحضار صخرة تزن 382 كجم على متن مركبة الفضاء المأهولة أبولو لدى عودتها إلى الأرض لأغراض تحليلها.	اقترح نموذج هارتمان وديفيس إمكانية وجود أصول لتأثير جسم خارجي.

عن السـؤال الأساسي المتمثل في السـبب وراء امتلاك الأرض وحدها قدرًا من المواد الزائدة يكفـي لعمل قمر ضخم، فإنه من الواضح أن الزخـم الزاوي للنظام الذي يجمع بين الأرض والقمـر عالٍ للغاية بالمقارنة بالكواكب الأرضية الأخرى، وهو أمر لا يمكن توقعه إذا ما كان القمر قد تشكل في الأساس من قرص بطيء الدوران.

النظريات الأولى

سعيًا وراء الحصول على إجابات، توصل علماء الفلك في القرن التاسع عشر إلى نظريتين - هما الاستيلاء والانشطار. لمزيد من التوضيح، يشير نموذج الاستيلاء إلى أن القمر قد تكوّن في مكان ما داخل النظام الشمسي وتم الاستيلاء عليه فيما بعد من قبل الأرض أثناء أحد اللقاءات القريبة. ولكنه فشل في تفسير السـبب وراء كون كثافة القمر أقل بكثير من كثافة الأرض، مما استلزم وجود سيناريو لقاء غير محتمل. إن قدر الصعوبة الذي يمكن أن يواجهه كوكب صغير في الاسـتيلاء على قمر كبير يزيد عن ذلك الذي يمكن أن يواجهه أحد الكواكب العملاقة في فعل ذلك (وحتى هذا الوقت، لم نعرف سوى قمر واحد كبير فقط تم الاستيلاء عليه في النظام الشمسي الخارجي - ألا وهو قمر تريتون الجليدي الخاص بكوكب نبتون).

في هذه الأثناء، روج عالم الفلك الإنجليزي جورج داروين (ابن تشارلز داروين) لفرضية الانشـطار لأول مرة. لمزيد من التوضيح، درس داروين قوى المد والجزر بين الأرض والقمر، وأوضح أن مدار قمرنا يتجه ببطء نحو الخارج بحوالي 4 سـم (1.6 بوصة) في كل عام،

1976م	1994م	2012م
نمـوذج كامـيرون ووارد لديناميات الاصطـدام الـذي أدى إلى تشـكل القمر.	تكشـف بعثة كليمنتين التابعة لوكالة ناسـا عن بقـاء غير متوقـع لعناصر متطايرة في قشور الصخور القمرية.	ظهور دليل على التشابه الشديد بين مواد الأرض والقمـر، وهو الذي ألهم العلماء بنظريات جديدة لنشأة القمر.

بينما يتباطأ دوران الأرض على نحو تدريجي. وقد استنتج على نحو صحيح أن الأرض والقمر كانا في وقت ما قريبين من بعضهما البعض إلى حد كبير، وقال إنهما نشـآ كجسـم واحد يدور بسرعة: كما أن المواد التي شـكلت القمر اندفعت من خط الاستواء الخاص بالأرض البدائية من قبل أن يندمج في المدار. بل إنه قال إن حوض المحيط الهادئ يمثل ندبة لا تزال ظاهرة حتى الآن كأثـر من آثار هذا الانفصال العنيف. بوجه عـام، انتشرت هذه النظرية لعقود عديدة في أوائل القرن العشرين، وهذا قبل أن تتوصل الدراسـات الأخـرى لقوى هذه العملية في عام 1930 تقريبًا إلى أن هذا السيناريو مستحيل من الأساس.

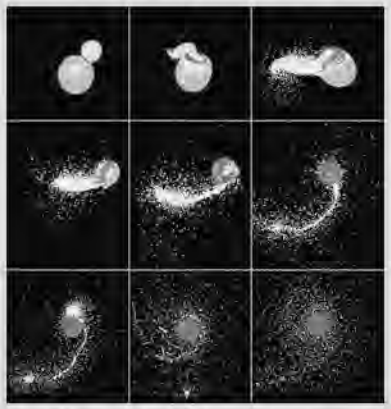
في السبعينيات، وصلت في النهاية أدلة جديدة على هيئة عينات الصخور جاءت بها بعثات أبولو التي سـافرت إلى القمر. وقـد أظهرت هذه العينات أن الصخـور القمرية كانت جافة للغاية – ولم تكن المياه فقط العنـصر الغائب عن الطبقات العلوية من قشرتها، بل أيضًا لم تكن المعادن الرطبة الموجودة على الأرض موجودة أيضًا. كما كانت الصخور مسـتنفدة بشكل كبير فيما يتعلق بالعناصر المتطايـرة (أي العناصر التي تكون نقطة الانصهار الخاصة بها منخفضة)، مثل البوتاسـيوم والرصاص والروبيديوم، وهذا بالمقارنة بالأرض وأنواع السـدم الشمسية الأساسية الداخلية. على الجانب الآخر، برهنت الأدلة على أن القمر أكثر ثراءً في أكسيد الحديد من كوكب الأرض نفسه، وهذا بصرف النظر عن وجود قلب حديدي صغير فقط به.

الاصطدام الهائل

جددت هذه النتائج الملهمة الاهتمام بالنظرية المهملة التي كان قد طرحها عالم الجيولوجيا الكندي ريجينالد ألدورث دالي في وقت سابق في عام 1946: ألا وهي فرضية الاصطدام الهائل. في هذه النسخة المعدلة من نظرية الانشـطار، تمثل القدر الأكبر من المواد التي شكلت كوكب القمر مـن مواد من الأرض، وهي التي لم تتطاير بفعل الـدوران السريع بل بفعل الاصطدام الكواكبي الذي حدث عند اصطدام الأرض بأحد الأجسام التي كانت بحجم الكواكب.

تشكيل ثيا (Modelling Theia)

لقد برهنت الأدلة على أن كوكب القمر قد تشكل من مواد تشبه المواد الموجودة على الأرض بشكل أساسي، وهذا ما جعل أصول كوكب ثيا المصطدم أكثر تقيدًا من أي وقت مضى. ولأن نسبة النظائر الموجودة عبر السديم الشمسي كانت على درجة عالية من الحساسية بالنسبة للمسافة التي تبعدها عن الشمس (انظر ص 30)، فمن الواضح أنه لا بد أن كوكب ثيا قد تشكل في مكان قريب للغاية ومن نفس المزيج من المواد بشكل أساسي. على الرغم من ذلك، فإن جاذبية الأرض نفسها يمكن أن تكون قد أعاقت تشكيل أي أجسام أخرى في الفضاء القريب، فمن أين أتى كوكب ثيا؟ هناك نظرية تقول إن كوكب ثيا قد تشكل إما في النقطة L4 أو في النقطة L5 – وهي نقاط جاذبية جيدة موجودة على المدار نفسه الموجود عليه كوكب الأرض، ولكن على بعد درجة أمام أو خلف الكوكب الأكبر حيث يقل تأثير كوكب الأرض. وهنا، كان من الممكن أن يزيد حجم كوكب ثيا بمقدار 10 في المائة تقريبًا عن كتلة الأرض قبل أن يتعطل مداره المستقر في نهاية المطاف ويسقط على مسار وينتهي به الأمر إلى اصطدام لا مفر منه. وهذا يمكن أن يُعزى إليه سبب التشابه بين المواد الخام في كلا الكوكبين (على الرغم من أنه لا يزال هناك قدر من الشك في كون هذا التفسير كافيًا). علاوة على ما سبق، وبما أن الكوكبين كانا يتحركان في مدارات متشابهة إلى حد كبير، فإن طاقة الاصطدام كان من الممكن أن تكون أقل بكثير، وربما هذا ما يفسر سبب بقاء بعض العناصر المتطايرة على سطح القمر حتى يومنا هذا.



نماذج محاكاة بالحاسب الآلي لتشكل القمر الأولي في غضون بضع ساعات بعد الاصطدام الذي حدث بين كوكب بحجم كوكب المريخ وكوكب الأرض الصغير الذي كان حجمه يبلغ 90 في المائة من حجمه في الوقت الحالي.

وقد برهن كل من ويليام كيه. هارتمان ودونالد آر. ديفيس من معهد علوم الكواكب في توكسون بولاية أريزونا على معقولية وجود الأجسام الأخرى التي تشكلت بالقرب من كوكب الأرض الأولي، في الوقت الذي برهن فيه كل من إيه. جي. دبليو. كاميرون وويليام وارد من جامعة هارفرد على وجود نموذج التأثير نفسه، وهذا ما يشير إلى أن الأمر قد ينطوي على اصطدام جسم بحجم كوكب المريخ بالأرض عند التماس. ومثل هذا الحدث من شأنه أن ينتج

قـــدرًا كبيرًا من العامل المؤثـــر، بالإضافة إلى ذوبان جزء كبير مـــن الأرض وخروجه إلى أحد المدارات، في الوقت الذي يجري فيه امتصاص معظم القلب الحديدي للجســـم المؤثر من قبل الأرض. كما أن الحرارة العالية والشـــديدة لتأثير الاصطدام من شـــأنها أن تفسر السبب وراء نقص المياه وغيرها من المواد المتطايرة في الصخور القمرية.

الأسئلة المعلقة

عـــلى نطاق عريض، تقبل علماء الكواكب فرضية تأثـــير الاصطدام الهائل منذ الثمانينيات. واعتقدوا أن الاصطدام من الممكن أن يكون قد وقع منذ ما يقرب من 4.45 مليار عامًا، حيث انحسر القمر بسرعة في غضون ســـاعات من الاصطدام. وتم منح الكوكب المصطدم اسماً غير رسمي، وهو ثيا على اسم أم إلهة القمر سيلين المذكورة في الأساطير اليونانية. على الرغم من ذلك، لا تزال هناك أســـئلة مهمة لم يتم البت فيها. لمزيد من التوضيح، أظهرت دراسة أكثر توثيقًا لعينات من الصخور القمرية أنها ليست خالية أو مستنفدة تمامًا من المواد المتطايرة على النحو الذي كان من المفترض أن تكون عليه عقب هذا الاصطدام الشـــديد. وفي واقع الأمر، لا يبدو أن درجات الحرارة حتى قد زادت عن 950 درجة مئوية (ما يعادل 1740 درجة فهرنهايت). وفي الوقت نفســـه، ثبت وجود تشـــابه كبير للغاية بين مزيج النظائر (وهي ذرات للعنصر نفســـه ولكن بـــأوزان مختلفة، والتي تعد وفرتها النســـبية مؤشرًا غاية في الحساسية على وجود المواد الخام في سديم الشمس) وذلك الموجود على الأرض – وهو تشابه كبير يشير إلى عدم وجود أي مساهمة من كوكب ثيا في هذا الأمر.

> **«لقد اختلط كوكب ثيا بشكل تام في كل من الأرض والقمر، ولكنه تسبب كذلك في إبعادهما عن بعضهما البعض.»**
>
> إدوارد يونج

وفي ســـبيل حل هذه المشـــكلات، تم تقديـــم العديد من النظريـــات المتنوعة، ربما كانت أهمهـــا تلك التي أقرت بالتحام كوكب الأرض وكوكب القمـــر معًا نتيجة للاصطدام المبدئي

بين جســمين أكثر بكثير، يزيد حجم كل جسم من هذين الجســمين بمقدار خمس مرات عن حجم كوكب المريخ. وفي الوقت نفســه، وفي عام 2016، قدم فريــق بقيادة إدوارد يونج من جامعة كاليفورنيا بولاية لوس أنجلوس أدلة جديدة تمكنوا من الحصول عليها من خلال بعض عمليات المقارنة الكيميائية، وأشــارت تلك الأدلة إلى أن كوكب ثيا اصطدم بكوكب الأرض بشــكل مباشر، وهذا ما أدى إلى اختلاط موادهما بشــكل تام وكامل. ويتضح لنا هنا أن أصل كوكب القمر – وربما كوكب الأرض نفسه – كان أكثر فوضى وتعقيدًا من التفسير الذي تقدمه لنا فرضية الاصطدام الهائل البسيطة.

الفكرة الرئيسة

نشأ كوكبنا من حادث تصادم بين الكواكب

07

الماء على كوكب المريخ

Water on Mars

هناك مجموعة من الاكتشافات ســاهمت في تغيير فهمنا للكوكب الأحمر الشهير المعروف باســم كوكب المريخ. فطالما نظرنا إليه على أنه كوكب بارد عبارة عن صحراء جرداء. ولكن الآن، اتضح لنا وجود مياه في أسفل سطحه، ليس فقط في صورة الجليد الذي يغطيه بل في صورته السائلة. بل إن الأكثر من ذلك أنه من المحتمل أن تكون المياه منتشرة بشكل أكبر على سطحه في بعض الأحيان.

انجذب علماء الفلك نحو فكرة احتمال تدفق المياه على سطح كوكب المريخ منذ أن تحدث الإيطالي جيوفاني شياباريلي عن مشــاهدته لقنوات ضيقة تربط بين المناطق الأكثر إظلامًا على سطح الكوكب في عام 1877. ونتيجة للفهم الخاطئ بكونها قنوات اصطناعية في العالم الناطق بالإنجليزية، كان الحديث من قبل العديــد من المراقبين الآخرين للكوكب عن وجود قنوات مثلها، وهذا ما أثار موجة من التكهنات حول إمكانية وجود حياة ذكية على سطـــح المريخ.

الخط الزمني

1877م	1965م	1972م
أقر جيوفاني شــياباريلي خطأً بوجود قنــوات مائيــة على ســطح كوكب المريخ.	أصبحت مارينر 4 أول مركبة فضائية تحلق فيا وراء كوكب المريخ مرســلة صورًا تشــير إلى كونه عالمًــا قاحلاً لا حياة فيه.	اكتشفت البعثة مارينر 9 دليلاً على وجود فيضانات قديمة ومجــارٍ نهرية جافة على سطح كوكب المريخ.

حتى عندما أظهرت عمليات الرصد والتجارب المتطورة في أوائل القرن العشرين أن القنوات لم تكن سوى مجرد خداع بصري، فإن فكرة كون كوكب المريخ عالمًا دافئًا ذا طقس مناسب ومياه على سطحه استمرت طوال السواد الأعظم من القرن العشرين. ولم يتم اكتشاف الحقيقة حتى منتصف الستينيات عندما حلقت السفن الفضائية التابعة لوكالة ناسا حول كوكب الأرض: يبدو أن الغلاف الجوي الخفيف للمريخ لم يجعله أكثر من مجرد عالم بارد يشبه القمر، مجرد كوكب مليء بالفوهات وغبار أحمر لا نهاية له.

ماضٍ مبلل - وحاضر أيضًا؟

على الرغم مما سبق، ومن نقطة منخفضة في أواخر الستينيات، شهدت البعثات المتتالية التي أرسلت إلى هذا الكوكب الأحمر أنه يستعيد جزءًا من بريقه وتألقه السابق، وهذا ما كشف عن امتلاكه لجوانب تشبه الأرض إلى حد كبير. وكانت مارينر 9، التي وصلت إلى المريخ في شهر نوفمبر من عام 1971، أول من اكتشف هذا الأمر – وهذا على الرغم من أنها كانت مضطرة إلى الانتظار لمدة شهرين حتى تنتهي العاصفة الغبارية الهائلة التي هبت على الكوكب بأكمله لكي تبدأ في عملية الاستطلاع الأولى لهذا الكوكب من المدار. وبينما اشتهرت هذه البعثة بتحديدها للبراكين المريخية الهائلة والفالق الشاسع الذي يشبه الوادي والمعروف باسم «وادي الملاحين أو Valles Marineris»،

> **«هناك مياه سائلة في الوقت الحاضر على سطح كوكب المريخ.»**
>
> مايكل ماير، ناسا 2015

2002م

اكتشفت بعثة Mars Odyssey كميات هائلة من المياه المتجمدة في التربة في نطاق كبير من النصف الشمالي من كوكب المريخ.

2006م

اكتشفت المركبة المدارية Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) مجاري صخرية رطبة قد تكون تشكلت بفعل العمليات المتعلقة بوجود المياه.

2015م

اكتشفت المركبة المدارية MRO معادن رطبة حديثة في المنحدرات المتواترة، وهذا ما يؤكد على وجود مياه سائلة بالقرب من سطح الكوكب.

فقد تمكنت أيضًا من اكتشاف أجزاء كبيرة من كوكب المريخ كانت محفورة بشكل أقل بكثير، وهذا ما منحها إشارات على احتمال وجود المياه في الماضي البعيد على سطح هذا الكوكب. كما اشتملت تلك الأجزاء على أودية متعرجة تشبه الأودية النهرية الموجودة على سطح كوكب الأرض وتشبه المسطحات المائية كذلك، والتي يبدو أنها كانت قد تكونت في أثناء الفيضانات الكارثية.

يبدو أن كوكب المريخ كان من الكواكب الرطبة في يوم ما، ولكن ماذا عن حاله الآن؟ على الرغم من أن مركبات فايكينج المدارية التي انطلقت في منتصف السبعينيات قد عززت وجود أدلة على وجود مياه على سطح المريخ في الماضي، وعلى الرغم من اكتشاف روادها لعلامات تشير إلى أن الصخور الموجودة على سطحه كانت عرضة في وقت ما للرطوبة أو كانت مغمورة بالمياه في الماضي البعيد، فإنه لم يتوفر سوى قدر ضئيل من الأدلة على استمرار

دورات ميلانكوفيتش المريخية

في أوائل العشرينيات، قدم العالم الصربي ميلوتين ميلانكوفيتش مقترحًا رائعًا للمساهمة في تفسير الدورات المناخية طويلة المدى في أثناء العصر الجليدي الأخير لكوكب الأرض. وأشار إلى أن القدر الذي يسخن كوكبنا من أشعة الشمس يتغير ببطء ولكن بنحو ملحوظ بتغير العديد من المعاملات المدارية للكوكب بمرور الوقت، وهذا ما يرجع سببه إلى تأثير الكواكب الأخرى. والآن، بدأ علماء الكواكب يتساءلون عما إذا كانت هناك دورات ميلانكوفيتش مماثلة من شأنها أن تكون مسؤولة عن التغيرات طويلة المدى التي طرأت على مناخ كوكب المريخ. والتغيرات التي كانت محل التساؤل هي:

- نسبة التغير على مدار 124 ألف سنة في مقدار ميل الكوكب من 15 درجة إلى 35 درجة، وهذا من شأنه أن يؤثر على مناخ المواسم المختلفة.
- تأرجح أو «سبق» قدره 175 ألف سنة في اتجاه محور الكوكب المائل، وهذا ما يؤثر على قدر تأثر كل نصف من نصفي الكوكب بالتغيرات الموسمية.
- دورات سنوية تتراوح بين 100 ألف و2.2 مليون سنة في مركزية المدار المريخي، وهي التي تتراوح ما بين دورة تامة كاملة تقريبًا إلى قطع بيضاوي، وهذا ما يؤدي إلى زيادة تأثير الفصول أو الحد منه.

على أي حال، يعتقد علماء الفلك ممن يدرسون الطبقات الجليدية السنوية التي تغطي القمم القطبية لكوكب المريخ أنهم قد اكتشفوا علامات تنوع من شأنها أن توضح قدرًا جيدًا من التطابق مع تأثير مثل هذه الدورات.

وجود المياه حتى الوقت الحالي، باستثناء بعض البقاع المتجمدة منها على القمم الثلجية الموجودة على هذا الكوكب.

في أواخر التسعينيات، تغيرت هذه الصورة بشكل سريع. فقد اكتشفت المركبة الفضائية Mars Global Surveyor (MGS)، وهي عبارة عن قمر صناعي مداري بإمكانه تصوير الكوكب بشكل أكثر تفصيلاً من مركبات فايكينج المدارية، علامات تشير إلى وجود جليد مدفون في النطاقات السفلية بعيدًا عن القمم القطبية. وفي عام 2002، اكتشف مسبار Mars Odyssey التابع لوكالة ناسا أدلة على وجود رواسب هائلة من الجليد المجمد في تربة كوكب المريخ. وفي واقع الأمر، وإلى حد كبير، يعتقد أن كيلوجرامًا من التربة (2.2 رطل) يحتوي على 500 جرام (18 أوقية) من المياه، وهذا في خطوط العرض الموجودة بعد خط العرض 55 درجة في كل نصف من نصفي الكوكب. وفي عام 2008، هبط المسبار Phoenix التابع أيضًا لوكالة ناسا بالقرب من القمم القطبية الشمالية وأكد على وجود جليد في التربة هناك.

ولكن، هل هناك مياه تتدفق على سطح كوكب المريخ في الوقت الحالي؟ هل تدفق المياه على سطح المريخ اليوم؟ يبدو هذا الأمر غير مرجح - فبينما يمكن أن تصل درجات الحرارة على سطح المريخ إلى 20 درجة مئوية (68 درجة فهرنهايت)، فإنها غالبًا ما تكون أقل من درجة التجمد، وفي الوقت نفسه، فإن طبقة ثاني أكسيد الكربون الرقيقة، والتي من المستبعد أن تكون درجات الحرارة السطحية للمريخ تصل إلى 20 درجة مئوية (68 درجة فهرنهايت)، ولكنها تبقى في الغالب أقل من التجمد، التي تضخ واحدًا في المائة فقط من ضغط الغلاف الجوي للأرض، تجعل أي مياه مكشوفة عرضة للغليان بشكل سريع حتى التبخر.

أخاديد غامضة

فتح أحد الاكتشافات البارزة التي قدمها Mars Global Surveyor النقاش في هذا الموضوع من جديد - مع وجود صور تشير إلى أماكن رطبة تشبه الأخاديد على منحدرات وادٍ يعرف باسم Gorgonum Chaos على خطوط العرض الواقعة في منتصف الجزء الجنوبي من الكوكب.

ولأنها تبدو كما لو كانت قد نشـأت من طبقة أسفل السـطح مباشرة، فقد تساءل الكثيرون عما إذا كانت عبارة عن علامات تشير إلى وجود مياه سائلة متسربة من طبقة مياه جوفية دفينة نحتت طريقها عبارة قنـاة على غبار السـطح قبـل أن تتبخـر. هناك أماكن تشـبه هذه الأماكن على سطح الأرض، وهي التـي تكونت نتيجة للمياه المتدفقة، بيـد أن الآراء الأكثر حذرًا قدمت أسـبابًا أخرى محتملة لحدوث هـذا الأمـر، مثـل التبخـر الانفجاري لجليـد ثاني أكسـيد الكربون المكشـوف في الطبقـة الواقعـة تحت السطح.

احترار عالمي؟

وتشير الأدلة الحديثة الناتجة عن المراكب الفضائية إلى أن كوكب المريخ قد يكـون انتقل من الحالة الباردة والجافة إلى الحالة الأكثر دفئًا ورطوبة على مسمع وبصر منا. فالمقارنات بين متوسط درجات الحرارة العالمية المقيسة من قبل مركبات الفايكينج المدارية في السبعينيات وتلك التي سجلت في منتصف الألفينيات زيادة قدرها 0.5 درجة مئوية (0.9 فهرنهايت) على مـدار ثلاثة عقود، وهذا ما يتزامن مع تقلـص حجم الجليد عند القمم القطبيـة (كما هو موضـح في الصورة أدناه). وقد يتمثـل أحد العوامل المهمة لهذا الاحترار العالمي الظاهر في انطلاق أعمدة ضخمة من الميثان، وهذا ما تم اكتشـافه في عام 2009 أعلى أكثر المناطق دفئًا في الكوكب، والتي يعتقد أنهـا ناجمة عن ذوبان الجليد الباطنـي. وعلى الرغم من أن غاز الميثـان لا يدوم طويلاً في الغلاف الجوي، فإنه غاز قوي من غازات الاحتباس الحراري ويمكنه أن يساهم في زيادة معدل الاحترار.

2001 1999

لقد زاد الغموض في هـذا الأمـر عـام 2006 حـين اكتشفت المركبة المدارية Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) التابعة لوكالة ناسا وجود أخاديد في مناطق ليس لها مثل تلك السمات، وهذا في صور MGS التي كانت قد التقطت منذ بضعة أعوام. من الواضح أن تشـكل الأخاديد من العمليات النشطة والمسـتمرة على الكوكب. وقد تشكلت

الأخاديد الحديثة على خطوط عرض مماثلة لتلك التي تشكلت على Gorgonum Chaos، مع وجود معظمها على المنحدرات الحادة التي تقع في مواجهة الجنوب. هناك نظرية تقول إن الثلوج تتجمع في مثل تلك المناطق (فهي التي لا تحصل سوى على قدر بسيط من أشعة الشمس في فصل الشتاء)، وأن الأخاديد تنجم عن ذوبان الجليد في فصل الربيع. بيد أن الأدلة القاطعة على تشكل تلك الأخاديد من خلال المياه لا تزال غير واضحة، ولكن التركيز على خطوط العرض الموجودة في المنتصف حيث تتركز تلك الأخاديد قدم لنا المزيد من النتائج القاطعة. ففي عام 2011، أعلنت وكالة ناسا عن اكتشاف خطوط المنحدرات المتواترة (RSLs) في العديد من المواقع نفسها التي كانت عبارة عن خطوط داكنة طويلة تمتد لأسفل على المنحدرات كالجدران المحفورة في أثناء فصل الصيف على كوكب المريخ، وتختفي أثناء فصل الشتاء. على النقيض من الأخاديد، تتركز خطوط المنحدرات المتواترة على المنحدات المواجهة لخط الاستواء حيث تستقبل أكبر قدر من أشعة الشمس على مدار العام، ومن ثم تكون دافئة إلى حد ما وقد تصل درجات الحرارة بها إلى 23- درجة مئوية (9- فهرنهايت).

على الرغم من الاعتقاد في البداية أنها ناتجة عن المياه المالحة (أي المياه التي بها نسبة عالية من الأملاح وهذا ما يقلل من درجة ذوبانها)، فإن خطوط المنحدرات المتواترة لا تعد مجرد مناطق رطبة من التربة. بدلاً من ذلك، يبدو أنها مناطق وعرة تتمكن بشكل ما من تمليس وتسوية نفسها والاختفاء في الجو البارد. هذا وقد تم اكتشاف الدليل الذي يثبت أن وجود المياه هو السبب في ظهورها في عام 2015، عندما أكدت المعدات والأجهزة التي كانت على متن MRO أن انتشار خطوط المنحدرات تلك يصحبه تشكل للأملاح المعدنية الرطبة. والرأي الجديد الذي تم الإجماع عليه هو أن خطوط المنحدرات تلك قد تشكلت بفعل المياه المالحة التي تتدفق أسفل السطح مباشرة عاملة على نشر التربة الفوقية الرخوة. يبدو أن كوكب المريخ ليس بصحراء جرداء كما كنا نعتقد من قبل، وهذا يثير التساؤل حول إمكانية العيش والحياة على كوكب المريخ (انظر الصفحة 76).

الفكرة الرئيسة

قد يكون المريخ صحراء، ولكنه ليس صحراء جرداء

08

الكواكب الغازية والجليدية العملاقة

Gas and ice giants

اكتشف علماء الفلك مؤخرًا وجود نوعين من الكواكب العملاق في النظام الشمسي الخارجي – الكوكبان العملاقان ذوا الغازات منخفضة الكثافة المشتري وزحل، والكوكبان العملاقان الأصغر والأكثر كثافة في الجليد أورانوس ونبتون. ولكن كيف تشكلت هذه العوالم، ولماذا يعد هذان النوعان مختلفين إلى هذا الحد؟

حتى التسعينيات، كان مصطلحا «الكوكب الغازي العملاق» و«الكوكب العملاق» مرادفين لبعضهما البعض. وكان يُعتقد أن أكبر عوالم النظام الشمسي لها نفس البنية ونفس التركيبة، بقلب صلب (قد يصل حجمه إلى حجم الأرض) محاط بغلاف جوي عميق يتألف معظمه من عنصرين خفيفي الوزن هما الهيدروجين والهليوم. كما أن الألوان المتميزة التي تشاهدها في الأغلفة الجوية العلوية للكواكب ارتبطت بالكميات الصغيرة نسبيًا من المركبات الكيميائية الأخرى. في الوقت نفسه، وعلى عمق يبلغ حوالي 1000 كيلومتر (أي 620 ميلاً)

الخط الزمني

1665م	1690م	1781م	1846م
قدم جيوفاني دومينيكو كاسيني أولى الملاحظات حول البقعة الحمراء الكبيرة لكوكب المشتري.	قاس كاسيني الدوران المتنوع لسمات كوكب المشتري كاشفًا عن عدم كونه جسمًا صلبًا.	اكتشف ويليام هيرشل كوكب أورانوس، أول الكواكب الجديدة في النظام الشمسي.	اكتشف جوهان جالي كوكب نبتون، وهذا عقب توقع بوجوده من قبل أوربين لو فيرير.

أو أكثر من سطحها المرئي، تحولت المكونات الغازية بفعل الضغط المتزايد إلى محيط من الهيدروجين السائل.

اكتشاف الكواكب الجليدية العملاقة

بدأت الصورة تتغير عندما حلل الباحثون البيانات التي أتت من عمليات التحليق بالمسبار الفضائي Voyager 2 على كوكبي أورانوس ونبتون (في عامي 1986 و1989 على التوالي). وقد تم الحصول على واحد من الأدلة الرئيسية على وجود فروق داخلية أساسية من خلال المجالات المغناطيسية الخارجية للكواكب. لمزيد من التوضيح، كانت تلك المجالات ضعيفة إلى حد ما، وكانت شديدة الميل حسب محور الدوران الخاص بكل كوكب ومقدار بعدها عن مركز كل كوكب أيضًا. وفي تناقض شديد الوضوح، كانت المجالات المحيطة بكل من كوكب المشتري وكوكب زحل أكثر قوة، كما كانت متمركزة داخل كل كوكب ومحاذية إلى حد كبير مع أقطابها الدورانية.

«ليس من المدهش أن كيمياء مثل هذه تحدث داخل الكواكب، الأمر فقط هو أن معظم الأفراد لم يسبق لهم التعامل مع التفاعلات الكيميائية التي يمكن أن تتم.»

لورا روبن بينيديتي

من الممكن فعليًا تفسير مغناطيسية كوكبي المشتري وزحل من خلال تأثير الطاقة، وهو التأثير الناجم عن طبقة رخوة من الهيدروجين المعدني السائل المحيط بالقلب الصلب لكل كوكب.

1952م

قدم مؤلف الخيال العلمي جيمس بليش مصطلح «الكوكب الغازي العملاق».

1972م

وكالة ناسا تطلق أول المسابير الفضائية Pioneer لكوكبي المشتري وزحل.

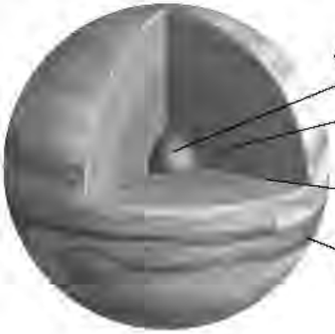
1986 - 1989م

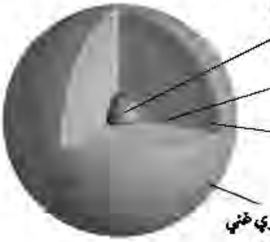
المركبة الفضائية Voyager 2 تحلق فيما وراء كوكبي أورانوس ونبتون، لتعثر على دليل أن تكونهما من تركيبة أكثر جليدية من الكواكب العملاقة الداخلية.

2014م

قدم كل من لامبريشتس ويوهانسن وموربيديلي نموذجًا للتراكم الحصوي لتفسير كيفية تشكل الكواكب العملاقة.

وفي وجود درجات الحرارة الشديدة ونسب الضغط العالية، تنقسم الجزيئات الموجودة في الغاز المسال لتشكل محيطًا من الأيونات ذات الشحنة الكهربائية. وحقيقة أن هذا الأمر لا يحدث على كوكبي أورانوس ونبتون يشير إلى أن الهيدروجين السائل لم يكن موجودًا ببساطة بكميات كبيرة وعلى أعماق كبيرة.





على الجانب الآخر، سرعان ما استنتج العلماء أن الأجزاء الداخلية من الكواكب الخارجية العملاقة كانت تسودها، مثل الجزء الأكبر من النظام الشمسي الخارجي، المياه وغيرها من الثلوج الكيميائية المتطايرة. وتفسح الطبقات الخارجية الغنية بالهيدروجين المجال، لبضعة آلاف من الكيلومترات لأسفل، لطبقة من المركبات الثقيلة إلى حد ما - والتي غالبًا ما تكون عبارة عن مياه وأمونيا وميثان. ومن ثم، وعلى الرغم من أن الهيدروجين والهليوم يمثلان أكثر من 90 في المائة من كتلة كوكبي المشتري وزحل، فإنهما يسهمان بنسبة قدرها 20 في المائة فقط من كتلة كوكبي أورانوس ونبتون.

برغم ذلك، وبصرف النظر عن الاسم، من الخطأ أن نعتقد أن الكواكب الجليدية العملاقة عبارة عن كرات مجمدة عميقة من المواد الصلبة. ففي هذه الحالة، يكون الجليد مجرد نوع من أنواع مزيد المركبات المتطايرة: المياه والميثان والأمونيا، والتي تشكل معًا محيطًا سائلاً رخوًا أسفل الغلاف الهيدروجيني الخارجي. ويعتقد أن التيارات الكهربائية الضعيفة الموجودة في هذه المنطقة هي المسؤولة عن المغناطيسية الغريبة لتلك الكواكب.

أصول الكواكب العملاقة

على الرغم مما سبق، لا تزال مسألة كيفية تشكل هذه العوالم الوسيطة الغريبة تمثل لغزًا أمام علماء الكواكب. كما أن النموذج التراكمي التقليدي لتكوّن الكواكب (انظر الصفحة 28) يواجه صعوبات في تفسير كل ما يتشكل حتى وقتنا هذا في النظام الشمسي (مدارات أورانوس على بعد حوالي 19 وحدة فلكية من الشمس، ونبتون على بعد حوالي 30 وحدة فلكية). ومن المشكلات التي يواجهها العلماء كذلك تلك التي تتمثل في أن دوران الكويكبات (ذات الحجم المتوسط والانحدار المعتدل في تشكل الكواكب) على هذا البعد من الشمس يحتاج فقط إلى قدر بسيط من الجاذبية ليتم طرده من النظام الشمسي بالكامل. في واقع الأمر، ونتيجة لجاذبية كوكبي المشتري وزحل اللذين يدوران بشكل أقرب للشمس، فإن الاحتمال الأكبر هنا هو أنهما قد طردا من النظام الشمسي ولم يتشكلا من خلال الاصطدام والتراكم بأعداد كبيرة.

يستند أحد الحلول الممكنة إلى ما يعرف باسم عدم الاستقرار القرصي، وهو نموذج لا يزيد فيه حجم الكواكب العملاقة من خلال التراكم بل من خلال التحطم المفاجئ للغاية لبعض الأجسام نتيجة الدوامات الكبيرة التي تحدث في السديم الشمسي. وبهذا الشكل، يؤكد المؤيدون لهذه الفكرة أن الكوكب الواحد يمكن أن يتشكل في مدة بسيطة تقل عن الألف عام. أما الفكرة البديلة، فتمثلت في كون تشكل جميع الكواكب العملاقة في حالات أقل خطورة وبالقرب من الشمس، بيد أن كوكبي أورانوس ونبتون قد مرا في وقت لاحق بفترة من التغير المداري أدت إلى تحولهما إلى مداراتهما الحالية (وهذا هو أساس نموذج نيس الذي تناول موضوع هجرة الكواكب - انظر ص 34). في مثل هذه الحالات، يتضح لنا وجود نماذج جديدة تشير إلى أن قلوب تلك الكواكب قد تشكلت بسرعة كبيرة من خلال التراكم الحصوي (انظر ص 31)، وهذا ما سمح لها بامتلاك القدر الكافي من الجاذبية الذي يجعلها تجتذب الغازات مما يحيط بها في عشرات ملايين السنين قبل أن تنفجر نتيجة للإشعاعات القادمة من الشمس القوية.

على الرغم مما سبق، لا يقدم أي نموذج من النماذج السابقة تفسيرًا جيدًا للسبب وراء الاختلاف القائم بين الكواكب العملاقة الغازية والجليدية. وقد تم تقديم العديد من الآليات في هذا الصدد، مثلاً، يشير نموذج عدم الاستقرار القرصي إلى أن الكواكب العملاقة جميعها بدأت بحجم أكبر من حجمها القائم، أي قبل أن تفقد الجزء الأكبر من أغلفتها الجوية نتيجة الهجوم الشرس من الأشعة فوق البنفسجية عليها من النجوم المجاورة الأخرى (وهي عملية تعرف باسم التقطير الضوئي الذي يرى في الوقت الحالي حول النجوم

أتمطر ماسًا؟

خرجت واحدة من أكثر النظريات المثيرة والجذابة من الدراسات الحديثة التي تناولت بنية الكواكب العملاقة الغازية والجليدية، وهي التي تمثلت في تكوين كلا النوعين من الكواكب لأمطار من الكربون البلوري (الماس) في أعماق أعماقها. في عام 1999، قام فريق من الباحثين من جامعة كاليفورنيا في بيركلي بضغط الميثان السائل، والذي تم اكتشاف وجوده بكميات كبيرة داخل كوكبي أورانوس ونبتون، بنسبة تزيد عن 100 ألف مرة من الضغط الجوي للأرض، وفي الوقت نفسه، قاموا بتسخينه إلى حوالي 2500 درجة مئوية (ما يعادل 4530 درجة فهرنهايت). وكانت النتيجة عبارة عن غبار من جزيئات الماس بالغة الصغر معلق في مزيج من المواد الكيميائية الهيدروكربونية الزيتية. ولأن الظروف الجوية داخل الكواكب الجليدية العملاقة لا تمنحها القدر الكافي من السخونة لتذيب جزيئات الماس، فإن أي جزيئات تنتج سوف تتمكن من التسرب ببطء من خلال الطبقات الداخلية السائلة للكوكب لتستقر في النهاية في قلبها الصلب.

في عام 2013، أدرك علماء مختبر الدفع النفثي التابع لوكالة ناسا احتمالية حدوث أمر أكثر إثارة في أجواء الكواكب الغازية العملاقة. هنا، يمكن أن تؤدي الصواعق القوية إلى تفكك الميثان وتحويله إلى سخام الكربون بنسبة عالية في الغلاف الجوي. وعندما ينخفض السخام بشكل تدريجي، فإنه ينضغط ليشكل فيما بعد ماسات بحجم الأنملة. وعلى النقيض من الكواكب الثلجية العملاقة، لا يتمكن هذا الماس من البقاء مع هبوطه عبر طبقات الكوكب. فعلى عمق يصل إلى حوالي 30 ألف كيلو متر (19 ألف ميل)، تصبح درجات الحرارة شديدة للغاية لدرجة تتسبب في ذوبان هذا الماس، وربما تتمكن من تشكيل طبقة من الكربون السائل تسبح فيها «جبال ماسية جليدية».

الحديثة – انظر ص 130). لقد كان كوكبا المشتري وزحل الأكبر حجماً أكثر قدرة على الصمود أمـــام هذه التجربة، ومن ثم تمكنـــا من الاحتفاظ بقدر أكبر من الهيدروجـــين، بينما فقد كوكبا أورانوس ونبتون معظمه.

عـــلى الجانب الآخر، قدمت لنا الأعمال الأخيرة التي تنـــاول التراكم الحصوي احتمالات أخرى، والتي أظهر فيها الاختلاف المبدئي البســـيط بين قلوب الكواكب المتزايدة وجود فرق كبير من الكواكب النهائية. لمزيد من التوضيح، يشير نموذج «الكتلة النطاقية» هذا إلى أن النمو السريع لقلوب الكواكب من الحصوات الصغيرة التي لا يتعدى حجمها بضعة ســـنتيمترات يولد حرارة تمنع الغازات من التوجه نحو القلب. ولكنه إذا ما وصل إلى كتلة معينة، فإن جاذبية القلـــب تحدث فتحة في قرص الحصوات المدارية، وهذا ما ينجـــم عنه قطع إمداداتها الغذائية. وعندما يبدأ القلـــب في أن يبرد، يقوم بتجميع الغازات بسرعة مـــن المناطق المحيطة به، وهذا مـــا يجعل الكوكب ينمو ليتحول في النهاية إلى كوكب غازي عملاق. في الوقت نفســـه، تكون الكواكب الجليدية العملاقة عبارة عن كواكب تكون قلوبها، والتي تتشـــكل في السديم إلى حد ما، لا تصل إلى تلك الكتلة النطاقية، أو كانت قد وصلت إليها في وقت متأخر للغاية بشـــكل جعلها تحتفظ بأكبر قدر من الهيدروجين سريع التلاشي والخاص بالنظام الشمسي الصغير. بناءً على ذلك، تجدها تحتفظ بتركيبة تشـــبه إلى حد كبير الحصى الجليدي الأصلي الخاص بالســـديم الشمسي الخارجي.

الفكرة الرئيسة

يختلف تركيب وتكوين الكواكب العملاقة الغازية عن الكواكب العملاقة الجليدية

09

الأقمار المحيطية

Ocean moons

تـــدور مجموعة كبيرة من الأقمار الجليدية حول كل كوكب من الكواكب العملاقة الموجودة في النظام الشمسي الخارجي، والتي تشكل العديد منها في الوقت نفســه ومن المواد نفسها التي تشكلت منها تلك الكواكب. بيد أن هناك أدلـــة متزايدة على أن عددًا كبيرًا من هذه الأقمار لا يمتلك أعماقًا متجمدة كما يبدو لنا من الوهلة الأولى.

تم اكتشاف أكبر أقمار النظام الشمسي الخارجي عقب اختراع التليسكوب في أوائل القرن الســابع عشر – فقد تم اكتشاف الأقمار الأربعة الكبيرة التي تدور حول كوكب المشتري في عام 1610، وتم اكتشاف قمر تيتان العملاق الذي يدور حول كوكب زحل في عام 1655. كما تم اكتشاف الكثير من الأقمار الأخرى منذ ذلك الحين حول كلا هذين الكوكبين، كما تم اكتشاف وجود مجموعات من الأقمار حول كل من كوكبـــي أورانوس ونبتون أيضًا. بيد أن طبيعة هذه الأقـــمار ظلت مجهولة حتى منتصف القرن العشرين، عندما اكتشـــفت عملية التحليل الطيفي

الخط الزمني

1971م

يقول لويــس إن بعــض الأقمار قــد تكون ساخنة بالقدر الكافي من خلال الاضمحلال الإشــعاعي، وهذا مــا يجعلهــا تحافظ على المحيطات السائلة أسفل قشرتها الجليدية.

1979م

أشــار بيل إلى وجود عملية التســخين المــدي كآليــة لتحريك النشاط الجيولوجي على أقمار المشتري الكبرى.

1979م

البعثة فوياجر 1 تكتشــف نشــاطًا بركانيًــا عــلى القمر أيــو، وقشرة جليدية على القمر أوروبا.

(انظر ص 94) باستخدام التلسكوبات الأرضية المتطورة أدلة على وجود كميات كبيرة من الجليد على العديد من أسطحها. وكقاعدة عامة، يتضاءل المحتوى الصخري للقمر حسب بعده عن الشمس، ولكن يظل الجليد المكون الأساسي في جميع الأقمار الصناعية الكبيرة تقريبًا. وهذا أمر متوقع فحسب، وذلك لأن جميع هذه العوالم نشأت خارج خط الثلوج في النظام الشمسي الأول، في منطقة يسود فيها الجليد على المواد الخام التي تتشكل منها الكواكب.

النظريات الأولى

في عام 1971، قبل عامين من وصول مسابير الفضاء الأولى إلى كوكب المشتري، نشر عالم الكواكب الأمريكي جون إس لويس أول تحليل مفصل لما يمكن أن يتوقع اكتشافه بين أقمار هذا الكوكب. وقد قال إن التحلل البطيء للمواد مثل اليورانيوم المشع داخل المكون الصخري لهذه الأقمار يمكنه توليد كميات كبيرة من الحرارة-ربما تكون كافية لإذابة المواد الجليدية حول اللب الصخري وتكوين محيط كروي مغطى بقشرة مجمدة وقد بدأت الفكرة في اكتساب شعبية عندما أكدت الصور التي جاءت من «بايونيرز 10 و11» أن الأقمار الثلاثة الخارجية الكبيرة لكوكب المشتري- أوروبا، وجانيميد، وكاليستو ـ تتشارك مظهرًا جليديًا عامًا (على الرغم من وجود اختلافات ملحوظة). ومع ذلك، فإن القمر الداخلي «أيو» بدا مختلفًا اختلافًا

«جميع هذه العوالم لك، باستثناء أوروبا لا تحاول الهبوط هناك.»

«آرثر سي كلارك».
رواية «2010 الأوديسا 2»

1995 - 2003م

قياسات مسبار «جاليليو» تكشف عن طبقات من الماء السائل على أوروبا، وجانيميد، وكاليستو.

2005م

مسبار كاسيني يكتشف عمودًا شاسعًا من المياه الجليدية خارجًا من «إنسيلادوس».

2013م

تلسكوب هابل الفضائي يكتشف بخار ماء فوق القطب الجنوبي لأوروبا.

صارخًا وليس به علامات وجود ماء في تكوينه. لقد مثل «أيو» مشكلة واضحة، وطرحت تفسيرات مختلفة لاختلافه الصارخ طوال فترة السبعينيات.

ثم في عام 1979، قبل مجرد أيام من تحليق مسبار«فوياجر1» لكوكب المشتري- والذي كان من المقرر أن يشتمل على عمليات تحليق أكثر قربًا من أقمار المشتري- ظهر تفسير جريء جديد للاختلافات. قال «ستانون جيه بيل» من جامعة كاليفورنيا بـ«سانتا باربارا» جنبًا إلى جنب مع زميلين من ناسا إن الجاذبية القوية لكوكب المشتري تبذل تأثير تسخين مدي على أقماره الداخلية، وعلى الرغم من أن مداراتها تقريبيًا دائرية إلا أن الاختلافات الطفيفة في المسافة تتسبب في جعل شكل الأقمار الداخلية («أيو»، و«أوروبا» على نحو ملحوظ) تنثني مع كل مدار. وهذا يولد احتكاكًا داخل صخورها ويجعلها تسخن أكثر كثيرًا مما يستطيع أن يفعل التحلل الإشعاعي وحده.

والأهم أن «بيل» اقترح أن «أيو» ينبغي أن يظهر إشارات لنشاط بركاني على سطحه، وهو تنبؤ وضع عندما أرسلت «فوياجر 1» صور تدفقات الحمم البركانية والعمود الضخم من مركبات الكبريت المنصهر التي انفجرت في الفضاء فوق القمر. وبدا من الواضح أن أي ماء يمكن أن يكون «أيو» قد احتوى عليه قد تبخر منذ وقت طويل.

الماء في كوكب المشتري

إن اكتشاف التسخين المدي القوي أحدث ثورة من الأفكار بشأن البيئة في النظام الشمسي الخارجي مع آثار كبيرة على أوروبا. أثبتت صور «فوياجر» وجود قشرة جليدية سميكة، لكنها أوضحت أيضًا أن السطح كان يجدد ويعاد ترتيبه بوضوح في فترة زمنية قصيرة (من الناحية الجيولوجية). بدت قشرة أوروبا، التي كانت ملطخة بشوائب يبدو أنها كانت تنبثق من الأسفل، أشبه بحزمة جليد مضغوطة من أن تكون قشرة جليدية ناعمة، وأفضل تفسير لهذه السمات هي أن الانفجارات البركانية تحت القشرة تطلق حرارة، مما يؤدي إلى تكوين محيط كروي من الماء السائل فوقه تزاح القشرة الصلبة ببطء وتموج بشدة.

لكن أحد السمات الأساسية في نمــوذج التســخين المدي هي أن تأثيراته تنخفــض بسرعة مع المســافة من الكوكــب الأم لذا بدا من غــير المرجح أن يؤثر على جانيميد أو كاليستو الأكثر بعدًا، وفي الحقيقــة، أشــارت صــور فوياجــر إلى أن جانيميد يمكن أن يكــون قد مر بمرحلة تشــبه أوروبا في ماضيــه المبكر قبل أن يتجمــد ويتصلــب، في حين أن داخل كاليستو ربما لم ينصهر قط من قبل وبالتالي كان من المفاجئ عندما وجــدت بعثة جاليليو إلى كوكب المشتري دليلًا مغناطيسيًّا على وجود محيطات فوق سطحية على كلا القمريــن (انظر المربع على اليسار).

الدليل المغناطيسي

بصرف النظر عن البحث عن نشــاط ســطحي أو آثار للماء من التاريخ الجيولوجي، يستطيع علماء الكواكب أن يبحثــوا مباشرة عن المحيطــات تحت الأرضية عن طريق دراسة المجالات المغناطيســية لمختلف الأقمار. إذا كان أحــد الأقمار له طبقة من مــادة متنقلة موصلة كهربيًّا تحت ســطحه فإنه عندما يتحرك خلال المجال المغناطيسي لكوكبه الأم ستتولد حركات تسمى تيارات دوامية في الطبقــة الموصلة. وهذا بدوره ينشــئ مجالًا مغناطيســيًّا مســتحثًّا مميزًا حول القمر يمكن اكتشافه بأجهزة القياس المغناطيسية المحمولة على مسابر فضاء عابرة. والمجال المســتحث مختلف تمامًــا عن أي مجال مغناطيسي أساسي مثل ذلك الناتج عن قلب حديدي، كما أن شــكله وقوته يمكنهما الكشف عن عمق الطبقة الموصلة وخصائصها الكهربية. لم تكتشــف المجالات المســتحثة حول أوروبا وإنســيلادوس فحســب، بل أيضًا حول أكبر أقمار كوكب المشــتري وهما جانيميد، وكاليســتو وحول القمر العملاق لزحل والذي يطلق عليه «تيتان» وجميعها تشــير إلى محيطات مالحة وعالية التوصيل للكهرباء وعلى أعماق متفاوتة.

وقد كانت هناك اكتشافات مذهلة أكثر تنتظر مركبة فضاء «كاسيني» عندما دخلت مدارًا حول زحل عام 2004. وقد كان مــن الأهداف الأولى للبعثة قمر زحل العملاق تيتان وهو عالم مجمد عليه يبدو أن الميثان يلعب دورًا مشــابهًا لدور الماء على كوكب الأرض. ومع ذلك، فإن القمر قد يخفي غطاءً من الماء الســائل والأمونيا في الأعماق تحت ســطحه (انظر المربع في الجهة المقابلة).

أعمدة إنسيلادوس

لكن تسليط الضوء غير المتوقع لبعثة «كاسيني» تحول إلى قمر أصغر كثيرًا وهو إنسيلادوس.

هذا القمر الذي قطره فقط 504 كيلومترات (313 ميلًا) له واحد من أكثر الأسطح سطوعًا في النظام الشمسي، وعدد قليل من الصور من مسابر فوياجر تظهره بمظهر منظر طبيعي مغطى بثلج ناضر. ومع ذلك، كان لا يزال مفاجئًا، عندما تحركت كاسيني خلال رحلة طيران مبكرة خلال عمود شاسع من بلورات جليد الماء بالقرب من القطب الجنوبي للقمر. تسربت محتويات بعض الكتل في الفضاء لتشكل حلقة خارجية باهتة حول زحل لكن معظمها سقط عائدًا إلى إنسيلادوس نفسه.

تم الآن تحديد أكثر من 100 عمود منفرد، ومعظمها ينفجر على طول المعالم التي تشبه النتوءات الجبلية المعروفة باسم خطوط النمر، وهي مناطق ضعيفة من القشرة عندها تسمح الشقوق للماء المالح السائل

البراكين الجليدية

قد يكون إنسيلادوس، وأوروبا هما العالمان الوحيدان اللذان بهما تسخين مدي كاف لإذابة الماء النقي لكن الكثير من أقمار المحيطات الأخرى في الأنظمة قد تكون مدينة لبيئاتها السائلة بوجود مواد كيميائية أخرى. إنها لحقيقة معروفة جيدًا أن الملح في محيطات كوكب الأرض يقلل من نقطة التجمد إلى حوالي 2- درجة مئوية (28 فهرنهيت) وهناك دليل جيد على أن الكثير من المحيطات تحت الأرضية الخارجية مالحة مثل تلك التي على كوكب الأرض. لكن وجود الأمونيا له تأثير أكبر أهمية فهي تخفض من نقطة الغليان بعشرات الدرجات- وهو ما يكفي للماء ليبقى سائلًا حتى في وجود تسخين مدي أضعف، وما يكفي للتبخر في صورة أعمدة تشبه الينابيع الساخنة التي تُرى على إنسيلادوس. الأكثر من ذلك-لأن خليط الأمونيا والماء يبقى ذائبًا على نطاق أوسع من درجات الحرارة-يعتقد علماء الكواكب أنها يمكن أن تكون قد لعبت دورًا مشابهًا للصهارة البركانية الموجودة على كوكب الأرض والتي تنفجر من الشقوق ومناطق تجديد السطح للعديد من الأقمار. في العوالم مثل تيتان، وقمر بلوتو ونبتون الذي يدعى «تريتون» هذه البراكين الجليدية الباردة يمكن أن تكون لا تزال تحدث اليوم.

الذي بالأسفل أن يتحول إلى غاز في الفضاء. يبدو أن التسخين المدي هو السبب مجددًا، وفي هذه الحالة تتولد الحرارة لأن مدار إنسيلادوس ممنوع من أن يصبح دائريًا تمامًا بسبب جاذبية القمر المجاور للخارج، وهو ديون. على النقيض من أوروبا ، يبدو أن الظروف على هذا القمر تسمح بوجود الماء بالقرب من السطح بشكل ملحوظ ، مما يجعل إنسيلادوس واحدًا من أكثر الأماكن الواعدة في نظامنا الشمسي للبحث عن الحياة.

الفكرة الرئيسة

العديد من الأقمار الخارجية في نظامنا الشمسي تخفي محيطات عميقة

10

الكواكب القزمة

Dwarf planets

الكواكب القزمة، التي لم يُعترف بها كفئة مميزة من الأجرام إلا في الآونة الأخيرة، أثبتت أنها واحدة من أكثر المناطق إثارة ودهشة في استكشاف الكواكب، وهناك اثنان على وجه الخصوص هما سيريس وبلوتو اللذان زارتهما المسابر الفضائية.

عندما اتخذ الاتحاد الفلكي الدولي قراره التاريخي بإعادة تصنيف الكواكب في 2006 (انظر المربع في الصفحة المقابلة) لم تُمنح إلا خمسة أجرام فقط لقب «كوكب قزم» الذي تمت صياغته حديثًا، وهي: سيريس (أكبر عضو في حزام الكويكبات)، وأربعة أجرام من حزام كايبر- بلوتو، وهوميا، ومايكمايك، وإريس (مرتبة حسب زيادة المسافة بينها وبين الشمس). تبددت الآمال أن يفي كويكب آخر وهو فستا ذو الـ 525 كم (326 ميلًا) بالمعايير عندما أشارت قياسات من مركبة الفضاء«دون» إلى أنه ليس له جاذبية كافية لجذب نفسه في شكل كرة (حتى مع إهمال الفوهة الصدمية الهائلة في قطبه الجنوبي). يدور كل من هوميا، ومايكمايك وإريس في أعماق حزام كايبر بعيدًا جدًا لدرجة أن التلسكوبات لا تستطيع أن تكشف سوى عن حقائق أساسية قليلة عنها، لكن لحسن الحظ، الكوكبان القزمان الآخران زارتهما المسابر الفضائية.

الخط الزمني

1801م	1930م	2005م
اكتشف «جوزيبي بيازي» سيريس أول كويكب والكوكب القزم الأعمق.	اكتشف «كلايد تومبو» بلوتو ـ أول أجرام حزام كايبر. وقد صنف في البداية ككوكب.	اكتشف علماء الفلك إريس، وهو جِرم له حجم مشابه لحجم بلوتو، ويدور في القرص المبعثر.

أكبر كويكب

كان سيريس أول كويكب يكتشف في بدايات عام 1801 على يد عالم الفلك الإيطالي «جوزيبي بيازي». وهو يدور على بعد من الشمس يتراوح من 2.6 إلى 3 وحدة فلكية، وهو يقع تقريبًا في منتصف المسافة بين كوكب المريخ وكوكب المشتري في منتصف حزام الكويكبات، وأشارت الملاحظات الطيفية

تعريف الكواكب القزمة

عندما اكتشف بلوتو في عام 1930 عُين بطبيعة الحال الكوكب التاسع في النظام الشمسي لكن سرعان ما ثارت الشكوك حول حالته وبدأ علماء الفلك يشكون أنه مجرد الأول في حزام الأجرام الافتراضي بعد نبتون. وحتى بعد اكتشاف أجرام أخرى في حزام كايبر في التسعينيات ظل بلوتو متمسكًا بحالته ككوكب- إلى أن تم اكتشاف جرم أطلق عليه 2003UB313 في شهر يناير من عام 2005، وهذا الجرم الذي أطلق عليه الاسم المستعار «زينا» وسُمي رسميًا فيما بعد باسم «إريس» قدر قطره بأنه أكبر من بلوتو بحوالي 200 كيلومتر (125 ميلًا) بلوتو، وروج له من قبل مكتشفيه على أنه الكوكب العاشر في النظام الشمسي.

لكن الاتحاد الفلكي الدولي المسؤول عن التسميات الفلكية الرسمية كانت لديه أفكار أخرى. فعندما واجهتهم إمكانية وجود عوالم كثيرة مماثلة كامنة في النظام الشمسي الخارجي عينوا لجنة من علماء الفلك لتصل إلى تعريف رسمي لكلمة كوكب. ولذلك فمنذ أغسطس 2006 عرف الكوكب على أنه عالم في مدار مستقل حول الشمس وله جاذبية تكفي لسحب نفسه في شكل كروي وأيضًا تكفي إلى حد كبير لإخلاء مداره من الأجسام الأصغر. وينطبق التصنيف الجديد للكوكب القزم على الأجرام التي تحقق المعيارين الأول والثاني ولا تحقق الثالث.

2006م	2015م	2015م
الاتحاد الفلكي الدولي يقدم تعريفًا للكواكب القزمة يشمل «سيريس»، و«بلوتو»، و«إريس».	مركبة فضاء «دون» تدخل مدارًا حول «سيريس» وترسل صورًا عن كثب للمرة الأولى.	«نيو هوريزونز» تحلق بمحاذاة بلوتو بسرعات عالية وتعود بثروة من البيانات.

من التلسكوبات الموجودة في كوكب الأرض في القرن العشرين إلى أن تكوين سطحه مماثل لتكوين سطح الكويكبات من الفئة C الأصغر حجماً.

هذه الأجسام الصخرية غنية بكربونات المعادن، ويعتقد أنها تمثل المادة التي لم يتغير جوهرها منذ الأيام الأولى للنظام الشمسي.

ومع ذلك، كشفت الملاحظات الأخيرة عن جانب أكثر تعقيدًا لـ«سيريس» فالصور من تلسكوب هابل الفضائي، وتلسكوب كيك أظهرت بقعًا مظلمة على السطح يعتقد أنها تتوافق مع الفوهات الصدمية، ومنطقة ساطعة مثيرة للدهشة ستصبح طبيعتها لغزًا دائماً.

في عام 2014 عندما كانت بعثة «دون» بالفعل في مسارها بين «فيستا»، و«سيريس» اكتشف علماء الفلك باستخدام مرصد هيرشل الفضائي بالأشعة تحت الحمراء غلافًا جويًا رقيقًا من بخار الماء يجري تجديده بفعل شكل ما من أشكال الانبعاث من السطح– على الأرجح تسامي جليد سطح مجمد مباشرة متحولاً إلى غاز.

عندما اقتربت بعثة «دون» من «سيريس» في بداية عام 2015 كشفت عن أكبر كويكب بتفاصيل غير مسبوقة، فقد ثبت أن سطحه أملس نسبيًا مع عدد من الفوهات الغائرة، وهذا يشير إلى أن «سيريس» له قشرة ناعمة غنية بالماء المجمد والتي ترتخي بمرور الزمن لتسطح معالم السطح المرتفعة أو المنخفضة.

أقمار بلوتو

بالنظر إلى حجم بلوتو الصغير فإن بلوتو له نظام معقد من الأقمار، فأكبرها، وهو «شارون» يزيد قطره قليلًا عن نصف قطر بلوتو نفسه، ويدور حول كوكبه الأم في 6.4 أيام فقط، وتضمن القوى المدية أن كل عالم يبقي الوجه نفسه دائماً موجهًا نحو الآخر. وهناك أربعة أجرام أصغر، وأسماؤها: «ستيكس»، و«نيكس»، و«كيربيروس»، و«هيدرا»، تدور أبعد قليلًا من شارون.

من اليسار إلى اليمين: بلوتو مع أقماره: شارون، ونيكس، وهيدرا كما شوهدت من تلسكوب، هابل الفضائي.

اكتشــف «دون» أيضًا العديد من البقع المضيئة داخل بعض الفوهات، وقد بدت إحداها مصحويــة بضباب متقطع يظهر فوقها. أشــار التحليل الكيميائي للبقع في خلال شــهور من وصول «دون» إلى أنها ربما تكون نوعًا ما من رواســب الملــح، لكن الطريقة التي تراكمت بها لا تزال غير مؤكــدة- وتقول إحدى النظريات إنها ربما ترســبت بفعل تسرب المياه المالحة إلى السطح من طبقة من المياه السائلة تحت الأرض.

الكوكب الذي خفضت منزلته

في حين كانت بعثة «دون» قادرة على الدوران حول «ســيريس» ودراسته لعدة أشهر، كانت بعثــة «نيو هوريزونز» إلى الكوكب القزم الخارجي بلوتــو محدودة بتحليق عالي السرعة مذهل في يوليو 2015 فنظرًا للمســافة الكبيرة التي يقع عليها بلوتو فإن الطريقة الوحيدة الممكنة للوصول إليه في إطار زمني معقول (أقــل قليلًا من عقد) كانت إطلاق بعثة خفيفة الوزن عالية السرعة في رحلة ذهاب بلا عــودة. كان هناك ضغط خاص للوصول إلى بلوتو بسرعــة أثناء بقائه بالقرب مــن الحافة الداخلية لمداره الإهليلجي ذي الـ 248 عامًا ـ اشــتبه الخــبراء في أنه قد يطور غلافًا جويًّا ضعيفًا عندما يكون على مقربة من الشمس لكن هذا الغلاف من شأنه أن يتجمد بسرعة إلى السطح عندما يرجع بلوتو من اقترابه من نبتون في أعماق حزام كايبر (انظر صفحة 70).

كانت الدراسات الطيفية في التسعينيات، قد أوضحت بالفعل أن سطح بلوتو يهيمن عليه نيتروجين متجمد عنــد درجات حرارة حوالي 299- درجة (380- فهرنهيت) مع وجود آثار للميثان وأول أكســيد الكربون، كما ثبت وجود غلاف جوي في بدايات 1985 (اكتشــف عن طريق تغيرات صغيرة في ضــوء النجوم البعيدة قبل أن تمر خلف بلوتو نفســه)، لكن الضغط الجوي أقل قليلًا من 1 على مليون من الضغط الجوي على كوكب الأرض ولا غرابة في أنه نظرًا إلى أن الغلاف الجوي تكون بفعل جليد سطحي متسامٍ، أنه أيضًا يهيمن عليه النيتروجين.

استخدمت أولى المحاولات المبكرة لرسم بلوتو في التسعينيات وفي الألفية الثالثة تلسكوب هابل الفضائي لرصد سلسلة من أحداث خسوف متبادلة بين بلوتو وقمره العملاق شارون، وقد كان من المستحيل تحديد معالم السطح مباشرة لكن اختلافات السطوع والألوان التي تحدث عندما يحجب كل عالم جزءًا من ضوء الآخر كشفت عن تباينات قوية في السطوع السطحي ودرجات الألوان، ولا سيما البقع الحمراء الداكنة التي كان يعتقد أن مسببها هي الثولونات- وهي جزيئات هيدروكربونية معقدة شكلها الميثان في الغلاف الجوي الرقيق الذي استقر مرة أخرى على السطح.

«هذا العالم حي، فله طقس، وله ضباب في الغلاف الجوي، وجيولوجيا نشطة.»

«آلان ستيرن» الباحث الأول في بعثة نيو هورايزونز

أكبر مفاجأة من مواجهة نيو هورايزونز كانت تنوع تضاريس بلوتو - ليس فقط في اللون لكن في الجيولوجيا الكلية، ففي حين أن سيريس مظهره موحد إلى حد ما إلا أن بلوتو فيه اختلافات صارخة تشير إلى ماضٍ جيولوجي مضطرب وربما حاضر نشط أيضًا، فهناك منطقة ساطعة تشبه القلب اسمها «تومبو ريجيو» لها سطح أملس ذو فوهات قليلة جدًّا، ولذلك يعتقد أنه حديث نسبيًّا (ربما يكون عمره 100 مليون سنة). ويبدو أنه مغطى بعدة كيلومترات من النيتروجين المجمد ، ويظهر معالم هي من عمل الأنهار الجليدية ولا شك. ومنطقة «كثولو ريجيو» الأدكن، على النقيض تمامًا، وعرة وبها الكثير من الفوهات وتشير إلى واحدة من بقع الثولون التي تم تحديدها في صور هابل.

وفي أماكن أخرى ، وجدت آثار لانفجارات غازية تشبه العيون الساخنة، جنبًا إلى جنب مع زوج من الجبال العالية على نحو خاص (ارتفاعه 5 كيلومترات أو 3 أميال) لا بد أنها مبنية إلى حد كبير من ماء مجمد. توحي الحفر المركزية العميقة أو الكالديرا (البحيرات البركانية)

بأن هذه القمم ـ رايت مونس وبيســكارد مونس، هي براكــين جليدية (انظر صفحة 62). إذا تم تأكيد ذلك، فســيكون إلى حد كبير أكبر الأمثلة التي تم اكتشــافها حتى الآن في النظام الشمسي الخارجي.

الفكرة الرئيسة

العوالم الصغيرة في النظام الشمسي يمكن أن تكون معقدة إلى درجة مدهشة

11

الكويكبات والمذنبات

Asteroids and comets

يمكن تقسيم الأجرام الصغيرة التي تدور بين الكواكب على نطاق واسع حسب تكوينها إلى كويكبات صخرية ومذنبات جليدية على الرغم من أن هذا التمييز غير واضح إلى حد ما. وبدلًا من ذلك يمكن تصنيفها حسب مناطقها المدارية. وهذا التصنيف يحدد مجموعات الكويكبات، والقنطور الجليدي، والمذنبات طويلة وقصيرة الأمد، وحزام كايبر، وأجرام القرص المبعثر.

في أعقاب تكون النظام الشمسي منذ حوالي 4.6 مليار سنة، تبقت كميات كبيرة من المادة تدور بين الكواكب الرئيسية وبعدها، وقد وضع تأثير جاذبية كوكب المشتري توقفًا مفاجئًا لنمو كوكب المريخ، وأنضب المادة المكونة للكواكب من المنطقة القريبة من مداره (انظر صفحة 38). وقد أدى هذا إلى ترك مجرد حلقة من الحطام الصخري والتي كونت حزام الكويكبات الموجود في الوقت الحاضر.

وعلى النقيض من ذلك، تكون وراء خط الثلج- الذي عنده يستطيع الجليد مقاومة الإشعاع الشمسي- عدد صغير من المذنبات الجليدية التي تجمعت في مدارات يسبح بين الكواكب العملاقة. وقد كانت المواجهات القريبة مستمرة لتغيير مدارات الكواكب قليلًا في كل مرة

الخط الزمني

1705م	1801م	1866م	1866م
تنبأ «إدموند هالي» بالمدار ذي الـ76 سنة للمذنب الذي يحمل اسمه.	اكتشف «بيازي» أول الكويكبات وأكبرها، وهو سيريس.	حدد «كيركوود» الفجوات في حزام الكويكبات مثبتًا أن مدارات الكويكبات يمكن أن تتطور مع مرور الوقت.	ربط «شياباريلي» زخات الشهب بمدارات المذنبات.

لكنهـا تثبت أنها أكثر إيذاءً للأجرام الأصغر، فكانت المذنبات كثيرًا ما ترسـل باندفاع نحو الشمس أو تطرد في مدارات طويلة بطيئة تصل إلى سنة ضوئية، ولا تزال تريليونات المذنبات باقية في هذه المنطقة إلى يومنا هذا، وهي تشـكل سـحابة أورت عنـد الحد الأبعد عن تأثير جاذبية الشمس.

وأخيرًا، عندما تحرك كوكب أورانوس ونبتون إلى تكوينهما الحالي منذ حوالي 4 مليارات سنة، مزقا الكثير من العوالم القزمة الجليدية متوسـطة الحجم التي كانت قد تشكلت حول حافة النظام الشمسي. بقيـت الأعضاء الخارجية لحـزام كايبر المبدئي هذا هادئة إلى حد كبير وشكلت ما يسـمى اليوم بـ«حزام كايبر الكلاسيكي» لكن أبناء عمومتها من ناحية الشـمس طرد أغلبهـا إلى مدارات مائلة للغاية وإهليلجيـة بدرجة عالية فكونت القرص المبعثر.

«لما كانت حركة الكوكب القزم «سيريس» بطيئة للغاية ومنتظمة فقد توارد إلى ذهني عدة مرات أنه يمكن أن يكون شيئًا أفضل من مذنب.»

«جيوزيبي بيازي»

الكويكبات المتطورة

حزام الكويكبات هو المخـزون الرئيسي الوحيد للأجرام الصغيرة التي عثر عليها عن طريق المصادفة، فهو أقرب هذه المناطق إلى كوكب الأرض. وفي أعقاب اكتشـاف كوكب أورانوس عام 1781، آمـن الكثير من علماء الفلك بالنمط العددي الذي أطلق عليه «قانون بود» والذي بدا أنه

1898م

اكتشف «جوسـتاف ويت» أول كويكب «إروس» قريب من كوكب الأرض.

1930م

اقترح «كينيث إيدجورث» وآخرون أن هنـاك حلقة من أجـرام صغيرة تـدور وراء نبتون مباشرة.

1932م

اقـترح «أوبيـك» وجـود سحابة مذنب تحيط بالنظام الشمسي على مسافة كبيرة.

1992م

اكتشـف تلسـكوب هابل الفضائي أول جرم من حزام كايبر غير بلوتو.

يتنبأ بمدارات الكواكب، وأيضًا بعالم مفقود بين كوكب المريخ، وكوكب المشتري، وفي عام 1801 اكتشف عالم الفلك الإيطالي «جيوزيبي بيازي» سيريس أكبر الكويكبات وأكثرها سطوعًا، ويدور في هذه المنطقة وسرعان ما اكتشف العديد بعد ذلك.

بحلول عام 1866، كان معروفًا لدى عالم الفلك الأمريكي «دانيال كيركوود» ما يكفي من الكويكبات لتحديد عدد من الفجوات في حزام الكويكبات. وتظهر هذه المناطق الفارغة لأن مدارات أي كويكبات داخلها من شأنها أن تجلب الصخور الفضائية في صدامات متكررة قريبة مع كوكب المشتري، وسرعان ما تطرد الكويكبات التي تسقط عن طريق المصادفة في مثل هذه المدارات الدائمة إلى مسارات أكثر إهليلجية. في عام 1898، اكتشف عالم الفضاء الألماني «جوستاف ويت» أول

أخذ عينات من النظام الشمسي البدائي

الكويكبات مهمة بالنسبة لفهمنا للنظام الشمسي لأنها تحتفظ بأجزاء من المادة المتبقية من ميلاده، وبناء على دراسات طيفية لضوء الكويكبات، والرؤى عن كثب من لقاءات المسبار الفضائي ودراسات النيازك (شظايا الكويكبات التي تسقط على كوكب الأرض) تنقسم الكويكبات إلى عدة مجموعات واسعة:

• المجموعة C من الكويكبات الكربونية لها أسطح مظلمة، ويعتقد أنها غنية بمواد خام لم تتغير.

• المجموعة S من الأجرام الصوانية، أو الحجرية تظهر أسطحًا متحولة كيميائيًّا بفعل درجات الحرارة العالية والعمليات الجيولوجية.

• المجموعة X تتكون من أجرام معدنية (معظمها حديد ونيكل).

ربما نشأت المجموعتان S، وX في أجرام أكبر نسبيًّا ارتفعت درجات حرارتها أثناء التشكيل فانفصلت من الداخل على حسب كثافتها. وهذه الأجرام انفصلت في وقت لاحق في التصادمات التي شتت بقاياها في أنحاء حزام الكويكبات (الحزام الذي يشغل حجمًا شاسعًا من الفضاء لكن يحتوي على عشرات ملايين الأجرام، لذلك فإن التصادمات متكررة على مقياس زمني فلكي). العديد من عائلات الكويكبات التي توحدها تشابهات التكوين أو المدار، يعتقد أن أصولها تعود إلى أحداث مثل هذه.

لاجئ من هذه المناطق ويسمى كويكب قريب من كوكب الأرض والذي تمت فهرسته باسم إروس 433. وأصبحت فئات عدة من هذه الأجرام معروفة الآن، وعلاقتها بمدار كوكب الأرض تراقب عن كثب باعتبارها تهديدًا محتملًا.

المذنبات طويلة وقصيرة الأمد

تفاعلات الجاذبية المماثلة مع الكواكب العملاقة تساعد أيضًا على توجيه الأجرام الجليدية للنظام الشمسي الخارجي، فالمذنبات التي تسقط نحو الشمس على الجزء الداخلي القصير نسبيًا من مداراتها الطويلة قد تجد مساراتها الإهليلجية قصيرة إلى حد كبير بفعل تقابل مع كوكب عملاق (خاصة كوكب المشتري) مما يؤدي إلى مدار يقاس بالعقود أو القرون بدلًا من آلاف السنين، والأوج (أبعد نقطة عن الشمس) في مكان ما في حزام كايبر. وتصبح مثل هذه المذنبات قصيرة الأمد زائرة متكررة للنظام الشمسي الداخلي ويمكن التنبؤ بها.

الحياة بالقرب من الشمس تقصر جذريًا من متوسط العمر المتوقع للمذنب- كل مسار حول الشمس يحرق المزيد من ثلج سطحه المحدود ويعرضه لخطر حدوث لقاء قريب مع كوكب المشتري الذي يمكن أن يقصر مداره أكثر. وينتهي الأمر ببعض المذنبات إلى مدارات تشبه الكويكبات ، حيث تستغرق سنوات قليلة فقط لتدور حول الشمس ويحترق جليدها المتبقي بسرعة إلى أن تتفكك إلى قشور داكنة مجففة لا يمكن تمييزها بشكل عام عن الكويكبات.

وقد شاهد مراقبو النجوم المذنبات منذ عصور ما قبل التاريخ وتم تحديدها بسهولة. مظهرها المميز عندما تكون قريبة من الشمس هو غلاف جوي متمدد أو ذؤابة حول نواة صلبة صغيرة نسبيًا وذيل يشير دائمًا بعيدًا عن الشمس. اشتهر العالم الإنجليزي «إدموند هالي» بأنه كان الشخص الأول الذي يحسب الفترة المدارية لمذنب عام 1705 فأدرك أن الأجسام التي شوهدت في 1531 و1607 و1682 كانت ، في الواقع ، نفس الجسم في مدار يدور حول الشمس على مدار 76 عامًا. وهذا الجرم موضع التساؤل يعرف الآن باسم مذنب هالي.

الأصول البعيدة

ولم تتضح الأصول النهائية للمذنبات حتى منتصف القرن العشريـــن. أول مـــن افترض سحابة أورت البعيدة في الواقع كان عـــالم فلك إســـتوني يدعى «إرنســـت أوبيك» عام 1932 ليـــشرح حقيقـــة أن المذنبـــات طويلة الأمد تقترب من النظام الشـــمسي الداخلي مـــن جميع الجهـــات، وطرحت بشـــكل مســـتقل على يد العالم الهولندي «جان أورت» في الخمســـينيات كوسيلة لتفسير كيف يمكن أن تكون المذنبات قد استمرت لمدة حياة النظام الشمسي دون أن تحرق جليدها وتُستنزف.

تكوين المذنب

كان الفيلســـوف الألماني «إيمانويل كانط» أول من اقترح أن المذنبات مكونة إلى حد كبير من جليد متطاير في مطلع عام 1755 إلا أنه في عام 1866، ربط «جيوفاني شـــياباريلي» الظهور الســـنوي لزخات الشهب (نيازك) بمرور الأرض عبر مدارات المذنبات. وقـــد أدت فكرة أن المذنبات تترك أثرًا من حطام غباري خلفها إلى نموذج شهير لنواة المذنب على أنها ركام مـــن حصى عائم يرتبط ببعضه بالجليد، لكن في بداية الخمســـينيات طرح عالم الفلـــك الأمريكي «فريد ويبل» نظرية كرة الثلج القذرة التي فيها الجليد هو العنصر الغالب. وقد دعمت استقصاءات مسبار الفضاء في وقت لاحق أساســـيات نموذج «ويبل» على الرغم من أن هناك اختلافات كبيرة من مذنب إلى آخـــر. وبصفة عامة، يبدو أنهـــا مزيج من الغبـــار الكربوني (بما فيها مـــواد كيميائية عضوية معقدة نسبيًّا) وجليد متطاير - ليس فقط ماء مجمد، لكن أيضًا أول أكســـيد كربون وثاني أكسيد كربون وميثان وأمونيا مجمدين.

على النقيض من ذلـــك، طرح العديد من العلماء حزام كايبر في أعقاب اكتشـــاف بلوتو عام 1930 وقد ارتبط اسمه باسم عالم الفلك الأمريكي الهولندي «جيرارد كايبر» عن طريق صدفة تاريخيـــة بعد أن كتب بحثًا في عام 1951 يقترح أن مثل هذا الحزام يمكن أن يكون قد وجد في الأيام الأولى للنظام الشـــمسي. وعلى عكس ســـحابة أورت، التي يمكن الاستدلال

عليها من عدة أدلة، لم يثبت وجود حزام كايبر حتى اكتشــف تلســكوب هابل الفضائي عام 1992. وكان QB1 الأول من بين عدة أجرام عثر عليها منذ ذلك الحين بعد نبتون.

الفكرة الرئيسة

المذنبات، والكويكبات هما حطام نظامنا الشمسي

12

الحياة في النظام الشمسي؟

Life in the solar system?

هل يمكن أن يكون هناك أشكال للحياة البدائية أو حتى المتقدمة نسبيًا في انتظار أن تكتشف وسط العوالم التي لا تعد ولا تحصى في نظامنا الشمسي؟ لم تكشف الاكتشافات الأخيرة مجموعة متنوعة مذهلة من الأجرام السماوية التي يحتمل أن تكون صالحة للحياة فحسب بل كشفت أيضًا أن الحياة نفسها يمكن أن تكون أكثر قوة بكثير مما كان يعتقد في السابق.

لقد فكر الناس في آفاق الحياة في عوالم أخرى في النظام الشمسي منذ العصور القديمة، لكن حتى أواخر القرن التاسع عشر-حين أدى تقرير «جيوفاني شياباريلي» عن قنوات المريخ (انظر صفحة 46) إلى أول بحث علمي في الموضوع- بقيت الحياة الفضائية إلى حد كبير ميدان الأدباء الساخرين ورواة القصص. وعن طريق تحديد أوجه التشابه مع كوكب الأرض شعر الكثير من علماء الفلك بالرضا تجاه قبول أن كوكب الزهرة قد يكون عبارة عن عالم مداري رطب تحت سحبه، وأن كوكب المريخ الأكثر برودة والقاحل كان لا يزال قادرًا على دعم حياة نباتية بدائية، إن لم تكن كائنات فضائية ذكية كما افترض »بيرسيفال لويل».

الخط الزمني

1977م	**1977م**	**1979م**
اكتشف علماء المحيطات أنظمة بيئية مزدهرة حول فتحات في أعماق البحر على كوكب الأرض.	حدد «كارل ووريس» مملكة ثالثة للحياة، وهي العتيقات، التي تحتوي على العديد من الكائنات المحبة للظروف القاسية.	اكتشاف التسخين المدي يرفع من فرص الماء السائل على أقمار النظام الشمسي الخارجي.

لكن منذ بدايات القرن العشرين، عانت التطلعات إلى الحياة سلسلة من النكسات الهائلة، ففي عام 1926، أوضح عالم الفلك الأمريكي «والتر سيدني آدامز» أن الأكسجين وبخار الماء كانا غائبين تمامًا تقريبيًا عن الغلاف الجوي لكوكب المريخ، وفي عام 1929 أوضح «بيرنارد ليوت» أن الغلاف الجوي كان أرق من الغلاف الجوي للأرض بشكل كبير. وقد أشار هذان الاكتشافان معًا إلى عالم شديد الجفاف نادرًا ما ترتفع فيه درجات الحرارة عن درجة التجمد، وتحليق مسبار الفضاء في الستينيات ضرب آمال الحياة على المريخ في مقتل، كما أن المسابير إلى كوكب الزهرة أرسلت مرة أخرى نتائج لا تقل قتامة- لقد كان السطح عبارة عن فرن سام دمر حتى المراكب الفضائية المدرعة تدريعًا شديدًا في غضون دقائق.

وقد ظهرت النهضة اللاحقة للتطلعات إلى الحياة في النظام الشمسي (وما بعده) من تيارين منفصلين من الاكتشافات اكتسب كل منهما وتيرة سريعة منذ السبعينيات. في الفضاء، أكدت المسابير إلى الكواكب البعيدة أن العديد من العوالم غير المتوقعة تحوي مسطحات كبيرة من الماء السائل الذي يمكن أن يكون صالحًا للحياة (أهمها قمرا أوروبا، وإنسيلادوس ـ انظر الفكرة التاسعة)، في حين أن الدراسات التي أجريب عن كثب لكوكب المريخ قد أظهرت أنه يمكن إلى حد ما ألا يكون قاحلًا كما كان يُعتقد سابقًا (انظر الفكرة السابعة).

الحياة في الظروف القاسية

لكن، على القدر نفسه من الأهمية، تأتي الاكتشافات التي اكتشفت على كوكب الأرض والتي فيها سلسلة من الاكتشافات التي قلبت الأفكار التقليدية حول الظروف التي فيها يمكن أن تستمر

1996م

أعلن علماء ناسا عن جزيئات حيوية محتملة وحفريات وأحياء دقيقة في نيزك من المريخ.

2003م

اكتشف علماء الفلك على كوكب الأرض علامات للميثان في الغلاف الجوي لكوكب المريخ، لكن الدراسات التي تبعت ذلك كانت مناقضة.

2014م

اكتشفت مركبة «Curiosity Rover» لوكالة ناسا عن ارتفاعًا مفاجئًا في الميثان في الغلاف الجوي للمريخ، وربما تكون إما بركانية الأصل أو أحيائية الأصل.

الحيــاة وتزدهر، وقد بدأت هذه الاكتشــافات في عــام 1977 عندما اكتشــف علماء المحيطات باســتخدام الغواصة «آلفين» حياة وفيرة حــول فتحات بركانية في أعــماق المحيط في قاع المحيط الهادئ. في غياب ضوء الشــمس الذي يحرك عملية البناء الضوئي (عادة قاعدة الهرم الغذائي على اليابســة وفي المحيطات) طورت هــذه الكائنات الحية بــدلًا من ذلك نظامًا يقوم على الكائنات الحية الصغيرة التي تزدهر في درجات الحرارة التي تقترب من الغليان وتهضــم مركبــات الكبريــت البركانيــة. توجد هذه البكتيريا في أحشــاء الديدان الأنبوبية الطويلة، وتدعم في النهايــة المخلوقــات الأخرى بما في ذلك الأســماك والقشريات التي أصبحت معزولة منذ فترة طويلة في هذه الواحات الدافئة في أعماق المحيط البارد.

«أعتقد أنه سيكون لدينا إشارات قوية إلى وجود حياة خارج كوكب الأرض خلال عقد من الزمان.»

«إيلين ستوفان» كبيرة علماء ناسا، 2015

في أواخر الســبعينيات، بحث عالم الأحياء الدقيقــة الأمريكي «كارل وويس» في الحمض النووي لميكرويات الفتحات في عمق البحر واكتشــف اكتشــافًا رائعًا هو أنها ليســت ببساطة بكتيريــا متكيفة بل هي أعضــاء من مملكة حياة مختلفة تمامًا تعرف الآن باســم العتيقات. وقد اتضــح أن العتيقات، والتي تتميز بالعمليــات الفريدة في اســتقلاب خلاياها، كانت منتشرة انتشــارًا مذهلًا في بيئات تتنوع بين المحيطات، والتربة وحتــى قولون البشر. والأهم من ذلك في البحــث عن حياة فضائية أن العتيقات المحبة للظروف القاســية تزدهر أيضًا في مجموعة من البيئات القاسية ـ ليس فقط في درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة لكن أيضًا في المناطق القاحلة للغاية، أو المالحة، أو الحمضية أو القلوية أو غير ذلك من الظروف السامة.

لا تزال الانتماءات التطورية للعتيقات غير مؤكدة ـ فهي لها سمات مشتركة مع كلتا المملكتين الرئيسيتين للحياة: البكتيريا والكائنات متعددة الخلايا حقيقيات النوى. يعتقد بعض الخبراء أنها قد تكون أقدم أشكال الحياة على كوكب الأرض، مما يزيد من احتمالية أنها تطورت فيما قد نسميه

نحن اليوم بالبيئة القاسية. ومن المؤكد أن الغلاف الجوي لكوكب الأرض قد خضع لتغيرات رئيسية قبل أن يصل إلى تركيبه الحالي، وبعض هذه التغيرات كانت مدفوعة بظهور الحياة نفسها وتطورها. ومن المؤكد أن الظروف التي نشأت فيها أقدم الكائنات الحية معادية للغالبية العظمى للحياة في الوقت الحاضر. فمن وجهة نظر العتيقات، نحن هم من يحبون الظروف القاسية.

البحث عن الحياة

في حين أن احتمالات أن تكون الحياة قد نشأت في عوالم أخرى قد تلقت دعمًا كبيرًا إلا أن إثباتها أمر مختلف، فحاليًّا، استكشافنا للكواكب الأخرى يقتصر على المسابر الروبوتية، ومهمة التعرف على علامات للحياة في الماضي أو الحاضر هي مهمة متخصصة لدرجة أنه لم يصمم إلا عدد قليل من البعثات التي تضعها في الاعتبار ، والمسبار الوحيد الذي أطلق حتى الآن، وهو بيجل 2، والذي تعطل للأسف أثناء هبوطه على كوكب المريخ عام 2003.

التبذر الشامل

فكرة أن الحياة يمكن أن يكون أصلها من الفضاء فكرة قديمة، لكنها أصبحت ذات شعبية في القرن التاسع عشر بمجرد أن اعترف العلماء بأن المادة تسقط إلى كوكب الأرض بانتظام في شكل نيازك. في عام 1834 تعرف عالم الكيمياء السويدي «يونس برزليوس» على الكربون في نيزك لأول مرة، ورصد العلماء اللاحقون ما اعتقدوا أنه يمكن أن يكون آثارًا للبكتيريا المتحجرة داخل النيازك الكربونية. وفي عام 1903 اقترح سويدي آخر يدعى «سفانت أرينوس» أن الميكروبات قد تسبح في الفضاء مدفوعة بضغط الضوء الصادر من النجوم.

وفي الآونة الأخيرة، بينت دراسات البكتيريا والعتيقات المحبة للظروف القاسية أن الميكروبات يمكن أن تبقى على قيد الحياة في الفضاء (ولا سيما إذا كانت محتجزة داخل نيازك) لمدد طويلة نسبيًّا. وقد أشعل اكتشاف النيازك من القمر وكوكب المريخ الاهتمام بفكرة أن الحياة يمكن نقلها بين كواكب النظام الشمسي.

إن كوكب المريخ هو المكان الأسهل وصولًا للبحث عن حياة، وستعود وكالة الفضاء الأوروبية قريبًا إلى المعمعة ببعثة مسبار ثنائية التشعب تسمى «ExoMars» مصممة خصيصًا للبحث عما يطلق عليه بصمات حيوية.

وتقوم وكالة ناسا بنشاط، في الوقت نفسه، بتطوير خطط لبعثة أوروبا المستقبلية، مع دراسة مختلف المفاهيم من أجل تحقيق مستهدف لإنسلادوس. ستكون كلتا المركبتين الفضائيتين مركبتين مداريتين لكن بالتأكيد في حالة إنسلادوس قد يكون من الممكن مباشرة الكشف عن علامات الحياة في المادة التي تطرحها أعمدة الجليد الشهيرة للقمر.

إن أي بحث عن الحياة باستخدام روبوتات هو حتمًا محدود النطاق مقارنة بما يمكن أن يحققه علماء الجيولوجيا أو الأحياء البشريون، لذا فإن الحكم النهائي على الحياة في النظام الشمسي يجب في النهاية أن ينتظر الاستكشافات البشرية. إن تحديد النيازك المعروف أنها قد أتت من كوكب

حفريات المريخ الصغيرة؟

في عام 1996، احتل فريق من الباحثين في ناسا عناوين الأخبار مع ادعاءات بأن نيزكًا من المريخ، صُنِّف باسم 84001ALH، يحتوي على آثار لحياة مريخية قديمة. وإلى جانب الجزيئات حيوية المنشأ، التي ينظر إليها على كوكب الأرض على أنها عمل الكائنات الحية، وجد الفريق هياكل شبيهة بالديدان تشبه الأحافير (في الصورة المقابلة). على الرغم من الإثارة في ذلك الوقت، سرعان ما أثار علماء آخرون مخاوفهم. لم يتساءل البعض عما إذا كانت الجزيئات الأحيائية قد تمكنت من الدخول إلى النيازك بعد وصولها إلى كوكب الأرض فحسب بل إن فريقًا قدم شرحًا للطريقة التي يمكن أن تكون قد تكونت بها دون الحاجة إلى حياة. وفي الوقت نفسه، الحفريات الصغيرة المزعومة أصغر من أي كائنات حية صغيرة مقبولة على كوكب الأرض، ومع طرح هذا العدد الكبير من الأسئلة يبدو أن الدليل القاطع على الحياة على كوكب المريخ سيضطر إلى انتظار المزيد من الاكتشافات.

المريخ (ويحتمل من عوالم أخرى) تفتح إمكانية إجابة أسرع، لكن مثلما يظهر الجدل حول «الحفريات الصغيرة لكوكب المريخ» فإن مثل هذه الأدلة تحدث تعقيدات في حد ذاتها (انظر المربع في الصفحة السابقة). وفي الواقع، حقيقة أن المادة يمكن نقلها بين العوالم بهذه الطريقة تثير تساؤلات مثيرة للاهتمام حول أصول الحياة على كوكبنا.

الفكرة الرئيسة

هناك مواطن سماوية صالحة للحياة على عتبة كوننا

13

شمسنا ـ نجم عن كثب

Our Sun – a star in close-up

يقع أقرب نجم على بعد 150 مليون كيلومتر فقط (93 مليون ميل) من كوكب الأرض، وهو يهيمن على النظام الشمسي. إن قرب الشمس يعني أننا يمكننا دراستها بالتفصيل وتعقب العمليات التي تحدث أيضًا في معظم النجوم الأخرى لكن تستحيل رؤيتها.

ذلك القرص المتوهج حاد الحواف الذي يهيمن على السماوات في وقت النهار يبدو للوهلة الأولى أنه الشمس كلها، لكن حتى أقدم علماء الفلك قد رأوا علامات على أن الحال لم يكن كذلك، وأبرز تلك العلامات كانت الشرائط الشاحبة الممتدة التي تظهر عندما يحجب القمر هذا القرص الحارق خلال الكسوف الكلي للشمس.

تسمى هذه الطبقة الخارجية للشمس باسم الهالة، بينما الحلقات الحمراء والوردية التي تشبه اللهب التي تأخذ شكل القوس فوق قرص القمر المظلم مباشرة في أحداث الخسوف باسم النتوءات. في عام 1605 تقريبًا، اقترح «يوهانس كيبلر» أن الهالة أنتجت بفعل مادة ضعيفة حول الشمس كانت تعكس ضوءها بخفوت، ولم يكن حتى عام 1715 أن ناقش «إدموند هالي» أن الشمس لها الغلاف الجوي الخاص بها.

الخط الزمني

1612م

رأى «جاليليو» البقع الشمسية للمرة الأولى واستخدمها في قياس دوران الشمس.

1843م

اكتشف «صموئيل سكهوب» الاختلاف الدوري لعدد البقع الشمسية.

1863م

قاس «كارينجتون» الدوران التفاضلي للشمس وأثبت أنها ليست جسمًا صلبًا.

البقع الشمسية

«أحد التحديات الكبرى في الفيزياء الشمسية هو فهم، وفي نهاية المطاف التنبؤ، بالنشاط المغناطيسي للشمس.»

الدكتورة «جوليانا دي توما»

ومع ذلك، كان اكتشاف «جاليليو» عام 1612 للبقع الداكنة الموجودة على قرص الشمس هو الذي غير فهمنا للطبيعة الحقيقية للشمس إلى الأبد، فقد أظهرت البقع الشمسية أن الشمس لم تكن كرة غير متغيرة بل هي جسم مادي غير تام وقابل للتغيير. وقد أتاحت حركة البقع لجاليليو أن يبين أن الشمس تدور حول محورها حوالي مرة كل 25 يومًا.

في الستينيات من القرن الثامن عشر، اكتشف العالم الأسكتلندي «ألكسندر ويلسون» اكتشافًا وضع علماء الفلك في طريق مسدود لمدة كبيرة من القرن. فقد أظهرت دراساته المتأنية للبقع الشمسية أثناء اقترابها من طرف الشمس (الحافة المرئية) أنها منخفضة بالمقارنة مع معظم الأسطح المرئية. وقد أدى ذلك بـ«ويليام هيرشل»، الذي كان ذا تأثير كبير بسبب اكتشافه لكوكب أورانوس، والعديد من الاكتشافات الأخرى، إلى استنتاج أن السطح الساطع للشمس كان في الواقع طبقة من الغيوم، وهذه الغيوم الكثيفة تكتنف سطحًا صلبًا أكثر برودة وتخفيه عن الأنظار، وتكهن «هيرشل» أن هذا السطح يمكن حتى أن يكون مأهولًا. وقد صاغ عالم فلك آخر ألماني الجنسية يدعى «يوهان سكروتر» مصطلح «الكرة الضوئية» ليصف هذا السطح المتوهج الظاهري فالتصق به هذا الاسم.

1900 - 1908م

اكتشف «هيل» الطبيعة المغناطيسية للبقع الشمسية، ومن ثم استخدمها في شرح أصل دورة البقع الشمسية.

1946م

رصد علماء الفلك الغلاف الجوي الشمسي عند الأطوال الموجية للأشعة السينية، والأشعة فوق البنفسجية لأول مرة باستخدام أدوات تحملها الصواريخ.

1976م

اكتشف «جون إيه إيدي» انخفاضًا مستمرًا في أعداد البقع الشمسية تقريبًا في أواخر القرن السابع عشر، يعرف باسم «قيمة ماوندر الصغرى».

في السبعينيات من القرن التاسع عشر، فقدت نظرية الشمس الصلبة أخيرًا مصداقيتها على يد عالم الفلك الإنجليزي الهاوي «ريتشارد كارينجتون»، فمن خلال قياساته الدقيقة، أثبت أن البقع الشمسية عند الحدود المختلفة تدور بمعدلات مختلفة. وهذا الدوران التفاضلي، الأسرع عند خط الاستواء منه عند القطبين، أظهر أن الشمس، في الواقع، جسم مائع.

الدورة الشمسية

الاكتشاف الرئيسي أن البقع الشمسية تتغير في دورة منتظمة كان على يد عالم الفلك السويسري «هينيريش سكهوب» عام 1843 باستخدام 17 عامًا من سجلات محفوظة بدقة. كانت البقع الفردية تظهر وتموت في غضون أيام، لكن «سكهوب» تعرف على

الدورات في النجوم الأخرى

بصفة عامة، الدورات المغناطيسية للنجوم البعيدة تحدث تغييرًا طفيفًا للضوء الكلي الخارج منها لدرجة أنه لا يكتشف من كوكب الأرض، إلا أن هناك استثناءات. النجوم المضيئة هي نجوم قزمة حمراء صغيرة وخافتة لكنها مع ذلك تستطيع إطلاق توهجات، أكثر قوة من أي توهج مرئي من الشمس (انظر صفحة 138). يمكن أيضًا استخدام أساليب مختلفة لقياس حجم البقع الشمسية الكبيرة وكثافتها (أكبر مئات المرات من تلك الموجودة على سطح الشمس). وأبسط هذه الأساليب أسلوب يطلق عليه تصوير دوبلر، ويتضمن قياس التغيرات الطفيفة في الضوء الناتج من النجم ولونه أثناء دورانه. وتكشف نُهج مماثلة في النجوم الثنائية الكسوفية أو النجوم ذات الكواكب الخارجية العابرة (انظر صفحتي 145 و151) اختلافات في سطح النجم عندما تُحجب أجزاء مختلفة عن الرؤية.

والأساليب الأكثر تعقيدًا تشمل إما «تأثير زيمان»، وهو تعديل في خطوط الامتصاص في طيف النجم (انظر صفحة 94) تحدثه المجالات المغناطيسية الشديدة، أو «نسبة خط العمق»، وهو اختلاف في شدة الخطوط وهي تكشف عن اختلافات درجات الحرارة على سطح النجم. وقد كشف الرصد عن كثب للنجوم ذات البقع الكبيرة عن دورات نجمية مماثلة لشمسنا، لكن بعضها أيضًا مختلف تمامًا. على سبيل المثال، فئة RS Canum Venaticorum من النجوم المتغيرة التي لها دورة ينقلب فيها نشاطها من نصف الكرة إلى النصف الآخر ثم يتكرر ذلك.

دورة في الأعداد الكليــة التي ازدادت وتضاءلت على مدى نحو عشر ســنوات. واليوم، من المتفق عليه بشــكل عام أن متوسط الدورة الشمســية حوالي 11 سنة. وفي عام 1858، أظهر «كارينجتون» أيضًا أن البقع الشمسية كانت تظهر قريبة من خط الاستواء كلما تقدمت الدورة. وجلبت الســنة التالية أول إشــارة إلى أن الأحداث التي تحدث في الشمس يمكن أن يكون لها تأثــير كبير على كوكب الأرض، وذلك عندما رصد «كارينجتون»، وآخرون تطور بقعة لامعة في الكرة الضوئية. وفي غضون أيام اضطرب المجال المغناطيسي لكوكب الأرض بفعل عاصفة جيومغناطيسية شاسعة أثرت على كل شيء من الشفق الشمالي وحتى نظام التلغراف. كان هذا أقدم وهج شمسي يتم تسجيله ـ اندلاع عنيف لمادة فائقة السخونة فوق الكرة الضوئية مباشرة ـ وقد أظهرت الدراسات اللاحقة أن مثل هذه الأحداث ترتبط بدورة البقع الشمسية نفسها. وأنها تنبع من المناطق نفسها في الشمس (انظر المربع في الصفحة السابقة).

تفسير مغناطيسي

في عام 1908، اكتشــف عالم الفلك الأمريكي «جورج إليري هيل» أن البقع الشمسية هــي مناطق مجالات مغناطيســية شــديدة، وهذا الاكتشــاف جنبًا إلى جنب مع اكتشــاف «كارينجتون» للدوران التفاضلي، ثبت أنه مفتاح تفسير الدورة الشمسية. باطن الشمس المائع غــير قادر على توليد مجال مغناطيسي دائم، لكن بــدلًا من ذلك تنتج طبقة داخلية من أيونات هيدروجين دوامية مشــحونة كهربيًّا مجالًا مؤقتًا. في بداية الدورة، يعمل المجال بسلاسة بين القطبين الشمالي والجنوبي تحت سطح الشمس لكن كل دوران للشمس يتسبب في جعله ينتهي حول خط استواء الشمس. عندما تصبح خطوط المجال متشابكة، تبدأ الحلقات المغناطيسية في الاندفاع خارج الكرة الضوئية، مما يؤدي إلى إنشاء مناطق لها كثافة أكثر انخفاضًا فيها تُقمع آلية الانتقــال الحراري عن طريق الحمل (انظر صفحــة 110). ونتيجة لذلك، تكون درجة

الحــرارة عند كل طرف من هذه الحلقــات الإكليلية أقل، ويظهر الغــاز المرئي أكثر قتامة من المناطق المحيطة به فيكون بقعة شمسية. في البداية، تندفع الحلقات المغناطيسية إلى خارج الشمس في مناطق مرتفعة نســبيًّا، لكن عندما تستمر الدورة ويتزايد تشابك المجال، يزيد عدد الحلقات، وتُســحب تدريجيًّا نحو خط الاســتواء بالتزامن مع فترة ذروة النشــاط الشــمسي. عدد قمم التوهجات الشمســية تقريبًا في هذا الوقت، والتي اندلعت عندما لف المجال في حلقات قصيرة أقرب إلى ســطح الشــمس مما أدى إلى إطلاق كمية ضخمة من الطاقة المغناطيســية التي تقوم بتســخين الغاز المحيط إلى درجات حرارة هائلة وتوزعه في أنحاء النظام الشمسي لا تزال تحمل مجموعة متشــابكة من المجال المغناطيسي داخلهــا. لكن في نهاية المطــاف، عندما تقترب البقع الشمسية إلى خط الاســتواء فإن الأقطاب المتعاكسة للمجالات المتشابكة تلغي بعضها البعض، ويتضــاءل عدد الحلقات إلى أن يختفي المجال المغناطيسي الشــمسي كله بالفعل في النهاية بعد ما يقرب من 11 ســنة، ويمثل هذا نهاية دورة بقعة شمســية مرئية، لكن هذا فقط منتصف طريق الدورة المغناطيســية الكلية للشــمس، فسرعان ما يتكون مجال جديد سلس تحت السطح، لكن هذه المرة تنعكس قطبيته وتتكرر القصة مجددًا ولا تعود الشــمس إلى حالتها المغناطيسية الأصلية إلا بعد 22 سنة.

في بداية الدورة الشمسية (1) يتحرك مجال مغناطيسي ضعيف تحت سطح الشمس من قطب إلى آخر. عندما تتقدم الدورة، يبدأ الدوران التفاضلي للشمس في سحب المجال المغناطيسي حول خط الاستواء (2) بتقدم الدورة يصبح المجال أكثر تشابكًا (3) وتؤدي الحلقات المغناطيسية إلى ظهور البقع الشمسية، والتوهجات الشمسية.

الفكرة الرئيسة

يمكن للمغناطيسية المتغيرة للشمس أن تُحدث تأثيرات مذهلة

14

قياس النجوم

Measuring the stars

إن النظر إلى السماء ليلًا ولو نظرة عابرة يشي بالاختلافات بين النجوم- وأبرز هذه الاختلافات يكون في السطوع واللون. وفهم الكيفية التي تعكس بها هذه الاختلافات في المظهر الخصائص الفيزيائية يكشف أن النجوم أكثر تنوعًا حتى مما يوحي مظهرها الخارجي.

إن الاختلافات في السطوع بين النجوم عبارة عن تنوع واضح حاول علماء الفلك فهرسته وقياسه منذ أقدم العصور. وحوالي عام 129 قبل الميلاد قسم عالم الفلك اليوناني «أبرخش» النجوم إلى ستة مقادير مختلفة، حيث وضع أكثرها سطوعًا مثل الشِّعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius) في المقدار الأول، والنجوم الأكثر خفوتًا والتي تُرى بالعين المجردة في المقدار السادس. وقد أدى ظهور التلسكوب مباشرة إلى اكتشاف عدد لا حصر له من النجوم الأكثر خفوتًا، ومن ثم اتسع النظام ليشمل مقادير أعلى أكثر خفوتًا، ولكن لم يُكتشف ذلك حتى عام 1856 عندما طبق «نورمان آر بوغسون» من مرصد «مدراس» فيما يعرف الآن بـ «شيناي» في «الهند» دقة علمية (انظر المربع في الصفحة المقابلة).

الخط الزمني

1827م	1838م	1856م
حسب «فيليكس سافاري» مدار النجم الثنائي «القفزة الأولى الجنوبية «Xi Ursae Majoris»، مفتاح تحديد كتلته.	قاس «بيسل» بنجاح البعد عن 61 Cygni باستخدام الانزياح النجمي.	أضفى «بوجسون» الطابع الرسمي على نظام المقدار الظاهري المستخدم في قياس سطوع النجوم.

المسافة واللمعان

هــل الاختلافــات في المقدار «الظاهــري» للنجوم يعكــس اختلافات في لمعانها الكامــن، أو بعدهــا عــن كوكــب الأرض، أو خليطًا من الأمرين؟

افترض «ويليام هيرشل» في محاولته الأولى لرسم خريطة لمجــرة درب التبانــة (انظر صفحــة 208) عــن طريق الخطأ أن جميع النجوم كانت تقريبًا لها السطوع نفسه، ومن ثم كان المقدار مؤشرًا للقرب من كوكب الأرض. وبقيت هذه المسألة بلا حل حتى عام 1838، عندما قاس عالم الفلك الألماني «فريدريك بيسل» بنجاح

نظام المقدار الحديث

اســتنادًا إلى مقارنات دقيقة بين النجوم، قدر عالم فلك القرن التاســع عشر «نورمان آر بوجســون» أن النجم من المقدار الأول كان أكثــر ســطوعًا بحوالي 100 مــرة من نجم من المقــدار الخامس، واقترح جعل هذه العلاقة علاقة قياســية بحيث يكون أي اختلاف يســاوي 5 مقاديــر يناظر عاملًا قيمته 100 في الفرق في الســطوع (الفرق الذي مقداره 1.0 إذن يناظر فرقًا في السطوع يساوي 2.512 مرة، وهو يعرف بنسبة بوجسون). وقد عين «بوجسون» مقدار نجم القطب لشــمالي النجم بولاريس بـ 2 بالضبط، وكنتيجة لذلك وجد أن مقدار النجوم شــديدة الســطوع اندفع نحو قيم ســالبة (حيث أن مقدار الشِّــعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius) رسميًا يساوي 1.46-). وبعد عصر «بوجســون» اكتشف علماء الفلك أن بولاريــس كان نجمًا متغيرًا بدرجة طفيفــة جدًا، لذلك فإن النقطة المرجعيــة الحديثة هي النجم الســاطع فيجا (النسر الواقع) الذي حُدد مقداره بـ صفر.

1869م

حدد غوستاف كيرشوف العلاقة بين لون ودرجة حرارة سطح النجوم.

1989 - 1993م

قامت بعثة هيباركوس التابعة لوكالة الفضاء الأوروبيــة بإجراء أول مســح لانزياح على نطاق واسع من الفضاء.

المســـافة إلى واحد من أقرب النجوم، وهو زوج ثنائي يسمى Cygni 61 باستخدام الانزياح في المنظر (انظر المربع صفحة 91): وقد اتضح أنه يقع تقريبًا على بعد 100 مليون مليون كيلومتر (60 تريليون ميل) من كوكب الأرض- وهي مســـافة شاســـعة جدًّا لدرجة أنه من الأســـهل الإشارة إليها بدلالة مقدار الوقت الذي يستغرقه الضوء ليصل إلينا: ومن ثم فهو يقع على بعد 10.3 ســـنة ضوئية. وعند هذه المســـافة، مقادير نجمية - 5.2 و-6.05 تعني ضمنًا أنهما كانا 1/ 6، و1/ 11 من لمعان الشمس على الترتيب.

عندما سمحت التحســـينات التكنولوجية بالقياس المباشر لمسافات نجمية أكبر في وقت لاحق من القرن التاســـع عشر، سرعان ما أصبح من الواضح أن النجوم كانت متنوعة للغاية من حيث الســـطوع. فالشِّعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius) على ســـبيل المثال، يقع على عتبة كوننا على بعد 8.6 سنة ضوئية، وهو أكثر لمعانًا من الشمس بحوالي 25 مرة. والنجم سهيل، ثاني أكثر النجوم سطوعًا في السماء، يقدر بعده بحوالي 310 سنوات ضوئية (بعيد جدًّا لدرجة أنه لا يمكن قياسه بوسيلة بيسل حتى وقت قريب)، ومن ثم لا بد أنه أكثر لمعانًا من نجمنا بأكثر من 15000 مرة.

وحتى بدون قياسات مباشرة للمسافة يستطيع مع ذلك علماء الفلك أحيانًا أن يأخذوا طريقًا مختصرة لتحديد اللمعان النجمي النسبي. وهذا يعتمد على فرض أن النجوم في التجمعات الضيقة مثل الثريا في كوكبة الثور (والتي توجد في مجموعات متقاربة للغاية لدرجة أنها لا يمكن أن تكون اصطفافًا إحصائيًّا من قبيل الصدفة) جميعها تقع فعلًا على البعد نفســـه عن نظامنا الشمسي. ومن ثم فإن الاختلافات في المقدار الظاهري تعكس اختلافات في المقدار المطلق أو اللمعان.

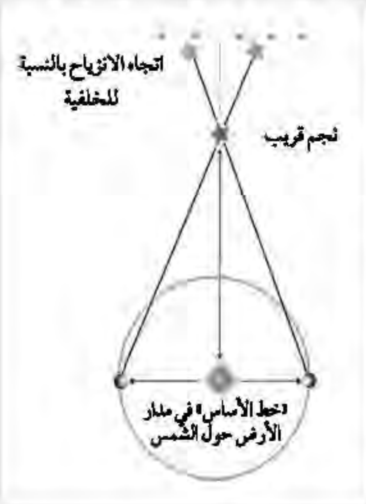
اللون، ودرجة الحرارة والحجم

لكن اللمعـــان ليس هو القصة بأكملها. هناك خاصية نجميـــة أخرى مهمة وهي اللون. اتضح أن النجوم لها مجموعة واســـعة من الألـــوان من الأحمر والبرتقـــالي وحتى الأصفر إلى الأبيض والأزرق (على الرغم أنه من المثير للفضول أن هناك نجمًا واحدًا فقط في الســـماء اتفق

عامــة على أنه أخضر اللون). هناك رابط بديهي بين هــذه الألوان والألوان التي تنبعث من قضيب حديدي مســخن في فرن على سبيل المثال، لكــن العلاقــة بين درجة الحرارة واللون الكلي لم يصغها سوى «جوستـــــــاف كيرشــوف» عــام 1869. عـــرف «كيرشوف» منحنى إشــعاع مميزًا يصف كميــة الإشــعاع للأطــوال الموجيــة والألــوان المختلفة التي يشــعها جسم أسـود عنـد درجة حرارة معينة (الجسم الأســود هو جســم افــتراضي يمتـص الضــوء تمامًــا لكن اتضح أن النجوم تتصرف على نحو مشــابه جدًّا). وقد وجد أنه كلما كان الجسم أكثر سخونة، كان إشــعاعه الكلي أقصر طولًا موجيًّا وأكثر زرقة. وهذا يعني أنه مع تطور التحليل الطيفي النجمي

طريقة الانزياح

الطريقة المباشرة الوحيدة لقياس المســافة إلى نجم تستخدم الانزياح في موضع الأجســام القريبة مقابل الخلفيات الأكثــر بعدًا والذي يحدث عندما يغير الراصد النقطة التي ينظر منها. بمجرد أن فُهــم أن كوكــب الأرض يدور حول الشــمس، وأن المقــدار الحقيقــي للنظام الشــمسي تم تقديره، قدم الانزياح في موضع كوكب الأرض من إحدى جهات مداراتــه إلى الجهة الأخرى (حــوالي 300 مليــون كيلومــتر أو 186,000 ميل) أساسًا مثاليًا لمثل هذه القياسات على الرغم من أن أقرب النجوم فقط هي التي تظهر انزياحًا كافيًا ليقاس بتكنولوجيا القرن التاســع عشر. وقد اختيرت الأهداف المحتملة على أســاس حركاتها الحقيقية أو الحركة في أنحاء السماء (انظر صفحة 102). ومع ذلك، اســتغرق تحقيق «فريدرك بيســل» قياسه لانزياح 61 Cygni سنوات كثيرة من الجهد ـ وهو مجرد 0.313 ثانية من قوس أو 1/ 11,500 درجة. أما اليوم، فتستطيع الأقمار الصناعية مثل القمر الصناعي جيا لوكالة الفضاء الأوروبية أن تقيس زوايا أصغر من ذلك بـ50,000 مرة.



في مطلــع القرن العشرين (انظر صفحــة 94) أصبح من الممكن تقدير درجة حرارة ســطح الشــمس الفعلية من خلال لونهــا. وقد كانت هذه الأداة الجديدة قويــة على نحو مذهل فقد أتاحت لعلماء الفلك تقدير حجم النجوم للمرة الأولى.

والمبدأ الكامن وراء مثل هذا التقدير واضح إلى حد ما. أولًا، احسب ناتج الطاقة اللازمة لتســخين متر مربع من سطح النجم إلى درجة الحرارة المقيسة (باستخدام معادلة بسيطة تسمى قانون ستيفان-بولتزمان). ثم استنتج ناتج الطاقة الكلي للنجم أو لمعانه (عن طريق المقارنة بين مســافته ومقداره الظاهري). وبعد ذلك يتم بسهولة حساب المساحة السطحية للنجم، وهذا بدوره يعتمد على قطره.

لإعطاء مثال ملموس: نجم أصفر صغير نســبيًّا مثل الشــمس متوســط درجة حرارته 5,800 درجة مئوية (10,472 فهرنهيت) نتيجة لخرج طاقته الداخلية (1 ســطوع شــمسي) التي تسخن سطحه. وعلى النقيض من ذلك، نجد النجم الأصفر غير المستقر رو ذات الكرسي يمر بمراحل عندما يكون له درجات حرارة سطح شبيهة بدرجات حرارة الشمس على الرغم من أنه على نحو لا يصدق أكثر لمعانًا بحوالي نصف مليون مرة (وهذا يفهم ضمنًا من مســافته التي تســاوي حوالي 8200 ســنة ضوئية ومقدار ظاهري 6.2). وهذا يعني أن قطره لا بد أن يكون حوالي 500 مرة قطر الشمس. وهو في الواقع عملاق فائق أصفر (انظر الفكرة 29)، أي نجم كبير جدًّا لدرجة أنه يمتد في نظامنا الشمسي بعد مدار كوكب المريخ.

وزن النجوم

هناك صفة واحدة أخيرة للنجوم هي كتلتها، لكن كيف يمكننا وزن نجم؟

حتــى وقت قريب كانت الطريقــة الوحيدة لقياس كتل النجوم مبــاشرة هي عن طريق حساب مدارات الأنظمة الثنائية (انظر صفحة 145). تدور النجوم في مثل هذه الأنظمة حول

مركز كتلة مشترك يسمى المرجح، وعلى مسافات متوسطة تتحدد بكتلها النسبية (لذلك يكون الأكثر ضخامة أقربها إلى المرجح). وقد استنتج عالم الرياضيات والفلك فرنسي الجنسية «فيليكس سافاري» أول مدار ثنائي بهذه الطريقة في وقت مبكر من عام 1827.

وعند دمج ذلك مع المعلومات القادمة من القياسات الطيفية للثنائيات أو الانزياح، يكون من الممكن العثور على بارامترات أكثر تفصيلًا لمدارات ثنائيات معينة، ثم يستطيع المرء حساب إما الكتل بالضبط أو مجموعة من الكتل المعنية، لكن حتى معرفة الكتل النسبية أثبتت أنها لا تقدر بثمن بالنسبة لفهم تطور النجوم (انظر صفحة 118).

«لقد كان إنجاز ذلك هو الهدف الأسمى لأماني كل عالم فلك.»

«جون هيرشل» عن قياسات بيسل للانزياح النجمي.

الفكرة الرئيسة

لون النجم وسطوعه يكشفان عن مسافته وحجمه

15

كيمياء النجوم

Stellar chemistry

التحليل الطيفي هو أسلوب لاكتشــاف التكوين الكيميائي للمواد من الضوء الذي ينبعث منهــا. وله مجموعة كبيرة من التطبيقات في الكيمياء والفيزيــاء، لكنه يمثل أهمية خاصة لعلــم الفلك الذي فيه يكون الضوء القادم من الأجسام البعيدة هو عادة وسيلتنا الوحيدة لدراستها.

في عام 1835، أعلن الفيلســوف الفرنسي «أوجســت كونت» أنه عندمــا يتعلق الأمر بالنجوم «فنحن لا نعرف أبدًا كيف ندرس تركيبتها الكيميائية بأي وســيلة». ســتثبت العقود القليلة التالية أنه كان مخطئًا للغاية، لكن يبدو أنه من غير المنصف انتقاده على عدم بصيرته– فقد تجاهل الكثيرون أيضًا الدليل الذي كان قد اكتشف قبل ذلك بأكثر من 20 سنة.

من عام 1814 فصاعدًا، كان صانع الأدوات البصرية الألماني «جوزيف فون فرانهوفر» قد نشر تفاصيل عن اكتشــافات باستخدام اختراعيه البصريين الجديدين: المطياف، ومحزز الحيود.

الخط الزمني

1814م	1842م	1848م	1859م
اكتشــف «فرانهوفــر» الخطوط الداكنة للضوء في الطيف الشمسي.	وصــف «دوبلــر» الإزاحة في الأطوال الموجية بســبب الحركــة النســبية للمصدر والمراقب.	اقــترح «هيبوليت فيزو» أن تأثير دوبلر ســيظهر نفسه أوضح ما يكون في إزاحة الخطوط الطيفية.	ربط «كيرشــوف»، و«بنسن» الخطــوط الطيفيــة بوجــود عناصر معينة.

واستطاعت كلتا الأداتين دراسة طيف ضوء الشمس بدقة أكبر كثيرًا من مجرد تقسيم الضوء باستخدام المنشور الزجاجي. وقد وجد «فرانهوفر» أن طيف الشمس، الذي هو أبعد ما يكون عن قوس قزح المتصل الذي كان «إسحق نيوتن» قد عرفه منذ أكثر من قرن، كان بالفعل مليئًا بخطوط ضيقة داكنة تشير إلى أن هناك ألوانًا محددة من الضوء قد حجبت بفعل مواد مجهولة. وقد رسم «فرانهوفر» أكثر من 574 خطًّا في الطيف الشمسي ووجد حتى خطوطًا داكنة في أطياف النجوم الساطعة مثل الشِّعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius)، ومنكب الجوزاء، ورأس التوأم المؤخر. وقد أوضح أيضًا أن بعض الخطوط النجمية تطابقت مع تلك التي في الشمس في حين أن بعضها الآخر اختلف.

بصمات العناصر

ظل أصل ما يسمى بخطوط فرانهوفر غير واضح حتى عام 1859 عندما ربطها كل من عالمي الكيمياء الألمانيين «جوستاف كيرشوف»، و«روبرت بانسن» بالذرات الموجودة في الغلاف الجوي للشمس. لقد كان «كيرشوف»، و«بانسن» يستخدمان المطياف للتحقيق في ألوان الضوء الناتج عندما تحترق المواد المختلفة باللهب، وقد وجدا أن هذه الألوان تميل إلى أن تصبح خليطًا من ألوان قليلة محددة، وكل عنصر ينتج خطًّا طيفيًّا ساطعًا فريدًا. وعندما أدركا أن ألوان الضوء المنبعث من المواد المحترقة تتطابق مع بعض الخطوط الداكنة في الطيف الشمسي، استدلا على أن هذه الخطوط الداكنة سببتها العناصر نفسها التي تمتص الضوء.

1866م

طور «سيكي» أول نظام تصنيف شمسي بناء على الخطوط الطيفية.

1868م

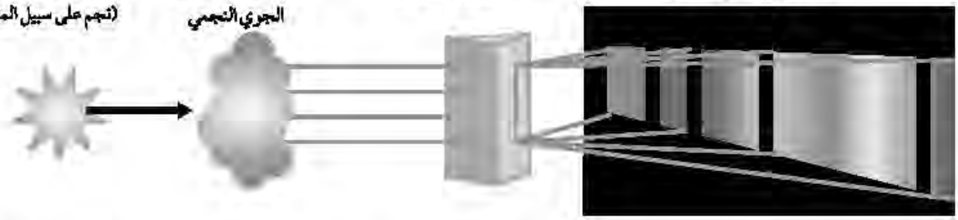
استخدم «هاجنز» تأثير دوبلر على الخطوط الطيفية لتحديد سرعة ابتعاد النجم عن كوكب الأرض.

1890م

نشر أول إصدار لفهرس «هنري درابر».

1913م

شرح «بور» كيف تنشئ التغيرات في حالات طاقة الذرات الخطوط الطيفية.



أما الشرح الكامل لأصل ما يســمى الآن بخطوط الامتصــاص والانبعاث فقد اضطر إلى الانتظار حتى أوائل القرن العشرين عندما وصف عالم الفيزياء الدنماركي «نيلز بور» الطريقة التي تنشــأ بها هذه الخطوط من ترتيب جسيمات الإلكترون عند مســتويات طاقة مختلفة داخل الذرة. فعندما تصطدم مجموعة واسعة من الضوء (طيف متصل) مثل انبعاثات الجسم الأسود من سطح أحد النجوم (انظر صفحــة 91) بالإلكترونات فإن الإلكترونات تمتــص الترددات المعينة التي تســمح لها بالقفز لمدة قصيرة إلى مستويات طاقة أعلى، ولما كان لكل عنصر ترتيب ذرات مختلف فإنه ينشئ نمطًا مختلفًا لخطوط الامتصاص. وفي الوقت نفسه، تنشأ خطوط الانبعاث عندما تعود الإلكترونات النشطة إلى مستوى طاقة أقل، ومستقرة أكثر وتتخلص من الطاقة الزائدة على شكل حزمة ضوئية صغيرة (فوتون) له طول موجي محدد خاص به ومن ثم له لون محدد.

في أعقاب اكتشــاف «كيرشوف»، و«بانســن» نظر علماء الفلك في خطوط فرانهوفر مرة أخرى ونجحوا في ربطها بالعناصر مثل، الهيدروجين، والأكسجين، والصوديوم، والماغنسيوم الموجودة في الطبقات الخارجية للشــمس. في عام 1868، عرف كل من عالم الفلك الفرنسي «جول يانسن»، والبريطاني «نورمان لوكير» على نحو مستقل الخطوط في الطيف الشمسي التي لم يمكن ربطها بأي عنصر معروف. وقد استنتج «لوكير» أن الشمس احتوت على عنصر هام لم يكتشف بعد على كوكب الأرض، وأسماه هيليوم نسبة إلى هيليوس إله الشمس عند الإغريق.

التصنيف الطيفي

ركز علماء فلك آخرون على الأطياف الخطية للنجوم، ومن أكثر العلماء إنتاجية كان «ويليام هاجنز» في لندن، و«أنجيلو ســيكي» في روما. وضع «سيكي» نظام تصنيف أساسيًّا للأطياف،

وعرف فيه أربع فئات رئيسية من النجوم: النجوم التي لها أطياف تشبه الشمس، والنجوم الزرقاء-البيضاء التي لها أطياف تشبه الشِّعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius)، والنجوم الحمراء التي لها نطاقات امتصاص واسعة مثل منكب الجوزاء، والنجوم التي يطلق عليها اسم نجوم كربونية (تكون في العادة حمراء أيضًا لكن لها خطوط امتصاص كربونية قوية).

في الوقت نفسه، كان «هاجنز» أول من يدرك أن الضوء الذي ينبعث من الأجرام المتفرقة التي تعرف باسم السدم يتكون من عدد قليل من خطوط الانبعاث الدقيقة واستنتج استنتاجًا صحيحًا أنها سحب هائلة من غاز بين نجمي ساخن ونشط. وكان «هاجنز» رائدًا للتصوير الفلكي،

تأثير دوبلر

إن وجود خطوط الامتصاص في ضوء النجوم يقدم مجموعة ملائمة جدًّا من العلامات لقياس حركة النجوم بفضل تأثير دوبلر، وهو إزاحة في تردد الموجات التي تصل إلى المراقب وطولها الموجي وتتوقف على الحركة النسبية لمصدر الموجة. وقد اقترح لأول مرة على يد عالم الفيزياء الأسترالي «كريستيان دوبلر» عام 1842 الذي أمل في تفسير الألوان المختلفة لضوء النجوم: الضوء القادم من النجوم التي تتحرك نحونا له ترددات أعلى وأطوال موجية أقصر وتميل إلى الزرقة، بينما الضوء القادم من النجوم التي تتحرك مبتعدة عنا له ترددات أقل، وأطوال موجية أكبر ويظهر محمرًّا. ومما يدعو للأسف لدوبلر أن سرعة الضوء الكبيرة جعلت التأثير أضعف كثيرًا مما كان دوبلر قد توقع (في كل الظروف باستثناء الظروف القصوى - انظر صفحة 244) - لكنه أثبت في موجات الصوت عام 1845.

إن تأثير دوبلر ليس هو تفسير ألوان النجوم لكن «الانزياحات الحمراء»، و«الانزياحات الزرقاء» في خطوط الامتصاص من مواضعها المتوقعة يمكن أن تستخدم لقياس سرعة حركة الجسم نحو كوكب الأرض أو بعيدًا عنه بدقة. وكان «ويليام هاجنز» من بين أوائل من حاولوا ذلك في النجوم لكن «آنجيلو سيكي»، وعالم الفلك الألماني «هيرمان فوجل» في سبعينيات القرن التاسع عشر كانا هما من نجحا في استخدام إزاحات دوبلر في خطوط الامتصاص على أجزاء مختلفة من الشمس لكي يشرحوا دورانها.

واستمر في عمل بعض من أولى فهارس الأطياف النجمية الفوتوغرافية الشاملة لكن عمل «هاجنز» حجب بفعل جهود «هنري درابر» والإرث اللاحق له- وهو طبيب أمريكي وفلكي هاو قام بالتقاط أولى الصور الفوتوغرافية لكل من الأطياف النجمية وأطياف السدم قبل أن يموت بالتهاب الجنبة في عمر 45 فقط في عام 1882. وفي عام 1886 تبرعت أرملة «درابر» بالأموال والمعدات لمرصد كلية هارفرد لتمويل المشروع الفلكي الأكثر طموحًا في ذلك العصر: فهرس أطياف نجمية فوتوغرافي واسع النطاق. وعرف باسم فهرس «هنري درابر» واستغرق تقريبًا أربعة عقود ليكتمل، وفي نهاية المطاف وصف أطياف أكثر من 225000 نجم.

«إن الطريق مفتوح لتحديد التركيب الكيميائي للشمس والنجوم الثابتة.»

روبرت بانسن

إن القوة الدافعة وراء الفهرس كان هو مدير المرصد إدوارد بيكرينج، لكن الجزء الأكبر من العمل نفذه فريق من النساء يعرفن في التاريخ باسم «حواسب هارفرد». كان دافع «بيكرنج» لتوظيف النساء مدفوعًا جزئيًا بمسائل تتعلق بالميزانية: فقد كانت النساء تتقاضين أجورًا أقل من الرجال ومن ثم استطاع دفع تكاليف تعيين فريق أكبر لتحليل الكميات الضخمة من البيانات التي ولدها مسح الصور الفوتوغرافية. ومع ذلك أظهر الكثير من عضوات فريقه مواهب علمية هائلة وكن مسؤولات عن العديد من الاكتشافات الهامة في الطريقة التي نفهم بها خواص النجوم.

الجزء الأكبر من أعمال الفهرسة الأولية كان وظيفة أول موظفة عينها «بيكرنج» التي ولدت بأسكتلندا «ويليامينا فليمنج»، فقد وسعت نظام تصنيف «سيكي» وحددت لكل نجم حرفًا بسيطًا من A إلى N بناء على قوة خطوط الهيدروجين في طيفه (مع تعيين الحروف O، وP وQ

للأجسام التي لها طيف غير عادي). وهذا النظام، الذي استخدم في أول فهرس لدرابر والذي نشر في 1890، سيخضع لتغييرات رئيسية عديدة قبل أن يصبح بالشكل الذي نستخدمه الآن.

الفكرة الرئيسة

يحمل ضوء النجم بصمات التركيب الكيميائي

16

مخطط هرتسبرنج - راسل

The Hertzsprung–Russell diagram

ربما جاءت أهم الاكتشافات في فهم دورة حياة النجوم عندما قارن علماء الفلك في القرن العشرين بين أنواع أطياف النجوم الجديدة التي أضيفت إلى فهرس مع لمعانها، وقد غير الرســم الناتج لخصائص النجوم، والذي أطلق عليه مخطط هرتسبرنج-راسل، علم الفلك للأبد.

كانت أول ثمرة لمشروع بحث «ويليام بيكرنج» في مرصد كلية هارفرد (انظر صفحة 98) هــي فهرس درابر للأطياف النجمية، والذي نــشر في 1890، وقد احتوى هذا الفهرس الذي جمعت معظمه «ويليامنيا فلمنج» أطيافًا لحوالي 10351 نجمًا ساطعًا. وفي حين استمر العمل في إضافة المزيد من النجوم إلى الفهرس الرئيسي، بحث «بيكرنج» وفريقه من الحواســيب والمكون كله من النساء في بعض الأطياف الأكثر سطوعًا بمزيد من التفاصيل.

الخط الزمني

1890م	تسعينيات القرن التاسع عشر	1901م
نشر أول طبعــة من فهرس هنري درابر.	موري» تصبح رائــدة في تصنيف للنجوم على أساس عرض خطوط الطيف.	وضع «كانون» النســخة النهائية من مخطط تصنيف هارفرد للأطياف.

نظام موري

ومن بين حواسيب هارفرد الأكثر موهبة كانت «أنتونيا موري» ابنة أخت «هنري درابر» وقد بدأت تلاحظ السمات المهمة في أطياف النجوم الأكثر سطوعًا التي كانت قد أهملت في التصنيف الهجائي البسيط لفلمنج. لم تتنوع خطوط الطيف من نجم لآخر فحسب (مما يشير إلى وجود عناصر مختلفة في غلافها الجوي) بل إن كثافة الخطوط واتساعها اختلف بين نجوم لها كيمياء متطابقة ظاهريًا. وبسبب اعتقاد «موري» أن اتساع الخط يمثل شيئًا مهمًا بالنسبة لطبيعة النجوم اقترحت إعادة ترتيب أنواع الأطياف بحيث تعكس قوتها لكن «بيكرنج»، و«فلمنج» كليهما وجدا أن نظام التصنيف الجديد مفرط التعقيد، وفي نهاية المطاف تركت «موري» المشروع. وعلى الرغم من طلبات «بيكرنج» ، رفضت أن تتخلى عن عملها على اتساعات الخطوط الطيفية وألحت في طلب اعتراف رسمي بمجهودها عندما نشر فهرسها لـ 600 نجم في نهاية المطاف في عام1897.

وعلى الرغم من أن «بيكرنج» استمر في التقليل من أهمية أفكار «موري» إلا أن هذه الأفكار أثرت فيمن جاء بعدها. انضمت «آني جامب كانون» بمجموعة هارفرد لتدرس نجوم نصف الكرة الجنوبية التي كانت تجري إضافتها إلى الفهرس. وقد قدمت نظام التصنيف الخاص بها الذي جمع بين بساطة حروف «فلمنج»، ونهج «موري» في عرض الخطوط. نتج عن ترك عدة حروف ثم إعادة ترتيبها لتعكس الألوان الطيفية من الأزرق إلى الأحمر تسلسلًا من الأنواع الطيفية O، وB، وA، وF، وG، وK، وM.

1908م

ربط هرتسبرنج بين اختلافات اتساع الخط عند «موري» باللمعان الكامن للنجوم.

1911م

نشر هرتسبرنج شكلًا بسيطًا لمخطط هرتسبرنج-راسل للنجوم في الثريا.

1913م

أصدر راسل أول مخطط هرتسبرنج-راسل لتضمين المجموعة الكاملة من النجوم.

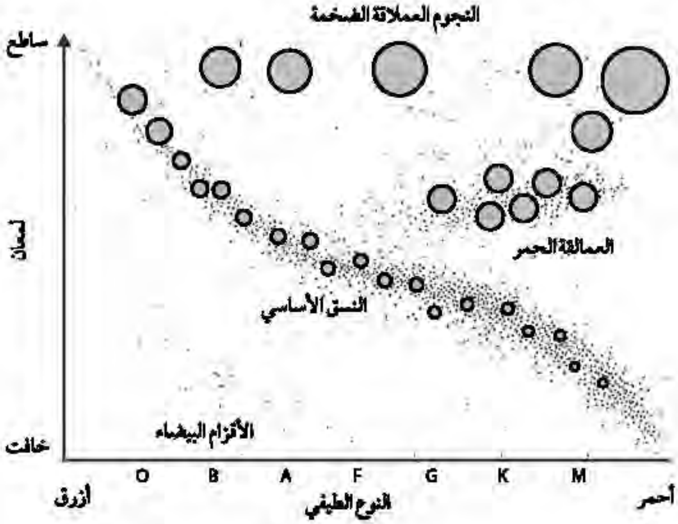
الأطياف هي المفتاح

«لقد ساعد تصنيف النجوم ماديًّا في جميع دراسات بنية الكون.»

آني جامب كانون

بعد بضع سنوات، تولى عالم الفلك الدنماركي «إيجنار هيرتسبرنج» مسؤولية حل لغز اختلافات عرض الخطوط. وقد استخدم قاعدة عبقرية وعملية لتقدير مسافة النجوم التي لم يتمكن من قياسها مباشرة عن طريق نهج الانزياح، ومن ثم تقدير سطوعها. وكقاعدة عامة، ناقش أن النجوم الأبعد تظهر حركات حقيقية أصغر (الحركة على أساس سنوي عبر السماء، وتسببها الحركة النسبية للنجم ونظامنا الشمسي). ومن ثم يمكن أن تستخدم الحركة الحقيقية كبديل غير دقيق للمسافة- إذا أظهر نجمان المقدار الظاهري نفسه فإن المرء يمكن أن يخمن أن النجم ذا الحركة الحقيقية الأصغر كان أكثر بعدًا ومن ثم له لمعان كامن أكبر.

عرف هيرتسبرنج باستخدام هذه الطريقة تقسيمًا واسعًا بين النجوم ذات الألوان المماثلة، ففصل النجوم اللامعة العملاقة عن الأقزام الأكبر عددًا لكن أكثر خفوتًا ولا سيما التي عند الطرف الأكثر برودة للطيف. وعندئذ اكتشف أن النجوم ذات الخطوط الطيفية الضيقة كانت أكثر لمعانًا من تلك التي لها خطوط واسعة، ودعم هذه الفرضية عن طريق القيام بجهد جهيد في حساب المسافة إلى عدة



مجموعات من النجوم. (السـبب وراء الفرق في اتسـاع الخط أصبح في نهاية المطاف واضحًا بعد سـنوات قليلة- انظر صفحة 181).

في عـام 1911، نـشر «هرتسبرنج» رسمًا بيانيًا يقارن بين السمات الطيفية للنجوم في تجمع الثريا (بالنيابة عن حرارة سـطحها، والنـوع الطيفي لـ«آني جامب كانـون») مع مقاديرها الظاهرية (انعكاس لمقاديرها المطلقـة، لأن جميع نجوم التجمع تقع على المسافة نفسـها). وعلى الرغم من أن الرسم بالضرورة محدود لأن النجـوم التـي يمثلها جميعها متشابهة على نحو كبير إلا أنها أظهرت اتجاهًـا لا لبس فيه- كلما كان النجم أكثر لمعانًا كان سطحه أكثر سخونة.

المسافات ومخطط هرتسبرنج-راسل

إن إنشـاء مخطط هرتسبرنج-راسل جعل من الممكن الحصول على فكرة تقريبية للمعان الكامن للنجوم (ومن ثم مسـافتها) ببساطة من خصائصها الطيفية. لكن النسق الأساسي، والمناطق الأخرى يمكن أن تكون واسعة للغاية لدرجة أن استنتاج لمعان نجم مفرد مـن نوعه الطيفي بمفرده دومًا ما ينطوي على كمية محددة من التخمين، ولحسن الحظ، يسمح مخطط هرتسبرنج-راسل أيضًا بقياسـات أكثر دقة للمسافة لتجمعات النجوم- وهو أسلوب يسمى مطابقة النسق الأساسي.

لما كانت جميع النجوم في تجمع معين تقع فعليًا على المسافة نفسها من كوكب الأرض، فإن الاختلافـات في مقدارها الظاهري هي انعكاس مباشر للاختلافـات في مقاديرها المطلقة. وهذا يجعل من الممكن رسم مخطط هرتسبرنج ـ راسل لتجمع محدد ينبغي له أن يظهر الخصائص نفسـها لتوزيع النسق الأساسي مثل النسـخة المعممة، ومن ثم فإن إيجاد الفرق بين السطوع المرصود والسطوع الكامن هو ببساطة مسألة حساب للإزاحة بين الرسمين، ولما كان العديد من النجوم مشتركة فمن الممكن عمل ذلك بدقة عالية.

وبالطبع كما هو الحال في معظم الأساليب الفلكية، هناك بعض العوامل المعقدة- على سـبيل المثال، نسبة العناصر الثقيلة في نجـوم التجمع تؤثر على توزيعها إلى حـد ما. كما أن التجمع كلما أصبح أقدم، بدأت النجوم الأكثر ضخامة في ترك النسق الأسـاسي، ومن ثم فمن المهم تحديد نجوم النسـق الأساسي الفعلية بدقة واستبعاد النجوم المتطرفة.

توسيع المخطط

على مدى الســنتين التاليتين، طور «هنري نوريس راسل» الذي كان يعمل في جامعة برينستون عمل «هرتســبرنج» بمخطط أكثر طموحًا بكثير استنادًا إلى الفكرة نفسها. أظهر رسم «راسل» مجموعة من النجوم أوســع كثيرًا، بما فيها تلك التي في تجمع القلائص (مجموعة أقــدم وأكثر تنوعًا) وتلك التي يمكن اســتنتاج لمعانها بدقة من قياســات الانزياح. وقد قارن الرسم بين النوع الطيفي والمقدار المطلق المقدر مما أدى إلى الكشف عن بعض الأنماط الأساسية للمرة الأولى.

تقع الغالبية العظمــى من النجوم على شريط قطري، وتتراوح من نجوم باردة وحمراء إلى نجوم ســاخنة وزرقاء. وهذه المجموعة، التي عرفها هرتسبرنج من قبل، شملت جميع أقزامه، وسميت بالنسق الأساسي. أما النجوم العملاقة والعملاقة الضخمة الأقل شيوعًا فكانت متناثــرة في جميع أنحاء الجزء العلوي من الجدول بجميع الألوان ودرجات الحرارة بتركيزات قوية من النجوم الحمراء اللامعة والعمالقة ذات اللون البرتقالي التي تظهر في فرع من النسق الأساسي.

لقد أثبت مخطط هرتسبرنج ـ راسل أنه مؤثر بشدة، واستمر علماء الفلك على مدى العقدين التاليين في الإضافة إليه. دائماً ما تقع أنواع معينة من النجم المتغير (انظر صفحة 172) في مناطق محددة من المخطط، في حين أن الأنواع الجديدة من النجوم التي اكتشــفت سدت فجوات (انظر صفحة 190). والحقيقة أن أعدادًا هائلة من النجوم التي تقع على النســق الأساسي أظهرت أن هذا هو المكان الذي تقضي فيه الغالبية العظمى من النجوم معظم حياتها. ويمكن عكس النهج كله-التحليل الدقيق لطيف النجم بمفرده يســتطيع أن يكشف عن مكانه على الرسم مما يؤدي

إلى إعطاء ليس فقط قياس نوعه الطيفي وحرارة سطحه بل أيضًا فكرة تقريبية عن لمعانه الكامن ومن ثم بعده عن كوكب الأرض.

الفكرة الرئيسة

مقارنة اللون والسطوع تكشف أسرار النجوم

17

بنية النجوم

The structure of stars

إن فهم البنية الداخلية للنجوم هو مفتاح تفسـير الاختلافات بينها، لكن مع وضع مخطط هرتسبرنج-راسـل في مطلع القـرن العشرين بدأ علماء الفيزياء الفلكية في تقدير مدى تنوع النجوم تقديرًا سليمًا.

على الرغم من الاكتشـافات في التحليل الطيفي النجمي تقريبًا في مطلع القرن العشرين عرف علماء الفلك على نحو مدهش القليل عن التكوين الداخلي للنجوم. كان من المفترض أن الخطوط الطيفية لا تفسر إلا مكونات الغلاف الجوي، أما السؤال عما يقع تحت الكرة الضوئية فبقـي بلا إجابة، لكن عالم الفلـك الإنجليزي «آرثر إدينجوتن» أثبـت أنه من الممكن وضع نموذج متطور للنجوم من الداخل دون الإشـارة إلى العناصر الموجودة بالضبط. وقد اشـتهر «إدينجوتن» دوليًّا عام 1919 عندما قدم دليلًا تجريبيًّا لنظرية النسـبية العامة لآينشتاين (انظر صفحـة 289). وكان يبحث أيضًا في بنية النجوم، وفي عام 1926 نشر كتابه شـديد التأثير «التكوين الداخلي للنجوم».

الخط الزمني

1906م	1925م	1926م
بحث شوارزشـيلد في التوازن بين الضغط الحراري للنجم وسـحب الجاذبية نحو الداخل.	ناقشت «سيسليا باين» أن الشمس مكونة أساسًا من الهيدروجين.	قـدم كتـاب إدينجوتن التكوين الداخلي للنجوم فكـرة ضغط الإشـعاع الخارجي من اللب.

الطبقات المتوازنة

«للوهلة الأولى، يبدو أن الداخل العميق للشمس والنجوم أقل سهولة في البحث من أي منطقة أخرى في الكون.»

آرثر إدينجوتن

يقوم نهج إدينجوتن على حقيقة أن درجات الحرارة داخل الشمس كانت على نحو واضح حارة بما يكفي لذوبان أي عنصر معروف، كان أن يعامل داخل النجم على أنه مائع محتجز بين سَحب الجاذبية نحو الداخل والقوة الخارجية للضغط الخاص بالنجم. علماء الفلك مثل الألماني «كارل شوارزشيلد» كانوا قد بحثوا بالفعل في هذه الفكرة باستخدام نماذج افترضت أن الضغط الخارجي كان بسبب عوامل حرارية تمامًا لكنهم وجدوا نتائج مختلفة، أما «إدينجوتن» فاعتقد أنه فضلًا عن الضغط الذي تسببه الذرات الساخنة المرتدة بكميات كبيرة من الطاقة الحركية هناك تأثير يسمى ضغط الإشعاع له دور يقوم به أيضًا. وطبقًا لنظريته، كان الإشعاع يولد في لب النجم (ولا يولد تمامًا على سطحه كما كان يعتقد معظم علماء الفلك حينئذ) وهذا يبذل ضغطًا كبيرًا من داخله أثناء انبعاث فوتوناته من الجسيمات المفردة على أعماق مختلفة داخل الشمس.

لقد اضطر «إدينجوتن» إلى استنتاج الكثير من نظريته من المبادئ الأولى، لكنه استنتج أن النجوم لا يمكنها أن تبقى مستقرة إلا إذا حدث توليد الطاقة بالكامل في لبها، عند درجات حرارة تساوي ملايين الدرجات (أكثر بكثير حتى من سطح أكثر النجوم سخونة).

1930م

اكتشف «آنسولد» أن المادة التي في الأجزاء الخارجية للنجوم الشبيهة بالشمس تشكل منطقة حمل حراري.

1938م

احتج «أوبيك» على الفرض العام بأن النجوم مختلطة اختلاطًا جيدًا.

1975م

اقترح «جوف» استخدام علم الرجفات الشمسية (هيليوسيسمولوجي) لفحص البنية الداخلية للشمس.

وقد أوضح أنه بسبب قلة الإشعاع عند المسافات الأكبر في اللب فإن أي طبقة عشوائية في النجم يمكن أن تتماسك بفعل التوازن الهيدروستاتيكي. بعبارة أخرى، عند كل نقطة في النجم، يكون الإشعاع إلى الخارج، والضغط الحراري كافيين بالضبط لموازنة قوة الجاذبية نحو الداخل.

إن البنيــة الداخلية للنجم، كما قال إدينجوتن، تحكمها التغيرات في عتامة موادها. وهناك عــالم فلك آخر بريطاني، يدعى «جيمس جين»، قد ناقــش أنه عند درجات حرارة عالية كهذه ســتتأين الذرات تمامًا (تنزع منها إلكتروناتها وتصبح مجرد نواة ذرية)، وأدرك «إدينجوتن» أن درجات التأين المختلفة (عند مســتويات مختلفة من درجة الحرارة والضغط داخل النجم) من شأنها أن تؤثر على ما إذا كان داخل النجم معتمًا أم شفافًا. وقد أثبتت نظرية إدينجوتن لدواخل النجوم نجاحها في التنبؤ بالطريقة التي تتصرف بها النجوم: أبرزها، أنها قدمت تفسيرًا للنجوم التي تنبض في دورات منتظمة (انظر صفحة 172).

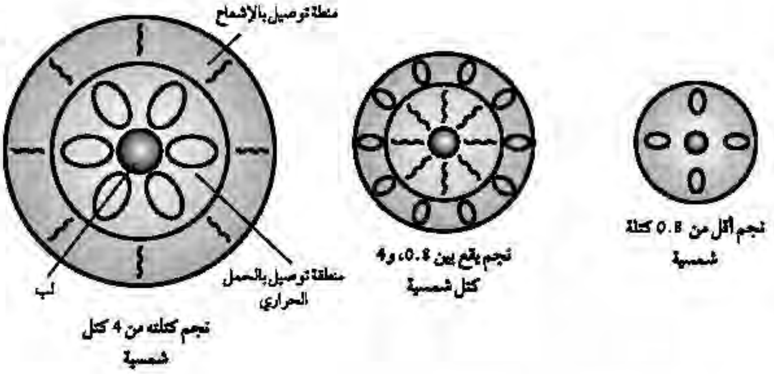
طفرة الهيدروجين

تنحية مسألة الكيمياء جانبًا مكنت «إدينجوتن» من التفكير في البنية النجمية تفكيرًا مجردًا للغاية، لكن مثل هذه التفاصيل ضرورية من أجل فهم كيف تلمع النجوم وكيف تنشــأ وتغير بنيتها على مر الزمن (انظر صفحتي 112، و118) وبالصدفة، كما كان «إدينجوتن» يؤلف كتابه في كامبريدج كانت «سيسيليا باين» تعمل على أطروحة الدكتوراة الخاصة بها في «هارفرد». وفي هذه الأطروحة ، اكتشــفت اكتشافًا رئيسيًّا يربط وجود الخطوط الطيفية وقوتها بدرجة حرارة الكرة الضوئية للنجم. وقد أتاح هذا مفتاحًا للتعرف على العناصر المكونة للشمس.

كانت كثافة الخطوط الطيفية قد فسرت فيما سبق على أنها دلالة مباشرة على الوفرة النسبية للعناصر في الغلاف الجوي للنجم، لكن «باين» أظهرت أنها في الواقع كانت في الغالب بسبب

الاختلافات في درجات الحرارة. وباستخدام هذا النهج الجديد حسبت أن نسب الأكسجين، والسيليكون والكربون في الغلاف الجوي للشمس كانت على نطاق واسع شبيهة بتلك التي على كوكب الأرض، لكنها وجدت أيضًا أن نجمنا احتوى على كميات من الهيليوم والهيدروجين على نحو خاص أكبر مما سبق أن اعتقد أي أحد. واستنتجت «باين» أن هذين العنصرين هما المكونان السائدان في الشمس، بل وفي كل النجوم. واستغرقت فكرتها عدة سنوات لتصبح مقبولة على نطاق واسع.

يمكن نقل الطاقة الموجودة في نجوم النسق الأساسي من لب النجوم إلى أسطحها إما عن طريق الحمل أو الإشعاع لكن عمق وموقع مناطق النقل المختلفة يختلف اعتمادًا على كتلة النجم.



مناطق انتقال الطاقة

أحد المواضيع الحاسمة التي أخطأ فيها «إدينجوتن» كان افتراضه أن داخل النجم متجانس ويتكون من العنصر نفسه في جميع أنحائه. لقد اعتقد أن إنتاج الطاقة في أكثر المناطق المركزية سخونة من شأنه أن يتسبب في جعل النجم كله يختلط، وأن تيارات الحمل من شأنها أن تحمل المادة الأكثر سخونة إلى أعلى وتهبط المادة الأكثر برودة لأسفل مما يضمن أن الداخل قد خلط خلطًا تامًّا.

لكن طبقًا للنظريات التي طرحها «إرنســت أوبيك» للمرة الأولى عام 1938، فإن المادة المنتــشرة في لب النجم تبقى هناك طوال حياته. اللب محاط بمنطقة إشــعاعية عميقة فيها ترتد الفوتونات ذات الطاقة العالية من الجسيمات فتولد ضغوطًا هائلة.

في النجــوم الشــبيهة بالشـــمس هذا اللب مغطى بطبقــة أخــرى مــن مادة موصلة بالحمل أكثر برودة نســبيًّا أثبت وجودها عالم الفيزيــاء الفلكيــة الألماني «آلبرخت آنســولد» في عام 1930. وهــذا التغيــير في أســلوب نقل الطاقة تسببه مرحلــة انتقالية فيها تصبح المادة الأكثر بــرودة معتمة فجأة. في الجزء العلوي من المنطقــة، تصبح الشـــمس شفافة مجددًا لكن الجسيمات عند ذاك تكون أقل تكدسًا بكثير لذلك فإن الإشـــعاع

علم الرجفات الشمسية

إن الطريقة الأكثر مباشرة لدراســة بنية الشمس أو أي نجم آخر هي اســتخدام الموجات الصوتية التي تموج باســتمرار داخلهــا، وهذه الموجات الزلزالية مماثلة لتلك التي تســبب حدوث الزلازل على كوكبنا. وفي عام 1962 اكتشف علماء الفيزياء الشمسية من معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا والذين اســتخدموا التحليل الطيفي لدراسة الشمس نمطًا متذبذبًا من الخلايا كل منها قطره حوالي 30000 كم (19000 ميل) تتحرك لأعلى وأسفل في دورة مدتها 5 دقائق تقريبًا. افترض أن هذه الخلايا هي تأثير ســطحي حتــى عام 1970 عندما قام عالم فيزياء شمســية إنجليزي يدعى «روجير أولريش» باقتراح أنهــا يمكن أن تكون نمطًا موقوفًا تســببه الموجات التــي تهتز للخلــف والأمام في داخل الشـــمس. بعد بضع ســنوات عام 1975 شرح «دوجلاس جوف» كيف يمكن أن تســتخدم موجات P المتذبذبة لـ«أولريش» في سبر داخل الشـــمس. ومن خلال الطريقة التي تؤثــر بها الموجات على أنماط الســطح عرف «جوف» الحدود داخل الشمس، مثل تلك التي بين منطقتي الحمل الحراري والمنطقة الإشعاعية.

المنبعث من الغاز الصاعد يمكن أن يتسرب بســـهولة إلى الفضاء. وهذا هو ما يكون الســـطح الساطع أو الكرة الضوئية للنجم والتي نراها من كوكب الأرض.

الفكرة الرئيسة

تتوازن الجاذبية مع الضغط توازنًا ممتازًا داخل النجوم

18

مصدر طاقة النجوم

The power source of stars

إن السـؤال عن مجرد الطريقة التي تولد بها الشـمس والنجوم الأخرى ضوأها وحرارتها كان لغزًا طويل الأمد في علم الفلك، وهو لغز لم يمكن حله حلًّا مرضيًا باسـتخدام الفيزياء الكلاسـيكية وحدها، ولم يحل لغز الطاقة النجمية إلا مع وصول الفيزياء النووية في القرن العشرين.

إن أقدم النظريات التي حاولت تفسـير الشـمس باعتبارها جسمًا ماديًّا افترضت أن نجمنـا ليس أكثر تعقيدًا من مجـرد كرة هائلة من الفحم أو بعض المـواد الأخرى القابلة للاشـتعال تحترق في الفضاء تلقائيًا، وكان اسـتيعاب كيمياء الاحتراق سـيئًا، وكذلك اسـتيعاب نقص الأكسـجين في الفضاء ومن ثم لم يكن حتـى عام 1843 أن أصـدر عالم الفلك الأسـكتلندي «جون جيمس واترسـون» تحليلًا سلبيًا للملابسات وقد أوضح أنه إذا كانت الشـمس 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 يمكـن أن يكـون مصدر طاقتها تفاعـلًا كيميائيًّا مثل تفاعل الاحتراق.	اقـترح «هيلمهولتـز» آلية من شـأنها أن تتيح للنجـوم توليد طاقة مـن الانقبـاض الجذبي الذي عدله «كلفن» فيما بعد.	وضعت مختلف التقديرات فترة عمر الشـمس 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

اقترح «إدينجتون» أن الشمس تستمد طاقتها من تفاعل نووي تتحول فيه الكتلة مباشرة إلى طاقة.

1927م

نشر «آرثر هولمز» دليلًا على أن كوكب الأرض عمره عدة مليارات من السنين.

1937م

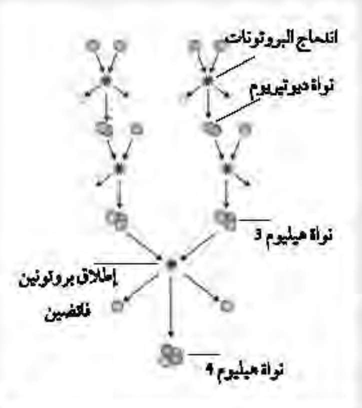
حدد «جامو»، و«ويزساكير» تفاعل اندماج سلسلة بروتون– بروتون وهي المصدر الرئيسي للطاقة للنجوم الشبيهة بالشمس.

1939م

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 تلقائيًّا إلى نيوترون لتكون نواة ديوتيريوم مستقر (هيدروجين ثقيل). والاندماج مع نيوترون آخر ينتج عنه نظير مستقر آخر يسمى هيليوم3-، وفي نهاية المطاف تندمج نواتا هيليوم3- لينتج 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 جدًا 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.

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»

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 تغيير. 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 جدًّا وفعالة لدرجة أن وجودها أو غيابها في النجوم هو العامل الرئيسي في تحديد فترة عمرها (انظر صفحة 119).

مجموعة صغيرة من أبرز علماء الفيزياء النووية إلى مؤتمر في واشـــنطن لمناقشة المشكلة، وقد كان من ضمـــن المجموعة المهاجر الألماني «هانز بيث». في بدايـــة الأمر كان اهتمام «بيث» بالمشـــكلة قليلًا لكنه رأى حلًّا حدســـيًا ممكنًا وبسرعة اســـتنتج التفاصيل مع «تشـــارلز كريتشفيلد». وفي السنة التالية نشر ورقتين بحثيتين لم يوجز فيهما عملية اندماج الهيدروجين التي تسود في النجوم الشـــبيهة بالشمس فحسب بل أيضًا أوجز عملية بديلة تسمى دورة كربون ـ نيتروجين ـ أكســـجين والتي تحدث على الأغلب في الدواخل الأكثر ســـخونة في النجوم الأضخم (انظر المربع على اليمين). اســـتطاع «بيـــث»، عن طريق التحليل الدقيق للمعدل الذي عنده تحدث العمليتـــان 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 نسبيًا.

الفكرة الرئيسة

تلمع النجوم بفعل اندماج الأنوية الذرية لإطلاق الطاقة

19

دورة حياة النجوم

The life cycle of stars

لقد ساعد مخطط هرتسبرنج ـ راسل، والاكتشافات التي حدثت في فهم مصادر الطاقة النجمية معًا أخيرًا علماء الفلك على بذل مجهود لفهم أكبر الألغاز العلمية على الإطلاق ألا وهو الطريقة التي بها تحيا النجوم وتموت، لكن الرحلــة تضمنت التخلي عن بعض النظريات التي كانت متبناة على نطاق واسع.

لقــد طرح وقدم «هنري نوريس راســل Henry Norris Russell» عام 1912 أول مخطط يرســم العلاقة بين لمعان النجوم ونوعها الطيفي وقدم أسئلة ضخمة لعلماء الفيزياء الفلكية. إن العدد الكبير من النجوم التي وجدت على طول قطر النســق الأساسي بين الأحمر الخافت والأزرق الساطع انطوى بوضوح على أن هذا هو المكان الذي تقضي فيه غالبية النجوم معظم حياتها، لكن كيف ينبغي تفســير هذه الأنماط؟ كان لرائدي الرســم التخطيطي وجهتا نظر مختلفتان لكن كلتيهما اعتقدتا أن الرسم يعكس تطور النجم. لقد شك «راسل» أن النجوم تبدأ

الخط الزمني

1913م	1926م	1938م
فسر علماء الفلك مبدئيًا النسق الأساسي في مخطط هرتسبرنج ـ راسل على أنه مسار تطوري.	سلط «إدينجوتن» الضوء على أهمية علاقة الكتلــة ـ اللمعان بالنسبة للتطور النجمي.	ذهب «أوبيك» إلى أن المادة النجمية ليســت مختلطة جيدًا مما يؤدي إلى وجود حدود لإمداد الوقود ومن ثم عمر النجوم.

حياتها كعمالقة حمر، وتنكمش لتصبح نجومًا زرقاء لامعة، ثم تخفت ببطء وتتحرك إلى أسفل النسق الأساسي وتبرد كلما تقدم بها العمر. أما أفكار «إجنار هرتسبرنج» فكانت أقل تحديدًا لكنه اعتقد أن النسق الأساسي والمجموعة الأفقية من العمالقة متعددة الألوان والعمالقة الضخمة متعددة الألوان الموجودة بطول الجزء العلوي من الرسم التخطيطي تمثلان مسارين تطوريين مختلفين.

عمر النجوم

مدة عمر النجوم يمكن أن تختلف اختلافًا كبيرًا اعتمادًا على كتلتها وتكوينها. فالنجوم الثقيلة يمكن أن تكون لها كتلة تساوي عدة مرات كتلة الشمس لكنها تشرق بعدة آلاف مرة من لمعان الشمس. ولذلك تحرق وقودها أسرع من الشمس بكثير، وفي حين أن شمسنا ستقضي حوالي 10 مليار سنة في النسق الأساسي (تدمج الهيدروجين والهيليوم في لبها) ومئات ملايين السنين في مراحل لاحقة من تطورها فإن نجمًا كتلته 8 كتل شمسية يمكن أن يستنفد الإمدادات التي في لبه من الهيدروجين فقط في بضعة ملايين من السنين مع قصر المراحل الأخرى من دورة حياته قصرًا كبيرًا أيضًا.

الكتلة هي أهم العوامل التي تؤثر في عمر النجم. ودرجات الحرارة الأعلى والضغوط في لب النجوم الضخمة تسمح لدورة اندماج دورة كربون ـ نيتروجين ـ أكسجين الأكثر كفاءة إلى حد كبير بأن تكون هي السائدة (انظر صفحة 116) في حين أنه في النجوم الأقل ضخامة سلسلة بروتون بروتون الأكثر هدوءًا هي التي تولد معظم الطاقة.. والتكوين أيضًا يلعب دورًا: فدورة كربون ـ نيتروجين ـ أكسجين لا يمكن أن تحدث إلا إذا كان الكربون موجودًا حتى يقوم بدور المادة الحفازة، ولما كان الكون قد أصبح غنيًا بالكربون بمرور الوقت (انظر الفكرة 42) فإن دورة كربون ـ نيتروجين ـ أكسجين كانت أقل أهمية في الأجيال السابقة من النجوم.

1945م

«جامو» يفسر العمالقة الحمر على أنها مرحلة متأخرة في تطور النجوم الشبيهة بالشمس.

1956م

بيّن «إيوسيف شكلوفسكي» أن السدم الكوكبية هي عمالقة حمراء أطاحت بأغلفتها الجوية.

1961م

وصف كوشيرو هياشي مسارات التطور النجمي السابق للمتتالية الرئيسية.

علاقة الكتلة - اللمعان

رسـخت مختلف النظريات التي تزاحمت لتثبت مكانتها حتى منتصف العشرينيات من القرن الماضي فكرة أن النجوم كانت تستـمد طاقتها من شكل من أشكال الانقباض الجذبي (انظر صفحة 112) لكن كتاب «آرثر إدينجوتـن» عام 1926 عن بنية النجوم جلب نهجًا جديدًا للخطوات. بدأ «إدينجوتن» العمل مـن نموذجه النظري لدواخل النجوم. فأجرى حسابات بأن هناك علاقة أساسية بين الكتلة واللمعان في جميع النجوم تقريبًا: كلما كان النجم أكبر ضخامة ينبغي أن يكون أكثر سطوعًا.

«النجوم لها دورة حياة مثل الحيوانات؛ فهي تولد، وتنمو، وتمر بتطورات داخلية محددة وفي النهاية تموت.»

هانز بيث

لم تكن هذه الفكرة جديدة، وهرتسـبرنج نفسـه سـبق أن وجد بعض الأدلة عليهـا في النجوم الثنائية (انظـر الفكرة 23) ومع ذلك فـإن نهج «إدينجوتن» أثبـت نظريًّا أن الكتلـة تزيد بزيـادة كل من اللمعان ودرجات حرارة السطح الأكثر ارتفاعًا، وعلى افتراض أن النجوم لها كتل ثابتة خلال حياتها فكان من المسـتحيل للنجوم أن تغير من توازن درجة حرارتها وسطوعها دون تغيرات كبيرة في مصدر الطاقة الداخلي لها. وكانت النتيجة أن النجوم التي تتبع نموذج «إدينجوتن» للبنية النجمية ستكون مسـتقرة في مكان واحد على النسق الأسـاسي لمخطط هرتسبرنج - راسل معظم حياتها - وهو مكان سيتحدد عند ميلاد النجم من قبل الكتلة التي تشكلت فيها.

وهذا التفسـير الثوري الجديد لمخطط هرتسبرنج-راسـل قوبل بشـك مدو بين زملاء «إدينجوتن»، لأسـباب ليس أقلها المشـكلة المسـتمرة لمصادر الطاقة النجمية. وقد سـاعد «إدينجوتن» بنفسه في دحض نموذج الانقباض الجذبي القديم لكن البديل المفضل كان نموذج

افــتراضي «لفناء المادة» (انظر صفحة 114) الذي من شــأنه أن ينتج طاقة وفيرة ويســمح للنجوم بالتألق ربما لتريليونات السنين لكنه أيضًا يسبب نقصًا كبيرًا في كتلة النجم على مدى عمره. وعلى أســاس هذا الافتراض، بدا التطور تحت النسق الأساسي ـ حيث تفقد النجوم كتلتها وتخفت كلما تقدم بها العمر ـ أمرًا منطقيًا.

لم يكن إلا في أواخر الثلاثينيات من القرن العشرين، مع عمل «بيث» المتطور على تفاعل سلســلة بروتون بروتون (انظــر صفحة 115) أن بدأ كل شيء يصبــح مفهومًا. فمن أجل إطلاق خرج الطاقة المرصود مــن النجوم، لا بد أن يحدث اندماج نووي بمعدل سرعة أكبر من عملية الفناء، لكن لا بد أن يكون لا يزال قادرًا على إبقاء نجم مثل الشــمس يلمع لمعانًا مطردًا لمليارات الســنين. والأكثر من ذلك أنه سيكون هناك فقد في الكتلة قليل نسبيًا ما بين بداية حياة النجم ونهايتها.

شرح العمالقة

بقي قول «إدينجوتن» أن النجوم تقضي معظم حياتها في نقطة واحدة على النسق الأساسي مصونًا، لكن كانت لا تزال هناك أســئلة رئيسية يجب أن تجاب بشأن الطريقة التي تتلاءم بها أنواع النجوم الأخرى مع القصة، ومثلما حدث، في السنة نفسها التي نشر فيها «بيث» أفكاره عن الاندماج، طرح عالم الفلك الأستوني «إرنست أوبيك» رؤية جديدة للبنية النجمية التي كان لها أيضًا آثار هامة للتطور.

إن افتراض «إدينجوتن» أن المادة داخل النجم يجري تقليبها باســتمرار وخلطها معًا كان قد لاقى قبولًا واســعًا في المجتمع الفلكي، ويعني ضمنًا أن جميع هذه المادة كان متاحًا في نهاية المطــاف كوقود، لكن «أوبيك» جــادل من أجل نموذج طبقي فيــه تبقى نواتج

الاندماج في اللب. وهذا يعني أن إمداد النجوم من الوقود كان أكثر محدودية بكثير، كما أكد أيضًا أن اللب يصبح أكثر كثافة وسخونة ببطء على مر الزمن أثناء اندماج وقوده الهيدروجيني مع الهيليوم. وكان اللب المتموج الموصل عن طريق الحمل محاطًا بغلاف هيدروجيني عميق آخر فيه كانت الطاقة تنقل للخارج في الأســاس عن طريق الإشعاع وكانت المادة جميعها، التي تشــكل الغالبية العظمى من النجم، في العادة غير متوفرة لتقوم بدور وقود الاندماج، لكن هذا يمكن أن يتغير في النجوم الأقدم. وبالبناء على فكرة اقترحها «جورج جامو» لأول مرة، قال «أوبيك» إن الاقتراب من لب متزايد الســخونة يمكن أن يسخن الجزء السفلي من الطبقة المشعة حتى تصبح هي أيضًا قادرة على إدامة تفاعلات الاندماج. وهذا من شأنه أيضًا أن يتسبب في توسيع حجم الغلاف كثيراً.

يقضي النجم معظم فترة عمره في اندماج الهيدروجين مع الهيليوم في لبه (1)، وعندما يستهلك إمداد اللب من الوقود (2)، ينتقل اندماج الهيدروجين إلى القشرة المحيطة وفي النهاية، تزداد كثافة ودرجة حرارة اللب المتقلص إلى درجة كافية لدعم اندماج الهيليوم (3).

إن النموذج الطبقي لـ«أوبيك» من شــأنه أن يثبت أنه مفتاح تفسير أنماط التطور، لكن مضت بعض السنوات قبل أن يصبح النموذج مقبولًا على نطاق واسع. قاد «جورج جامو» محاولات لوضع نموذج لبنية النجوم العمالقة الحمر وموضعها في التسلسل التطوري، لكنه ضل مرارًا وتكــرارًا بفعل الاعتقاد بأن النجوم لا بد أن تكــون مختلطة جيدًا. لم يكن حتى عــام 1945 عندما قام بإدخال النهج الطبقي في نموذجه وأوضح أن العمالقة الحمر مرحلة لاحقة في تطور النجوم العادية نسبيًّا حيث يتسبب اندماج الهيدروجين في غلاف حول اللب

في جعلها أكثر سطوعًا وأكبر من أسلافها في النسق الأساسي. وقد أدرك «جامو» أن العملاق الأحمر في نهاية المطاف من شـــأنه أن يطيح بطبقته الخارجية ويعرض لبه المستنفد كقزم أبيض ســـاخن لكن خافت (انظر صفحة 190). وهذه التطورات كانت مجرد خطوات أولى مؤقتة نحو تفسير القصة المعقدة للتطور ما بعد النسق الأساسي.

الفكرة الرئيسة

إن دورة حياة النجم تتحدد بكتلته عند ميلاده

20

السدم، تجمعات النجوم

Nebulae and star clusters

تنشأ النجوم من سـحب كبيرة منهارة من الغاز بين النجمي، وغالبًا ما يشعل تكونها هذا الغاز فتنشـأ عنه سدم مذهلة لكن في حين تم التعرف على الارتباط بين تجمعـات النجوم المتقاربة والسـدم في أوائل القرن التاسـع عشر إلا أن استنتاج كيف يؤدي أحدهما إلى الآخر قد استغرق وقتًا.

إن كلمة سديم (nebula) معناها في اللغة اللاتينية «سحابة cloud» وكان يستخدمها مراقبو النجوم في بدايات عصر بطليموس الإسكندرية لوصف مجموعة من الأجرام الغامضة في سماء الليـل والتي لم تكن تتكـون بوضوح من نجوم فردية. لكن، لم يبدأ علماء الفلك في اكتشـاف الكثير من هذه الأجرام سوى مع ظهور التلسكوب. أحد أوائل، وبالطبع أكثر فهارس السدم شهرة أعده صائد المذنبات الفرنسي «تشارلز ميسييه» في عام 1771 ظاهريًّا للمساعدة في تجنب حالات الخطأ في تحديد الهوية عند مسح السماء بحثًا عن مذنبات.

الخط الزمني

1771م	1791 - 1811م	1864م
أعد «ميسييه» أول فهرس من الأجرام الفلكية غير النجمية.	تعرّف «هيرشـل» على سـدم غازيـة مائعة سـاطعة وربطها بتكون النجوم.	أوضح «هاجنز» أن السـدم المائعة الساطعة غازية بطبيعتها.

بعد عقدين من الزمان، أعاد «ويليام هيرشل» النظر في أجرام فهرس «ميسييه» باستخدام تلسكوب أكثر قوة وكان قادرًا على التمييز بين عدة أنواع مختلفة من السدم، بعضها قسم نفسه في مجموعات أو تجمعات من النجوم- أو على الأقل بدت كما لو كان من الممكن أن تفعل ذلك ربما باستخدام آلة أكثر قوة- في حين بدت سدم أخرى سحبًا متوهجة من الغاز مصحوبة عادة بنجوم أو حتى تجمعات نجوم مفتوحة مضمنة داخلها.

مواقع ولادة النجوم

«قد نتصور أنه ربما مع تقدم الوقت تبقى تلك السدم متجمعة لكي تصبح نجومًا بالفعل.»
ويليام هيرشل

أطلق «هيرشـــل» على هذه الســـحب اسم «المواقع الســـاطعة» وكانت هي أول دليل قاطع على وجود مادة في الفضاء بـــين النجوم. وعلى مدى العقدين التاليين، عاد لدراســـتها بين حين وآخر وفي عام 1811 أوجز نظرية تقول إن المواقع الساطعة هي مواقع تشكل النجوم. وقد اعتقد «هيرشل» أنه من خلال النظر في مختلف الســـدم سيكون قادرًا على تعقب تجمعها وتحولها إلى نجوم مفردة وتجمعات نجوم في خطوة واحدة تقريبًا لكل مرة. ومع ذلك، ارتكب خطأ كبيرًا في افتراض أن النجوم كان يجري تشـــكيلها على نحو فردي ثم تسحب معًا بفعل الجاذبية لتشكل التجمعات، بعبارة أخرى، التجمعات الأشد ارتباطًا كانت أقدم من المجموعات الفضفاضة.

1888م

فـــرّق «درايـــر» بـــين تجمعات النجوم المفتوحـــة والتجمعات الكروية.

1929م

وضع «هرتسبرنج» طرقًا لقياس عمر التجمعـــات المفتوحة من ألوان نجومها.

1947م

حدد فيكتور إمبارتسوميان أول رابطة OB.

شهد القرن التاسع عشر فيما بعد تطورات كبيرة في دراسة كل من السدم والتجمعات المفتوحة. ومنذ عام 1864 حلل «ويليام هاجنز» أطياف السدم وأوضح أن الضوء الصادر من الموائع الساطعة لـ«هيرشل» يتكون من بضعة خطوط امتصاص ضيقة من ألوان محددة في حين أن الضوء من أنواع السدم الأخرى أظهر خطوط امتصاص داكنة مقابل سلسلة واسعة من الألوان المختلفة.

وقد أثبت ذلك أن السدم المكونة للنجوم (التي تسمى الآن بسدم الانبعاث) كانت طبيعتها غازية إلى حد كبير، وأشار إلى أن العديد من السدم الأخرى، غالبًا حلزونية الشكل، جمعت الضوء من أعداد هائلة من النجوم (انظر صفحة 223).

وفي هذه الأثناء، في عام 1888 نشر عالم الفلك الدنماركي-الأيرلندي «جيه إل دراير» الفهرس العام الجديد (NGC)، وهو سرد موسع جديد للأجرام غير النجمية، وميز فيه بين نوعين من تجمعات النجوم- المرتبطة بإحكام، وهي كرات كروية الشكل ممتلئة بآلاف النجوم، ومجموعات أكثر حرية بها عشرات أو مئات الأعضاء وفيما بعد أطلق على السابقة الأولى اسم تجمعات كروية، لكن تلك التجمعات الأخيرة التي أطلق عليها تجمعات مفتوحة هي التي وجدت مصحوبة بسدم الانبعاث.

أصبحت صورة مناطق تكون النجوم أكثر تعقيدا في أوائل القرن العشرين، عندما أظهر عالم الفيزياء الفلكية رائد علم التصوير الفلكي الأمريكي «إي إي برنارد» وزميله الألماني «ماكس ولف» أن هذه التجمعات غالبًا ما تكون مرتبطة بمناطق معتمة من غبار ماص للضوء «السدم المظلمة». ومن ناحية أخرى، في عام 1912 اكتشف «فيستو سيلفر» نوعًا آخر من السحب النجمية في تجمع نجوم الثريا. ويلمع «سديم الانعكاس» هذا بفعل انعكاس الضوء من نجم قريب.

تحديد التاريخ الذي ترجع إليه تجمعات النجوم

في حين بدا من الواضح أن سـدم الانبعاث كانت هي مواقع ولادة النجوم إلا أن التسلسل الفعلي للأحداث كان غير واضح على نحو محبط. إن الاكتشـافات في فهم دورات حياة النجوم ونشـأة التجمعات من شـأنها أن تبدأ في جعل الأمور منطقية، لكن في عام 1929، على سـبيل المثال، لاحظ «إجنار هيرتسبرنج» فرقًا كبيرًا في خصائص النجوم في تجمعات الثريا، وبريسيبي، والقلائص المفتوحة الشـهيرة. أكثر نجوم الثريا سطوعًا جميعها حـارة وزرقـاء، في حـين أن بريسـيبي، وخاصة القلائص يحتـوي عـلى نجـوم برتقالية وحمراء أكثر سطوعًا، وبعد بضع سنوات، أصبح من الواضح أن اختلافات الألوان كانت إشارة للأعـمار النسـبية للتجمعات: النجـوم الأكثـر سـطوعًا والأضخم تلمع على نحو أكثر سـخونة وزرقة أثناء حياتها في طور النسـق الأسـاسي، لكنها تتقدم في العمـر سريعًا فتخرج عن النسق الأساسي وتصبح من

التجمعات الكروية

بالإضافة إلى التجمعات المفتوحة عـرف «درايرِ» نوعًا ثانيًا من تجمعـات النجوم، وهذه التجمعات الكرويـة لها بنية أكثر تركيـزًا بكثـير وأصل مختلف تمامًا. وهي تحتوي على مئات الآلاف من النجوم التي تتداخل مداراتها الإهليلجية لتكـون شـكلًا كرويًـا أو إهليلجيًـا تقريبًـا. النجـوم المفردة يفصلهـا عن بعضها أيـام ضوئية أو شـهور ليس سـنوات. وتوجد التجمعات الكروية بالقـرب من مركز المجرات أو تدور في المناطق الهالية فوقها وأسفل منها (انظر صفحة 209) وهي مكونة بالكامـل تقريبًا من نجوم قزمة ذات كتلة قليلة، ولها أعمار تمتد للعديد من مليارات السنين. ويشـير الدليل الطيفـي إلى أنها تفتقـر إلى العناصر الأثقل الموجودة في النجوم المولودة حديثًا، ولذا فقد تكون تكونت قبل شمسنا بكثير، أي في الأيام الأولى من الكون. في الواقع، يربط التفكير الأخير بين أصل هذه التجمعات والتصادمات بين المجرات (انظر صفحة 227).

العمالقة الأكثر سطوعًا لكنها أيضًا تصبح أكثر برودة، وذلك خلال بضعة ملايين من السنين. ومن ثم فإنه كلما كان التجمع أقدم كانت العمالقة الحمر التي يحتوي عليها أكثر لمعانًا.

أظهرت القدرة على وضع التجمعات في ترتيب زمني أن نظرية هيرشل عن التجمعات التي تصبح أكثر كثافة بمرور الزمن لا بد أن تُعكس. في الواقع، التجمعات الأكبر كثافة هي الأصغر، وهي تصبح أكثر تباعدًا تباعًا بمرور ملايين السنين. في عام 1947، قام عالم الفلك الأرميني «فيكتور أمبارتسوميان» بطفرة أخرى حين عرف أول مجموعات (OB) وهذه المجموعات من النجوم الصغيرة إلى حد ما والساخنة الساطعة منتشرة عبر مناطق من الفضاء أوسع كثيرًا، لكنها تظهر حركات حقيقية يمكن في نهاية المطاف أن تعود إلى النقطة نفسها، وكان اكتشاف «أمبارتسوميان» هو الإثبات الأخير على أن النجوم تولد على شكل تجمعات مفتوحة متقاربة داخل السدم قبل أن تتناثر ببطء في الفضاء. اليوم، نحن نعلم أن آلية التشتت الأساسية هذه تشتمل على لقاءات متقاربة بين النجوم وهي تنتهي بقذفها خارج التجمع في اتجاهات مختلفة وأحيانًا بسرعات عالية جدًّا.

مجموعة الدب الأكبر المتحركة

في بعض الأحيان، تتجمع التجمعات المفتوحة معًا لمدة طويلة على نحو مذهل - على سبيل المثال، لا تزال عدة عشرات من النجوم المبعثرة على نطاق واسع، بما فيها خمسة أعضاء من الدب الأكبر الشهيرة، تشارك حركة مشتركة في السماء في هيئة مجموعة الدب الأكبر المتحركة واكتشف عالم الفضاء الإنجليزي، والكاتب «ريتشارد إيه بروكتور» في عام 1869 هذه المجموعة، التي تكون جميع أعضائها في السديم نفسه منذ حوالي 300 مليون سنة مضت.

بحلول منتصف القرن العشرين، كانت مواقع ولادة النجوم فوق مستوى الشك ولكنها ستستلزم ثورة في تكنولوجيا الرصد حتى يتمكن علماء الفلك بالفعل من فهم العملية المعنية (انظر الصفحة 131). والسؤال الرئيسي الآخر هو، ما الذي حرك بالضبط الانهيار المبدئي للسدم لتكوين تجمعات النجوم في المقام الأول؟ طرحت العديد من الآليات، بدءًا من القوى

المدية التي تثيرها النجوم المارة وحتى الموجات الصدمية الناشئة من انفجارات المستعر الأعظم، لكن في حين أن أحداث الصدفة لمثل هذا النوع لها بلا شـك دور تقوم به إلا أن الآلية الرئيسية سرعان ما ستثبت أنها مرتبطة بالبنية الأوسع لمجرتنا والمجرات الأخرى (انظر صفحة 211).

الفكرة الرئيسة

سحب الغاز في الفضاء هي مهد النجوم الجديدة

21

ولادة النجوم

Starbirth

بحلول منتصف القرن العشرين، كان من المفهوم أن النجوم تنشـــأ في تجمعات نجوم كثيفة تشــكلها ســحب الغاز المنهارة في ســدم الانبعاث. لكن الكشف عن تفاصيل جديدة داخل ســدم الانبعاث هذه وشرح العمليات المحددة التي ينطوي عليها تشكل النجوم استلزم مجيء علم فلك عصر الفضاء.

جاءت القرائن الأولى للآليــة الدقيقة لولادة النجوم في عــام 1947، عندما أبرز عالم الفلك «بارت بوك» وجود كتل صغيرة نســبيًّا ومعتمة داخل السدم المشكلة للنجوم. ولأن أقطارها كانت تصل إلى ســنة ضوئية اقترح «بوك» أن هــذه الكريات كانت شرانق داخلها تتشكل نجوم فردية.

وبقي هذا الفرض غير قابل للإثبات لســنوات طويلة ببســاطة لأن «كريات بوك» بطبيعتها معتمة. لكن علم الفلك القائم على الفضاء بدأ يتطور في السبعينيات وكان من الممكن أخيرًا معالجة مثل هذه المشــاكل. وعلى وجه الخصوص، قدم القمر الصناعي الفلكي بالأشــعة تحت الحمراء،

الخط الزمني

1852م	أربعينيات القرن العشرين	1947م
اكتشــف «جون راســل هند» تي-الثــور وهو النجم المتغــير المثالي ما قبل النسق الأساسي.	درس «جورج هيربج»، و«جوليمورو هارو» الســدم الصغيرة التي عثر عليها بالقرب من النجوم الصغيرة المفردة.	عرّف «بوك» كريات معتمة مضغوطــة داخل الســدم المشكلة للنجوم.

وهو تعاون دولي بدأ عام 1983، رؤية مختلفة تمامًا للسماء. لم يشغل القمر الصناعي الفلكي بالأشعة تحت الحمراء إلا لمدة 10 شهور لكنه في هذه المدة رسم 96 ٪ من السماء عند أربعة أطوال موجية تحت حمراء مختلفة فأدى إلى توليد بيانات أبقت علماء الفلك مشغولين لسنوات.

الضوء في الظلام

تنبعث الأشعة تحت الحمراء، بأطوال موجية أطول وأقل نشاطًا من الضوء المرئي، من جميع الأجرام في الكون، وتخترق الغبار المعتم مثل ذلك الذي في كريات بوك. وفي عام 1990، أعلن «جاو لن يون» وأعلن «دان كليمنز» أن الكثير من الكريات تزامنت مع مصادر أشعة تحت حمراء في بيانات القمر الصناعي الفلكي بالأشعة تحت الحمراء، تمامًا كما قد يكون متوقعًا إذا كانت تخفي نجومًا صغيرة ما قبل النسق الأساسي.

بعد بضع سنوات، في عام 1995، التقط تلسكوب هابل الفضائي صورة لـ«أعمدة الخلق» الشهيرة. وقد كشف تكبير منطقة تشكل النجوم المعروفة بسديم النسر (ميسييه 16) بتفاصيل غير مسبوقة عن أبراج من غاز وغبار معتمين منها ظهرت الجذوع الغريبة والمحلاق. وأظهرت الهالات

«نجوم تي الثور ولدت في السحب المظلمة وهناك لم يكن لديها وقت كافٍ لتتحرك بعيدًا جدًا عن محل ميلادها.»

جورج هيربج

1954م

اقترح «فيكتور أمبارتسوميان» أن «أجرام هيربج - هارو» تتكون عندما تخرج نجوم تي الثور مادة أثناء تشكلها.

1961م

وصف «هايشي» تفاصيل تطور ما قبل النسق الأساسي بدلالة المسارات على مخطط هرتسبرنج-راسل.

1990م

ربط «يون» و«كليمن» «كريات بوك» بالمصادر القوية للأشعة تحت الحمراء مما يشير إلى أن بها نجومًا مضمنة داخلها.

1995م

التقط تلسكوب هابل الفضائي صورًا لبنى أعمدة الخلق داخل سديم النسر.

المتوهجة حول الأعمدة أنها كانت تتبخر تحت فيض من الإشعاع من النجوم الهائلة القريبة. فسر «جيف هيستر»، و«بول سون»- اللذان التقطا الصورة- شكل الأعمدة على أنها مناطق أكثر كثافة داخل سديم أكبر والتي تمتعت بقدرة أفضل على تحمل آثار الإشعاع. وتظهر السمات التي تشبه الجذوع عندما تبقى عقدة من المادة حول نجم ملتئم سليمة «كريات بوك» حتى عندما تضرب المناطق المحيطة بها مرة أخرى.

ومنذ أن التقطت الصورة الأصلية للأعمدة ومناطق تشكيل النجوم الأخرى - عدة مرات باستخدام الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء ويبدو أن القصة نفسها تتكرر مرارًا وتكرارًا. الإشعاع الكثيف من جيل أول من النجوم الهائلة واللامعة المولدة حديثًا تحدث تجاويف في السديم المحيط. وتظهر الأعمدة والمحلاق من جدرانها مما يدل على المواقع التي لا يزال فيها تشكل النجوم مستمرًا. وتأثيرات هذا الإشعاع الذي يبعد مادة السديم- إلى جانب الأمواج الصدمية عندما تنفجر هذه النجوم على هيئة مستعر أعظم (انظر الفكرة 30)-

النجوم الضخمة صغيرة السن

في عام 1960 اكتشف عالم الفلك «جورج هيربج» فئة مميزة من نجوم متغيرة أزرق-أبيض غير مسبوقة ويطلق عليها الآن اسم نجوم هيربج Ae/Be. وقد ثبت أن هذه النجوم هي مرحلة مبكرة في ولادة النجوم الأكبر من الشمس (تزن من 2 إلى 8 كتلة شمسية). على غرار نجوم تي الثور، هذه النجوم الصغيرة المشوهة محاطة بأقراص من المادة ما زال بعضها يتراكم فيها في حين أن جزءًا كبيرًا من البقية لا يزال يطرد إلى الفضاء النجمي. ويشير البحث إلى أن مثل هذه النجوم الشابة عالية الكتلة لا تتبع مسار «هايشي» على مخطط هرتسبرنج-راسل على الإطلاق.

وهي بالفعل لامعة جدًا عندما تصبح مرئية وتنكمش ببساطة بمرور الزمن وتتحرك بطول المسار الأفقي لـ«هيني» وتزيد من درجة حرارة سطحها بسرعة لكي تنضم إلى الطرف العلوي من النسق الأساسي. المراحل المبكرة في تطور معظم النجوم الضخمة جميعًا (التي تزن عشرات الكتل الشمسية) ليست مفهومة جيدًا لكن يبدو من المؤكد أنها أيضًا تتحرك بطول مسار «هيني» في بداية حياتهم القصيرة.

تحد بفاعلية من نمو شقيقاتها الأصغر سنًا في التجمع. ووفقًا لدراسة أجريت عام 2001 فإن ثلث الغاز في السديم الأصلي فقط ينتهي به الأمر مندمجًا في النجوم الخاصة به، وتدوم عملية تشكل النجوم بضع ملايين من السنين فقط على الأكثر قبل أن يفقد الغاز كله. وفي الغالبية العظمى من الحالات تتسبب هذه الخسارة الكبيرة من الكتلة في جعل التجمع الوليد يخسر سلامة جاذبيته، فيعاني من «الموت في قت مبكر» لأن النجوم المكونة له والنجوم الأولية تنجرف بعيدًا. ولا ينجو إلا أقلية تصبح تجمعات نجمية مفتوحة ناضجة تحوي ما بين 100 إلى بضعة آلاف النجوم وقد تظل متماسكة لعشرات الملايين من السنين.

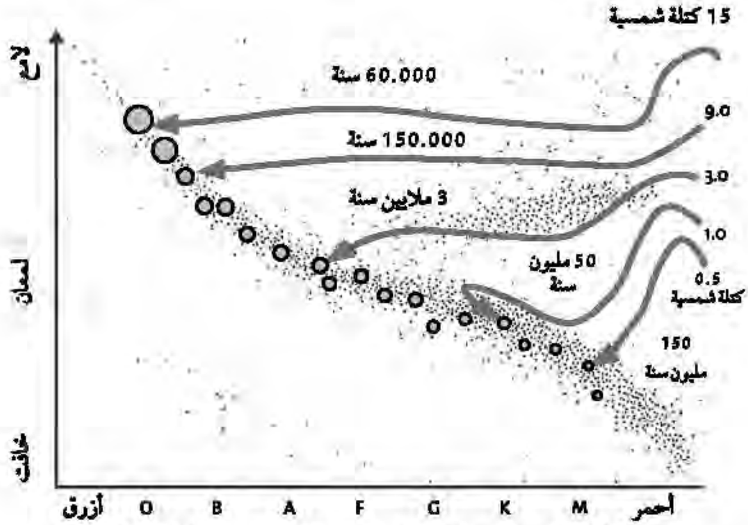
النجوم صغيرة السن

قد تنتج كرية واحدة من كريات بوك نجماً واحدًا فقط أو نجمين أو نظامًا متعددًا إذا تجمعت في لُبين مختلفين أو أكثر. وتقترح نمذجة الحاسوب أن الانهيار المبدئي إلى حد ما سريع وتتكون فيه النجوم الأولية الساخنة الكثيفة خلال عشرات الآلاف من السنين، وتبقى جزءًا لا يتجزأ من سحابة أوسع من مادة دوارة إلا أنها تتسطح تدريجيًا متحولة إلى قرص تراكمي. وعندما تصبح النجوم الأولية أقوى تستمر في جذب مادة أكثر لكن الإشعاع من اللب الذي تتزايد سخونته يبطئ من معدل الانجذاب وتقوم المجالات المغناطيسية بعمل منافث تتسرب من أعلى وأسفل القرص، ومن المعتقد أن هذه التركيبة من الرياح النجمية القوية والمجالات المغناطيسية تنقل كمية حركة زاوية إلى القرص مما يبطئ من دوران النجم ويسرع من دوران المادة المحيطة مما يؤدي إلى حل لغز قديم بشأن أصول نظامنا الشمسي (انظر صفحة 29).

يقضي نجم مثل الشمس 10 ملايين سنة أو أكثر كنجم أولي تنبعث منه أشعة تحت الحمراء في حين تزداد سخونته وطاقته بثبات، وفي النهاية يلمع بضوء مرئي وعندئذ يقال إنه أصبح نجماً من نجوم تي الثور. هذه الأجرام كبيرة، ومحمرة وأكثر لمعانًا من النجوم التي ستصبح ما هي عليها.

ولما كانت هــذه النجوم تجلب معظم طاقتها من الانقبــاض الجذبي بدلًا من تفاعلات الاندماج النووي (انظر صفحة 112) فهي تتنوع على نحو غير متوقع.

تســتمر المرحلة العادية من تي الثور حوالي 100 مليون ســنة أو أكثر وفي هذا الوقت ينكمش النجم تدريجيًا وتقوم طاقته الداخلية بنقل هذه التغييرات. في عام 1961 رسم عالم الفيزياء الفلكية «كوشيرو هايشي» ما تعنيه هذه التغيرات بدلالة مخطط هرتسبرنج ـ راسل.



يوضح مخطط هرتسبرنج ـ راسل مساري «هياشي»، و«هيني» للنجوم المولودة حديثًا وهي تقترب من النسق الأساسي.

النجوم ما قبل النسق الأساسي تصبح أقل لمعانًا كلما أصبحت أكثر كثافة مما يتيح لها في البداية أن تبقي حرارة السطح نفسها. وتتبع النجوم التي كتلتها أقل من نصف كتلة الشمس تتبع «مسار هياشي» إلى أن تصبح ألبابها كثيفة بما يكفي لبدء اندماج بروتون– بروتون، وهي تســتقر كأقزام حمراء (انظر صفحة 136). أما النجوم التي تصل كتلتها إلى ضعف كتلة الشــمس فهي تغير اتجاه تطورها عندما تصبح دواخلها ســاخنة بما يكفي لتطوير منطقة مشــعة (انظر صفحة 109).

وهي حينئذ تحتفظ باللمعان نفسه عندما تستمر في التقلص مما يؤدي إلى ارتفاع حرارة السطح (ما يسمى «مســـار هيني»). وفي كلتا الحالتين تدل بداية تفاعل اندماج بروتون ـ بروتون على النقطة التي ينضم فيها النجم إلى النسق الأساسي ويبدأ الفترة الأطول والأكثر استقرارًا في حياته.

الفكرة الرئيسة

يبين علم الفلك بالأشعة تحت الحمراء كيف ولدت النجوم

22

النجوم القزمة

Dwarf stars

تظهر النجوم التي تقلّ كتلتها عن كتلة الشـــمس خصائصها الفريدة من نوعها والمذهلة أحيانًا بما في ذلك النشاط العنيف المثير للدهشة. عند الحد الأدنى من الكتلة تتحول هذه الأقزام الحمراء إلى أقزام بنية وهي ما تسمى بالنجوم الفاشلة والتي لم يثبت وجودها إلا منذ التسعينيات.

من الناحية التقنية، تقريبًا جميع النجوم هي نجوم قزمة بما فيها شمســـنا، والنجوم الأكثر ضخامة ولمعانًا مثل الشِّـعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius) (انظر المربع صفحة 138). إلا أن الشائع هو اســتخدام مصطلح قزم اســتخدامًا أكثر تحديدًا لوصف النجوم الصغــيرة الأقل لمعانًا من الشـــمس بقدر كبير. وحتى هذا يمكن أن يكون محيرًا، فالأقزام البيضاء ـ وهي بقايا نجمية محترقة (انظر صفحة 190) ـ أجرام مختلفة اختلافًا واضحًا عن الأقزام الحمراء التي هي مجرد نجوم نســق أساسي عادية لها كتلة صغيرة جدًا. وكلاهما بدوره مختلف عن الأقزام البنية التي لا تفي حتى بالتعريف المعتاد للنجوم.

الخط الزمني

1915م

اكتشـــف «روبرت إينيس» قنطور الأقرب وهو قزم أحمر خافت وهو أقرب نجم للشمس.

1948م

اكتشـــف «جاكوب لوتين» النجم المجـــاور BL Ceti أول نجـــم قزم يظهر نشاطًا واضحًا لنجوم مضيئة.

1962م

تنبأ «كومار» بوجـــود وفرة من النجوم الفاشـــلة صغيرة الكتلـــة والتي أطلق عليها فيما بعد اسم أقزام بنية.

يختلف لمعان النجوم على نطاق أوســع كثيرًا من كتلتها، تمامًا مثلما تستطيع الأوزان الثقيلة أن تكون أكثر سطوعًا مئات الآلاف من المرات من الشمس كذلك يمكن أن تكون أقل النجوم ضخامة أكثر خفوتًا بمئات الآلاف من المرات. فنجم كتلته تساوي نصف كتلة الشمس (يعتبر هــذا الحد الأعلى للقزم الأحمر) تشرق بحوالي 1/ 6 من ضوئهــا لكن النجم الذي كتلته 0.2 كتلة شمســية له حوالي جزء من 200 جزء من لمعان الشمس. وهذا يعني أن الغالبية العظمى من الأقزام الحمراء خافتة للغاية. لفترة طويلة كانت الأمثلة المعروفة هي تلك التي على أعتابنا الكونيــة فقط، مثل نجــم برنارد (انظر صفحة 298) وقنطور الأقــرب، وهو أقرب نجم إلى الشــمس وعلى الرغم من أن هذا القزم ذا الـ0.12 كتلة شمســية يبعد فقط مسافة 4.25 سنة ضوئيــة إلا أنه أكثر خفوتًا بـ100 مرة من النجــم الأكثر خفوتًا الذي يرى بالعين المجردة ولم يكتشف إلا عام 1915.

لم تتضح وفرة الأقزام الحمراء في مجرتنا إلا مع إطلاق أول تلســكوب فضائي بالأشعة تحت الحمراء في ثمانينيات القرن العشرين. البصمات الحرارية لهذه النجوم الخافتة أكثر أهمية بكثير من خرج ضوئها المرئي وقد أظهرت خرائط الأشــعة تحت الحمراء للسماء أن الأقزام الحمــراء أعدادها تفوق إلى حد كبير النجوم الأخرى، ربما تمثل ثلاثة أرباع جميع نجوم مجرة درب التبانة.

1995م

اكتشــف «ريبولا»، وآخرون أول نجــم مؤكد مــن الأقزام البنية ويطلق عليه تيد 1.

2006م

وجد «مايكل ماركــس»، و«بافل كروبــا» حدًّا أدنى للكتلة للنجوم التي كتلتها 0.083 كتلة شمســية بناء على أكثر النجوم خفوتًا في أحد التجمعات الكروية.

بنية القزم

أحد الفروقات الهامة بين الأقزام الحمراء والنجوم الأكثر ضخامة والذي يحدد الحد الأعلى من الكتلة لهذه النجوم هو حقيقة أنها لا تنقل الطاقة داخليًّا عن طريق الإشعاع، وبدلًا من ذلك فإن دواخلها تنقل الحرارة بالكامل عن طريق الحمل، والمادة التي تحتوي عليها تخلط ويعاد تدويرها باستمرار، وهذا الخلط ينقل نواتج الهيليوم في الاندماج النووي إلى خارج منطقة اللب ويضع مكانه هيدروجينًا جديدًا؛ مما يضمن أن جميع مادة النجم متاحة لاستخدامها كوقود للاندماج. إلى جانب المعدل البطيء طبيعيًّا لتقدم الاندماج بسبب درجة حرارة اللب المنخفضة فإن هذا يعني أن الأقزام الحمراء يمكن نظريًّا أن تدعم اندماج بروتون ـ بروتون (وتبقى في النسق الأساسي) لتريليونات السنين ـ وهو أكثر كثيرًا من أي نجوم أخرى.

تعريف الأقزام

وفقًا للتعريف الأصلي لـ«إجنار هيرتسبرنج»، القزم هو ببساطة نجم يتبع العلاقة واسعة النطاق بين درجة حرارة النجوم ولمعانها ومن ثم تقع على النسق الأساسي في مخطط هرتسبرنج-راسل. وقد استخدم مصطلح قزم في الأصل للتفرقة بين هذه النجوم وبين العمالقة- النجوم شديدة اللمعان من جميع الألوان والتي توجد في أعلى مخطط هرتسبرنج-راسل، لكن المصطلحات اختلطت بمرور الزمن، على أي حال.

والأكثر من ذلك، في الجزء أعلى اليسار من المخطط، لا يمكن التمييز بين الأقزام الزرقاء شديدة اللمعان والعمالقة بناء على اللون واللمعان وحدهما- يمكن التمييز بينهما فقط إذا كانت هناك معلومات إضافية تثبت ما إذا كان النجم لا يزال يدمج الهيدروجين في لبه أم لا. أما استخدام مصطلح الأقزام البيضاء للإشارة إلى البقايا النجمية المحترقة التي لا تقع في أي مكان قريب من النسق الأساسي (انظر صفحة 190) لا يضيف إلا المزيد من الارتباك.

يضخ لب القزم الأحمر إشعاعًا أقل بكثير من إشعاع الشمس وهذا يعني أن هناك ضغطًا خارجيًّا أقل لدعم طبقاته الخارجية ومن ثم فإن هذه النجوم أصغر كثيرًا وأكبر كثافة مما قد تشير

إليه كتلتها وحدها. قنطور الأقرب أكبر من كوكب المشـــتري بـ40 ٪ فقط وكثافته 40 مرة كثافة الشمس في المتوسط. وهذه الكثافة العالية جنبًا إلى جنب مع بنية التوصيل بالحمل التي يتسم بها القزم الأحمر يمكن أن يكون لها تأثيرات غير معتادة.

الدليل الأول على أن الأقزام يمكنها أن تظهر نشاطًا كبيرًا جاء من عالم الفلك الهولندي- الأمريكي «جاكوب لوتين» الذي اكتشــف اختلافات غريبة في طيف عــدة أقزام متقاربة في الأربعينيات مــن القرن العشريــن. وكان أحدها على وجه الخصوص- وهــو النجم الأكثر ســطوعًا من بين ثنائي يقع على بعد 8.7 ســنة ضوئية في كوكبة قيطــس- عرضة أيضًا لزيــادات ضخمة في السطوع لكن قصيرة العمر. في انفجار عام 1952، على سبيل المثال، هذا النجم الذي يطلق عليه «UV Ceti» زاد سطوعه بمقدار 75 مرة في بضع ثوان. بحلول ســبعينيات القرن العشرين، كان من الواضح أن انفجارات النجوم لا تحدث فقط في الضوء المرئي لكن أيضًا في الموجات الراديوية والأشعة الســينية عالية الطاقة، وأنها كانت شــبيهة جدًّا بالتوهجات الشمسية (انظر صفحة 84) وإن كان ذلك على نطاق أوسع بكثير. اليوم يدرك علماء الفلك أن الكثير من الأقزام الحمراء يطلق عليهم أيضًا نجوم متوهجة. وكثافة هذه النجوم، والتوصيل بالحمل المتماوج في دواخلهم يولد مجالات مغناطيسية أكثر قوة بكثير وأكثر تركيزًا من تلك التي ترى في النجوم الشبيهة بالشمس. نتيجة لذلك، تستطيع أحداث «إعادة الاتصال» المغناطيسي إطلاق طاقة تصل إلى 10000 مرة أكبر من تلك التي تثير التوهجات على الشمس مع نتائج مذهلة.

«النجوم التي لها كتلة أقل من كتلة حرجة معينة ستظل تنكمش حتى تصبح أجسامًا منحلة تمامًا.»

شيف إس كومار

الأقزام البنية

طبقًا لمعظم نماذج الاندماج النووي، لا بد أن تكون كتلة النجم على الأقل 0.08 مرة كتلة الشــمس لكي تدعم درجات الحــرارة والضغط في لبها تفاعل بروتون-بروتون المتسلســل.

ولذلك فإن هذا هو الحد الفاصل الرسمي للنجوم لكن هناك الكثير من الأجرام أقل من هذه الكتلة وتشكلت بالطريقة نفسها التي تشكلت بها النجوم وقد لا تزال تضخ كميات كبيرة من الأشعة تحت الحمراء والإشعاع المرئي. ومثل هذه «النجوم الفاشلة» التي تعرف باسم الأقزام البنية تبقى ساخنة بفعل الانقباض الجذبي، والاندماج النووي لنظير الهيدروجين الثقيل الديوتيريوم الذي يتطلب شروطًا أقل. وقد وضع نظريات لوجودها عالم الفلك شيف كومار (على الرغم من أن الاسم قد صيغ لاحقًا إلى حد ما) في الستينيات.

أثناء ثمانينيات القرن العشرين اكتشفت أجرام مثيرة للجدل لها خصائص مختلف عليها لكن في عام 1995 عثر على أول قزم بني لا جدال فيه. كان تيد 1،

طقس الأقزام البنية

تمامًا مثل النجوم، يمكن تصنيف الأقزام البنية حسب نوعها الطيفي وفقًا لدرجة حرارتها وخطوط الامتصاص الموجودة في غلافها الجوي. أكثر الأقزام البنية سطوعًا، مثل أكثر الأقزام الحمراء خفوتًا، له فئة طيفية من النوع M (انظر صفحة 101) لكن من هنا أضاف الباحثون الفئات الجديدة L، وT، وY وعندما تصبح هذه النجوم أكثر برودة تباعًا تستطيع الجزيئات متزايدة التعقيد أن تبقى في أغلفتها الجوية. وقد أظهرت دراسات حديثة اختلافات في خرج الأشعة تحت الحمراء من الأقزام البنية الخافتة التي يبدو أن سببها راجع إلى سمات سحابية هائلة (في حجم كوكب) تتحرك في أغلفتها الجوية وتحجب تسرب الحرارة من داخلها مؤقتًا. تندفع السحب تحت تأثير الرياح الشديدة- كما قد يكون متوقعًا، فإن الطقس على الأقزام البنية أكثر عنفًا من الطقس على العمالقة الغازية مثل كوكب المشتري.

خريطة الطقس للقزم البني «Luhman 16B»

الذي عثر على مكانه الفريق الأسباني الذي قاده «رافايل ريبولو»، جرمًا دقيقًا متضمنًا في تجمع نجوم الثريا البعيد.

كان دليـــل وجود الليثيوم في طيفه هو الدليل الذي أفســح المجال لهويته لأن حتى أخف النجوم الحقيقية ساخنة بما يكفي لتدمير كل أثر لهذا العنصر خلال الاندماج النووي.

ومنذ ذلك الحين عثر عـــلى مئات الأقزام البنية بما فيها الكثير المضمن في الســـدم المكونة للنجوم المشـــهورة أو على عتبة كوننا وغالبًا تدور حول نجم قزم آخر. تشير تقديرات كتلها إلى أن أصغر الأقزام البنية يمكن أن يكون بالفعل أقل ضخامة من أكبر الكواكب الغازية العملاقة والعامل المميز بين نوعي الجرمين هو وضع التشكيل.

الفكرة الرئيسة

النجوم الأصغر هي الأكثر وفرة أيضًا

23

النجوم الثنائية والمتعددة

Binary and multiple stars

حالة شمسنا كنجم مفرد تضعها ضمن الأقلية. إننا اليوم نعرف أن معظم النجوم في مجـرة درب التبانة هي أعضاء في أنظمة نجوم ثنائية أو متعددة. إن المســافات والأعمار المتطابقة للنجوم في مثل هذه الأنظمة يمكن أن يكشف عن حقائق هامة بشأن نشأة النجوم.

في حــين أن بضعة الآلاف من النجوم التي ترى من الأرض بالعين المجردة يبدو أن لها توزيعًا عشوائيًا تقريبًا في السماء، حتى مراقب النجوم يستطيع بلا مساعدة أن يرى زوجًا من النجوم يبدو أنهما اســتثناءان. تعرف الثنائيات المتقاربة في السماء عادة بالنجوم المزدوجة، وربما أشهر الأمثلة هما المئزر وسها؛ النجم الأوسط في ذيل كوكبة الدب الأكبر. فكر العلماء الأوائل قليلًا في هذا: إذا كان توزيع النجوم حقًا عشــوائيًا، إذن يمكن توقع القليل من هذه الأزواج المتقاربة. لكن، عندما قام عالم الفلك الإيطالي «بينديتو كاســتلي» بتحويل تلســكوب أولي على نظام النجوم في بداية 1617 وجد شــيئًا آخر. في حين يبدو المئزر للعين المجردة على أنه نجم مفرد إلا أنه هو نفســه في الحقيقة

الخط الزمني

1617م	1783م	1804م
اكتشف «كاستلي» أول نجم مزدوج بالتلسكوب، وهو المئزر في الدب الأكبر.	اقترح «جودريك» آلية كسوف لتفسير النجم المتغير «الغول» في بيرسوس.	أوضح «هيرشل» أن نجمي القفزة الأولى الجنوبيــة يــدوران حــول بعضهما البعض.

ثنائي قريب مكون من نجمين بيضاويين لكل منهما سطوع للعين المجردة. ومثل هذا الاصطفاف لنجمين ســاطعين فقط عن طريق المصادفة أقل احتمالية بكثير مــن النجمين المرتبطين ارتباطًا فضفاضًا وهما المئزر وســها، لكن مضى وقــت طويل قبل أن يفكر أي أحد تفكيرًا ســليمًا في الملابســات. أول شخص يقترح أن نجمي المئزر التوأم كانا حقًّا متجاورين في الفضاء هو الفيلسوف الإنجليزي «جون ميشيل» عام 1767.

«من السهل إثبات أن نجمين قد يكونان مرتبطين معًا للغاية عن طريق أدائهما حركة دائرية، أو قطوع ناقصة متشابهة حول مركز ثقلهما المشترك.»

ويليام هيرشل

وبعد ذلك، في عام 1802 خرج «ويليام هيرشل» بدليل إحصائي ـ بناء على مســح دقيق للسماوات ـ على أن النجوم المزدوجة القريبة أكثر شــيوعًا بكثير لدرجة أنه لا يمكن تفسيرها بأنها اصطفافات من قبيل الصدفة.

المدارات الثنائية

قال «هيرشــل» أنها لا بد أن تكون نجومًا ثنائية، مرتبطــة معًا ماديًا في مدار حول بعضها البعض عن طريق التجاذب المتبادل.

في عام 1804 حســم الجدل عن طريــق إظهار أن نجمي القفــزة الأولى الجنوبية (نجم مزدوج قريب آخر في الدب الأكبر، وكان قد اكتشــفه قبل ذلك بـ24 عامًا) قد غيرا توجههما

1889م

حــدد «مــوري»، و«بيكرنج» المئــزر A كأول نجــم ثنائــي تلسكوبي.

1901م

استنتج «فوجل» الصفات المادية للنجمين في المئزر A من البيانات الطيفية.

1903م

اكتشــف «جوســتاف مولر»، و«بول كيمبــف» أول نظــام ثنائــي متصــل معروف «أورمي ماجوريس».

النسبي مما يثبت أنهما كانا يدوران حول بعضهما البعض. بحلول عام 1826، كان الزوج قد رُصد عن كثب بما يكفي لعالم الفلك الفرنسي «فيليكس سافاري» أن يحلل مدارهما بالتفصيل، وقد أوضح أن هذين النجمين تقريبًا لهما كتلة الشمس، ويتبعان مدارات إهليلجية عمرها 60 عامًا بفاصل يتراوح ما بين 12 إلى 39 وحدة فلكية.

ومع تحسن التلسكوبات في القرن التاسع عشر اكتشفت أنظمة نجوم ثنائية أكثر، وحتى أنظمة نجوم متعددة تحتوي على أكثر من عنصرين. وسرعان ما أصبح من الواضح أن المسافة بين النجوم في مثل هذه الأنظمة يختلف اختلافًا كبيرًا: يمكن أن يكون الفاصل بينها مسافات بين كوكبية من بضع وحدات فلكية أو مسافات بين نجمية تصل لسنة ضوئية أو أكثر.

النجوم الثنائية الكسوفية

تمامًا مثل النجوم، يمكن تصنيف الأقزام البنية حسب نوعها الطيفي وفقًا لحالات معينة، يمكن الكشف عن النجوم الثنائية القريبة من بعضها للغاية لدرجة أنه لا يمكن التفرقة بينهما بالتلسكوب عن طريق تأثيرهما على ضوء النظام كله. أول نجم اكتشف من هذه النجوم، وهو الغول (Beta Persei)، كان معروفًا منذ العصور القديمة باسم «الشيطان الغامز». وقد وصف تقريبًا بدقة حتى قبل أن يحسم «هيرشل» قضية النجوم الثنائية المادية.

في عام 1783 لاحظ عالم الفلك الهاوي ذو الثمانية عشر عامًا «جون جودريك» أن نجم الغول عادة يضيء بسطوع ثابت مقداره 2.1، لكنه ينخفض فجأة إلى 3.4 لمدة حوالي 10 ساعات في دورة تكرر نفسها كل يومين و21 ساعة. وقد أشار إلى أن أحسن تفسير لهذا التغير هو إذا كان جسمًا أكثر إظلامًا يدور حول الغول ويمر عبر وجه النجم ويحجب ضوءه جزئيًا مرة في كل مدار، وقد أدت به الفكرة - أول آلية مقترحة لتفسير النجم المتغير من أي نوع - إلى أن يمنح وسام كوبلاي المرموق للمجتمع الملكي. لم يكن حتى الثمانينيات أن أوضح «بيكرنج» وفريقه في هارفرد أن الجسم الأكثر خفوتًا الذي يدور هو نجم مستقل بذاته. يعتبر الغول اليوم أحد النجوم الثنائية الكسوفية، ونموذج أولي لهذه الفئة المهمة من النجوم المتغيرة.

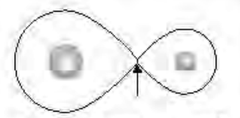
النجوم الثنائية والمتعددة ساعدت علماء الفلك أيضًا في بدء فهم العلاقات داخل النجوم، على سبيل المثال، لما كانت جميع النجوم في نظام ما تقع على نفس البعد عن كوكب الأرض فإن الاختلافات في مقدارها الظاهري تتوافق مع الاختلافات في اللمعان الحقيقي. إذا كان يمكننا تحديد حجم كل مدار نجم يمكننا إذن استنتاج كتلته النسبية، ولما كان بإمكاننا أن نفترض أن جميع أجزاء نظام النجوم تشكلت في الوقت نفسه فيمكننا حتى أن نرى كيف أثرت صفات مثل الكتلة على تطور النجم عبر الزمن.

النجوم الثنائية الطيفية

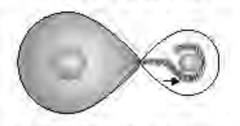
تفرض الملاحظة المباشرة قيودًا على أنواع النجوم المتعددة التي يمكن اكتشافها. مهما أصبحت التلسكوبات قوية، إذا كان النجمان قريبين جدًّا من بعضهما أو بعيدين جدًّا عن كوكب الأرض فإنهما سيندمجان في نقطة واحدة من الضوء. لكن في أواخر القرن التاسع عشر اكتشفت وسيلة جديدة لاكتشاف النجوم المتعددة.

الثنائيات المتصلة

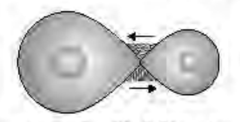
في بعض الأنظمة الثنائية، قد يكون العنصران قريبين جدًّا من بعضهما لدرجة أن التغيرات التطورية في حجم أحدهما أو كليهما تجعلهما يتصلان اتصالًا مباشرًا ببعضهما البعض. وهذا يحدث عندما يتجاوز النجم حيز روش الذي يحد من تأثير جاذبيته. وفي هذا السيناريو، يشكل النجمان نجم «دبليو يرامي ماجوريس» المتغير، وهو أحد النجوم الثنائية الكسوفية التي يتغير خرج ضوئها باستمرار. يمكن للانتقالات الكبيرة من الكتلة من أحد النجمين إلى الآخر عبر ملايين السنين أن تغير حتى من المسار التطوري لأحدهما أو كليهما.



أثناء حياة النجمين في مرحلة النسق الأساسي، كلاهما موجود داخل حيز روش لكل منهما.



عندما يتضخم النجم الأكثر حجمًا ليصبح عملاقًا تنتقل المادة إلى جاره.



وفي نهاية المطاف، قد يتضخم أيضًا النجم الأصغر ويصبح عملاقًا. وحينئذ تسري المادة في كلا الاتجاهين.

ومن اللافت للنظر أن دراســات الميزر هي التي قادت الطريق مجددًا. وكجزء من مشروع عالم فلك هارفرد «ويليام بيكرنج» لفهرسة الأنواع الطيفية وكيمياء النجوم (انظر صفحة 98) جمع أطيافًا من عنــصري النجم التوأم على مدار أكثر من 70 ليلــة بين عام 1887 و1889، وأوكل مهمة تحليلهما إلى «أنطونيا موري» التي كانت في الحادية والعشرين من عمرها. وسرعان ما حددت «موري» ســمة غريبة في طيف النجم الأكثر سطوعًا وهو الميزر A. الخط الداكن K الذي يدل على الكالســيوم في غلافه الجوي بدا حادًّا وواضح المعالم في بعض الأطياف لكنه بدا واسعًا وغامضًا في أطياف أخرى، كما أنه انقسم إلى خطين مختلفين في ثلاث لوحات فوتوغرافية أخرى أدركت «موري» أن تأثير «ازدواج الخط» هذا كان يحدث كل 52 يومًا وحدد «بيكرنج» الســبب تحديدًا صحيحًا: يتكــون الميزر A في الواقع من نجمين في مــدار ضيق حول بعضهما البعض. كلا النجمين يسهمان في الطيف الكلي لكن خطوط k المنزاحة تكشف عن أن خرجهما من الطاقة يحدث له إزاحة دوبلر باستمرار كلما تغيرت حركتهما بالنسبة لكوكب الأرض (انظر صفحــة 97). عند بعض النقاط في مداريهما، يكــون أحدهما متحركًا نحو كوكب الأرض مما يســبب قصر الأطوال الموجية لضوئه ويســبب انزياح خط k نحو النهاية الزرقاء من الطيف. وأثناء ابتعاد النجم الآخر في الوقت نفسه عن كوكب الأرض يتمدد ضوؤه ويحمر.

في أحيان أخرى ينعكس الوضع أو يتحرك النجمان من الجنب بالنســبة لكوكب الأرض ومن ثم يختفي تأثير دوبلر.

أصبــح الميزر A هو أول نجم في فئة النجوم الثنائية الطيفية الجديدة والتي كشــفت ببطء حقيقــة أن الغالبية العظمى من النجــوم في مجرتنا تقع داخل أنظمة ثنائيــة أو متعددة. وعلى القدر نفســه من الأهمية، أدرك «بيكرنج» أن هذه النجوم تقدم أداة جديدة قوية لعلماء الفلك: فباســتخدام السرعة والدورة المدارية يســتطيع المرء حساب المســافة بين النجوم، وأن يقيس مباشرة كتلتها باســتخدام قانون نيوتن العام للجاذبية. استغرق استخدام الوسيلة استخدامًا

صحيحًا بعض السنوات (أخيرًا، حل عالم الفلك الألماني «هيرمان فوجل» في عام 1901 مدار المئزر A) لكن القدرة على قياس مثل هذه الخصائص الفيزيائية للنجوم البعيدة مباشرة، بل مجرد وجود أنظمة نجوم ثنائية ومتعددة كان له تأثير كبير على علم الفلك في القرن العشرين.

الفكرة الرئيسة

النجوم المفردة مثل شمسنا هي الأقلية

24

البحث عن الكواكب الخارجية

Searching for exoplanets

بمجرد أن بدأ علماء الفلك في تقبل فكرة أنه ليس هناك شيء خاص بالتحديد فيما يتعلق بشمسنا أو مكاننا في مجرة درب التبانة، كان من الصعب أن يفكروا في سبب ألا يكون لدى النجوم البعيدة أنظمة كوكبية خاصة بها، لكن إثبات ذلك سيستغرق وقتًا طويلًا ولم يعثر على ما يسمى بالكواكب الخارجية بأعداد كبيرة إلا منذ تسعينيات القرن العشرين.

كانت القيود المفروضة على التكنولوجيا تعوق لمدة طويلة البحث عن كواكب تدور حول نجوم أخرى، لكن اكتشاف نجم برنارد Barnard عام 1916 جلب معه الآمال الأولى في اكتشاف كواكب خارجية. وضع هذا النجم القزم الأحمر في فهرس النجوم لكن المصور الفلكي «إي إي برنارد» كان أول من يتعرف على حركته الحقيقية العالية غير العادية أمام نجوم الخلفية. الحركة التي تعادل اتساع بدر كل 180 سنة ألمحت إلى أن نجم برنارد كان قريبًا جدًّا من نظامنا الشمسي، كما أن قياسات الانزياح (انظر صفحة 91) سرعان ما أثبتت أنه يبعد فقط 6 سنوات ضوئية عن كوكب الأرض، وهو رابع أقرب نجم إلى الشمس.

الخط الزمني

1969م	1992م	1995م
نشر «فان دي كامب» دليلًا خاطئًا عن الكواكب التي تدور حول نجم برنارد.	اكتشف «ولسزكزان»، و«فريل» أول كوكب نابض معروف يدور حول PSR B 1257+12.	أعلن «مايور»، و«أولوز» اكتشاف الفرس الأعظم 51 بي، أول كوكب خارجي يدور حول نجم عادي.

بداية مزيفة

أدرك عالم الفلك الهولندي «بيتر فان دي كامب» أن الحركة السريعة لنجم برنارد من شأنها أن تجعل أي تذبذبات في مساره -بسبب سحب جاذبية الكواكب الكبيرة- ملحوظة على نحو خاص. ولأكثر من ثلاثة عقود بدأت في عام 1937 تعقب بانتظام الموقع الدقيق للنجم، وفي نهاية المطاف، نشر عام 1969 دليلًا على كوكبين من فئة كوكب المشتري.

الكواكب النباضة

عُثر بالفعل على أول الكواكب التي اكتشفت حول نجم آخر قبل بضع سنين من اكتشاف الفرس الأعظم 51 بي لكنها اكتسبت اهتمامًا أقل لأن الظروف التي عثر عليها فيها كانت معادية للحياة. في عام 1992 أعلن «ألكسندر ولسزكزان»، و«دالي فريل» اكتشاف كوكبين يدوران حول نجم نباض عرف باسم PSR B1257+12، على بعد 23000 سنة ضوئية من كوكبة العذراء (انظر صفحة 194). وتبعه كوكب ثالث عام 1994. وقد تم العثور في ذلك الوقت على العديد من أنظمة الكواكب عن طريق التحليل الدقيق للتغيرات الصغيرة في الومضات الدقيقة من الإشعاع التي تحدث عندما يُجذب نباض في اتجاهات مختلفة بفعل الأجسام التي تدور حوله. مثل هذه الكواكب من غير المرجح أن تنجو من انفجارات المستعر الأعظم التي يتكون فيها النباض. وبدلًا من ذلك، يُعتقد أنها وُلدت في مرحلة ثانوية من تكون الكوكب، من حطام نجم مرافق مُدمر.

1999م

اكتشاف أول كوكب خارجي باستخدام طريقة العبور.

2009م

أطلقت «ناسا» مهمة كبلر للعثور على الكواكب، مما أدى إلى التعرف على آلاف الكواكب الخارجية الجديدة.

لكن ثبت أن ملاحظاته من الصعب على الآخرين تكرارها، وبحلول الثمانينيات اســتنتج معظم الناس أن «فان دي كامب» كان مخطئًا ربما بســبب أخطاء في معداته. تركت مسألة نجم برنارد الكثير من علماء الفلك في حيرة شديدة وسيطر رأي آخر أكثر تشككًا.

افــترض معظم الناس أن الكواكــب حول النجوم الأخرى كانت نادرة جدًّا لســبب ما. ولحســن الحظ، لم يمض وقت طويــل حتى قوضت طريقة جديدة أكثر حساســية للعثور على الكواكب هذا الوضع.

النجاح أخيرًا

«مهمة تلسكوب كبلر لوكالة ناسا هي رفع الغطاء عن أعيننا والكشف لنا عن كيف أن عالمنا الذي نعيش فيه عالم عادي.»

سيث شوستاك

اقترح «أوتو ســترف» عــالم الفلــك الأوكراني ـ الأمريكي في مطلع عام 1952 فكرة اكتشــاف كواكب حول النجــوم الأخرى عن طريق قيــاس التغيرات في سرعتها نصــف القطرية (الحركة نحو كوكب الأرض أو بعيدًا عنه). حيث توصل إلى أنه تمامًا مثلما تكشف النجوم الثنائية «الطيفية» طبيعتهــا الحقيقية عن طريق إزاحات دوبلر للخلف والأمــام للخطوط الطيفية عندما تتحرك عناصرها نحــو كوكب الأرض أو مبتعدة عنها (انظر صفحــة 145) فإن تأثير كوكب ما على نجمه كذلك ينبغي أن يظهر إذا استخدم راسم طيف حساس بما فيه الكفاية.

ومع ذلك فإن المشــكلة (كما اكتشفها «فان دي كامب») هي أن الكوكب لا يؤثر إلا تأثيرًا ضئيلًا جدًّا على نجمه. فبناء على كتلتيهما النســبية وحجم مــدار الكوكب فإن أكبر اضطراب يمكــن أن يأمله المرء قد يكون تذبذبًا في حدود بضعة أمتار كل ثانية بسرعة متوســطة تحســب عادة بالكيلومترات لكل ثانية. إن الكشف عن تغيرات طفيفة كهذه يعني تجزئة ضوء النجم إلى طيف واســع جدًّا وعالي التشتت، وهو أمر كان خارج نطاق التكنولوجيا في ذلك الوقت. لكن التقدم في الثمانينيات أنتج أول رواسم الطيف «شيلي» المناسب لتحليل الضوء الخافت للنجوم.

وهذه الأدوات تستخدم زوجًا من محزز الحيود لعمل طيف واسع بالتعاون مع الألياف البصرية لتزويد المحززات بالضوء القادم من النجوم المفردة.

معدات «إيلودي» التي شـــغلها لأول مرة «ميشل مايور»، و«ديديه كولوز» في مرصد «دو هوت بروفينس» منــذ عام 1993، كانت مصممة خصيصًا للبحـــث عن الكواكب الخارجية وسرعان ما أثبتت جدارتها. ففي عام 1995 استطاع «مايور»، و«كولوز» الإعلان عن اكتشاف كوكب كتلته على الأقل نصف كتلة كوكب المشـــتري يدور حول نجم الفرس 51 القريب نسبيًّا وكان هذا الأول من بين عديد من اكتشـــافات كهذه من «إيلودي»، ونظائره التي تقع في نصف الكرة الجنوبي.

طرق العبور وطرق أخرى

بعد بضع ســـنوات من تلك الاكتشافات المبكرة، لاقى أسلوب أكثر فعالية نجاحه الأول. إن طريقة العبور تنطوي على قياس الانخفاض الضئيل في الضوء الكلي الخارج من النجم عندما يعبر كوكب مباشرة أمامه. ولأن حجم النجم يسهل استنتاجه من خواصه الطيفية (انظر صفحة 101) فإن الانخفاض النسبي للضوء الخارج يكشف عن حجم الكوكب العابر. ومن الواضح أن العبـــور لا يحدث إلا في حالات نادرة فقط عندما يكـــون مدار الكوكب مصطفًا مباشرة مع كوكب الأرض، لكن نظرًا لحساسية أجهزة قياس الضوء الحديثة أصبح الآن هو الطريقة الأكثر عملية لتحديد الكواكب الخارجية منخفضة الكتلة التي في حجم كوكب الأرض.

تم اكتشـــاف أول كوكب خارجي عابـــر، في عام 1999، يدور حول نجم غريب شـــبيه بالشـــمس تمت فهرسته باســـم 209458HD وهو يقع على بعد 150 سنة ضوئية في مجرة الحصان المجنـــح. وكان علماء الفلك بالفعل يعرفون أن هذا النجم له كوكب يدور في مدار ضيق بفضل قياســـات سرعته نصف القطرية، لكن العبور أثبت أن نصف قطره حوالي 1.4 مرة نصف قطر

كوكب المشتري. ومنذ أول اكتشـــاف من مرصد «كيك» في هاواي، والتلسكوبات القائمة على الأقمار الصناعية والكاشفة للعبور هي الوســيلة الأكثر نجاحًا في اصطياد الكواكب.

الأول، وهـــو بعثـــة فرنسـية أطلـق عليهـا «COROT» عمـل بـين 2006-2012 في حـين جـاءت أداة ناسـا وهـي كيبلـر (انظر المربع) لاحقًا. يسـمح أي موقع في المدار للتلسـكوب بـأن يراقب باسـتمرار سـطوع مضمار كامل من النجـوم لفترات طويلة بـلا انقطاع مما يجعل مـن الأسـهل اكتشـاف الكواكب في المدارات الأطول.

كيبلر

أطلق القمر الصناعي لناســا والذي يدعى كيبلر عام 2009 وهو ســفينة فضاء مخصصــة لصيد الكواكــب وقد حولت معرفتنــا عن الكواكــب الخارجية. ومعدتــه الوحيدة هي تلســكوب عاكس طولــه 0.95 مــتر (37 بوصة) متصل بكاميرا ضوئيــة تقيس التغيرات الضئيلــة في ضوء النجوم للكشــف عن العبور الكوكبــي. أثناء مهمته الأساســية، اســتخدمت أربع «عجــلات رد فعل» للحفــاظ على مجال رؤية كيبلر مثبتًا بدقة على مجــال رؤية وحيد- رقعة من مجرة درب التبانــة معظمها في كوكبة الدجاجــة. بعد تلف اثنتين من تلك العجلات وفقد التتبع الدقيق، عثر المهندســون على وسيلة بارعة لإبقاء التلسكوب موجهًا في الفضاء باستخدام ضغط الإشــعاع من الشــمس. وهذا أتاح لهم فترات زمنية أقصر لتعقب النجوم لكنها كانت لا تزال مفيدة. وحتى الآن اكتشــف كيبلر أكثر من ألف كوكب خارجي مع عدة آلاف أخرى تنتظر الإثبات.

خصائص الكواكب

تكشــف أنواع مختلفة من أســاليب اصطياد الكواكب خصائص فيزيائيــة مختلفة للكواكب الخارجية. فطريقة السرعة نصف القطرية على سبيل المثال، تضع حدًّا أدنى من الكتلة على الكوكب

الذي يتســـبب في تذبذب النجم لكن لو لم يكن ميل مدار الكوكب معلومًا لما أمكن العثور على قيمة أكثر دقة للكتلة. وعلى النقيض من ذلك، تستطيع الكشف عن قطر الكوكب وليس كتلته. وعمليًّا، رصد الكوكب باســـتخدام الطريقتين يكشـــف عن معظم المعلومات إذا كانت بيانات السرعة نصف القطرية يمكن الحصول عليها فإن مجرد حقيقة أن الكوكب يعبر نجمه تقيد ميل مداره وكتلته الممكنة وهما معًا بالإضافة إلى قياس القطر يمكن أن يثبتا كثافة الكوكب ويسمحا لعلماء الفلك باستنتاج مكوناته المحتملة.

الفكرة الرئيسة

البحث عن كواكب حول نجوم أخرى يحتاج إلى أساليب مبتكرة وأدوات حساسة

25

الأنظمة الشمسية الأخرى

Other solar systems

قبل اكتشـــاف أول الكواكب الخارجية، كان علـــماء الفلك يعتقدون أن الأنظمة الشمسية الخارجية تتبع نمطًا شـــبيهًا بالنمط الخاص بنا، إلا أن الاكتشـــافات الحديثة قد كشـــفت عن مجموعة كاملة من أنواع كواكب ومـــدارات جديدة غير متوقعة مما يشـــير إلى أن الأنظمة الكوكبية تتطور تطورًا كبيرًا طوال التاريخ.

منـــذ اللحظة التي أعلن فيها «مايور»، و«كويلز» في 1995 اكتشـــافهما «للفرس الأعظم 51 بي»- أول الكواكب الخارجية التي أثبت دورانها حول نجم يشـــبه الشمس (انظر صفحة 151)- وجد علماء الكواكب أنفســـهم في مواجهة لغـــز، فالكوكب الجديد يدور حول نجمه فقط في 4.23 يوم، وهو 7 مرات أقرب من عطارد بالنسبة للشمس. والأهم من ذلك أن كتلة الكوكب كانت على الأقل نصف كتلة كوكب المشـــتري (ربما أكثر بكثير). ما الذي كان يفعله كوكب غازي عملاق محتمل على مقربة شديدة من نجمه؟

الخط الزمني

1995م	2005م	2007م
اكتشـــف «مايـــر»، و«كويلز» أول «مشـــتري حـــار» وهـــو «الفرس الأعظم 51 بي».	اكتشـــف «أوجينو ريفـــيرا»، وآخرون «جليـــز 867 d» أول كوكـــب أرض عمـــلاق حـــول أحد نجـــوم النســـق الأساسي.	استنتج «ســـنيلين» وآخرون وجود ريـــاح عاليـــة السرعـــة في الغلاف الجوي لـ«HD209548 b».

ومع بداية ظهور عوالم جديدة بمعدل متزايد، سرعان ما أصبح من الواضح أن «الفرس الأعظم 51 بي» لم يكن الوحيد، ففي الواقع، اتضح أن جزءًا كبيرًا من جميع الاكتشافات المبكرة تندرج تحت ما يطلق عليه اسم «كواكب المشتري الحارة»- وهي كواكب عملاقة تدور في مدارات قريبة حول نجومها، وقد كان ذلك جزئيًا نتيجة لطريقة السرعة نصف القطرية المستخدمة لاكتشاف هذه الاكتشافات الأولية: الكواكب الكبيرة فقط كتلتها تكفي للتأثير على إزاحة دوبلر لضوء نجمها والإزاحات المتكررة لأن الكواكب التي في المدارات قصيرة المدة ستكون أسهل في العثور عليها، كما أن طريقة العبور أيضًا منحازة نحو العثور على كواكب قريبة من نجومها، ليس فقط بسبب أن أحداث عبورها تحدث على نحو متكرر أكثر لكن أيضًا لأن احتمالات حدوث محاذاة مسببة للعبور أكبر كثيرًا في الكواكب ذات المدارات الأصغر.

«يبدو أنه ليس هناك أي سبب مقنع يجعل الكواكب النجمية الافتراضية لا ينبغي لها أن تكون أقرب كثيرًا من نجومها الأم.»

أوتو ستروف عام 1952

لكن هذا لا يسهم إلا بالنزر اليسير في تغيير حقيقة أنه طبقًا للنماذج الناجحة الأخرى لتكون الكواكب (انظر صفحة 31) فإن الكواكب من نوع العملاق الغازي ينبغي ألا تكون قادرة على أن تتكون على مقربة شديدة من نجم.

كواكب ليست في مكانها

أحد الحلول الممكنة لمشكلة «المشتري الحار» التي تنشأ من نظريات هجرة الكواكب هو فكرة أن الكواكب تغير من مواضعها تغيـيرا كبيرًا على مدى فترات زمنية طويلة. ومع وجود

2009م

أحدث إطلاق «كيبلر» تحولًا في أنواع الكواكب الخارجية التي يمكن اكتشافها.

2012م

حدد «نيكي مادوسودان» وآخرون كوكب السرطان 55 ككوكب كربوني محتمل.

ظروف ابتدائية مناسبة، ليس من الصعب جدًّا وضع نموذج لسيناريو فيه يبدأ كوكب عملاق حياته بعد خط الثلج لنظامه الشمسي حيث يكون هناك وفرة من الغاز والجليد، لكن بعد ذلك يتحرك في حركة حلزونية نحو الداخل بسبب التفاعل المدي مع الغاز في السديم الكوكبي الأول. وواحدة من الاحتمالات غير المرغوب فيها هي أن وجود كوكب عملاق على مسار بطيء نحو الداخل كهذا سيعطل مدارات أي عوالم ربما تكون قد تكونت على مقربة من نجمها - تحديدًا نوع العوالم الصخرية الصغيرة التي قد تكون مواتية لحياة خارج كوكب الأرض.

قياس الأغلفة الجوية للكواكب

حتى الآن، لا يمكن سوى تصوير الضوء المباشر للكواكب الخارجية في حالات نادرة للغاية. ومع ذلك، يمكن للملاحظات الكواكب العابرة أحيانًا أن تسفر عن بيانات بشأن الأغلفة الجوية لهذه الكواكب. فعندما يمر الكوكب أمام نجمه تمتص الغازات التي في غلافه الجوي أطوالًا موجية معينة مما يتسبب في تغير نمط طيف الامتصاص لدى النجم نفسه وشدته (انظر صفحة 94). في عام 2001، استخدم هذا الأسلوب للتعرف على الصوديوم في الغلاف الجوي لكوكب «HD 209548b» وهو أحد كواكب المشتري الحارة على بعد حوالي 154 سنة ضوئية من «الحصان المجنح». كشف المزيد من الدراسات لهذا الكوكب المثير للفضول عن غلاف غني بالهيدروجين، والكربون، والأكسجين يمتد إلى أكثر من ضعف نصف قطره، وهذه إشارة إلى أن الكوكب يفقد غلافه بسبب لفحة الحرارة من كوكبه الأم مما يؤدي إلى رفع درجة حرارته إلى حوالي 1000 درجة مئوية (1800 فهرنهايت). وعن طريق قياس إزاحة دوبلر لخطوط امتصاص أول أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للكوكب استطاع فريق يقوده «إجناس سنيلين» من جامعة ليدن في هولندا ليس فقط قياس سرعة الكوكب الدقيقة في مداره بل أيضًا اكتشف وجود رياح عالية السرعة في الغلاف الجوي تهب ما بين سرعة 5000 إلى 10000كم/ ساعة (3000-6000 ميل/ ساعة).

حتى الآن اكتشفت كواكب مشتري حارة ذات مجموعة واسعة من الكتل تتراوح بين ما هو أقل قليلًا من كوكب المشتري نفسه إلى ما يصل إلى حوالي ما هو أثقل منه 10 أضعاف أي تقريبًا

في نفس حجم أصغر نجوم «الأقزام البنية» (انظر صفحة 139). في الطرف الأقل ضخامة من هـذا النطاق، يمكن للحرارة الصادرة عن النجم القريـب أن تجعل الغلاف الجوي للكوكب يتضخم حجمه ضد الجاذبية الضعيفة نسبيًّا مما يؤدي إلى جعل الكوكب منتفخًا وقليل الكثافة، وقـد أثبت هذا التأثير المتنبأ به نظريًّا بفعل ملاحظـات متتابعة لكواكب خارجية عابرة يمكن حساب قطرها مباشرة.

ومع ذلك، تبدو بعـض الكواكب الأخرى الأكثر ضخامـة وذات الجاذبية العالية أكبر وأكثر سـخونة مما تتوقعه النظرية، ففي عام 2013، حدد «ديريك بوذاسي» من جامعة ساحل خليج فلوريـدا رابطًا محتملًا بين هذه الكواكب الأضخم مما هو متوقع والنشـاط المغناطيسي لنجومها الأم، مما يشير إلى أن المغناطيسية قد تلعب دورًا كبيرًا في رفع حرارتها.

حديقة حيوان خارج المجموعة الشمسية

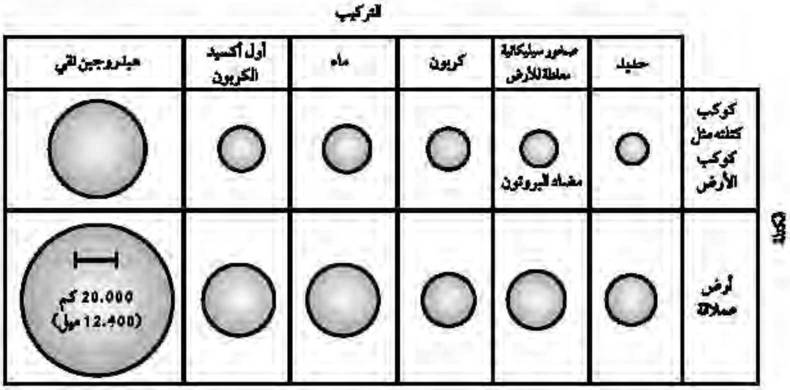
كانت كواكب المشـتري الحـارة الأولى من عدة فئات جديدة مـن الكواكب ظهرت من بيانات الرصد ونمذجة الكمبيوتر منذ التسعينيات. وتشمل هذه الفئات:

- كواكب نبتون الحارة. وكما يوحي اسـمها، هذه الكواكب هي كواكب عملاقة في مثـل كتلة نبتون تدور في مـدارات قريبة حول نجومها. ومـن المدهش أن بعض نماذج تكون الكوكب تشـير إلى أن الكواكب العملاقة التـي تنتمي إلى هذه الفئة يمكن أن تتشـكل على مسافة من نجومها الأم تشـبه مسافة الأرض دون أن تكون هناك ضرورة للهجرة.
- الكواكب الكاثونية. اكتشـف العديد من الأنظمة التي يجرد فيها الإشـعاع والرياح النجمية الطبقات الخارجية من كوكب المشتري الحار مكونة ذيلًا يشبه المذنب.

الكواكب الكاثونية هـــي النهاية الافتراضية لهذه العملية فالرياح الشمســـية عديمة الرحمة لا تترك إلا اللب الصخري المكشوف للكوكب الذي كان عملاقًا ذات مرة، مما يؤدي إلى تقليل كتلته ليصبح ذا كتلة مثل كتلة كوكب الأرض.

- الكواكب الأرضية العملاقة كتلتها ما بين 5 إلى 10 أضعاف كتلة كوكب الأرض وتشير الملاحظات إلى أن الكواكب الأرضية العملاقة لها مجموعة متنوعة من الكثافات ومن ثم مجموعة من التراكيب، فبعضها قد يكون ببســـاطة كواكب صخرية متضخمة، بينما بعضها الآخر يمكن أن يكون «كواكب غازية قزمة»، والقرب من النجم المركزي يحدد ظروف الســـطح التي يحتمل أن تتراوح ما بين بحار من الحمم البركانية شبه المنصهرة، وحتى جليد شديد التجمد. الكواكب المحيطية هي مجموعة فرعية مثيرة للفضول على نحو خاص، وبها نســـبة عالية من الماء، يعتقد أنها تكونـــت عندما هاجر عالم جليدي ابتدائي إلى موقع أقرب إلى نجمه.

يبين هذا الجدول مدى اختلاف حجم الكواكب الخارجية الشبيهة تقريبا بالأرض اعتمادًا على كل من الكتلة والتركيب.



كواكـــب الحديد والكربون. اعتمادًا على الظروف في الســـديم الكوكبي الأولي، قد تنتهي الكواكب الأرضية بكميات أكبر من الكربون أو الحديد بدلًا من الصخور الســـيليكاتية التي تهيمـــن على كوكب الأرض. قد تتكـــون أيضًا العوالم التي يهيمن فيهـــا الحديد عندما يقصف

الكوكب بفعل تأثيرات كبيرة تنزع العناصر الخفيفة الموجودة في طبقة الوشــاح الخاصة به. في نظامنا الشمسي، يعتقد أن شيئًا من هذا القبيل قد حدث لكوكب عطارد.

حتى الآن، لا تزال دراســة هذه الأجرام الزاهرة في مهدها لكن من الممكن بالفعل تحديد مجموعة مذهلة من الخواص الفيزيائية للكواكب التي ليس بوسعنا ملاحظتها مباشرة حتى الآن. يجري التخطيط بالفعل لجيل جديد من التلسكوبات العملاقة التي ستتمكن من تحليل الكواكب الخارجية الفردية ودراستها ، مما يكشف المزيد عن هذه العوالم المثيرة للاهتمام والمتنوعة.

الفكرة الرئيسة

تكوين نظامنا الشمسي ليس إلا واحدًا من الاحتمالات العديدة

26

مناطق جولديلوكس

Goldilocks zones

البحث عن كواكب شبيهة بالأرض حقًّا من الممكن أن تكون قادرة على دعم الحياة باستخدام كيمياء حيوية قائمة على الكربون هو أحد أكبر التحديات في علـم الفلك المعاصر. لكن ثبت أن فهم ما يتسـبب في وجود المنطقة الصالحة للحياة حول نجم معين مهمة معقدة على نحو يثير الاستغراب.

طرحت فكرة أن الخصائص الإشـعاعية للنجم تؤثر على صلاحية الحياة في الكواكب التي حوله عام 1953 على يد باحثين منفصلين هما: عالم الفيزياء «هوبرتس ستراجهولد» الذي ولد في ألمانيا وعالم الفلـك الأمريكي «هالتون أرب». لقد كانت حقيقـة أن الأحوال الجوية للكوكب تكون حارة بالقرب من الشمس وتصبح أكثر برودة كلما ابتعدنا في النظام الشمسي مسلّمًا بها لعدة قرون لكن «ستـراجهولد» كان أول من يعرف ما يُسمى بـ«المناطق» التي يكون فيها وجود حياة أكثر أو أقل احتمالًا في حين حسـب «أرب» نطاق الظروف التي يمكن فيها أن يظل الماء في حالته السـائلة على سـطح الكوكب. وفي عام 1959 جمع «سوشـو هونج» هذه المفاهيم معًا في فكرة «المنطقة الصالحة للحياة» بناء على ما كان معروفًا حينئذ بشأن أصول الحياة والشروط التي تتطلبها.

الخط الزمني

1953م	1959م	1979م
درس «ستراجهولد»، و«أرب» على نحو مستقل العوامل التي تؤثر على درجة الحرارة وصلاحية الحياة على الكواكب التي تـدور حول نجوم أخرى.	دمج «سوشـو» أفكار «ستـراجهولد»، و«أرب» في مفهوم منطقة صالحة للحياة حول كل نجم.	اكتشافات التسـخين المدي وأقمار المحيطات تفتـح إمكانيات للحياة خارج المنطقة الصالحة للحياة.

تعريف منطقة جولديلوكس

منذ ذلك الحين أصبحت المنطقة الصالحة للحياة- التي اشتهرت منذ السبعينيات باسم «منطقة جولديلوكس» -طريقة مفهومة على نطاق واسع للتفكير في تطلعات الحياة حول نجوم أخرى. والإعلانات عن الكواكب الخارجية الجديدة غالبًا ما تركز على مدى مشابهتها لكوكب الأرض، مع موضعها في المنطقة باعتباره عاملًا أساسيًا.

الشوفينية الكربونية

معظم التفكير في المناطق الصالحة للحياة ضمنًا يتقبل أن الحياة في مكان آخر في العالم ستكون تقريبًا مشابهة للحياة على كوكب الأرض إلا أنه في وقت مبكر من عام 1973 حذر عالم الكواكب «كارل ساجان» من أن هذه الشوفينية الكربونية قد تكون مضللة. وفي الواقع، هناك أسباب وجيهة لنفرض أن بعض ضروريات الحياة ستبقى كما هي في جميع أنحاء المجرة. بكل المقاييس، حتى أبسط أشكال الحياة تضم نوعًا من الجزيئات الحاملة للمعلومات مماثلة للحمض النووي وقابلة للتوريث عندما يكرر الكائن الحي نفسه. ويمكن اعتبار الكربون الأساس الأكثر احتمالًا منطقيًّا لجزيء مثل هذا لأن البنية الوفيرة لهذا العنصر تسمح له بتكوين مجموعة فريدة من الروابط الكيميائية المعقدة (عناصر أخرى مثل السيليكون والجرمانيوم تكون روابط بطريقة مشابهة لكنها أقل تفاعلًا كيميائيًّا.)

الدور الرئيسي للماء، في هذه الأثناء، قائم على الاحتياج البسيط لوسط سائل تستطيع فيه المركبات الكيميائية التحرك والخضوع للتفاعلات الضرورية لبناء جزيئات معقدة في المقام الأول. والسوائل الأخرى كالأمونيا تستطيع نظريًّا أداء هذا الدور لكن حتى الآن نحن نعلم أن الماء هو الوسط المحتمل الأكثر وفرة، وأنه أيضًا الوسط الذي يبقى في حالة سائلة على أوسع نطاق ممكن من درجات الحرارة.

1987م

صاغ «ماركونيك» و«موخين» فكرة منطقة صالحة للحياة في المجرة باحثين عن مناطق في مجرتنا قد تدعم الحياة.

1993م

قدّم «كاستينج» وآخرون تعريفًا جديدًا لمنطقة جولديلوكس يميل إلى إزاحتها خارج النجم المركزي.

2011م

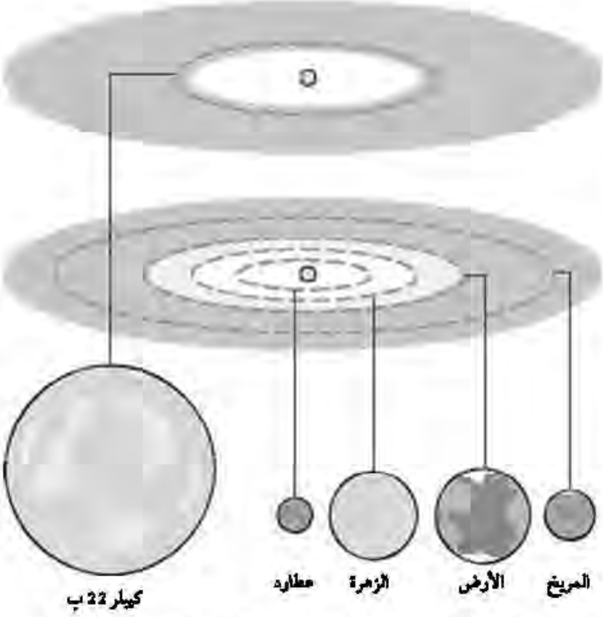
اكتشف علماء الفلك «كيبلر 22ب» أول كوكب خارجي معروف يدور داخل المنطقة الصالحة للحياة.

2014م

اكتشاف «كيبلر 186 f» أول كوكب في المنطقة الصالحة للحياة له حجم مساوٍ لحجم كوكب الأرض.

وفقًا لما جاء في قصص الأطفال أن «مناطق جولديلوكس» ينبغي لها أن تكون حيث تكون الأشـياء ليسـت بالسـاخنة جدًّا ولا بالباردة جدًّا، بل معتدلة. قد يبدو ذلك سهلًا بما يكفي للحساب: لأي نجم معين لا بد أن تقع المنطقة بين النقاط التي يقوم فيها إشعاع النجم بتسخين سـطح الكوكب بما يكفي لتبخير المياه (نقطة الغليان) وحيث لا يكون التسـخين كافيًا لصهر الجليد (نقطة الانصهار). ولسـوء الحظ، فإن الأمر ليس بهذه البساطة، فلكي يحتفظ الكوكب بالماء في حالة سائلة فإنه يحتاج إلى ضغط جوي كبير معقول. وبدونه يتبخر الماء السائل بسهولة مهما كانت درجة الحرارة. فكلما كان الضغط أقل، كانت نقطة غليان الماء أكثر انخفاضًا وذلك وفقًا لما وجدته أجيال من متسلقي الجبال المحبطين لأنهم حاولوا عمل فنجان لذيذ من الشاي.

تعتـبر القدرة على الاحتفاظ بغلاف جوي في حد ذاتهـا وظيفة من وظائف كتلة الكوكب وموقعه بالنسـبة لنجمه. الجاذبية العالية و/ أو ظروف الطقس البارد تجعل من الأسـهل منع الغازات المتنقلة باستمرار من الانجراف بعيـدًا في الفضاء. وأي غـلاف جوي لـه تأثير عـازل يسـاعد عـلى معادلة درجـات الحـرارة بـين نهار الكوكـب وليله عـن طريق منـع الحرارة أثنـاء النهار من الإشـعاع بعيدًا مبـاشرة بعد غروب الشـمس. ومع ذلك، فالتركيب الكيميائـي الدقيق للغلاف الجـوي أيضًا له تأثير



مقارنة بين «كيبلر 22ب»، أول كوكب خارجي يكتشف في منطقة جولديلوكس حول نجم يشبه الشمس، ومدارات نظامنا الشمسي الداخلي.

كبير. الغازات الدفيئة، مثل غاز ثاني أكسيد الكربون، والميثان وبخار الماء تمتص المزيد من الحرارة المتسربة وتبقي سطح الكوكب دافئًا نسبيًّا. ويرى هذا التأثير بشكل أكثر وضوحًا على كوكب الزهرة حيث يرفع الغلاف الجوي المكون من غاز ثاني أكسيد الكربون الكثيف درجة حرارة سطح الكوكب بمئات الدرجات مما كان يمكن أن تكون عليه.

ولأنه لا يزال من المستحيل علينا أن نحلل مباشرة الأغلفة الجوية لمعظم الكواكب الخارجية فإن علماء أحياء الكواكب الخارجية يستخدمون نماذج قياسية للتوقع بآثار احترارها. في عام 1993، وضع عالم الجيولوجيا «جيمس كاستنج» وآخرون نموذجًا لـ«منطقة جولديلوكس» على أنها منطقة بين حافة داخلية تكون فيها المياه دائمًا مفقودة من كوكب له جاذبية على غرار جاذبية كوكب الأرض بغض النظر عن تركيب غلافه الجوي، وحافة خارجية تكون فيها المياه عند درجة حرارة أعلى قليلًا من نقطة التجمد في أقصى غلاف جوي من الغازات الدفيئة (غاز ثاني أكسيد الكربون هو الغالب فيه). لقد وضعت تقديرات «كاستنج» المنطقة الصالحة للحياة في نظامنا الشمسي بين 0.95 و1.67 وحدة فلكية من الشمس مما يشير إلى أن كوكب الأرض يدور بالقرب من الحافة الداخلية على نحو خطير. وفي عام 2013 دفع نموذج جديد بالمنطقة الصالحة للحياة إلى أبعد من ذلك فجعلها ما بين 0.99، و1.70 وحدة فلكية.

إزاحة عمودي شبكة المرمى

لكن حتى بعدما ركز بعض العلماء على تحسين موضع منطقة «جولديلوكس» التقليدي هذا، زادت الاكتشافات الجديدة من صعوبة تحديد الموضع الذي تقع فيه المنطقة الصالحة للحياة حقًّا، وبينت أن هذه بالتأكيد ليست الكلمة الأخيرة في البحث عن حياة. الكشف عن كائنات حية تعيش في ظروف قاسية على كوكب الأرض (انظر صفحة 77) أوضح أن الحياة

يمكن أن تزدهر في نطاق من البيئات أوسع كثيرًا مما كان يعتقد، في حين أن تأثيرات التسخين المدي والمحيطات تحت الأرضية بين الأقمار الجليدية في النظام الشمسي الخارجي قد وسعت من عوامل احتمال وجود عوالم تدعم الحياة وراء التقديرات المحافظة لمنطقة جولديلوكس.

وفي الوقت نفسه، وسعت اكتشافات أخرى مفهوم صلاحية الحياة إلى أبعد من ذلك مما أدى إلى تضييق خيارات وجود كواكب خارجية بها احتمالية حياة. وأحد الاعتبارات الممكنة هي موضع النجم في المجرة الأوسع، فطبقًا لفكرة المنطقة المجرّية الصالحة للحياة فإن النجوم المزدحمة في قلب المجرة تكون احتمالية انفجارها بفعل أشعة انفجارات المستعر الأعظم أكبر في حين أن النجوم القريبة من الحافة الخارجية ستكون دون الحاجة إلى غبار لتكوين كواكب أرضية في المقام الأول. إلا أن بعض علماء الفلك يشكون فيما إذا كان موضع النجم مفيدًا إلى هذه الدرجة. وقد قال «نيكوس برانزوس» من معهد باريس للفيزياء الفلكية: هناك ببساطة الكثير من المتغيرات المشتركة في الأمر ليس أقلها هو حقيقة أن مدار النجم داخل مجرة قد يتغير كثيرًا خلال فترة عمره.

> **«أولى علامات وجود حياة أخرى في المجرة قد تأتي من الكواكب التي تدور حول نجم قزم من النوع M.»**
>
> إليزا كوانتينا
>
> معهد البحث عن ذكاء خارج الأرض

وأحد الاعتبارات الأخرى ليست مكانية بل زمانية: قائمة على كوكبنا كمثال، حيث يبدو أن تطوير حياة متقدمة يستغرق وقتًا. ففي حالة كوكب الأرض، أكثر أشكال الحياة البدائية وحيدة الخلية وجدت لها موطئ قدم بعد مليار سنة من نشأة كوكب الأرض، لكن الحياة متعددة الخلايا استغرقت 3 مليارات سنة بعد ذلك لتنشأ. وقد يبدو أن ذلك يجعل احتمالات الحياة مقصورة على النجوم ذات فترات الحياة التي تمتد إلى عدة مليارات من السنين، أي بعبارة أخرى، تلك التي لها كتلة ليست أكبر كثيرًا من شمسنا. وقد علل البعض أنه بسبب أن تطور العناصر اللازمة لتكون كواكب شبيهة للأرض في مجرتنا

قد اســتغرق وقتًا أيضًا فإن جيل العوالم الخاص بنا قد يكون أول الأجيال التي وُجد فيها إمكانية حياة متقدمة.

الفكرة الرئيسة

قد تتوافر شروط الحياة على الكثير من الكواكب الخارجية

27

العمالقة الحمر

Red giants

العمالقة الحمر، من بين أكبر النجـوم في الكون، هي المرحلة الأكثر إثارة في تطور النجوم مثل شمسـنا وهي تلعب دورًا رئيسـيًّا في نشأة العناصر الثقيلة. كان من المعتقد ذات مرة أنها نجوم صغيرة إلا أن طبيعتها الحقيقية لم يُتعرف عليها إلا بعد أن دفنت المفاهيم الخاطئة حول بنية النجوم.

نشأ مصطلح العملاق الأحمر من تقسيم «إجنار هيرتزسبرنج» في عام 1905 للنجوم على حسـب لمعانها إلى أقزام وعمالقة. فقد أدرك هو و«هنري نوريس راسل» أن لمعان هذه النجوم الشديد وانخفاض درجة حرارة سـطحها يدلان على أن حجمها هائل. ومع ذلك، كان من الواضح أيضًا أنه على الرغم من ظهور هذه النجوم اللامعة في سـماوات كوكب الأرض إلا أنها نادرة للغاية مقارنة بإخوتها الأقزام الأكثر خفوتًا.

تفسير الوحوش

العمالقة الحمر تتسـم بالضخامة بحيث أنه إذا حل أحدها محل الشمس في نظامنا الشمسي فإن هذا من شـأنه أن يبتلع مدارات العديد من الكواكب بما فيها كوكب الأرض. في وقت مبكر

الخط الزمني

1920م

أثبت «ميكلسون»، و«بيز» ضخامة قطر نجم منكب الجوزاء في كوكبة الجبار.

1938م

قدّم «أوبيك» فكرة أغلفة الاندماج التي يسـبب تطورهـا التغيرات في حجم النجم ولمعانه.

1945م

وضع «جـورج جامـو» نموذجًا للعمالقـة الحمـر على أنهـا مرحلة متأخـرة في تطور النجوم الشـبيهة بالشمس.

مــن عام 1919 توقع «آرثر إدينجوتن» حجم العملاق الأحمر المشــهور «منكب الجوزاء» في كوكبة الجبار. وفي السنة التالية استخدم «ألبرت ميكلسون»، و«فرانسيس بيز» تلسكوب هوكر في مرصد جبل ويلســون في كاليفورنيا والذي كان آنذاك الأكبر في العالم لاســتهداف منكب الجــوزاء لإثبات توقع «إدينجوتن». لكــن من المثير للفضول أن الدليل بدا أنه يشــير إلى أن العمالقة الحمر وزنها ليس أكبر كثيرًا من النجوم الأقزام العادية. من الواضح أنه يجب أن يكون هناك اختلاف أســاسي ما بين العمليات التي تؤدي إلى نشأة الطاقة في الأقزام والعمالقة، ولكن ماذا يمكن أن يكون هذا الاختلاف؟

لقد نشــأ الحل من الاقتراح الجريء لـ «إرنســت أوبيك» عام 1938 أن النجوم ليست متجانسة (انظر صفحة 121). فقد اقترح ما يخالف كل النظريات السائدة في هذا العصر بشأن الوقت الذي تصبح فيه دواخل النجم مختلطة تمامًا فقال إن إنتاج الطاقة يحدث في مناطق أساسية منفصلة تتراكم فيها نواتــج اندماج الهيدروجين بمرور الزمــن. وبتطبيق فكرة «إدينجوتن» للتوازن بين قوة الإشــعاع الخارجي، وقوة ضغط الجاذبيــة للداخل أوضح «أوبيك» أن اللب يزداد كثافة وســخونة كلما استهلك إمداده من الهيدروجين. وفي نهاية المطاف، على الرغم من أن وقود اللب يستهلك إلا أن تأثير حرارته على ما يحيط به يخلق ظروفًا مناسبة لحدوث اندماج في غلاف من المادة حوله.

وبسبب ارتفاع درجات الحرارة تلك فإن «احتراق غلاف الهيدروجين» هذا يحدث بمعدل أسرع كثيرًا من انصهار اللب مما يعزز من لمعان النجم ويتسبب في جعل منطقة الغطاء التي فوق

1952م

اكتشــف «هويل»، و«فاولر» تفاعــل ألفا الثلاثــي لاندماج الهيليوم.

1956م

أوضح «شيكلوفســكي» أن العمالقة الحمــر أطاحت بأغلفتهــا الجوية في الســدم الكوكبية وأظهــرت أنويتها كنجوم قزمة بيضاء.

1962م

عرّف «شوارزشيلد»، و«هارم» وميض الهيليــوم. وهــو تغيير مفاجــئ في بنية العمــلاق الأحمر يسـببه بــدء احتراق الهيليوم.

الغـــلاف تتمدد تمددًا هائلًا وتكون عملاقًا أحمر. ولأن احـــتراق الغلاف يبدد الوقود بسرعة، رأى «أوبيك» أنه سيكون مرحلة قصيرة نسبيًّا في دورة حياة النجم مما يفسر سبب كون العمالقة الحمر أندر كثيرًا في مجرتنا من النجوم الأقزام.

ما وراء غلاف الهيدروجين

«الوقت الذي يستغرقه النجم في تطوره ليصبح عملاقًا أحمر لا بد أن يكون أقصر كثيرًا من الفترة التي سيقضيها في النسق الأساسي.»
جورج جامو

بحلول أوائل الخمســينيات، رسخت الأفكار القائلة بأن اندماج الهيدروجـــين هو المصدر الرئيسي لطاقة النجوم وأن احتراق الغلاف هو المحرك لتطور العمالقة الحمر. كان الســؤال البديهي التالي هو ما إذا كانت تفاعلات الاندماج الأخرى يمكن أن يكون لها دور أيضًــا. كان الهيليوم مثــيرًا للاهتمام على نحو خاص لأنه ينتج بوفــرة في المراحل الأولى من اندماج الهيدروجين. بدأ مختلف علماء الفيزياء الفلكيـــة والعلماء النوويين في تركيز اهتمامهم على سلســلة معينة من تفاعلات اندمـــاج الهيليوم باعتبارها إحدى الطرق الممكنـــة التي قد تبقى بها النجوم لامعة وأيضًا تولد بعضًا من أكثر العناصر الثقيلة وفرة في الكون. وقد جاء الحل في شكل تفاعل ألفا الثلاثي (انظر المربع صفحة 169)، وهو تفاعل اندماج بين أنوية الهيليوم التي تشتعل عندما يصل لب النجم العملاق الأحمر الذي ينهار ببطء إلى كثافة ودرجة حرارة حرجتين.

وبمجــرد أن يصبح احتراق الهيليوم ممكنًا فإنه ينتشر في اللب في حدث يســمى «وميض الهيليوم». إعادة اشــتعال اللب هذه لها تأثير كبير على البنية الداخلية للنجم، ويتســبب ضغط الإشعاع المستعاد من اللب في جعل غلاف الهيدروجين المحترق يتمدد ويصبح أقل كثافة كلما قلت سرعة الاندماج ونتيجة لذلك ينكمش النجم ككل ويصبح أقل لمعانًا قليلًا. تستنفد إمدادات اللـــب من الهيليوم بسرعة كبيرة، وبعدهـــا ينتقل اندماج الهيليوم إلى غـــلاف خاص به تحت الغلاف المحترق للهيدروجـــين فيضيء النجم مرة أخرى ويتمدد. بالنســـبة للغالبية العظمى للنجوم تقترب

النهاية بسرعة ـ فاللب الذي أصبح حينئذ غنيًّا بالكربون والأكسجين يستمر في الانكماش لكنه لا يصل أبدًا إلى درجات الحرارة القصوى الضرورية للبقاء للتنفيذ مرة أخرى.

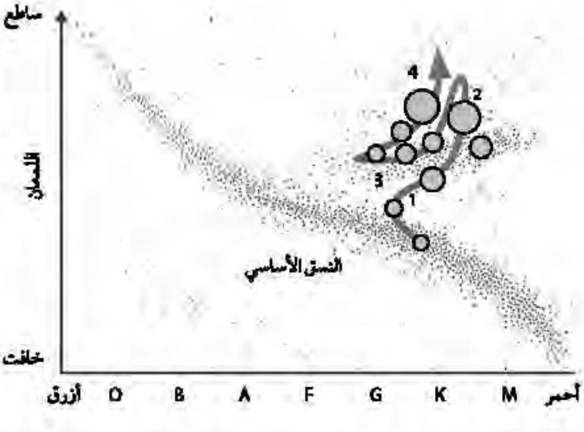
وفي وقت متأخر من تطور العمالة الحمر أرسل العديد منها نبضات في طبقاتها الخارجية، تزيد وتتقلص بسبب عدم الاستقرار في بنيتها الداخلية (انظر صفحة 172). وهذه التذبذبات يمكن أن تصحبها تغيرات جوهرية في اللمعان إما أن تكون تغيرات مباشرة في الطاقة الخارجة للنجم، أو نتيجة لطبقات معتمة من الغاز والغبار الغني بالكربون الذي يلقى خارج الجزء العلوي من الغلاف الجوي ويحجب ضوء الكرة الضوئية تحته.

تفاعل ألفا الثلاثي

تعرف العملية المسؤولة عن دمج الهيليوم في الكربون في ألباب النجوم المتطورة باسم «تفاعل ألفا الثلاثي» لأن نواة الهيليوم العادية (المكونة من بروتونين ونيوترونين) مكافئة لجسيمات ألفا المنبعثة من بعض المواد المشعة. المرحلة الأولى من العملية تنطوي على نواتي ذرتي هيليوم تتحدان لتكوين نواة بريليوم 8-. نظير البريليوم هذا غير مستقر بدرجة عالية ويتفكك طبيعيًّا إلى نواتي هيليوم تقريبًا على الفور، لكن عندما تتخطى الظروف في اللب قيمة معينة تستطيع نواتا الهيليوم تكوين البريليوم أسرع من قدرته على التفكك. وعندما يبدأ البريليوم في التراكم في اللب، تصبح المرحلة الثانية من العملية ممكنة- وهي الاندماج مع نواة هيليوم أخرى لتكوين الكربون. ووفقًا لنماذج التفاعلات النووية في أوائل الخمسينيات من القرن العشرين، من المستبعد أن تحدث هذه العملية حتى عندما يتم إجبار نواتي البريليوم الهليوم على التفاعل معًا، لكن عالم الفيزياء الفلكية البريطاني «فريد هويل» أدرك بشكل جلي أنه يجب أن يحدث إذا كانت النجوم ستشكل الكربون، ومن ثم تنبأ بوجود «رنين» بين طاقات الأنوية الثلاثة المعنية من شأنه أن يجعل حدوث الاندماج أكثر احتمالًا. وعلى الرغم من شكوك مؤسسة الفيزياء النووية، إلا أن فريق «ويليام ألفريد فاولر» اكتشف في وقت لاحق هذا الرنين في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا في عام 1952.

الغاية النهائية

شرح عالم الفلك السوفييتي «أوسيف شكلوفسكي» مصير العمالقة الحمر عام 1956، فقد وجد حلقة تطورية مفقودة في شكل السدم الكوكبية. يبدو أن هذه الفقاعات الجميلة للغازات بين النجمية التي تشبه الساعة الرملية والتي تشبه الحلقات والمضاءة بفعل نجم أبيض ساخن في منتصفها تتمدد بسرعة هائلة. وقد أدرك «شيكلوفسكي» أن هذه السمات من شأنها أن تجعل السدم الكوكبية أجرامًا لها عمر قصير جدًّا بالنسبة للفلك (ربما لا تبقى إلا بضعة آلاف من السنين) واستنتج أنها لا بد أن تكون مرحلة متوسطة بين جرمين آخرين أكثر انتشارًا. ويبدو أن النجم الأبيض الساخن الذي في المركز هو نسخة أكثر سخونة من «قزم أبيض» (انظر صفحة 191) المصير النهائي لجميع السدم الكوكبية. وفي هذه الأثناء، تظهر الأغلفة الغازية تشابهًا قويًّا مع أغلفة العمالقة الحمر - هل يمكن أن يكون هذا هو أصلها؟.



عندما يستهلك النجم الشبيه بالشمس الهيدروجين في لبه فإن هذا النجم يخرج عن النسق الأساسي في مخطط هيرتزسبرنج ـ راسل، ويلمع ويتضخم (1) ليصبح عملاقًا أحمر (2). احتراق لب الهيليوم يشهد أيضًا تحركه في الفرع الأفقي (3) لكن عندما يخرج احتراق الهيليوم أيضًا في غلاف فإن النجم يتضخم مجددًا ويتحرك إلى ما يسمى فرع العملاق المقارب (4).

الأبحاث التي أجريت في وقت لاحق دعمت هذا الاستنتاج الجريء، ففي عام 1966 أوضح «جورج أوجدين»، و«بيتر جولدريتش» بالضبط الطريقة التي يستطيع بها الغلاف الجوي لعملاق أحمر أن يتسرب ليصبح سديمًا كوكبيًّا، في حين أنه في الفترة الواقعة بين الخمسينيات والسبعينيات استخدم

«مارتن شوارزشيلد»، و«ريتشارد هارم» في برينستون أجهزة الكمبيوتر لوضع نموذج لقصة العمالقة الحمر بأكملها مع تعقيد متزايد. وفي الآونة الأخيرة، كشــفت الصور المأخوذة من تليســكوب هابل الفضائي والمراصد الحديثة الأخرى عن تفاصيل أكثر حول مراحل الموت في النجوم مثل الشمس.

الفكرة الرئيسة

العمالقة الحمر هي نجوم شبيهة بالشمس عتيقة ومتطورة

28

النجوم النابضة

Pulsating stars

في حين أن الغالبية العظمى مـــن النجوم تلمع بلمعان ثابت تقريبًا لمعظم حياتها إلا أن بعضها قد يختلف كثيرًا في السطوع على فترات زمنية قصيرة نســبيًّا. بعض هذه النجوم نجوم كســوفية ثنائية، لكن التغير في اللمعان يمكن أيضًا أن يكون صادرًا من نجم واحد يمر بنبضات مفاجئة.

لا يــزال أول نجم نابض متغير يتم اكتشــافه هو الأكثر شــهرة. حيث يمر هذا النجم - الذي تمت فهرســته باسم «أوميكرون سيتي» وهو النجم الأحمر الموجود في عنق كوكبة وحش البحر قيطس- بتغيرات مفاجئة في الســطوع تحوله من جرم تســهل رؤيته بالعين المجردة إلى جرم لا يرى ســوى بالتلسكوبات، وذلك خلال دورة تســتمر 11 شهرًا. وقد لاحظه «ديفيد فابريســوس» للمرة الأولى عام 1596، وسرعان ما أسماه «يوهانس هيفيليوس» باسم «ميرا» (والتي تعني حرفيًّا الشيء المدهش).

الخط الزمني

1596م	1784م	1879م
لاحظ «فبريسوس» السطوع المتغير لميرا، أول نجم متغير يتم اكتشافه.	عرّف «جــون جودريكي» تغير دلتا الملتهب.	أشار «ريتر» إلى أن النجوم النابضة هي نتيجة لتغيرات داخلية وليست تفاعلات مع نجوم أخرى.

لم تكتشف هذه النجوم المتغيرة بأعداد أكبر إلا في أواخر القرن الثامن عشر فصاعدًا، وسرعان ما أظهرت تنوعًا محيرًا؛ ففي حين أن بعضها كان من الواضح أنه ينتمي إلى النجوم الحمراء مثل «ميرا» وله نبضات طويلة المدة، بعضها الآخر مثل دلتا الملتهب في كوكبة الملتهب اختلف بشكل أقل فجائية وفي فترات مدتها بضعة أيام فقط.

«من الجدير بالملاحظة أن النجوم المتغيرة الأكثر سطوعًا لها فترات أطول.»

هنريتا سوان ليفيت

في حين أن تغيرات ميرا يمكن أن تكون غير منتظمة إلى حد ما، وسرعان ما اكتشف أن النجوم التي تسمى نجوم المتغير القيفاوي تكرر دورتها بدقة متناهية. وقد أظهر تطوير تقنيات القياس الضوئي لقياسات المقادير النجمية عالية الدقة في القرن العشرين مجموعة أكبر من التغييرات، بما في ذلك النجوم التي تغير سطوعها بكسور من المقدار في فترات مدتها دقائق وأنماط أكثر تعقيدًا مكونة من عدة نبضات متراكبة.

التغيرات الداخلية

كان المهندس الألماني «أوجست ريتر» أول من أشار في عام 1879 إلى أن تغيرات السطوع في هذه النجوم ناتجة عن تغيرات أساسية في أنصاف أقطار النجوم وسطوعها. وفي ذلك الوقت، اعتقد معظم علماء الفلك أن التغير ناتج فقط عن تفاعلات داخل أنظمة النجوم الثنائية (انظر صفحة 145) ومن ثم تم تجاهل أفكاره إلى حد كبير. ومع ذلك، ففي عام 1908 اكتشفت

1908م

حددت «ليفيت» العلاقة بين الفترة واللمعان في نجوم المتغير القيفاوي، مما يدعم فكرة أن تغيراتها ترجع إلى أسباب داخلية.

1926م

أوضح «إدينجتون» أن النبضات النجمية على الأرجح تحدث بسبب تغيرات داخلية في العتامة.

1953م

أوضح «زيفاكن» أن تأين الهيدروجين يمكن أن يتسبب في تغير الإعتام في نموذج «إدينجتون».

«هينريتا سوان ليفيت» (واحدة من فريق عمل إدوارد تشارلز بيكرنج النسائي الذي أطلق عليه اسم «حواسيب هارفرد» (انظر صفحة 98) اكتشافًا مهماً، فمن بين آلاف المتغيرات القيفاوية التي صورت في سحابة ماجلان الصغرى (سحابة نجمية منعزلة يعرف عنها الآن أنها مجرة تابعة لمجرة درب التبانة) بدا أن هناك علاقة واضحة: فكلما كان المظهر المتوسط للنجم أكثر سطوعًا كانت دورة تغيره أطول. وقد افترضت «ليفيت» أن السحابة جرم مادي على مسافة كبيرة نسبيًّا من كوكب الأرض (ومن ثم جميع نجومها عمليًّا تبعد البعد نفسه، وأن الاختلافات بين الحجم الظاهري يمثل اختلافات في الإضاءة الذاتية) فاستطاعت أن تستنتج أن هناك علاقة حقيقية بين الفترة واللمعان عمليًّا.

أنواع أخرى من النجوم المتغيرة

ليست كل النجوم التي تحدث لها تغيرات أساسية تخضع لتأثير آلية نبض «إدينجوتن» فالعديد من النجوم الصغيرة مثل نجوم تي الثور (انظر صفحة 133) سطوعها متقلب لأنها لم تصل من الداخل إلى الاتزان بعد، وربما لا تزال تكتسب أو تطرح كميات كبيرة من المادة. النجوم العملاقة للغاية، عالية الإضاءة تستطيع في هذه الأثناء أن تغير من الضوء الناتج منها لأن الكمية الهائلة من الضغط الإشعاعي الذي تولده يجعلها غير مستقرة، مما يؤدي بها غالبًا إلى الإطاحة بطبقاتها الخارجية في الفضاء المحيط (انظر صفحة 179)

وبعض النجوم المتغيرة الأخرى تتطلب تفسيرًا مختلفًا تمامًا، ومنها نجوم الإكليل الشمالي R، وهي نجوم عملاقة تطرد أحيانًا سحبًا من الغبار المعتم مما يؤدي إلى حجب معظم ضوئها من الرؤية لسنوات، ولم يبدأ علماء الفلك في التعرف على مجموعة واسعة من النجوم المتغيرة الدوارة إلا مؤخرًا، وهي نجوم يختلف سطوعها أثناء دورانها حول محورها إما بسبب البقع النجمية المظلمة الضخمة في أغلفتها الجوية أو تأثيرات المجالات المغناطيسية القوية أو حتى - بسبب التشوهات في شكلها العام - في حالة أسرع الدورانات والنجوم في الأنظمة الثنائية القريبة.

وفي عام 1912، نشرت «ليفيت» دليلًا أكثر تفصيلًا لهذه العلاقة، وقد أسـقط اكتشافها أفكارًا متبناة منذ زمن بعيد عن النجوم المتغيرة حيث لم يكن هناك تفسـير معقول للسبب الذي يجعل نجمًا ثنائيًّا كسوفيًّا أو أي نظام مشابه يتبع قاعدة فترة اللمعان تلك. ولعبت أيضًا في وقت لاحق دورًا رئيسيًّا في تطوير أفكار عن الكون واسع النطاق (انظر صفحة 223).

وعلى الرغم من الأدلة التي جمعها «هارلو شابلي» في عام 1914 والتي تذهب إلى أن نجوم المتغير القيفاوي يدفعها نوع من آليـات النبض إلا أن الشرح المفصل لا يزال بعيد المنال. وبعد ذلك اسـتخدم «آرثر إدينجوتـن» في العشرينيات نموذجه الجديد لدواخـل النجوم ليعلل أن النبضات يجب أن تنظم بفعل «صمام» طبيعي يحد من تسرب الإشعاع من سطح النجم.

وعلاوة على ذلك، أوضح كيف يمكن أن ينشـأ هذا الوضع إذا أصبحت طبقة معينة من الطبقات الداخلية للنجم أكثر إعتامًا. حيث تميل الكثافة المتزايدة لطبقة ما نتيجة الضغط إلى أن تبطئ تسرب الإشـعاع لكن الزيادة الناتجة في الضغط من أسفل ستدفع في نهاية المطاف الطبقة نحو الخارج وعندها سـتصبح أكثر شفافية وتسـمح للطاقة الزائدة بالتسرب. وبهذه الطريقة تصبح العملية دورة متكررة.

كانت هناك مشـكلة رئيسية واحدة في نظرية «إدينجوتن» ـ فالأدلة تشير إلى أن الضغط المتزايد في معظم مناطق النجم تقلل فعلًا من عتامته (وهو تأثير يعرف باسـم قانون كرامر). ولم يكن «سيرجي زيفاكن» قد عثر على آلية لتفسير نبضات النجوم القيفاوية قبل الخمسينيات من القرن العشرين. والبنى المعروفة باسم مناطق التأين الجزئي هي مناطق داخلية في النجم، وهي قريبة نسـبيًّا من سـطحه وفيها يكون التأين (انتزاع الإلكترونات مـن الذرات) ذو درجـات الحرارة العالية غير مكتمل. وضغط الغاز في هـذه المناطق يطلق طاقة تحث المزيد من التأين وتزيد من العتامة.

مدى النبضات

آلية الإعتام هذه (المعروفة الآن باسم آلية كابا) تقدم تفسيرًا جيدًا للنبضات في نجوم المتغير القيفاوي ومجموعة واسعة من النجوم الأخرى. الشريط القطري العريض على مخطط هرتزسبرنج ـ راسل ـ ما يسمى بـ«شريط عدم الاستقرار» ـ هو المنطقة التي يؤدي فيها توازن الكتلة والحجم واللمعان إلى نشأة مناطق مشابهة من التأين الجزئي. تضم النجوم التي على هذا الشريط ما يسمى بالنجوم المتغيرة «القيفاوية الكلاسيكية»، والتي تشبه دلتا الملتهب والعديد من الأشكال الأخرى.

تبدأ آلية كابا بمنطقة تأين جزئي شفافة للإشعاع. وهذا يقلل من ضغط الإشعاع ومن ثم تسقط الطبقات الخارجية للنجم ببطء نحو الداخل (1). وعندما ترتفع درجات الحرارة جدًا لدرجة كافية، تصبح المنطقة متأينة ومعتمة فتحتجز الإشعاع (2). وهذا يؤدي إلى زيادة الضغط الخارجي ويبدأ النجم في التمدد (3) إلى أن تبرد المنطقة في نهاية المطاف وتنزع منها الأيونات فتصبح شفافة (4) بحيث يمكن تكرار هذه العملية.

- شبيهات متغير العذراء السادس تشبه هذه النجوم بشكل كبير النجوم القيفاوية الكلاسيكية ولكن مع كتلة أقل، فهذه النجوم تحتوي على كميات أقل من المعادن الثقيلة وعلاقة بارزة بين الفترة الزمنية واللمعان.
- شبيهات متغير الشلياق العاشر هذه النجوم القديمة التي تنتمي إلى الجمهرة الثانية غالبًا ما توجد في مجموعات كروية (انظر صفحة 127).
- نجوم دلتا الترس تعرف أيضًا باسم النجوم المتغيرة القيفاوية القزمة، وهي تظهر نمط تغير مشابهًا للنجوم المتغيرة القيفاوية لكن لها فترات أقصر كثيرًا وهي أكثر خفوتًا.

على الرغم من أن آلية الكابا كانت ناجحة في شرح العديد من أنواع النجوم المتغيرة ، إلا أن الفهم الكامل لميرا ـ النجم النابض الأروع في السماء ـ لا يزال بعيد المنال، ففتتها من «متغيرات الفترة الطويلة» أكثر برودة من أن تطبق عليها آلية كابا كما هو الحال في النجوم المتغيرة القيفاوية، ولا يبدو أن الآلية تغير ناتجها الإجمالي من الطاقة، ولكن تحولها جذريًّا من الضوء المرئي إلى أشعة تحت الحمراء وتعيدها مجددًا. التفسير الأكثر احتمالًا في الوقت الحالي هو أن نبضاتها تنشأ بفعل آلية إعتام خارجية، ربما علاقة بين درجة الحرارة وتشكيل الغبار الممتص للضوء في الغلاف الجوي العلوي للنجم.

الفكرة الرئيسة

يختلف العديد من النجوم في السطوع وبعضها له فترة زمنية يمكن التنبؤ بها

29

العمالقة الفائقة

Supergiants

إن أكثر النجوم سـطوعًا في الكون يفوق لمعانها لمعان الشمس مليون مرة، وهي تتراوح ما بين العمالقة الفائقة الزرقـاء المضغوطة لكن ثقيلة الحجم، وحتى العمالقة الضخمة الحمراء المتضخمة التي تقل عنها في الحجم لكن لا تقـل عنها في الروعة، ومثل هذه الوحوش النجمية تلعب دورًا مهمًا في نشر العناصر الثقيلة في الكون.

إن البحث عـن ألمع النجوم وأثقلها هواية دائمة لعلماء الفلـك، لكن إثبات الفيزياء التي وراءهـا كان انطلاقة مهمة في فهمنا للكون ككل. يـأتي مصطلح العمالقة الضخمة من موضع تلك النجوم على مخطط هرتزسـبرنج - راسل وقد شكل «ويليام ويلسون مورجان»، و«فيليب سي كينان»، و«إديث كلمان» في الأربعينيات والخمسينيات تقسيمًا من نجوم ذات «فئات لمعان» مختلفة تلازم أنواعها الطيفية. وغالبًا ما تعرف فئة اللمعان باسم تصنيف MK، أو تصنيف يركس (انظر المربـع صفحة 181)، وكل منها في هذا النظام يشـار إليه برقم روماني. أقزام النسـق

الخط الزمني

1843م	1867م	1943م
انفجر النجم المتغير الأزرق اللامع «إيتا كارينـا» لكي يصبـح لفترة وجيزة ثـاني أكثر النجـوم لمعانًا في السماء.	عـرّف «تشـارلز وولـف»، و«جورجس رايت» الأمثلة الأولى من نجوم وولف - رايت.	أطلـق «مورجـان»، و«كينـان»، و«كيلـمان» مصطلـح العمالقـة الضخمة على أكثر النجوم سطوعًا في نظام التصنيف الخاص بهم.

الأساسي العادية هي فئة V بينما تنقسم العمالقة الضخمة إلى فئة Ia، وIb ثم أضيفت فيما بعد فئة من العمالقة الفائقين أكثر سطوعًا وهي الفئة o.

وقــد اقترح «آرثر إدينجوتن» في وقت مبكر مــن العشرينيات أن هناك حدًّا للمعان بعده لا يستطيع أي نجم أن يبقى مســتقرًّا في مواجهة الضغط الخارجي للإشعاع. ولما كانت هناك علاقة تربــط الكتلة واللمعان، فإن ذلك يضع حدًّا أقصى لكتلة النجوم المستقرة. وحتى عهد قريب، كان من المعتقد أن هذا الحد في حدود بضع عشرات من الكتل الشمســية لكن الآن أصبح من المفهوم أن مجموعة واسعة من العناصر تؤثر على اســتقرار النجوم وتســمح لها بأن تزداد دون أن تنفجر منفصلة عن بعضها البعض في عملية التشكل.

«يبدو أن هناك علاقة عامة بين الكتلة الكلية لتجمع ما والنجم الأضخم كتلة في هذا التجمع.»

بول كروثر

ومن ثم، فإن أثقل النجوم المعروفة اليوم هو «R136a1»، وهو نجم ضخم يبلغ 265 كتلة شمسية ويقع في قلب تجمع نجوم صغيرة كثيف في مجرة سحابة ماجلان الكبرى.

وحوش متنوعة

تتغلب الجاذبية في أكثر النجوم ضخامة على الميل الطبيعي للتمدد مما يؤدي إلى بقاء النجوم في صورة عمالقة ضخمة زرقاء مضغوطة نســبيًّا درجات حرارة ســطحها في حدود عشرات

1954م

أوضح «هويــل» الطريقــة التي تســتطيع بها العمالقــة الضخمة توليد مجموعة متنوعة من عمليات الاندماج.

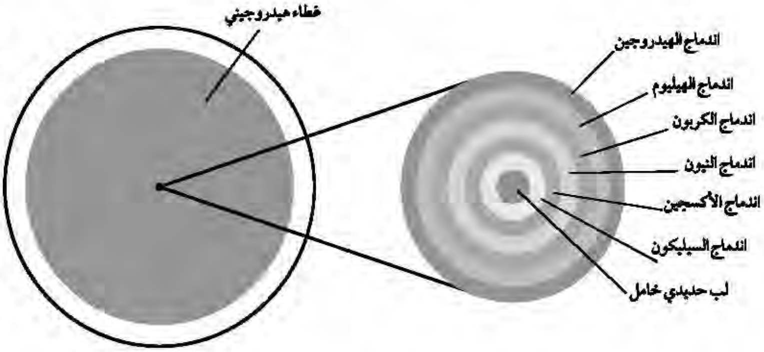
1971م

صــاغ «كينــان» التعريــف الحديث للنجم العملاق الفائق.

2010م

اكتشــف «بول كروثر»، وآخرون أثقل النجــوم المعروفة، وهــو «R136a1» في سحابة ماجلان الكبرى.

الآلاف من الدرجات. ومع ذلك، ثبتت صحة النقطة الأساسية لـ«إدينجوتن» في المجموعة المختلفة من النجوم العمالقة الضخمة التي كانت قد درست ذلك الوقت، والتي تقول إن شدة لمعان النجوم الضخمة تجعلها غير مستقرة. النجوم المتغيرة الزرقاء المضيئة (LBVs) هي نجوم متطورة للغاية (على الرغم من أن عمرها لا يتجاوز بضعة ملايين من السنين بفضل فترة العمر المعجلة لأكثر النجوم ضخامة) وحجمها، وسطوعها، ودرجة حرارة سطحها تتأرجح بشدة عند اقترابها من نهاية حياتها القصيرة.



يتكون الجزء الداخلي للعملاق الفائق من غطاء هيدروجيني ضخم بحيث يعادل قطره مدار كوكب المشتري. وفي مركزه توجد سلسلة صغيرة نسبيًّا من قذائف الانصهار المختلفة التي تدمج النوى المختلفة لتكوين عناصر تصل إلى كتلة الحديد.

والعمالقة البيضاء الضخمة المعروفة باسم نجوم وولف ـ رايت إلى حد ما أقل ضخامة من النجوم المتغيرة الزرقاء المضيئة (LBVs)، وقد كشف طيفها عندما رصدت للمرة الأولى في ستينيات القرن التاسع عشر أنها محاطة بغازات سريعة التمدد، وأنها تخفق في الانصياع لعلاقات الكتلة، ودرجة الحرارة، واللمعان، وهي أحد الأمثلة الكلاسيكية لنظرية إدينجوتن عمليًّا: تبدأ النجوم حياتها بالكثير من اللمعان لدرجة أن الرياح النجمية السريعة تنزع طبقاتها السطحية. وكشف الطبقات الأعمق، والأكثر سخونة يزيد فقط من الضغط الخارجي للإشعاع، مما يؤدي إلى خلق تأثير كبير يمكن أن يجعل النجم يفقد مقدارًا كبيرًا من كتلته ـ ربما عشرات قيمة الشمس ـ خلال حياة احتراق الهيدروجين القصيرة، والفقد السريع في الكتلة له تأثير كبير على الطريقة التي تتطور بها النجوم في مراحل لاحقة من حياتها.

أما العمالقة الضخمة الصفراء الأكثر برودة هي نجوم قد استنفدت هيدروجينها الأساسي وتتوسع في اتجاه مرحلة العمالقة الضخمة الحمراء. وأثناء قيامها بذلك،

تعبر «شريط عدم الاستقرار» في مخطط هرتزسبرنج ـ راسل وتصبح نجومًا متغيرة قيفاوية (انظر صفحة 172). وبفضل الفقد المبكر للمادة فإن هذه النجوم تميل إلى أن تصبح أقل ضخامة من النجوم المتغيرة الزرقاء المضيئة (LBVs)، حيث تصل كتلتها إلى حوالي 20 شمسًا. ومن ناحية أخرى، العمالقة الفائقة الحمراء هي ناتج التوسع أثناء المراحل النهائية للتطور النجمي. ومثل العمالقة الحمر، تُكون اندماجًا ينتقل من لب النجم إلى واحد أو أكثر من الأغلفة التي تشبه الطبقات. هذه هي أكبر النجوم في الكون من حيث الحجم وأقطارها تكافئ مدار كوكب المشتري أو أكبر. ومع ذلك لا يصل إلى هذه المرحلة إلا النجوم التي كتلتها حتى 40 كتلة شمسية، أما النجوم الأثقل فتصل إلى نهايات عنيفة في مرحلة المستعر الأعظم وهي لا تزال في مرحلة النجوم المتغيرة الزرقاء المضيئة (LBVs).

فئات اللمعان

اكتشف عالم الفيزياء الألماني «يوهانز ستارك» عام 1913 ظاهرة تعرف باسم اتساع الضغط والتي تجعل خطوط الامتصاص أو الانبعاث الطيفي المصاحبة لغاز معين تصبح أوسع عندما يكون الغاز تحت ضغط أكبر. وهذا ينتج عن زيادة عدد التصادمات مع جسيمات الغاز مما يؤدي إلى حدوث تغيرات طفيفة في الطاقة الكلية التي تنبعث من كل ذرة مفردة أو تمتصها كل ذرة مفردة.. وقد أدرك «مورجان وكينان» من مرصد «يركس أنه من الممكن استخدام ذلك لتقدير حجم النجوم». نظرًا إلى أن الغازات الموجودة في الكرة الضوئية لنجم صغير كثيف تقع عند ضغط أعلى من الضغط الواقع على الكرة الضوئية لنجم عملاق متضخم فإن النجوم القزمة إذن ينبغي أن يصدر عنها خطوط طيف أوسع من خطوط طيف العمالقة. وقد كان هذا أحد الإبداعات الرئيسية لنظام مورجان ـ كينان، أدى إلى إنشاء طريقة مختصرة لتحديد لمعان النجوم.

وبمجرد أن تم الدمج بين هذه الطريقة المستقلة عن قياس حجم النجم وبين المعلومات عن اللون ونوع الطيف أصبح من الممكن مباشرة استنتاج لمعان النجوم، وعن طريق الاتساع استنتاج بعدها المرجح عن كوكب الأرض. وقد أوضح ذلك للمرة الأولى أن العديد من أنواع النجوم التي تبدو في الظاهر غير مرتبطة ببعضها البعض، والتي لها ألوان وسمات مختلفة في الحقيقة جميعها عمالقة فائقة شديدة اللمعان.

أفران العناصر

أوضح «فريد هويل» عـــام 1954 العمليات التي تحدث داخل العمالقة الفائقة، فقال إن الضغط الهائل الذي تبذله الطبقات الخارجية لهذه النجوم من شـــأنه أن يضغط ألبابها في وقت متأخر من حياتها مما يؤدي إلى جعلها ســـاخنة جدًّا لدرجـــة أن عمليات الاندماج لا تنتهي في تفاعل ألفا الثلاثي كما تفعل في النجوم الشـــبيهة بالشـــمس (انظر صفحة 169)، بل يســـتمر الاندماج فتضطر أنوية العناصر إلى الاتحاد معًا مثل الكربون والأكســـجين، جنبًا إلى جنب مع الهيليوم المتبقي لبناء عناصر ثقيلة على نحو متزايد مثل النيون والسيليكون.

تستطيع العملية الجارية في نهاية المطاف تكوين عناصر حتى الحديد، والكوبالت والنيكل- وهي أثقل العنـــاصر والتي يطلق تكونها طاقة أكبر مما يمتص. أمـــا أصل العناصر الأثقل من الحديد فإنه مع ذلك بقي لغزًا. ثم في عام 1952 اكتشف الفريق المكون من الزوجين جيوفري ومرجريت بوربيدج عددًا من النجوم غـــير العادية بدت ثرية بهذه العناصر الأثقل. ونظرًا إلى أنها لا يمكن أن تكون قد تكونت من اندماج مباشر فإن الطريقة البديلة الوحيدة لتفســـير هذا التكون هي القصف البطيء للنواة الأخف باســـتخدام النيوترونات الفردية تحت الذرية. وقد جذب عمل الزوجين انتباه «ويليام ألفريد فاولر» فبدأ العمل معه هو و«هويل» وكانت النتيجة النهائية مقالة مراجعة معروفة باســـم «B2FH» في عام 1957 (مأخوذة من اختصارات أســـماء مؤلفيهـــا). وقد أوضح ذلك للمرة الأولى ليس فقط دور الاندماج النووي بل أيضًا نوعين من أنواع التقاط النيوترون هما: الالتقاط البطـــيء والالتقاط السريع في عملية تخليق المواد داخل النجوم الضخمة. وقد كان عالم الفيزياء الفلكية الكندي «ألاســـتير جيه دبليو كاميرون» يتبع مسارًا مشابهًا في البحث لكن على نحو مستقل، وربط فيه بين عملية التقاط النيوترون السريعة،

وانفجارات المســتعر الأعظم (انظر صفحــة 187)، وقد ثبت أن هذا هــو الخطوة الأخيرة الحاسمة في تفسير أصل العناصر داخل النجوم.

الفكرة الرئيسة

النجوم ثقيلة الوزن تعيش سريعًا وتموت صغيرة في العمر

30

المستعر الأعظم

Supernovae

في حين تنهي نجوم مثل الشمس حياتها في حلقة كونية هادئة نسبيًّا من السديم الكوكبي، تعيش النجوم ذات الأوزان الثقيلة بسرعة وتموت صغيرة في العمر، وهي تنهي حياتها بانفجار مذهل هو المستعر الأعظم والذي قد يفوق لمعانه لمعان مجرة بأكملها من النجوم العادية ويقذف مواد مكونة للنجوم الجديدة في الفضاء.

تحدث المستعرات العظمى بمعدل متوسط حوالي مرة كل قرن في مجرة درب التبانة، ويمكن أن تصبح أحيانًا هي الأجرام الأكثر سطوحًا في سماوات كوكب الأرض. وعلى هذا النحو لوحظت وسجلت على مر التاريخ، وكان أشهرها في عام 1054 عندما أضاء الموت العنيف لنجم في «كوكبة الثور» سماء الليل وخلف وراءه سحابة ممزقة من غاز فائق الحرارة يعرف باسم سديم السرطان وقد ساعد مستعر أعظم لاحق، في عام 1572 على زعزعة الافتراضات التي بقيت لمدة طويلة بشأن السماوات غير المتغيرة، وأسرع من الثورة الكوبرنيكية

الخط الزمني

1921م	1934م	1941م
اكتشف «جيه سي دانكان» أن سديم السرطان يتمدد. ولاحظ «كنوت لاندمارك» قربه من مستعر 1054.	حسب «باد»، و«زويكي» السطوع الحقيقي للمستعر «المرأة المسلسلة» 1885.	صنّف «مينكوفسكي»، و«زويكي» المستعرات العظمى إلى أنواع متميزة.

(انظر صفحة 13) ومع ذلك فإن ندرة هذه الأجرام جعلت من الصعب دراستها ـ فمنذ اختراع التلسكوب لم يُعرف أن أحد المستعرات العظمى قد حدث في مجرتنا. ولم يكن إلا بعد أن أصبحت حقيقة وجود مجرات غير درب التبانة في العشرينيات مقبولة حيث بدأت بحق دراسات المستعر الأعظم ورصدت ودرست في المجرات البعيدة.

تعقب المستعرات العظمى

لقد استغرق علماء الفلك وقتًا للتمييز بين المستعرات العظمى، والمستعرات العادية التي هي توهجات عرضية لنجوم أخرى خافتة (انظر صفحة 197). أول مستعر أعظم يتم التعرف عليه على هذا النحو في 1934 كان قد حدث تقريبًا في منتصف القرن قبل أن يحدث في مجرة «المرأة المسلسلة (Andromeda Galaxy)» المجاورة. لقد احتاج الأمر تقدمًا في قياسات المسافة (انظر صفحة 223) لتوضيح مدى عنف انفجار مستعر أعظم المرأة المسلسلة (S Andromedae) عام 1885 وقد قام «والتر بادي»، و«فريتز زويكي» اللذان كانا يعملان في مرصد جبل ويسلون بكاليفورنيا بحساب أن ذلك النجم لا بد أنه كان على الأقل أكثر سطوعًا من الشمس مليون مرة، وصاغا مصطلح المستعر الأعظم لوصفه.

وعلى مدى السنوات التالية أجرى «زويكي»، و«بادي»، و«رودولف مينكوسكي» دراسة استقصائية مكثفة عن المستعرات العظمى في المجرات الأخرى، فقام «زويكي» بالبحث الأولي عن ظهور نجوم جديدة، ثم اتبعه «بادي» بقياس السطوع المتغير لكل نجم تم اكتشافه (بانيًا له

1942م

قاس «بادي» معدل توسع سديم السرطان وربطه بالمستعر الأعظم المكتشف عام 1054.

1957م

فسر الزوجان بوربيدجيس، و«فاولر»، و«هويل» طريقة تكون العناصر الثقيلة في انفجارات المستعر الأعظم.

1987م

ظهور أكثر المستعرات العظمى سطوعًا في الآونة الأخيرة، وهو «SN 1987A» في سحابة ماجلان الكبرى.

نموذجًا لمنحنى الضوء). وركز «مينكوفسكي» على الحصول على الأطياف. وقد حقق «بادي» في احتمالية وجود مستعرات عظمى في مجرتنا فيما مضى، وقد أثبت أن «النجم الجديد» المكتشف عام 1572 كان مستعرًا أعظم، واكتشف أن سديم السرطان لا بد أن يكون بقايا مستعر أعظم (بدلاً من سديم كوكبي)، وذلك بسبب معدل توسعه السريع.

وبناء على بيانات من أكثر من اثني عشر مستعرًا أعظم خرج «مينكوفسكي»، و«زويكي» بنظام تصنيف عام 1941 لا تزال ميزاته الأساسية مستخدمة حتى اليوم. فمن خلال مزيج من ميزات خطوط الطيف، والفروقات بين منحنى الضوء عندما تتلاشى المستعرات العظمى حتى تختفي قاما بتقسيم المستعرات العظمى بصورة عظمى إلى نوعين:الأول والثاني، مع العديد من التقسيمات الفرعية في كل فئة. ومع ذلك فإن هذا التقسيم إلى حد ما مضلل حيث تبين أن الأجرام المصنفة من نوع المستعرات العظمى الأول لها أصل مختلف عن باقي الفئة (انظر صفحة 199).

«إننا نقدم وجهة النظر التي تذهب إلى أن المستعر الأعظم يمثل مرحلة انتقالية يتحول فيها نجم عادي إلى نجم نيوتروني يتكون أساسًا من النيوترونات.»
فريتز زويكي

النجوم المنفجرة

بناء على سلوك مستعر أعظم المرأة المسلسلة (S Andromedae) أثبت «زويكي»، و«بادي» في وقت بكر من عام 1934 أن انفجار المستعر الأعظم يتضمن تحويل كميات كبيرة من الكتلة إلى طاقة صرف وفقًا لمعادلة آينشتاين الشهيرة (الطاقة = الكتلة في مربع سرعة الضوء) وقالا إن المستعر الأعظم يمثل الفترة الانتقالية بين نجم ثقيل الوزن، وشيء آخر كتلة أصغر إلى حد كبير. وقد افترضوا أيضًا وجود نجوم نيوترونية فائقة الكثافة (انظر صفحة 194) كناتج نهائي ممكن لمثل هذا الانفجار. ومع ذلك، لم يوضح كل من مارجريت وجيوفري بوريدج، وويليام أولر، وفريد هولي العمليات الحقيقية الفعلية في المستعر الأعظم من النوع الثاني حتى ظهور بحث «B2FH»، الذي كان بمثابة أحد المعالم، عام 1957. (انظر صفحة 182).

تفسير «هويل» لاندماج الكربون في النجوم (انظر صفحة 169) أقنعه أن الأجزاء الداخلية لأثقل النجوم (أكثر من 8 أضعاف كتلة الشمس) من شأنها أن تبني سلسلة من أغلفة الاندماج تشبه البصل مكونة عناصر أثقل حتى تصل إلى الحديد والنيكل تحت غطاء هيدروجيني ممتد. إلا أن اندماج الحديد من شأنه أن يمتص طاقة أكثر من تلك التي تنطلق منه مما يؤدي إلى قطع مصدر طاقة النجم. وقد رأى «هويل» أنه في غياب ضغط الإشعاع الخارجي الذي يدعمه فإن كتلته حتماً بمجرد أن تتخطى «حد شاندراسيخار» وهو 1.4 كتلة شمسية (انظر صفحة 193) ستنهار فجأة مكونة نجماً نيوترونيًا (انظر المربع في الصفحة التالية).

نيوترونات المستعر الأعظم

يتضمن تكون نجم نيوتروني تفاعلاً نوويًا تضغط فيه البروتونات والإلكترونات المشحونة كهربيًا معًا فتكون نيوترونات. وفي هذه العملية تُطلق جسيمات تحت ذرية يطلق عليها نيوترينات كناتج ثانوي، وتنبعث جسيمات أكثر كثيرًا كطريقة للنجم النيوتروني للتخلص من الحرارة الزائدة التي تتولد بفعل انهيار الجاذبية الخاصة به. النيوترينات تقريبًا عديمة الكتلة، وهي تتحرك بسرعة قريبة جدًا من سرعة الضوء لذا يمكنها أن تنبعث من المستعر الأعظم جيدًا قبل أن يحدث الانفجار في طبقاته الخارجية على غرة هذه الجسيمات سريعة الحركة يعرف عنها أنها صعبة الاكتشاف إلا أن مراصد النيوترينات المتقدمة المدفونة بعمق تحت الأرض تقدم نظام تحذير مبكر مفيد للمستعرات العظمى الوشيكة فضلًا عن أنها طريقة للتحقق من الأحداث داخل لب النجم المنفجر وحوله.

الانهيار والعودة

ونتيجة لانتزاع الدعم من الأغلفة الخارجية تسقط للداخل فقط وتعود عند سطح النجم النيوتروني منتجة موجة صدمية هائلة، وهذا هو سبب المستعر الأعظم المرئي، كما أن الضغط المفاجئ، والتسخين الشديد للطبقات الخارجية للنجم يطلق موجة من التفاعلات النووية لا يمكن تحقيقها في الوضع الطبيعي. ومن أهمها عملية التقاط النيوترون السريعة، التي تلتقط

فيهــا الأنوية الثقيلة مثل أنوية الحديد النيوترونات الناتجــة بوفرة من تكون النجم النيوتروني. وقد أدرك «هويل» أن هذا يمكنه إنتاج مجموعة واســعة من العناصر الثقيلة بكميات كبيرة مما يؤدي في النهاية إلى حل مشكلة طويلة الأمد وهي معرفة أصل هذه النجوم.

كانــت الورقة البحثية B2FH مقنعة للكثيرين لأن توقعاتهــا طابقت التقديرات الجديدة لوفرة العناصر الكونية التي نشرها عالما الكيمياء «هانــز ســويس»، و«هارولــد يوري» عــام 1956 مطابقة جيــدة (وكانت مبنية على قياســات دقيقة لعينات نيزك).

ومــع ذلك لم يكــن كل مــا فيها صحيحًــا، وكان «آليســتر كاميرون» الذي كان يعمل على نحو مستقل أول من فسر أهمية عملية التقاط النيوترون السريعة تفسيرًا صحيحًا، وقد استغرق ذلك وضع نماذج حاسوبية من قبل ويليام فاولر، وتلميذه «دونالد سايتون» و«كاميرون» أيضًا من أجل حل مشاكل مستعصية أخرى.

المستعر الفائق

المراحل الأخيرة للنجوم الضخمة بحق يمكن أن تكون أكثر مأساوية من المراحل الأخيرة للمستعر الأعظم العادي. فالنجوم الهائلة التي كتلة لبها تتراوح ما بين 5 إلى 15 ضعف كتلة الشــمس تنهار مكونة ثقوبًا سوداء في مراكزها (انظر صفحة 202). وهذه الثقوب السوداء قد تلتقط المادة مــن طبقات النجم الخارجيــة وتلتهمها بسرعة وهــو لا يزال في عملية الانفجار. عادة، هذا يكتم ســطوع الانفجار الأصلي لكن إذا كان النجم يدور بسرعة كافية فإن جنون الالتهام الذي يقوم به الثقب الأسود سيولد أيضًا أشــعة قوية من جســيمات تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. وعندمــا تتفاعل هذه الجســيمات مع الغلاف الخارجــي المنفجر للنجم فإنها تســتطيع أن تنشطه ليرفع من ســطوع الانفجار حوالي 10 أو 20 ضعف ســطوع المستعر الأعظم العادي. وهذا المستعر الفائق يطلق أيضًا سلسلة من أشعة جاما عالية الطاقة، ومن المثير للفضول أن أكثر الألباب الضخمة لا تنتج أيًا من هذه التأثيرات ـ فجاذبية الثقوب الســوداء التي تشكلها قوية لدرجة أنها تبتلع النجم قبل أن ينفجر بالكامل.

النوع الثاني الكلاسيكي للمستعر الأعظم (يطلق عليه أحيانًا المستعر الأعظم ذو اللب المنهار) يحدث في النجوم التي تصل كتلتها إلى حوالي من 40 إلى 50 مرة كتلة الشمس. أحداث نوعي Ib، وIc التي تسطع وتخفت بطريقة مختلفة، تتضمن آلية مشابهة لكنها تحدث في نجوم وولف ـ رايت التي أطاحت بكتلة كبيرة من طبقاتها الخارجية (انظر صفحة 179). ومن المربك أن المستعرات العظمى من النوع الأول تنطوي على آلية مختلفة تمامًا، بل وأكثر إثارة (انظر صفحة 197).

الفكرة الرئيسة

تموت العمالقة الفائقة في انفجارات عنيفة

31

بقايا نجمية
Stellar remnants

في نهاية حياة النجم، يطيح في نهاية المطاف بطبقاته الخارجية ويصبح اللب المحترق الذي سيكون الجزء المتبقي الدائم مكشوفًا. الظروف الدقيقة التي يحدث فيها مخاض الموت الأخير للنجم ونوع الجرم الذي ستخلفه وراءها في أعقاب ذلك يحددها تحديدًا حاسمًا كتلة النجم الكلية.

يتعرف علماء الفلك على ثلاثة أنواع رئيسية من البقايا النجمية: وهي- مرتبة حسب تصاعديًّا حسب الكثافة وتنازليًّا حسب الحجم- الأقزام البيضاء، والنجوم النيوترونية، والثقوب السوداء. وتلك الأخيرة هي أكثر الأجرام غرابة في الكون وتم تناولها بالتفصيل في الفكرة 33، لكن الغالبية العظمى من البقايا إما أقزام بيضاء أو نجوم نيوترونية. اليوم، نحن نفهم أن الأقزام البيضاء هي المرحلة النهائية للنجوم التي كتلتها أقل من 8 كتل شمسية، والتي تشكل الأغلبية العظمى من النجوم في مجرتنا. والنجوم النيوترونية، والثقوب السوداء

الخط الزمني

1862م	1926م	1931م
اكتشف «كلارك» القزم الأبيض الكثيف الصغير الشِّعرَى اليَمانِيَّة (Sirius) من النوع B.	وصف «فاولر» الأقزام البيضاء على اعتبار أنها نجوم منهارة يدعمها ضغط الإلكترون المنحل.	حسب «شاندراسيخار» الحد الأعلى لكتلة القزم الأبيض.

هي أشــباح النجوم الأكثر ضخامة والتي تقضي فترات احتراق الهيدروجين باعتبارها عمالقة ضخمة وذلك قبل أن تموت في مستعرات عظمى مذهلة (انظر صفحة 184).

الأقزام البيضاء

«عندما كان المخطط قيد المراجعة استطعت أن أرى أن الإشارة كانت سلسلة من النبضات بينها فترات قدرها ثانية وثلث ثانية.»

جوسيلين بيل بيرنيل

جميع البقايا النجمية أصغر كثيرًا من أسلافها النجوم، ومن ثم فهــي أكثر خفوتًــا وأكثر صعوبة في الكشــف عنها. الأقزام البيضــاء لا ترى بالعين المجردة، لكن أول قزم أبيض تم تســجيله باعتباره عضوًا في نظام النجم المتعدد 40 على يد «ويليام هيرشــل» في بدايات عــام 1783 إلا أن أهمية هذا النجم لم تدرك حتى وقــت لاحق بكثير، وكنتيجة لذلــك، أول قزم أبيض يعترف بــه كفئة نجوم مهمة وغير عادية كانــا نجمين مترافقين من النجوم الأكثر سطوعًا في السماء: الشِّــعرَى اليَمَانِيَّة (Sirius) أو الشعرى الشامية (Procyon). لاحظ «فريدرك بيســل» إزاحات طفيفة في مواضع هذين النجمــين المتقاربين عام 1844 وربط تذبذباتهما بوجود نجوم غير مرئية محتجزة بينهما في المدار. ومع ذلك فإن نجم الشِّعرَى اليَمَانِيَّة لم يرصده التلســكوب حتى عام 1862 عندما شــاهده عالم الفلك الأمريكي «ألفان جراهام كلارك».

1934م

تنبأ «بــادي»، و«زويكي» بوجود النجوم النيوترونية في صورة بقايا للمستعر الأعظم.

1939م

اكتشف «أوبنهايمر»، و«فولكوف» الحد الأعلى لكتلة النجوم النيتروجينية باستخدام عمل سابق لـ«تولمان».

1967م

اكتشف «بيل» و«هويش» أول نباض.

بقايا نجمية

في أوائل القرن العشرين، قاس علماء الفلك طيف الأقزام البيضاء للمرة الأولى فوجدوا أنها شبيهة جدًّا بالنجوم البيضاء العادية لكنها تحتوي على كميات معززة من الكربون، والنيتروجين، والأكسجين في أغلفتها الجوية. وفي الوقت نفسه، أشارت مداراتها إلى أنها بالتأكيد تحمل كتلة كبيرة على الرغم من خفوتها. وقد كان من الواضح أن هذه النجوم كانت أصغر كثيرًا وأكبر كثافة من تلك الموجودة في النسق الأساسي، لكنها مع ذلك لها أسطح ساخنة للغاية. ولما كان ضغط الإشعاع غير قادر على إمساك كتلة الأقزام البيضاء كما يحدث في النجوم الأكبر، فإنه لا بد من شيء آخر يمنعها من الانهيار تمامًا تحت تأثير وزنها.

النجوم المغناطيسية

ربما تقدم النجوم المغناطيسية باعتبارها شكلًا غير عادي للنجوم النيوترونية تفسيرًا ممكنًا لبعض أكثر الأحداث عنفًا في المجرة، وهو ما يعرف بـ«مكررات أشعة جاما اللينة» التي تنبعث منها نفثات دورية قوية من الأشعة السينية، وحتى أشعة جاما الأكثر نشاطًا. النجوم المغناطيسية هي نجوم نيوترونية لها فترة دوران بطيء على نحو غير معتاد، تقاس بالثواني بدلًا من أجزاء من الثانية ومجال مغناطيسي قوي على نحو غير معتاد يتولد أثناء الانهيار الأولي للنجم النيوتروني، وهو مدعوم بفعل هيكلها الخارجي، وتتضاءل قوة المجال بسرعة خلال بضعة آلاف من السنين لكن على الرغم من أنها تستمر إلا أن الزلازل النجمية الضخمة على سطح النجم النيوتروني المستقر يمكن أن تؤدي إلى إعادة ترتيب مفاجئة للمجال المغناطيسي مما يؤدي إلى إطلاق طاقة تمد انفجارات أشعة جاما بالطاقة.

المادة الغريبة

أطلق «ويليام لوتين» على هذه الأوزان الثقيلة القليلة الغريبة وصف «الأقزام البيضاء» في عام 1922، لكن تفسير خصائصها الغريبة اضطر إلى الانتظار حتى عام 1926 عندما طبق عالم الفيزياء «رالف إتش فاولر» ظاهرة مكتشفة حديثًا في فيزياء الجسيمات على هذه المسألة.

ينص مبدأ استبعاد باولي على أن جسيمات الإلكترونات تحت الذرية لا يمكنها أن تشغل الحالة نفسها، بحيث أنها في الحالات القصوى ـ داخل النجم المنهار على سبيل المثال ـ تُكون «ضغط إلكترون منحل». هذا الضغط يمنع القزم الأبيض ككل من التكوم تحت تأثير وزنه وبدلًا من ذلك ينشئ نجمًا عالي الكثافة حجمه حجم كوكب الأرض تقريبًا.

أحد الجوانب المثيرة للفضول في ضغط الإلكترون المنحل هو أنه كلما كان الجسم يحتوي على مادة أكثر، يصبح الجسم أصغر وأكثر كثافة. وفي نهاية المطاف، يتم تجاوز الحد الفاصل وعندئذ حتى ضغط الإلكترون لا يمكنه الحيلولة دون انهيار النجم. في عام 1931 حسب عالم الفيزياء الفلكية الهندي «سابراهمانيان شاندراسيخار» الحد الأعلى لكتلة القزم الأبيض لأول مرة (حوالي 1.4 كتلة شمسية باستخدام قياسات حديثة). ويقابل هذا الحد المهم الذي يطلق عليه اسم «حد شاندراسيخار» كتلة إجمالية تقارب 8 أضعاف الشمس. وقد اعتقد «شاندراسيخار» أن الكتلة أكبر من ذلك تجعل القزم الأبيض لا محالة ينهار ويصبح ثقبًا أسود.

وعلى الرغم من أن «شاندراسيخار» قد حسب الحسابات الرياضية حسابًا صحيحًا إلا أنه لم يستطع أن يعرف ما إذا كان هناك مرحلة متوسطة بين القزم الأبيض، والثقب الأسود. وقد فتح إثبات الجسيمات النيترونية تحت الذرية عام 1933 مجالًا جديدًا للفيزيائيين ليستكشفوه وسرعان ما اتضح بعد ذلك أن النيوترونات تنتج ضغط الانحلال الخاص بها والذي يعمل على نطاقات أقصر من الضغط بين الإلكترونات. وبعد سنة، تنبأ «والتر بادي»، وزميله «فريتز زويكي» بوجود النجوم النيوترونية باعتبارها ناتجًا نهائيًا لانفجارات المستعر الأعظم (انظر صفحة 187). وقد ذهبا إلى أن انحلال النيوترون يمكن أن يدعم نجومًا أعلى من حد شاندراسيخار مما يؤدي إلى وقف انهيارها عند أقطار حوالي 10 أو 20 كم/ الساعة (6-12 ميلًا). ويبدو أن الحجم الصغير لهذه الأشياء يجعل من المستحيل مراقبتها مباشرة.

المنارات الكونية

على الرغم من أن النجوم النيوترونية كانت أجرامًا افتراضية مثيرة للاهتمام بلا شك إلا أن اختفاءها المفترض يعني أن عددًا قليلًا من العلماء يبذلون جهدًا في المزيد من التقصي ومن ثم، في نوفمبر عام 1967 وجدت الباحثة الدكتورة «جوسلين بيل» من كمبريدج بالمصادفة إشارة راديوية مثيرة للفضول صادرة عن دورية قادمة من السماء، وكانت الإشارة تستمر 16 ملي ثانية فقط وتتكرر كل 1.3 ثانية، وقد جاءت من جرم ليس أكبر حجمًا من كوكب. في البداية، لقبت بـ «LGM-1» كإشارة إلى احتمالية أن تكون إشارة من فضائي «رجل صغير أخضر LGM» وسرعان ما ألغى اكتشاف إشارات مشابهة في أجزاء أخرى من السماء هذه الاحتمالية، وتركز البحث عن سبب ما على بقايا النجوم.

نجوم كواركية

إذا كانت كتلة لب نجم ينهار أعلى مما يسمى حد تولمان ـ أوبناهايمر ـ فولكوف (TOV) ـ وهو قيمة تقع بين ضعفين إلى ثلاثة أضعاف كتلة الشمس ـ فحتى انحلال النيتروجين لا يمكنه تكوين ضغط كاف لإيقاف انهيار النجم. كان من المعتاد أن يفترض أن اللب ينهار متحولًا فورًا إلى ثقب أسود عندما تنقسم نيوتروناته إلى عناصر مكونة تعرف باسم «كواركات»، لكن الفيزياء النووية الحديثة تشير إلى إمكانية وقف تنفيذ ذلك على صورة نجوم كواركية. هذه الأجرام الغريبة مدعومة بنوع من ضغط الانحلال بين الكواركات نفسها. لا يمكن لمادة الكوارك أن تبقى مستقرة إلا تحت درجات حرارة وضغوط كبيرة، وقد توقف الانهيار عند قطر حوالي نصف قطر النجم النيوتروني، أي حوالي 10 كم (6 أميال). من الممكن أيضًا أن تتمكن مادة الكوارك من تكوين لب عالي الكثافة داخل النجم النيوتروني، مما يجعل من المحتمل أن يسمح للنجم بالبقاء على قيد الحياة بعد حد تولمان ـ أوبناهايمر ـ فولكوف (TOV).

وعن طريق صدفة رائعة نشر عالم الفيزياء الفلكية الإيطالي «فرانكو باتشيني» بحثًا علميًّا قبل ذلك ببضعة أسابيع يناقش فيه كيف يمكن لبقاء كمية التحرك، والمجالات المغناطيسية أن تؤثر على لب نجم منهار. وقد قال إن النجوم النيوترونية تدور بسرعة شديدة بينما مجالاتها

المغناطيسية توجه المادة المتسربة والإشعاع إلى أشعة كثيفة تخرج من قطبيها. وسرعان ما أثبت «باتشـيني» وآخرون أن «بيـل» قد وجد مجرد جرم – منارة كونية تعرف باسـم النباض. إلا أن مـشرف الدكتوراة لـ«بيل» ويدعى «أنتوني هويـش» ـ جنبًا إلى جنب مع رائد علم الفلك الراديوي «مارتن رايل» ـ هو الذي حصل على جائزة نوبل في الفيزياء عن هذا الاكتشاف.

الفكرة الرئيسة

موت النجوم يخلف وراءه أكثر الأجرام غرابة في الكون

32

النجوم الثنائية المتطرفة

Extreme binary stars

عندما بحث علماء الفلك في عوالم ما وراء الضوء المرئي في القرن العشرين أزيل الحجاب عن مجموعـــة متنوعة من الأجرام الغريبة، مثل النجوم التي تنبعث منها الأشـــعة السينية قوية وإشارات راديوية. وقد اتضح أن تفسير هذه الأنظمة الغريبة يكمن في التفاعلات بين النجوم العادية وبقايا النجوم.

أشار «جيرارد كايبر» في ورقة بحثية عام 1941 سعت إلى تفسير خصائص النجوم الثنائية الكسوفية المثيرة للفضول (انظر صفحة 144)، والتي يطلق عليها «الشلياق» إلى أن النجوم في نظام ثنائي أحيانًا تدور في مدارات قريبـــة بما يكفي لانتقال المادة فيما بينها. وقد وضع «كايبر» نموذجًـــا لما يحدث إذا فاض أحد النجمين أو كلاهما في نظام كهذا بـ«حيز روش» (الحد الذي فيه يمكن للنجم أن يحتفظ بأجزائه مع بعضها البعض ضد قوة جاذبية سحب النجوم المجاورة). وأوضح في هذه العملية أن المادة لا تســحب بســهولة مباشرة من نجم لآخر لكنها تتراكم في «قرص تراكمي» فوق خط استواء النجم المتلقي. ومن المرجح أن يحدث هذا خاصة في الأنظمة

الخط الزمني

1892م

اكتشاف غاز متوسع حول المستعر T ممسك الأعنة مما أدى إلى الكشف عن طبيعته الانفجارية.

1941م

اقترح «كايبر» وجود ثنائيات اتصال كتفسير للنجم الشلياق.

1967م

أوضح «شيكلوفسكي» نموذج القرص التراكمي لنجوم الأشعة السينية الثنائية، والمســتخدم للكشــف عــن النجــوم النيوترونية، والثقوب السوداء.

التي تكـــون فيها بقايا نجمية صغيرة، وكثيفة يرافقها نجم عمـــلاق أحمر منتفخ ذو قبضة ضعيفة نســـبيًّا على طبقاته الغازية الخارجية (ســـيناريو قد يحدث لأن النجوم ذات الكتل المختلفة تشيخ بمعدلات مختلفة). وفي وضع كهذا، يستطيع النجم الأقل كتلة والأكثر خفوتًا في البداية أن ينتهي به الحال إلى أن يصبح أكثر النجمين لمعانًا، ويدور حوله قزم أبيض صغير لكن ضخم أو حتى نجم نيوتروني أو ثقب أســـود (إذا أصبح النجم مســـتعرًا أعظـــم). وهذا النظـــام - مصحوبًـــا بوجود «قرص تراكمي» - يمكن أن ينتج سلسلة من التأثيرات.

معظم الوقت، يسحب القزم الأبيض في نظام المستعر المادة بثبات من النجم المرافق له (1) ويتراكم الغلاف الجوي حوله عن طريق قرص تراكمي. (2) وأحيانًا يصبح الغلاف الجوي ساخنًا جدًّا وكثيفًا لدرجة أنه ينفجر في عاصفة نووية.

النجوم المتغيرة الكارثية

من المثير للفضول أن الثنائيات بما فيها الشكل الأقل تطرفًا من بقايا النجم (قزم أبيض) تنتج أكثر النتائج عنفًا وإثارة للذهول.

كما أن هنـــاك انفجارات نجميـــة عرضية تعرف بالمستعرات أو النجوم المتغيرة الكارثية، ويمكنها إنتاج انفجارات نادرة وأكثر روعة تسمى المستعرات العظمى من النو الأول ولم يتضح الفـــرق بين هاتين الفئتين

1971 - 1974م

فـــسر «ســـتارفيلد» وزمـــلاؤه المستعرات بأنها انفجارات حرارية نوويـــة مصحوبة بأقـــزام بيضاء في أنظمة اتصال ثنائية.

1973م

فسر «جون ويلان»، و«إكوك إيبن» الابن المستعرات العظمى من النوع الأول من خلال الانهيـــار المفاجئ لنجوم الأقزام البيضاء.

1974م

فـــسر «وارنـــر» أصـــل انفجـــارات المستعرات القزمة.

من الأحداث سوى في الثلاثينيات بفضل مطاردة «فريتز زويكي»، و«ولتر بادي» للمستعرات العظمى في المجرات الأخرى (انظر صفحة 185).

أول مستعر يتم ربطه بالفورة الانفجارية كان مستعر T ذا الأعنة الذي انفجر وظهر بعد اختفائه في عام 1892 ليصبح نجمًا يُرى بالعين المجردة بسهولة. أشارت الدراسات الطيفية إلى أنه كان محاطًا بغلاف من الغازات التي تتمدد بسرعة، وأحد أوائل النظريات اقترحت أن المستعرات كانت قد نشأت عندما تحركت النجوم في سحب كثيفة من الغاز بين النجمي وسخنتها إلى درجة الاتقاد. ولم يظهر التفسير الصحيح سوى في الخمسينيات فصاعدًا حيث أثبت علماء الفلك أن أنظمة المستعرات الخافتة هي عادة ثنائيات بها نجم مرئي واحد يدور حوله نجم مرافق صغير ذو كتلة عالية.

المستعرات القزمة

تحدث بعض انفجارات المستعر على نطاق أصغر كثيرًا من المعتاد وعلى فترات شبه منتظمة تتراوح بين أيام وسنين. وهذه «المستعرات القزمة» (غالبًا ما يطلق عليها اسم نجوم «يو جيمينورام» نسبة إلى النموذج الأولي الذي اكتشف عام 1855) تتضمن النوع نفسه من النظام الثنائي لانتقال الكتلة الذي رأيناه في «المستعرات الكلاسيكية» الأكثر سطوعًا. وفي عام 1974 أوضح عالم الفلك البريطاني «بريان وارنر» لأول مرة كيف تولد هذه المستعرات القزمة انفجاراتها عن طريق آليات مختلفة تمامًا. فالمواد التي جمعت وتراكمت في القرص التراكمي تصل إلى كثافات عالية لدرجة أنها تصبح غير مستقرة، وتؤدي إلى انهيار مفاجئ على سطح القزم الأبيض، وانفجار مأساوي يخفت ببطء قبل أن يعود النظام إلى حالته الطبيعية. وقد اكتشفت عدة مئات من نجوم «يو جيمينورام» مما أدى إلى الكشف عن نمط واضح بين كثافتها وتكرار انفجاراتها: فكلما كان الانتظار بين الانفجارات أطول أصبحت النجوم أكثر إشراقًا في نهاية المطاف. ومن ثم فإن بعض علماء الفلك حريصون على التحقيق في إمكانية استخدام المستعرات القزمة كشموع قياسية ـ وسيلة لقياس المسافات في مجرتنا والمجرات الأخرى.

وبحلول سبعينيات القرن الماضي، استطاع عالم الفلك الأمريكي «سامنر ستارفيلد» والعديد من الزملاء إثبات أن النجوم الصغرى المرافقة في أنظمة المستعرات كانت أقزامًا بيضاء، واستطاعوا وضع نموذج «الانفلات النووي الحراري» لشرح ما كان يحدث. ووفقًا لهذه النظرية، لا تحدث المستعرات إلا في الأنظمة الثنائية المتقاربة التي يتخطى فيها النجم الأكبر حيز روش مما يسمح للقزم الأبيض بسحب المواد بعيدًا عن غلافها الغازي الممتد. الغاز الذي حُصل عليه من القرص التراكمي يتراكم ليكون طبقة هيدروجين حول القزم نفسه والذي يضغط بفعل الجاذبية القوية ويسخن أيضًا بفعل السطح الساطع الذي تحته. وفي نهاية المطاف، تصبح الظروف في الغلاف الجوي للهيدروجين قاسية جدًّا لدرجة أن الاندماجات النووية تتوقف وتحرق طريقها خلال الغلاف الجوي في تفاعل هروب قد يستمر لعدة أسابيع. وبمجرد أن ينفد إمداد الهيدروجين، يخفت المستعر لكن العملية قد تعيد بناء نفسها. وفي نهاية المطاف تتكرر فيما يعرف باسم «المستعر المتكرر». وما بين الانفجارات، يتسبب الإشعاع القادم من المادة التي تدخل القرص التراكمي في جعل الضوء الكلي للنظام يومض بطريقة مميزة جدًّا.

النجوم المتفككة

شدة انفجارات المستعر والفترة بين الانفجارات المتكررة تعتمدان على الديناميات الدقيقة للنظام، من ثم ليس هناك مستعران متطابقين. لكن لا يمكن قول الشيء نفسه عن الإخوة الكبار للنجوم المتغيرة الكارثية، ألا وهي المستعرات العظمى من النوع الأول، وفي الحقيقة يستند اختراق رئيسي في فهمنا الحديث للكون على حقيقة أن شدة هذه الانفجارات الرائعة هي دائمًا نفسها.

نشأت المستعرات العظمى من النوع الأول من أنظمة المستعر التي يكون فيها القزم الأبيض قريبًا من حد شاندراسيخار الذي يبلغ 1.4 كتلة شمسية (انظر صفحة 193). اعتاد علماء الفلك على أن يفترضوا أنه إذا تراكمت كتلة كافية في الغلاف الجوي للقزم فإنه ببساطة

يخضع لانهيـــار مفاجئ وعنيف متحولًا إلى نجم نيتروجيني، لكـــن البحث الحديث اقترح أنه قبل أن يمكن حدوث ذلك فـــإن الضغط الداخلي المتزايد يحرك موجـــة جديدة من الاندماج في الكربون والأكســـجين المحتجزين بالداخل. ولأن مادة القزم الأبيض منحلة، لا يســـتطيع أن يتمـــدد بالطريقة نفســـها التي يتمدد بها النجم العادي، ومن ثـــم ترتفع درجة حرارة اللب إلى مليارات الدرجات ويخرج الاندماج عن الســـيطرة. وفي النهاية تختل ظروف الانحلال في انفجار مفاجئ ومأســـاوي يدمر كليًّا النجم الذي تصل ذروة ســـطوعه إلى حوالي 5 مليار مرة لمعان الشـــمس، ولأن المســـتعرات العظمى من النوع الأول تحتوي دائمًا على الكمية نفسها من الكتلة التي تتحول إلى طاقة فإن علماء الكون يســـتطيعون استخدامها كشموع معيارية لقياس المسافة إلى المجرات البعيدة (انظر صفحة 280).

ثنائيات الأشعة السينية

إذا كان النجم غير المرئي في النظام الثنائي نجمًا نيوترونيًّا أو ثقبًا أســـود فإن النتائج يمكن أن تختلف تمامًا، فبدلًا من أن تنتج المـــادة التي تقع في القرص التراكمي نفثات متقطعة مرئية، تُقطع إربًا وتســـخن بفعل قوى مدية شديدة بســـبب مجال الجاذبية الأكبر الكثافة بكثير لبقايا النجم. وعند درجة حرارة مليون، تصبح أجزاء من القرص مصادر قوية لكن متغيرة للأشعة السينية عالية الطاقة ـ آلية استخدمها «يوسيف شكلوفسكي» عام 1967 لتفسير السبب الذي يجعل أيضًا بعض النجوم المرئية تبدو مصادر ساطعة للأشعة السينية.

الغالبيـــة العظمى مـــن النجوم النيوترونيـــة التي تم تحديدها إلى الآن معروفة إما من ثنائيات الأشـــعة السينية أو من آليـــة النابض (انظر صفحـــة 194)، وحتى وقت قريب كانت ثنائيات الأشعة السينية هي الوسيلة الوحيدة

«جرم في حجم كويكب، وهو لامِع ومصدر وامض للأشعة السينية، وهو مرئي على مسافات بين نجمية ماذا يمكن أن يكون؟.»

كارل ساجان

لتحديد مكان الثقوب السـوداء التي لها كتلة النجوم. ومع ذلك ، لا يوجد سبب نظري أيضًا لعدم وجود الثنائيات التي تحتوي على نجمين نيوترونيين أو حتى ثقبين سوداوين (انظر صفحة 194) ـ ويعتقد في الواقع أن هذه الأنظمة تشـكل جزءًا أساسـيًّا من جميع الثنائيات المتطرفة. إن الجاذبية القوية بـين البقايا النجمية في كلا نوعي الثنائي تولد موجات مدّية قوية ترسـلها نحو بعضها البعض في مسـار تصادمي لا مفر منه ، وتولد لحظاتها الأخيرة نفثات من موجات جاذبية (انظر صفحة 290). وفي حين أن اتحاد ثقبين سوداوين ينبغي ألا ينتج أي انفجار نحو الخارج إلا أن الاندماجات بين نجمين نيترونيين قد تكون هي المسؤولة عن نفثات أشعة جاما الهائلة، وقد ذهب بعض العلماء إلى أنهما أيضًا باستطاعتهما أن يقدما وسيلة أخرى لتكوين أثقل العناصر الموجودة في الكون.

الفكرة الرئيسة

النجوم في الأنظمة الثنائية يمكن أن يكون لها دورات حياة مختلفة اختلافًا جذريًّا

33

الثقوب السوداء

Black holes

فكرة أجسام كتلتها كبيرة جدًّا ولا يمكن للضوء الإفلات من جاذبيتها موجودة منذ فترة طويلة جدًّا لكن فهم الفيزياء التي تنطوي عليها هذه الأجسام الغريبة ليس بالمهمة السهلة، كما أن تعقب أجسام لا تطلق ضوءًا يمكن أن يكون أكثر صعوبة.

في عام 1915 نشر «ألبرت آينشتاين» نظريته النسبية العامة، وقد وحد هذا النموذج المكان والزمان في زمكان رباعي الأبعاد متصل يمكن أن يتشوه بفعل تراكم الكتلة مما يؤدي إلى حدوث التأثير الذي نعرفه بأنه الجاذبية (انظر صفحة 289). وقد شرح نظريته مستخدمًا «معادلات المجال»، وبعد شهور قليلة، استخدم «كارل شوارزشيلد» هذه المعادلات للتحقيق في كيفية تشوه الزمكان حول كتلة كبيرة تشغل نقطة منفردة في الفضاء.

وقد بين أنه إذا ضغطت أي كتلة تحت حجم معين (يعرف الآن باسم نصف قطر شوارزشيلد) فإن الوصف الذي قدمته معادلات «آينشتاين» سينهار: في لغة علم الرياضيات، سيصبح الجسم نقطة تفرد. وعلاوة على ذلك، ستتعدى السرعة المطلوبة للإفلات من جاذبية

الخط الزمني

1783م	1915م	1926م	1931م
تنبأ «ميشيل» بوجود نجوم مظلمة لها جاذبية عالية لا يستطيع الضوء الهروب منها.	تنبأ شوارزشيلد بوجود ثقوب سوداء من تحليله للنسبية العامة.	أوضح «إدينجوتن» كيف تتسبب نقاط التفرد في انزياح أحمر للضوء حولها.	ذهب شاندراسيخار إلى أن نقاط التفرد يمكن أن تنتج من انهيار ألباب النجوم الأكثر ضخامة.

الجسم (التي نسميها الآن سرعة الهروب) سرعة الضوء. ولما كانت سرعة الضوء هي الأسرع في الكون وفقًا للنسبية فإن هذا الجسم سيكون فعليًّا لا مفر منه.

وقد درس «آرثر إدينجوتن» (انظر صفحة 290)، الذي كان بالفعل قد قام بالكثير من أجل دعم نظرية آينشتاين، هذه الأجسام المضغوطة في كتابه عام 1926 عن بنية النجوم، وصقل الفكرة الأساسية كثيرًا.

ولما كانت سرعة الضوء ثابتة فإن الضوء من مثل هذا النجم هائل الكثافة لا يمكن إبطاؤه. وبدلًا من ذلك، قال إدينجوتن إنه لا بد أن يفقد طاقة عند حدوث انزياح أحمر

التنبؤ بالنجوم المظلمة

في عام 1783 قدم رجل الدين وعالم الفلك «جون ميشيل» ورقة بحثية ذات تبصر ملحوظ إلى المجتمع الملكي في لندن. في ذلك الوقت، اتبع معظم العلماء نظرية إسحق نيوتن؛ النظرية الجسيمية للضوء التي يتكون فيها الضوء من جسيمات دقيقة تتحرك بسرعات عالية. وقد فكر «ميشيل» منطقيًّا أن مثل هذه الجسيمات تتأثر بالجاذبية، ومن ثم فإنه من الممكن نظريًّا للنجم أن يكون جاذبية قوية لدرجة أن السرعة المطلوبة للهروب منها تفوق سرعة الضوء. وفي مثل هذه الحالة، قال إن النتيجة ستكون «نجم مظلم» - أي جسم لا ينبعث منه أي إشعاع لكن يمكن مع ذلك اكتشافه عن طريق تأثير جاذبيته على الأجسام المرئية، على سبيل المثال، إذا كان هذا النجم موجودًا في نظام ثنائي. وقد كانت الورقة البحثية التي قدمها «ميشيل» تنبؤًا هائلًا بظاهرة الثقب الأسود لكن عمله قوبل بالإهمال حتى السبعينيات وهو الوقت الذي قد تم فيه اكتشاف الثقوب السوداء بطرق أخرى.

1958م وضع «فينكلستاين» بضع فكرة أفق الحدث.

1963م وضع «روي كير» نموذجًا للثقوب السوداء الدوارة، وهو النوع الأكثر احتمالًا في العثور عليه في الطبيعة.

1969م اقترح «ليندن بيل» الثقوب السوداء الهائلة باعتبارها تفسيرًا ممكنًا لنشاط النجوم الزائفة.

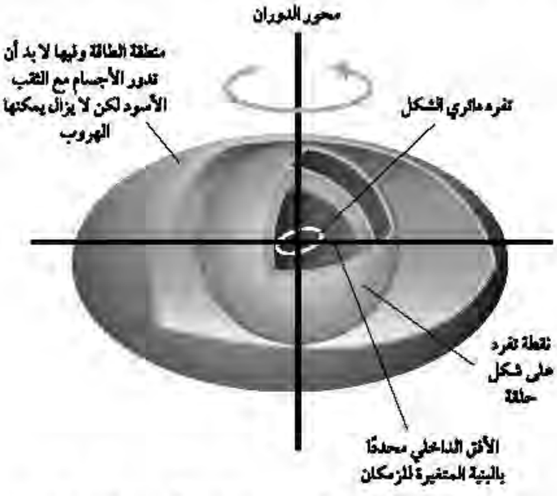
1973م أثبت «ويبستر»، و«ميردن»، و«بولتن» أن نجم الدجاجة X-1 على الأرجح هو ثقب أسود.

2015م اكتشاف اندماج نتج عنه ثقب أسود للمرة الأولى عن طريق موجات الجاذبية.

له على نحـــو متزايد إلى أطوال موجية أخرى. وعندما يضغـــط النجم إلى أقل من نصف قطر شوارزشيلد، يحدث انزياح أحمر فعليًا لضوئه ويتحول إلى غير مرئي.

من النظرية إلى الواقع

ومع ذلك بقيت أجســـام «شوارزشيلد» الغريبة تتسم بالســـمة النظرية البحتة حتى عام 1931 عندما أشار «سابرامانيان شاندراسيخار» إلى أن هذه الثقوب هي النتيجة الحتمية لانهيار لب نجم كتلته أكبر من 1.4 كتلة شمسية من المادة (انظر صفحة 193). وقال «شاندراسيخار» إنه لم يكن هناك وســـيلة لمثل هذا النجم ليولد ضغطًـــا كافيًا لمعادلة ضغط جاذبيته الخاصة. ولم يتوقع النجوم النيوترونية التي اكتشفت فيما بعد، لكن في عام 1939 بين «روبرت أوبنهايمر» وزمـــلاؤه أن حتى هذه النجوم فائقة الكثافة لها حد أعلى للكتلة قيمته حوالي 3 كتل شمســـية. وأثبت «أوبنهايمر» أنه عندما يتعدى النجم المنهار نصف قطر شوارزشـــيلد فإن مرور الوقت يتوقـــف، وهكـــذا تصبـــح هذه النجـــوم غـــير المتوقعـــة معروفة بـ«النجوم المجمدة».



الثقوب السوداء الدوارة على الأرجح هي الشكل الأكثر شيوعًا في الطبيعة، ووفقًا لتحليل عالم الرياضيات النيوزيلندي «روي كير» عام 1963 فإن لهذه الثقوب سمات ليست موجودة في الثقوب السوداء الساكنة.

وقد بدأ عصر جديد في دراسة الثقوب السوداء عام 1958، عندما أعاد عالم الفيزيـــاء الأمريكي «ديفيد فنكلشـــتاين» تعريـــف «نصف قطر شوارزشيلد» فســـماه «أفق الحدث». داخل هـــذه الحدود، يســـتمر انهيار النجم ليكون نقطة كثافتها اللا نهائية

في الفضاء (نقطة التفرد الحقيقية)، لكن من وجهة نظر خارجية لا يمكن لأي معلومة الهرب من الأفق ـ وأي شيء يعبر هذه الحدود قُدِّر عليه أن تكون رحلته ذات اتجاه واحد فقط!

ما وراء أفق الحدث

أثناء الفترة ما بين الستينيات وبدايات السبعينيات، نظر علماء الكون نظرة أكثر تعمقًا في خصائص معلومات هذه الأجسام الغريبة مما أدى إلى اكتشاف أن خصائصها ليست متأثرة سوى بكتلة المادة التي تحتوي عليها، وكمية تحركها الزاوي، وشحنتها الكهربية. وطبقًا لـ«مبرهنة انعدام الشعر» فجميع المعلومات الأخرى فقدت بلا رجعة. وقد صاغ الصحفي «آن وينج» مصطلح «الثقب الأسود» الذي وصف به هذه الأجسام في تقرير صحفي عام 1964، وقد اكتسب شعبية عندما اعتمده عالم الفيزياء «جون ويلر» بعد سنوات قليلة.

في عام 1969، أشار عالم الفيزياء الفلكية البريطاني «دونالد ليندن بيل» للمرة الأولى إلى أن الثقوب السوداء قد لا تكون مقصورة على الأجسام التي لها كتلة النجوم، وقال إن اختفاء المادة داخل «حلق شوارزشيلد» الهائل مع كتلة ملايين الشموس قد يكون المحرك للنشاط الغريب والعنيف الذي يرى في قلب المجرات النشطة (انظر الفكرة 38). ومثل هذا الجسم، الذي يطلق عليه الآن ثقب أسود فائق، يمكن أن يبدأ بشيء بسيط مثل انفجار سحابة ضخمة من المادة النجمية في مجرة صغيرة. في عام 1971، وصل «ليندن بيل» وزميله «مارتن ريس» إلى حد الإشارة إلى أن ثقبًا أسود كامنًا يشكل مرساة الجاذبية في قلب مجرتنا (انظر صفحة 214).

الكشف عن الثقوب السوداء

في عام 1974، اشتهر عالم فيزياء شاب يدعى «ستيفن هوكينج» بإثباته أنه على الرغم من أنه ليس هناك إشعاع يفلت من الثقب الأسود إلا أن تأثيرات فيزياء الكم يمكن أن

تتسبب في جعل الثقب الأسود يصدر إشعاعًا منخفض الشدة في أفق الحدث له طول موجي يرتبط بكتلته.

ومع ذلك فإن «إشـــعاع هوكينج» هذا ضعيف جدًّا لدرجة أنه لا يمكن اكتشافه ومن ثم فإن الثقوب السوداء غير مرئية بأي شكل من الأشكال.

إلا أنه لحسن حظ علماء الفلك الظروف حول الثقوب السوداء من الشدة بحيث أنها تنتج آثاراً أخرى يمكن الكشـــف عنها. فعلى وجه التحديد، تنبعث الأشـــعة السينية من المادة التي تســـقط داخل الثقب الأسود حيث أن القوى المدية الصادرة من الطاقة الهائلة تمزقها وتسخنها حتى مليون درجة. وفي الســـتينيات، اكتشـــف العديد من مصادر الأشعة السينية الفلكية عن طريق أدوات تحملها الصواريخ، وعثر على المزيد بعد إطلاق أول قمر صناعي فضائي مخصص للأشـــعة الســـينية، وهو «أهورو» عام 1970. وقد ثبت أن العديد منها سحب من غاز فائق الحرارة داخل تجمعات مجرّية بعيدة (انظر صفحة 239) لكنها انضغطت في مكان ما ويبدو أنها مرتبطة بالنجوم المرئية في درب التبانة.

«الثقوب السوداء التي في الطبيعة هي أكثر الأجسام العيانية مثالية في الكون.»

سابرامانيان شاندراسخار

الســـيناريو الأرجح لتفســـير هذه المصادر الساطعة سريعة التغير كان ما يســـمى «ثنائي الأشعة السينية» وهي بقايـــا نجمية مضغوطة تســـحب المادة بعيـــدًا عن النجم المرئي المرافق (انظـــر صفحة 200). وعادة ما تضم مثل هذه الأنظمـــة نجومًا نيترونية، لكن في عـــام 1973، قام عالما الفلك البريطانيان «لويس ويبســـتر»، و«بول مردين» جنبًا إلى جنب مع الكندي «توماس بولتون» بالتحقيق في مصدر الأشـــعة السينية الساطع نجم الدجاجة X-1 وقاســـوا إزاحة دوبلر للضوء من نظيره المرئي؛ نجم عملاق أزرق ضخم. وقد كشـــف ذلك أن النجم محتجز في مدار حول مرافقه غير المرئي الذي تكبر كتلته 8 أضعاف كتلة الشـــمس.

ومثل هذا الجســم لا يمكن إلا أن يكون ثقبًا أســود. ومنذ ذلك الحين تســتخدم هذه الفكرة البسيطة في الكشــف عن الثقب الأســود عن طريق تأثيره على النجم المرافق له للكشف عن العديد من الأنظمة المشابهة.

الفكرة الرئيسة

لا مهرب من أكثر الأجسام كثافة في الكون

34

مجرة درب التبانة

The Milky Way galaxy

درب التبانة عبارة عن مجموعة من ضوء شـاحب يلف نفسه حول سماء الليل. عرفت مجرة درب التبانة منذ عصور ما قبل التاريخ، لكن طبيعتها الأعمق لم تكشـف إلا بعد اختراع التلسكوب، وهويتها كنظام حلزوني شاسع مكون من نجوم لم يعرف إلا في القرن العشرين.

مما لا يثير الدهشة أن درب التبانة كانت أول أهداف عالم الفلك الإيطالي «جاليليو جاليلي» الذي وجه تلسـكوبه البدائي نحوه في يناير عام 1610. وعندما اكتشف أنها مرصعة بعدد لا يحصى من النجوم التـي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة، اسـتنتج أن المجموعة كلها تكونت مـن عدد لا يحصى من مزيد من النجوم البعيدة عن متناول أدواته. وذهب أبعد من ذلك فقال إن «السدم» التي تشبه سـحبًا غامضة أيضًا مكونة من نجوم بعيدة (استنتاج صحيح في بعض الحالات وليس جميعها).

إلا أنه لم يكن إلا في عـام 1750 عندما ناقش عالم الفلك الإنجليزي «توماس رايت» أن درب التبانة لا بد أن تكون سـحابة من النجوم شاسـعة دوارة مقيدة بالجاذبية بمسـتو واحد

الخط الزمني

1000 - 1300هـ	1610م	1750م	1785م
ذهب مختلف علماء الفلك المسـلمين إلى أن درب التبانـة مكونة من أضواء نجوم لا تحصى.	وضـع «جاليليـو» أول دراسـة تلسـكوبية لدرب التبانة واكتشف الكثير من النجوم الجديدة.	وضـع «رايـت» التقدير الأول لشـكل المجرة بناء على توزيع النجوم.	نـشر «هيرشـل» أول خريطة لدرب التبانة.

له بنية تشبه كثيرًا نظامنا الشمسي. وبعد خمس سنوات، تطرق «إيمانويل كانط» أيضًا لفكرة مجرة تشبه القرص، وأشار بقدر كبير من التبصر إلى أنها واحدة فقط من بين العديد من «جزر الأكوان»، والتي يُرى بعضها على بعد مسافات هائلة على شكل سدم.

رسم خريطة لدرب التبانة

قام «ويليام هيرشل» بأولى محاولات رسم خريطة لدرب التبانة في ثمانينيات القرن الثامن عشر وقد أحصى عدد النجوم في أماكن مختلفة من السماء وافترض أن جميع النجوم لها السطوع الكامن نفسه بحيث أن حجمها الظاهر كان دلالة مباشرة على بعدها.

وقد أدى به ذلك إلى أن يرسم مجرتنا على شكل فقاعة غير منتظمة، والشمس قريبة من منتصفها. وبعد أكثر من قرن، بذل عالم الفلك الهولندي «جاكوبس كابتين» جهدًا مضنيًا ليكرر عمل «هيرشل» باستخدام أدوات أكثر قوة ومجموعة كاملة من البيانات الفلكية لتقدير السطوع الحقيقي للنجوم. ومع ذلك وصلت الدراسة الاستقصائية لـ«كابتين» والتي نشرت أخيرًا في عام 1922 إلى الاستنتاجات نفسها تقريبًا فاقترحت أن المجرة على شكل عدسة قطرها حوالي 40 ألف سنة ضوئية والشمس قريبة من مركزها.

> «درب التبانة ليست إلا كتلة من نجوم لا تحصى مزروعة معًا في مجموعات.»
>
> جاليليو جاليلي

ومن المفارقات أن قبل الوقت الذي نشر فيه «كابتين» عمله، كان هناك اكتشاف، من شأنه أن يقوض

1921م
حدد «شابلي» المركز التقريبي لدرب التبانة من توزيع التجمعات الكروية.

1927 - 1940م
حدد «أورت» حجم المجرة من تحركات النجوم.

1930م
صنّف «روبرت ترامبلر» التجمعات المفتوحة وعرّف الضوء الممتص للغبار بين النجوم.

1956م
أثبت «أورت» البنية الحلزونية لدرب التبانة من رسم سحب الهيدروجين.

2005م
أكدت ملاحظات الأشعة تحت الحمراء أن مجرتنا مجرة حلزونية ضلعية.

نظرته عن المجرة. ففي عام 1921، جمع «هارلو شـــابلي» دراســـته الاستقصائية عن تجمعات النجوم الكروية الكثيفة التي توجد في بعض أجزاء الســـماء (انظر صفحة 127) وقد استنتج أنها متجمعة في صورة تجمعات فضفاضة حول منطقة بعيدة في الفضاء في اتجاه كوكبة القوس. وقد كان »شابلي« يعتقد أن هذا هو المركز الحقيقي لدرب التبانة، ونظامنا الشمسي يقع بعيدًا في الروافد الخارجية لقرص المجرة الواسع.

ومع ذلك فقد أخطأ «شـــابلي» في شيء واحد وهو تقديره للقطر الحقيقي لدرب التبانة. وبناء عـــلى التقديرات الخاطئة لبعـــد التجمعات الكروية افـــترض أن عرضها هائل؛ حوالي 300,000 ســـنة ضوئية. وقد بدأ تصحيح ذلك منذ عام 1927 عندما بدأ «جان أورت» في عرض نظرية (قدمت بعد فترة وجيزة على يد السويدي بيرتل ليندبلاد) تقول إن النجوم تدور بسرعات مختلفة بناء على بعدها عن مركز المجرة. وقد أتاحت قياسات «أورت» الدقيقة له أن يضع صيغة لحساب هذا «الدوران التفاضلي» وأثبت أن النظام الشمسي يبعد حوالي 19000 سنة ضوئية من مركز مجرة اتساعها 80000 سنة ضوئية. وهذا ليس إلا تقديرًا طفيفًا من القيم الحديثة التي تبلغ 26000 و10000 سنة ضوئية على الترتيب.

الأذرع الحلزونية

نشأ الإثبات الأول على البنية الحلزونية لدرب التبانة من محاولات «ويليام دبليو مورجان» رســـم توزيع التجمعات المفتوحة في أوائل الخمسينيات. وقد عرف «مورجان» ثلاث سلاسل من التجمعات التي أشار إلى أنها قد تكون أجزاء من أذرع حلزونية، وقد أثبت اكتشافه بعد بضع سنوات عندما اســـتخدم «جان أورت» الملاحظات الراديوية لرسم توزيع سحب الهيدروجين الذري المتعادل في جميع أنحاء المجرة. فقد اخترقت الإشارات الراديوية المنبعثة من الهيدروجين بطول موجي 21 ســـم (8.3 بوصة) التي اخترقت سحب النجوم المتداخلة، وممرات الغبار مما سمح لـ«أورت» برسم خريطة للمجرة على نطاق أكبر بكثير من مورجان.

عندما بذل علماء الفلك جهدًا لفهم هذه الأساليب الجديدة، ظهرت صورة لحلزون له أربع أذرع رئيسية والعديد من الهياكل الصغيرة تسمى (المهاميز) موجودة بينها (أحدها هو مهماز الجبار-الدجاجة وهو الأقرب لنظامنا الشمسي). وقد اتفق عمومًا على أن درب التبانة مجرة حلزونية «عادية» لها محور مركزي بيضاوي، لكن في السبعينيات بدأت خرائط راديوية

تكون أذرع الحلزون

الدوران التفاضلي لمجرتنا يعني أن أذرعها الحلزونية لا يمكن أن تكون هياكل مادية دائمة- إذا كانت كذلك، فإن مناطق الدوران السريع التي تقع بالقرب من محور المجرة ستتسبب في جعل هذه الأذرع تنتهي وتختفي في غضون بضع لفات لكن بدلًا من ذلك فإن البنية الحلزونية لا بد أن يعاد توليدها باستمرار.

اليوم، نحن نفهم أن الأذرع الحلزونية هي مناطق تكون نجوم واضحة داخل قرص من النجوم والغاز والغبار الذي يحيط بالمحور.. والأجرام المنفردة تتحرك داخل هذه المناطق وخارجها على مدى عشرات الملايين من السنين- تتباطأ النجوم وتتجمع معًا مثل السيارات التي تتحرك في ازدحام مروري في حين تضغط السحب بين النجمية لتؤدي إلى تكون نجوم جديدة. أكثر هذه النجوم سطوعًا وأضخمها عمرها قصير لدرجة أنها تشيخ وتموت قبل أن تسنح لها فرصة ترك مناطق الحضانة والانضمام إلى التجمع العام الموجود في القرص.

لكن كيف تنشأ منطقة «الازدحام المروري» الحلزونية نفسها؟ أفضل التفسيرات المتاحة التي قدمها «تشيا-تشايو لن» و«فرانك شو» في أواخر الستينيات والذي يعرف باسم نظرية موجة الكثافة. وهي تعتمد على حقيقة أن الأجسام التي تدور حول مركز المجرة تتبع مدارات إهليلجية بدلًا من مدارات تامة الاستدارة، وهي تتحرك حركة أبطأ بالقرب من حواف المدارات. وعندما يسحب تأثير خارجي، مثل التفاعل مع مجرة تابعة صغيرة، هذه المدارات ويجعلها مصطفة تكون النتيجة هي منطقة حلزونية فيها يرجح وجود النجوم والمواد الأخرى.

هذا الرسم التخطيطي يوضح كيف تنشأ المناطق الحلزونية ذات الكثافة الأعلى نشأة طبيعية عندما يتأثر عدد من المدارات الإهليلجية بمقادير مختلفة قليلًا كما يحدث أثناء لقاء قريب من المجرة.

جديدة في الإشارة إلى منطقة على شكل شريط من النجوم تمتد إلى كلا الجانبين وحلقة كبيرة من النجوم تحيط بمركز المجرة بنصف قطر 16000 سنة ضوئية. ومن بين المسافات بين المجرات، يمكن أن تكون هذه الحلقة هي السمة الغالبة على مجرتنا.

في عام 2005، أكدت ملاحظات الأشعة تحت الحمراء من تلسكوب سبيتزر الفضائي التابع لناسا وجود شريط مركزي يتتبع توزيع العمالقة الحمر عبر امتداد 28000 سنة ضوئية، ويؤكد بما لا يدع مجالًا للشك أن درب التبانة هي حقًا مجرة حلزونية ضلعية (انظر صفحة 223).

خريطة مبسطة لدرب التبانة تبين موضع نظامنا الشمسي والسمات الأساسية للمجرة.

للمجرات من هذا النوع ذراعان حلزونيان رئيسيان (واحد يظهر من كل طرف من طرفي الشريط)، وفي عام 2008 استخدم عالم الفلك «روبرت بنيامين» من جامعة «ويسكنسن» ملاحظات «سبيتزر» لتتبع تجمع نجوم عمالقة حمر باردة على شكل ذراعين، إلا أنه في عام 2013 أعادت دراسة راديوية جديدة فصل المناطق الجديدة لتكون النجوم، والنجوم الصغيرة إلى أربع أذرع رئيسية.

مما لا شك فيه أن المزيد من الدراسات مطلوب من أجل حل التناقض بين النجوم القديمة والشابة، لكن قد يثبت أن الحل مرتبط بسلاسل تصادمات مجرتنا المستمرة مع مجرة الرامي الإهليجية القزمة. ووفقًا لنماذج الكمبيوتر التي نشرت عام 2011، فإن هذه المجرة الصغيرة

ـ التي تبعد حاليًّا 50,000 ســنة ضوئية عــن الجانب الأبعد من مركز المجرة ـ يكاد يكون من المؤكد أنها مسؤولة عن تشكيل الهيكل الحلزوني الحالي لدرب التبانة.

الفكرة الرئيسة

مجرتنا هي حلزون من النجوم، والشمس بعيدة عن مركزه

35

قلب مجرة درب التبانة

Heart of the Milky Way

تقع المناطــق المركزية في مجرتنا عــلى بعد 26000 ســنة ضوئية في كوكبة القوس، وتحجب ســحب النجوم الكثيفة المتداخلة اللب نفســه تمامًا من الملاحظــة البصريــة إلا أن التقدم في علــم الفلك القائم عــلى علم الفلك الراديوي والقائم على الفضاء كشف عن وجود وحش نائم في قلب المجرة: إنه ثقب أسود كتلته تساوي كتلة 4 مليون شمس.

بعد اكتشاف «هارلو شابلي» المركز الحقيقي للمجرة عام 1921 (انظر صفحة 210) حول علماء الفلك انتباههم بطبيعة الحال إلى دراسة هذه المنطقة السماوية المثيرة للاهتمام. وعلى الرغم من تقنياتهم المحدودة آنذاك إلا أنهم سرعان ما أصبحــوا قادرين على مقارنة بنية درب التبانة بما يســمى السدم الحلزونية التي كانت قد أُثبتت حديثًا في العشرينيات على أنها مجرات مستقلة بذاتها، وسرعان ما اكتشــفوا أن مركز مجرتنا يتميز بوجود انتفاخ عرضه 20000 سنة ضوئية مــن نجوم حمراء وصفراء من الجمهرة الثانية (انظر المربــع). لكن ما الذي أدى إلى تجمع هذه السحابة النجمية الهائلة في أول الأمر؟.

الخط الزمني

1921م	1933م	1971م	1974م
حدد «شابلي» موقع مركز مجرتنــا في جــزء بعيد في كوكبة الرامي.	حدد «جانسكي» انبعاثات راديوية صادرة من المناطق المركزية للمجرة.	أشــار «لينــدن بيــل»، و«ريس» إلى أن هناك ثقبًا أسود فائقًا في قلب درب التبانة.	حدد «براون»، و«باليك» المصــدر الراديــوي المضغوط «الرامي A*».

لقد ظهرت فكرة أنوية المجرات التي قد تخفي ثقوبًا سوداء فائقة لها كتلة تساوي ملايين الشموس من محاولات تفسير النجوم الزائفة والمجرات النشطة الأخرى ما بين الستينيات، والسبعينيات (انظر صفحة 232). في عام 1971، أشار «دونالد ليندن بيل»، و«مارتن ريس» إلى أنه ربما هناك ثقوب سوداء فائقة نائمة تقع في مركز جميع المجرات، بما فيها مجرة درب التبانة. وهي بمثابة محور جاذبية حوله يدور النظام بأكمله. مع عدم القدرة على رؤية ما بداخل السحب النجمية المتداخلة بالضوء المرئي، وبسبب أن الملاحظات

جماهر النجوم

طرح «والتر بادي» لأول مرة فكرة جمهرتين نجميتين مميزتين بناء على دراساته لمجرة المرأة المسلسلة (Andromeda Galaxy) المجاورة، ومن ثم طبقها على النجوم في أماكن أخرى بما فيها مجرتنا. توجد نجوم الجمهرة الأولى في أقراص وأذرع المجرات الحلزونية. وهي صغيرة نسبيًّا وملونة بمجموعة من الألوان وبها إلى حد ما نسبة معادن أعلى (نسبة العناصر الأثقل من الهيدروجين والهيليوم) مما يسمح لها باللمعان من خلال دورة الكربون والنيتروجين CNO cycle (انظر صفحة 116) وعلى النقيض من ذلك، توجد نجوم الجمهرة الثانية غالبًا في الانتفاخات المركزية للمجرات الحلزونية، وفي التجمعات الكروية، والمجرات الإهليلجية (انظر صفحتي 222، و127). وهي باهتة بمفردها، وأقل ضخامة عمومًا من الشمس، وأغلبيتها الساحقة لونها أحمر وأصفر. نقص المعادن يحد من اندماج الهيدروجين مع سلسلة تفاعل بروتونات مع بروتونات (انظر صفحة 114) ويضمن أن عمرها طويل وغير مذهل. يعتقد على نحو عام أن نجوم الجمهرة الثانية هي الأقدم في الكون اليوم، وأن بعضها لا يزال على قيد الحياة منذ أولى مليارات السنين بعد الانفجار العظيم.

1998م

أثبت «جيز»، وآخرون وجود ثقب أسود من الحركة السريعة للنجوم حول الرامي A*.

2008 - 2009م

حدد علماء الفلك كتلة الثقب الأسود بأنها حوالي 4.2 مليون كتلة شمسية.

2009م

اكتشف «ستيفن جيلسين» وآخرون كميات كبيرة من مادة غير مرئية بالقرب من الثقب الأسود المركزي.

2015م

كشفت تلسكوبات الأشعة السينية عن تدمير كويكب كان داخلًا إلى الثقب الأسود.

الفضائية كانت لا تزال في مهدها ظهرت أدلة أولية مســاندة لأفــكار «ليندن»، و«ريس» من منظور علم الفلك الراديوي.

إشارات من القلب Core

كان أول تلســكوب راديوي مكونًا من مجموعة هوائيات مؤقتة مختلفة تمامًا عن الأطباق التي على شكل قطع مكافئ التي ظهرت في وقت لاحق. لم يكن لدى هذا التلسكوب الراديوي الذي بناه عالم الفيزياء «كارل جانســكي» في معامل بــل للتليفونات في نيوجيرسي حوالي عام 1930 إلا إمكانيات اتجاهية بســيطة لكنهــا كانت كافية لـ«جانســكي» ليتعرف على إشــارة راديوية من الســماء اتضح أنها تشرق وتغرب يوميًا. في البداية، بدت الإشارة مطابقة لحركة الشمس، لكن على مدى عدة شهور لاحظ «جانســكي» أنها انحرفت عن ذلــك: فأصبحت تشرق وتغرب في وقت سابق قليلًا كل يوم، وحركتها كانت مطابقة بالفعل لدوران النجوم. قبل عام 1933 كان قادرًا على الإعلان عن اكتشاف موجات راديوية تأتي من درب التبانة، وهي أقوى ما تكون في اتجاه «الرامي».

«الدليل على أن هناك ثقبًا أسود هو إثبات أن هناك كمية هائلة من الكتلة تشغل حجمًا صغيرًا للغاية.»

آندريا إم جيز

وقــد ظل هذا المصدر الراديــوي المركزي، الذي عرف فيما بعد باســم الرامي A، فقاعة منتشرة بلا شكل حتى الستينيات عندما استطاع علماء الفلك أخيرًا تحليله بتفاصيل أدق.

وقد اتضح أنه مقســم إلى وحدات شرقية وغربية متميــزة: النصف الشرقي يعرف اليوم باسم بقايا المستعر الأعظم في حين أن «الرامي A الغربي» هو هيكل حلزوني ثلاثي الأذرع مثير للفضول. ثم اكتشف «روبرت براون»، و«بروس باليك» في عام 1974 عنصرًا مميزًا ثالثًا وقد كان مصدرًا أكثر انضغاطًا داخل «الرامي A الغربي» والذي ســمي فيما بعد باســم الرامي A* وقد تكهن علماء الفلك على الفور بأن هذا الجســم قد يدل على التركيز الهائل للكتلة عند المركز

الدقيق للمجرة ككل، وقد تأكد ذلك في عام 1982 عن طريق القياسات الدقيقة لحركته- أو بالأحرى الدراسات الدقيقة لعدم حركته المميزة.

شهدت السبعينيات والثمانينيات وصول طرق أخرى للنظر فيما وراء السحب النجمية المتداخلة. أثبتت الأقمار الصناعية ذات الأشعة تحت الحمراء أنها مفيدة بشكل خاص في تحديد تجمعات النجوم المفتوحة الضخمة حول المنطقة المركزية. وإحدى هذه التجمعات النجمية، وتعرف باسم التوائم الخمسة، أثبتت أنها تستضيف وحشًا نجميًّا ضخمًا حقًّا يعرف باسم نجم بيستول. ويقدر سطوع هذا النجم بحوالي 1.6 مليون مرة أكثر سطوعًا من الشمس، وهذا هو الأكبر من بين العديد من النجوم العملاقة في كل من مجموعة التوائم الخمسة وتجمع آرشز القريب الأكثر ضخامة (الذي لم يكتشف إلا في التسعينيات) وعلى الرغم من أن كلا هذين التجمعين يقع على بعد عشرات السنين الضوئية عن الرامي A* إلا أن وجود مثل هذه الوحوش النجمية ذات الأعمار القصيرة قوض الافتراضات التي تقول إن محور المجرة موطن فقط لنجوم الجمهرة الثانية القزمة الثانوية المعمرة. وبدلًا من ذلك، اتضح أن المناطق المركزية هي مواقع لتكون النجوم النشطة على مدى بضعة ملايين السنين.

الدوران حول وحش

هناك تجمع كبير آخر من نجوم عالية الكتلة يحيط بالرامي A* نفسه على الرغم من أنه ليس مطابقًا لتجمع آرشز ولا تجمع التوائم الخمسة. وهذه النجوم التي اكتشفت في التسعينيات والتي عرفت بشكل متواضع باسم «تجمع النجوم السديمية» قد لعبت دورًا رئيسيًّا في إثبات وجود ثقب المجرة الأسود وتحديد خصائصه.

وقد كشفت إزاحات دوبلر أن نجوم هذا التجمع تتحرك جميعًا بسرعات تصل إلى مئات الكيلومترات كل ثانية أو بسرعات أكبر. وهي تتبع مدارات إهليلجية حول جسم مركزي غير مرئي فمن الممكن تتبع مواضعها الإزاحية على مدى بضع سنوات، مما يؤدي إلى تحديد حجم

الجســم الهائل الذي يمثل مرساة التجمع ومجرة درب التبانة بأكملها. وقد تم تعقب أحد النجوم خاصــة باســتمرار منذ 1995 وهو يساوي 15 كتلة شمســية ورمز إليه بالرمــز S2 وهو يدور في مدار حوالي 15.6 ســنة حول الرامي A*، بأقصى اقــتراب ويبلغ حوالي 4 أضعــاف المســافة بين الشــمس ونبتون. وقد أكد تحليل مدار S102 ـ وهو نجم أقرب اكتشــف عام 2012 ـ وجود جســم غير مرئي كتلته حوالي 4 ملايين مرة كتلة الشــمس وفي حيز أصغر كثيرًا من مدار كوكب الأرض. وهذا الجســم لا يمكن أن يكون سوى ثقب أسود.

النوم الخفيف

في العقــد الماضي، وجدت الدراســات أن الثقب الأســود في مركز مجرتنا كان نشــطًا في الفترة الأخيرة نســبيًّا. حيث ترصد تلسكوبات الأشعة الســينية الدوارة أحيانًا توهجات من مركز المجرة على الأرجح أنها تحدث عندما تضل الأجســام الصغيرة مثل الكويكبات طريقها وتقترب كثيرًا فتتمزق وتســخن بفعل الجاذبيــة الهائلة للثقب الأســود. كــما وجدوا أيضًــا «أصداء ضوئية» ـ سحبًا لامعة من الانبعاثات تنشأ عندما تضيء الأشعة السينية حدثًا أكثر عنفًا منذ بضعة عقود مضت السحب الغازية التي تبعد حوالي 50 سنة ضوئية من الثقب الأسود.

ولأن أي شيء يضل فيقترب جدًّا من الثقب الأسود يسحب إلى الموت، افترض معظم علماء الفلك أن الثقب الأســود المركزي قد مسح محيطه المباشر ثم همد في خمول. والأشياء الوحيدة المتبقية هي نجوم مغامرة قليلة مثل S2، وS102 تدور على مقربة ، وركام من الغاز بطيء لكنه ثابت داخل الثقب الأســود يولد أشعة راديوية من الرامي A*. لقد كان من المفاجئ، بعد ذلك أن أشــارت دراسة نُشرت في عام 2009 إلى أن المنطقة التي تدور فيها مــدارات S2 مليئة بمواد أخرى بقيمة مليون شــمس، يعتقد أنها توزع بين النجوم الباهتة

والبقايا النجمية غير القابلة للكشـــف. وفي بيئة مزدحمة كتلك، قد لا يكون الثقب الأسود المركزي خامدًا كما كان يعتقد سابقًا.

الفكرة الرئيسة

هناك ثقب أسود فائق الحجم يقع في مركز درب التبانة

36

أنواع المجرات

Types of galaxies

أدى اكتشاف «إدوين هابل» عام 1924 أن العديد من السدم التي في السماء هي مجرات مستقلة أبعد كثيرًا من مجرتنا إلى فتح مجال جديد تمامًا لعلم الفلك، فأمكن حينئذ عقد مقارنات بين درب التبانة، وهذه الأنظمة الأخرى واتضح على الفور أن بعض أنواع المجرات مختلفة تمامًا.

لقد تم تعديل وتغيير نظام تصنيف المجرات في وقتنا الحالي عدة مرات إلا أن علماء الفلك لا يزالون معترفين بالأنواع الخمسة الأساسية للمجرات والتي حددها «هابل» في كتابه عام 1936 تحت عنوان «عالم السدم». وهذه الأنواع هي: المجرات الحلزونية، والمجرات الحلزونية الضلعية، والمجرات الإهليلجية، والمجرات المحدبة، والمجرات غير المنتظمة.

المجرات لها نواة منتفخة من نجوم قديمة من الجمهرة الثانية (انظر صفحة 215)، ومن هذه النواة تخرج أذرعًا حلزونية مضاءة بمناطق تكون النجوم، وتجمعات ساطعة من نجوم مضيئة ذات أعمار قصيرة تنتمي لنجوم الجمهرة الأولى. وفي عام 1939 استخدم «هوراس

الخط الزمني

1924م	1936م	1937م	1939م
أثبت «هابل» أن السدم الحلزونية هي مجرات أبعد كثيرًا من درب التبانة.	حدد «هابل» تصنيفًا واسعًا لأنواع المجرات.	اكتشف «شابلي» أولى المجرات القزمة الكروية الوفيرة.	أثبت «بابكوك» الدوران التفاضلي للنجوم في أنحاء المجرات الحلزونية.

بابكوك» قياسات طيفية من مجرة المرأة المسلسـلة (Andromeda Galaxy) لإثبات أن النجوم داخـل المجرات الحلزونية تـدور بمعدلات مختلفة بناء على بعدها عـن المركز، وهي فكرة اقترحها «بيرتيل ليندبلاد» عام 1925 (انظـر صفحة 210). فترات الدوران العادية عند منتصف المسافة بين المركز والحافة حوالي 200 مليون سنة. بالإضافة إلى المجرات الحلزونية العادية، عرف «هابل» مجموعة كبيرة من المجرات فيها يقطع شريط مسـتقيم النواة، وتخرج الأذرع الحلزونية من طرفيه. في الواقع، تمثل المجرات الحلزونية المضلعة حوالي ثلثي المجرات الحلزونية في الكون المجاور بما في ذلك مجرتنا درب التبانة.

«تاريخ الفـلك هو تاريخ آفاق منحسرة.»
إدوين هابل

وتمثل المجرات الحلزونية، والمجرات الحلزونية الضلعية معًا حوالي 60 ٪ من المجرات الساطعة في الحقبة الحالية، على الرغم من أن هذا العدد قد تغير بلا شك بمرور الزمن.

وهـي تتراوح في الحجم من بضع عشرات الآلاف وحتى حوالي نصف مليون سـنة ضوئيـة إلا أن الأنظمة الأكبر من درب التبانة والتي يبلغ قطرها 100000 سـنة ضوئية نادرة جدًّا. قسـم «هابل» كلا نوعي المجرات الحلزونيـة طبقًا لمدى الإحكام الذي يظهر على التفاف أذرعها. وهناك العديد من التقسيمات الأخرى المهمة والتي ربما من بين أهمها الفصل بين المجرات الحلزونية رائعة التصميم التي لها أذرع حلزونية محددة وبين المجرات

1944م
حـدد «بـادي» جمهرتـين نجميتـين في درب التبانـة ومجرات أخرى.

1959م
أدخـل «جـيرارد دي فوكوليروس» امتدادًا واسـع الاستخدام إلى نظام هابل.

1964م
قـدّم «لين»، و«شـو» نظرية موجة الكثافة لتفسير الأذرع الحلزونية.

الحلزونية الصوفية التي فيها تشـكيل النجوم أكثر انتشـارًا وغير مكتمل. ومن المعتقد أن الفرق بين الاثنين يتحدد بالتأثير النسـبي على تشـكيل النجوم لعوامل على نطاق واسع مثل موجة حلزونية كثيفة (انظر صفحـة 211)، والعوامل المحلية مثل موجات صدمية للمستعر الأعظم.

المجرات الإهليلجية، والمجرات المحدبة

الفئة الرئيسـية الثالثـة للمجرات في تصنيف «هابل» هي المجـرات الإهليلجية وهي سحب على شكل كرة من نجوم حمراء وصفراء تدور في مدارات ليست ممدودة فحسب بل مائلة بمجموعـة كبيرة من الزوايا. وعلى عكس المجرات الحلزونية، فالمجرات الإهليلجية ينقصها سـحب الغاز بين النجمي اللازم لتكوين نجوم جديدة نقصًا شـديدًا. أي نجوم قصـيرة العمـر وهائلة زرقاء وبيضاء قد شـاخت وماتت منذ حين ولم يتبق سـوى نجوم الجمهرة الثانيـة الأكثر اتزانًا، ومنخفضـة الكتلة. ونقص الغاز مسـؤول أيضًا عن بنيتها الفوضوية- التصادمات بين سحب الغاز لديها ميل طبيعي نحو تكوين أقراص بأي حجم بدءًا من الأنظمة الشمسية وحتى المجرات، وتأثير الجاذبية على هذه الأقراص بدوره يسطح مدارات النجوم. المواجهات القريبة بين النجوم-وهي آلية أخرى لمعادلة المدارات- نادرة، ولذلك تأخذ المجرات الإهليلجية مجموعة من الأشكال تتراوح ما بين شكل كرات مكتملة وحتى أشـكال سيجار ممتد. وهي تختلف على نطاق أوسع بكثير من المجرات الحلزونية من حيـث الحجم، ولها أقطار تـتراوح ما بين بضعة آلاف إلى بضع مئات الآلاف من السـنين الضوئيـة. وهي تمثل حـوالي 15 ٪ من جميع المجرات اليوم، لكـن الأمثلة الأكبر لا توجد سوى في تجمعات المجرات الكثيفة- وهي سمة تقدم دليلًا دامغًا على أصولها (انظر صفحتي 229 و239). رتـب «هابل» المجرات الحلزونية، والمجرات الحلزونية الضلعية على مخططه الشـهير «الشوكة الرنانة» (انظر الصفحة المقابلة) مع نوع وسيط من المجرات يسمى المجرة

المحدبة في التقاطع بين طرفي الشوكة. تشبه المجرات المحدبة مجرات حلزونية «بلا أذرع». ولها انتفاخ مركزي من النجوم يحيط به قرص من الغاز والغبار لكن ليس هناك ما يدل على استمرار تشكل نجوم لتكوين أذرع حلزونية. وكما خمن هابل تخمينه الصحيح، يعتقد أنها تميز مرحلة رئيسية في تطور المجرات من شكل إلى آخر.

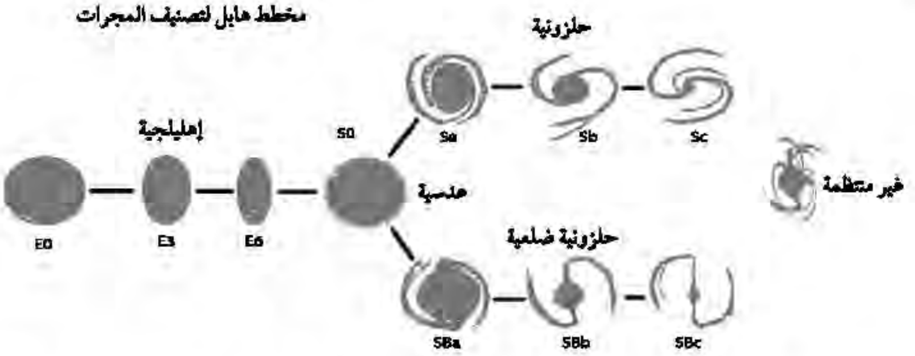
اكتشاف مجرات أخرى

كانت طبيعة السدم الحلزونية- التي عرفت من خلال الدراسات الطيفية بأنها سحب نجمية بعيدة- محل جدال شرس في الأوساط الفلكية في مطالع القرن العشرين. هل هي أنظمة صغيرة نسبيًا تدور في مدار حول درب التبانة الذي يحيط بالكون كله في الواقع؟ أم هي مجرات كبيرة وبعيدة مستقلة مما يعني أن الكون حجمه أكبر بكثير؟

وهذا الجدال الذي سمي بـ«الجدال العظيم» استقر أخيرًا في عام 1925 عن طريق العمل الدؤوب لـ«إدوين هابل» الذي بنى على أعمال «هنريتا سوان ليفيت» (انظر صفحة 174)، و«إجنار هيرتزسبرنج». لقد جمع «هابل» بين اكتشاف «ليفيت» للعلاقة بين الفترة واللمعان في النجوم المتغيرة القيفاوية وبين تحديد «هيرتزسبرنج» المستقل لبعد عدة نجوم متغيرة قيفاوية مجاورة. وقد سمح له ذلك باستخدام فترة النجوم المتغيرة القيفاوية لتقدير لمعانها الفعلي، ومن ثم (بالمقارنة بسطوعها الظاهري في سماوات كوكب الأرض) تقدير بعدها عن كوكب الأرض. وعلى مدى عدة سنوات استخدم «هابل» تلسكوبًا 2.5 متر (8.2 قدم) في مرصد جبل ويلسون بكاليفورنيا لتحديد أماكن النجوم المتغيرة القيفاوية في بعض السدم الحلزونية الأكثر سطوعًا ومراقبة سطوعها. وبحلول عام 1924 تمكن من إثبات أن السدم الحلزونية هي أنظمة مستقلة أبعد من درب التبانة بملايين السنين الضوئية- وكان ذلك هو الخطوة الأولى نحو اكتشاف أعظم (انظر صفحة 244).

المجرات غير المنتظمة، والمجرات القزمة الكروية

المجرات غير المنتظمة التي اكتشفها «هابل»، والتي هي أصغر من المجرات الحلزونية، هي سحب نجمية، وغاز، وغبار ليس لها شكل منتظم، وهي غالبًا ما تكون غنية بالنجوم الصغيرة اللامعة ولها لـــون أزرق واضح. ويعتقد أنها تمثل ربع المجرات جميعًا على الرغم مـــن أنها عادة أصغر حجمًا وأكثر خفوتًا من المجرات الحلزونية أو المجرات الإهليلجية مما يجعل من الصعب ملاحظتها. ولحسن الحظ، فإن اثنتين من أقرب المجرات المجاورة لنا – سحابة ماجلان الكبرى، وسحابة ماجلان الصغرى – مجرات غير منتظمة لذلك دُرس هذا النوع جيداً.



قسم «هابل» المجرات غير المنتظمة إلى فئتين: المجرات غير المنتظمة I، وهي التي تظهر بعـــض البنية الداخلية، والمجرات غير المنتظمة II التي لا شـــكل لها تمامًا. الهيكل الداخلي للمجرات غير المنتظمة I يمكن أن تضم آثارًا لقضبان مركزية أو أذرع حلزونية غير محددة بوضـــوح. إن صور الكون البعيد البدائي في تلســكوب هابل الفضائي تظهر أن المجرات غير المنتظمة كانت أكثر غزارة في الماضي، وتدعم فكرة أن المجرات الحلزونية نشـــأت من عمليات اندماج.

إحدى المجموعات الهامة الأخيرة من المجرات، وهــي أصغر حجمًا وأكثر خفوتًا من المجرات غير المنتظمة، هي المجرات القزمة الكروية. هذه السـحب الكروية أو الإهليلجية الصغيرة من النجوم اكتشفت على يد «هارلو شابلي عام 1937» وليس لها نواة واضحة ولها سطح سطوعه منخفض. وعلى الرغم من التشـابه الخارجي بين المجرات القزمة الكروية، والمجـرات الإهليلجية إلا أن المجـرات القزمة الكروية يبدو أنها تحتـوي على خليط أكثر تعقيـدًا من النجوم بالإضافة إلى كميات كبيرة من «المادة المظلمة» غير المرئية والتي تمسـك جاذبيتهـا بعناصرها المتفرقة المرئية. وهي تشـكل أكثر من ثلثي جميـع المجرات في المحيط الخاص بنا لكن من المستحيل اكتشافها عبر مسافات أكبر.

الفكرة الرئيسة

تأتي المجرات في عدة أشكال مختلفة جدًا

37

المجرات المتصادمة والمتطورة

Colliding and evolving galaxies

في حين أن المســافات التي تفصل المجرات شاســعة مقارنة بمقاييسنا التي نستعملها يوميًّا، إلا أنها صغيرة نسبيًّا إذا ما قورنت بأحجام المجرات نفسها. وهــذا يجعل التصادمات واللقاءات التي تقــترب فيها المجرات من بعضها حدثًا شائعًا على نحو مدهش، ويلعب دورًا رئيسيًّا في نشوء المجرات.

حالما اتضحت الطبيعــة الحقيقية للمجرات في العشرينيات، سرعان ما اكتشــف علماء الفلك أن العديد من المجرات القريبة من بعضها البعض في الســماء هي حقًّا قريبة من بعضها البعض في الفضاء. قام عالم الفلك الســويدي «إريك هولمبيرج» بعمل رائد في هذا المجال في وقت مبكر من عام 1937، وفي عام 1941 كان أول شــخص يدرس ما يمكن أن يحدث إذا اصطدمت مجرتان ببعضهما البعض. ولكي يقوم بذلك، استخدم حاسوبًا تناظريًّا بدائيًّا، بني من عشرات المصابيح الضوئية التي يمكن لشدة ضوئها المتغيرة أن توضح تركيزات النجوم. وقد كشف عمل «هولمبيرج» عدة تأثيرات مهمة: أوضح كيف يمكن للمجرتين المتقاربتين أن تحدثــا قوى مدية داخل بعضهما البعض مما يؤدي إلى إثارة موجات من تشــكيل النجوم أثناء

الخط الزمني

1941م	1951م	1966م
وضــع «هولمبــيرج» نموذجًــا للأحداث المرتبطة بالتصادمات الافتراضية للمجرات.	اقترح «ليمان ســبيتزر» الابــن و«والتر بادي» أن التصادمــات يمكن أن تكــون آلية لتحول المجرات من نوع لآخر.	نشر هالتون آرب أطلس المجرات الغريبة.

إبطاء سرعتيهما الكلية في الفضاء بحيث تتجمعان وتندمجان.

وعلى الرغم من هذا، تعرضت تصادمات المجرات للتجاهل باعتبارها حوادث نادرة حتى عام 1966 عندما نشر «هالتون آرب» أطلس المجرات الغريبة- وهو قائمة مصورة لمجموعة متنوعة من المجرات التي لا تنسجم مع مخطط تصنيف إدوين هابل المنمق (انظر صفحة 224).

تجمعات النجوم الفائقة

واحدة من النتائج الأكثر إثارة لتفاعل المجرة هي تشكيل تجمعات النجوم بمقدار يقلص الأنظمة الطبيعية المفتوحة أو الكروية (انظر صفحة 127). إن ما يسمى بتجمعات النجوم هي العناصر المكونة لتوزيع نجمي أوسع نشأ عندما أثارت القوى المدية انهيار جاذبية سحب الغاز بين النجمي. أبرز هذه التجمعات في سماوات الأرض هي «136R» وهي تجمع مفتوح كثيف في سحابة ماجلان الكبرى التي هي موطن أثقل النجوم المكتشفة إلى الآن (انظر صفحة 179). ومع ذلك فإنه تم التعرف على تجمعين نجميين فائقين على الأقل في مجرة درب التبانة نفسها.

تعتبر تجمعات النجوم الفائقة مهمة لأنها تقدم المنشأ المحتمل للتجمعات النجمية الكروية الغامضة. وعلى الرغم من جاذبيتها القوية إلا أنها أطاحت بغازها المكون للنجوم مما أدى إلى عرقلة تكون المزيد من النجوم بعد انفجار أولي. النجوم الضخمة ذات الأعمار القصيرة التي نشأت في الموجة الأولى تشيخ وتموت في غضون بضعة ملايين سنة، مما يؤدي إلى تكون موجات صدمية هائلة للمستعر الأعظم والتي سرعان ما تطيح بالسديم المحيط بها. وبمجرد أن تصل النجوم الوسيطة أيضًا إلى نهاية حياتها تنضغط جميع البقايا في صورة تجمعات كروية معبأة بعدة آلاف من النجوم منخفضة الكتلة ذات أعمار متطابقة.

1970م

ربط الأخوان «تموري» نماذج حاسوبية لتصادمات المجرات بالمجرات الغريبة.

1977م

أشار «آلار تموري» إلى أن المجرات الحلزونية المندمجة مع بعضها البعض تتجمع وتصبح مجرات إهليلجية.

1987م

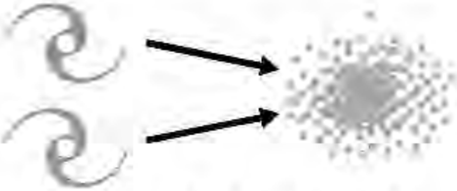
أشار «ليونارد سيارل»، و«روبرت زن» إلى أن المجرات الحلزونية تتشكل من اندماج مجرات غير منتظمة أصغر.

2002م

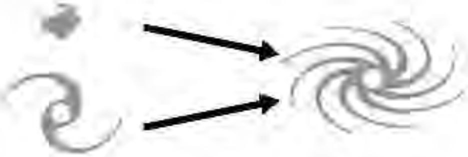
استخدم «ماتياس شتاينميتز»، و«خوليو نافارو» نماذج حاسوبية متقدمة لدعم نظرية تطور المجرات الهرمية.

وضع نموذج للاندماج

وفي الوقت نفســه تقريبًا، طبق الأخوان الأســتونيان «آلار تومري»، و«جوري تومري» تكنولوجية حاســوبية فائقة على مســألة عمليات الاندماج وقد أصدرا نتائج مشــابهة لنتائج «هولمبيرج» لكن بتفاصيل أكثــر. وفي بعض الحالات، قاما بمحاكاة تصادمات مجرات محددة. المجرات الهوائية على ســبيل المثال، هي زوج من المجرات الحلزونية المتصادمة على بعد حوالي 45 مليون ســنة ضوئية في كوكبــة الغراب: عندما اقتربتا من بعضهــا البعض، قامت القوى المدية «ببســط» أذرعها الحلزونية ممــا أدى إلى تكوين تدفقين من النجــوم يمتدان في الفضاء بين المجرتين. وقد كشــفت صور تلسكوب هابل الفضائي منذ التسعينيات عن تشكيل كثيف للنجوم في الأجرام الرئيســية لهذه المجرات، في حين أن الصور القادمة من الأشعة السينية تبين أن النظام كله محاط الآن بهالة من الغازات الساخنة.



اليسار: في اندماج المجرات الكبيرة، تفقد المجرتان الحلزونيتان المصطدمتان هيكلهما وتتجمعان لتشكلا مجرة إهليلجية أكبر.



اليمين: في اندماج المجرات الصغيرة: امتصاص المجرة القزمة الصغيرة في المجرة الحلزونية يعزز من هيكل المجرة الحلزونية ومن معدل تشكيل النجوم.

على الرغم من هذا المشــهد، يبــدو أن التصادمات بين النجوم الفرديــة نادرة. تصطدم سحب الغاز والغبار الأكثر انتشارًا وجهًا لوجه مما يؤدي إلى نشأة نجوم جديدة وفيرة في حدث

يعرف باســم الانفجار النجمي. الموجات الصدمية التي تمزق المادة المصطدمة تســخنها إلى حد كبير. وفي الوقت نفســه، تسخن انفجارات المســتعر الأعظم من النجوم الضخمة ذات الحياة القصيرة التي تكونت في الانفجار النجمي الغاز أكثر مما يؤدي إلى رفع درجة الحرارة إلى ملايين الدرجــات وتثريه بنواتج اندماجها النووي، وفي نهاية المطاف، قد يصبح الغاز ســاخنًا للغاية وسريع الحركة لدرجة أنه يفلت إلى منطقة بها حول المجرة المرئية.

وعلى الرغم من أوجه التقدم في كل من تكنولوجيا الحوسبة وفهمنا لتكوين المجرة منذ أولى عمليات المحاكاة (بما في ذلك اكتشــاف المادة المظلمة ـ انظر الفكرة 45) فإن نموذج «تموري» للاندماج الكبير بين المجرات الحلزونية الكبيرة بقي ســليمًا. بالطبع ليست جميع الاندماجات تنطوي على زوج من المجرات الحلزونية: اللقاءات بين الأقزام الإهليلجية الأصغر أو المجرات غير المنتظمة أكثر شــيوعًا بكثير، وهذه أحداث أحاديــة الجهة أكثر بكثير، وفيها تتمزق المجرة الأصغر تحت تأثير النظام الأكبر وفي النهاية تفقد هُويتها تمامًا أثناء تفتتها. وكآثار جانبية، يبدو ســحب الجاذبية للمجرات الأصغر أنه يزيد من تشكل النجوم والنمط الحلزوني المرئي (انظر صفحــة 211). هناك أدلة دامغة على أن مجرتنا حاليًا تشــارك في هذا الحدث في هذه اللحظة، وهي تتفاعل مع مجرة صغيرة تعرف باسم مجرة الرامي الإهليلجية القزمة.

التصادمات باعتبارها تطورًا

وقد قام «آلار تومر» بناءً على دراســاته للطريقة التــي تتصرف بها النجوم التي نجت من اندماج كبير بطرح اقتراحه الجريء عام 1977 بأن الاندماجات بين المجرات الحلزونية تنتج المجرات إهليلجية. ويجزئ الاندماج الأولي مدارات النجوم إلى مجموعة متنوعة من المسارات الإهليلجية غــير المرتبة، ويزيل فقد الكثير من الغاز في النظام المدمج تأثيرًا رئيســيًا يســطح مداراتها وتتسطح سحب الغاز فتصبح قرصًا عند اصطدامها، مما يؤدي إلى بذل سحب الجاذبية

على النجوم الموجودة والتحكم في المستوى الذي تتكون فيه الأجيال الجديدة من النجوم. ولأن النجوم الهائلة الأكثر سطوعًا والتي تكونت في الاندماج الفعلي يتقدم عمرها بسرعة وتموت، فإن النتيجة النهائية تكون كرة غير منتظمة الشكل من نجوم حمراء وصفراء أكثر استقرارًا في مدارات متداخلة: مجرة إهليلجية. وبفرض أن جميع المجرات بدأت كمجرات حلزونية، حسب «تومر» المعدل المرجح للاندماجات على مدى عمر الكون موضحًا أنها تطابق النسبة الموجودة من المجرات الإهليلجية.

أخذت أفكار الأخوين «تومر» بعض الوقت لتشتهر، وقد تعرضت لمناقشات حادة خلال الثمانينيات، لكن الملاحظات الأكثر تفصيلًا لاندماج المجرات كشفت عن العديد من الأنظمة التي يبدو أنها تمر بمراحل مختلفة في الانتقال من النوع الحلزوني إلى الإهليلجي. وفي الوقت نفسه ركزت التطورات مؤخرًا على سد الفجوات حول فكرة الاندماج الأساسية. وعن طريق تصوير تلسكوب هابل الفضائي لمجرات تبعد عدة مليارات من السنوات الضوئية في وقت سابق من عصر تطور الكون (انظر صفحة 269) أوضح أن معظم المجرات بدأت كمجرات غير منتظمة قبل أن تندمج وتنمو لتصبح مجرات حلزونية أكثر تعقيدًا. كما أصبح من الواضح أن المجرات الإهليلجية يمكن أن تعيد امتصاص الغاز تدريجيًا من المناطق المحيطة بها. وهذا يسمح لها بالتجدد من خلال مرحلة عدسية (انظر صفحة 223) وفي النهاية تشكل أذرعًا حلزونية جديدة.

«الأنظمة المزدوجة والمتعددة وكذلك التجمعات يمكن تفسيرها كنتيجة للاستحواذات بين سدم متأثرة بالقوة المدية في اللقاءات القريبة.»

إيريك هولمبرج

قد تعيد دورة الاندماج نفســها عدة مرات ويتزايد ارتفاع درجات حرارة الغاز وتصبح إعادة امتصاصــه أبطأ أثناء تطور المجرة من مجرة حلزونية صغــيرة إلى مجرة إهليلجية ضخمة وعملاقة قديمة (انظر صفحة 240) في قلب تجمع من المجرات..

الفكرة الرئيسة

المجرات تتصادم في كثير من الأحيان، ونتيجة لذلك يحدث تغير في شكلها

38

النجوم الزائفة، والمجرات النشطة

Quasars and active galaxies

تأتي المجرات النشطة في أشكال مختلفة ولكنها متحدة في أن بها نواة مركزية ساطعة ومتغيرة فيها يتغذى ثقب أسود فائق على المادة من المناطق المحيطة به. وأشهر هذه المجرات هي بلا شك النجوم الزائفة والتي لها دور رئيسي في قصة نشأة المجرة.

في عام 1908 نشر عالما الفلك «فيستو سليفر»، و«إدوارد إيه فيث» من مرصد ليك بكاليفورنيا تفاصيل عن سمات غريبة في طيف مسييه 77 إحدى أكثر المجرات سطوعًا في السماء. وقد كانت بارزة لأن طيفها لم يظهر الخليط المعتاد من خطوط الامتصاص التي ينشئها ضوء النجوم التي لا تحصى بل خطوط انبعاث -أطوال موجية معينة من الضوء كانت ساطعة لدرجة أنها برزت مقابل استمرارية الأطياف النجمية لم يعرف «سليفر»، و«فيث» حينئذ أنهما اكتشفا أول مجرة نشطة.

الخط الزمني

1943م	1953م	1960م	1963م
اكتشف «سيفرت» عددًا من المجرات الحلزونية ذات الأنوية الساطعة المضغوطة وذات خطوط انبعاث واسعة.	ربط «بادي»، و«مينكوفسكي» المصدر الراديوي (الدجاجة A) بمجرة غريبة بعيدة.	عرّف «سانداج» أول المصادر الراديوية شبه النجمية أو النجوم الزائفة.	اكتشف شميث البعد الكبير للنجم الزائف 3C273.

مجرات سيفرت، والمجرات الراديوية

لم يكن حتى عام 1943 ـ عندما أعلن «كارل سيفرت» اكتشافه لعدد من المجرات الحلزونية ذات نقاط من الضوء تشبه النجوم، وساطعة على نحو خاص موجودة في الأنوية المركزية- عندما تم العثور على مجرات لها صفات تشبه مسييه 77 وقد أشار عرض خطوط الانبعاث أنها ناتجة عن سحب غازية تدور في مدار حول المنطقة المركزية بسرعة عالية (مما يتسبب في جعل انبعاثاتها الضوئية تخضع لإزاحة دوبلر في مجموعة من الأطوال الموجية ـ انظر صفحة 97) اليوم، تعرف هذه الأنظمة باسم «مجرات سيفرت»، وهي تعرف بأنها أضعف أشكال المجرات النشطة.

«هذه المنطقة النووية أكثر سطوعًا من الناحية البصرية بحوالي 100 مرة من المجرات المضيئة. وقد عرفت بمصادر راديوية حتى الآن.»

مارتن شميت

وفي الوقت نفسه، في عام1939، حدد عالم فلك شاب يدعى «جروت ريبر» بعض المصادر الفلكية الراديوية الأولى بالإضافة إلى درب التبانة نفسها (انظر صفحة 215)، ومع ذلك ثبت أن اكتشاف أجسام مرئية تقابل هذه المصادر الراديوية أمر صعب حيث أن دقة الخرائط الراديوية في بداياتها كانت محدودة للغاية. لم يكن حتى قبل 1953 حين استخدم «والتر بادي»، و«رودولف مينكوسكي» دراسات استقصائية راديوية أكثر دقة لتحديد مصادر «ريبر» وفي حين أن معظمها اقترن بأجرام في مجرتنا مثل بقايا المستعر الأعظم، إلا أن واحدًا يطلق عليه الدجاجة A. بدا مرتبطًا

1964م

اقترح «إدوين سالبيتر»، و«ياكوف زيلدوفيك» أن انبعاثات النجم الزائف قد تأتي من القرص التراكمي حول ثقب أسود عملاق.

1968م

اكتشف «جون إل شميت» نوعًا آخر من المجرات النشطة: النجم الزائف المتوهج أو جرم بل لاسرتا.

1969م

ذهب «ليندن بيل» إلى أن جميع المجرات النشطة يمكن تفسيرها بوجود ثقب أسود فائق.

بزوج بعيد من المجرات المصطدمة. وبعد بضعة أشـــهر أصبح مـــن الواضح أن المصدر الراديوي (الدجاجة A) يتكون بالفعل من فصين ممتدين كل منهما على أحد جانبي نظام المجرة المركزي.

لغز النجم الزائف

لقد شـــهدت أواخر الخمســـينيات ازدهارًا في علم الفلك الراديوي مع تطور أول تلسكوب راديوي على شـــكل طبق كبـــير في جوردريـــل بنك بالقرب من مانشســـتر، إنجلترا. اكتشف العديد مـــن المصـــادر الراديوية خـــارج المجـــرات، وفي حـــين أن بعضهـــا يتفق مـــع القالـــب مـــزدوج الفـــص لـ«الدجاجـــة A» هنـــاك الكثير يتكون فقط مـــن مصادر مفردة. وفي عـــام 1960، بـــذل عـــالم الفلـــك الأمريكي «آلان ســـانداج» جهودًا لمسح الســـماء حول هذه الأجرام، ووجد أنها عادة ما تكون مقترنـــة بنقاط

الاندماجات والمجرات النشطة

منذ الاكتشاف الأولي للمجرات النشطة، أصبح من الواضح أن النشاط العنيف في المحورغالبًا ما يكون مقترنًا بعمليات تصادم مجرات مذهلة أو تقابل قريب. على سبيل المثال، مجرة قنطورس A، واحدة من أقرب المجرات الراديوية لكوكب الأرض، تظهر في الضـــوء المرئي كمجـــرة إهليلجية يطلق عليهـــا NGC 5128 يعبرها ممر مظلم من الغبار المعتم الذي هو نفسه مرصع بمناطق من تشكل النجوم وتجمعات نجمية ساطعة صغيرة. ويعتقد أن هـــذا النظام ناتج عن اندماج بين مجرة إهليلجية موجودة، ومجرة حلزونية كبيرة قد تم فعليًا ابتلاعها. ومثل هذه الأحداث ينتج عنه حتمًا كميات كبيرة من الغاز بين النجمي وأيضًا نجوم كاملة تُدفع للوصول إلى الثقب الأســـود المركزي فتبث به الحياة، ومن ناحية أخرى فإن النشـــاط منخفض المســـتوى نسبيًا، مثل ذلك الذي يرى في مجرات ســـيفرت، قد يكون مدفوعًا بتوقف مدي مـــن مجرات أصغر تندمج مع النظام الأكبر أو ببســـاطة تدور في مدار حوله. وفي نهاية المطـــاف، بمجرد أن تنتهي عملية اندماج المجرة، فإن الثقوب الســـوداء المســـتقلة التي كانت في الأنظمة المســـتقلة فيما مضى قد تلتف مع بعضهـــا البعض أيضًا وتندمج مما يؤدي إلى توليد موجات جاذبيـــة قوية في هذه العملية (انظر صفحة 290).

ضوء باهتة تشبه النجوم. وقد أطلق عليها «ساندا ج» اسم مصادر راديوية شبه نجمية، لكن خلال سنوات اختصر هذا الاسم إلى اسم أكثر أناقة، وهو «النجم الزائف». وقد بدا طيف الضوء المرئي لهذه النجوم الزائفة أنه يظهر خطوط انبعاث واسـعة وساطعة أكثر قوة بكثير من خطوط انبعاث مجرات سيفرت، لكن من المحبط أنها لا تتطابق مع أي عناصر معروفة.

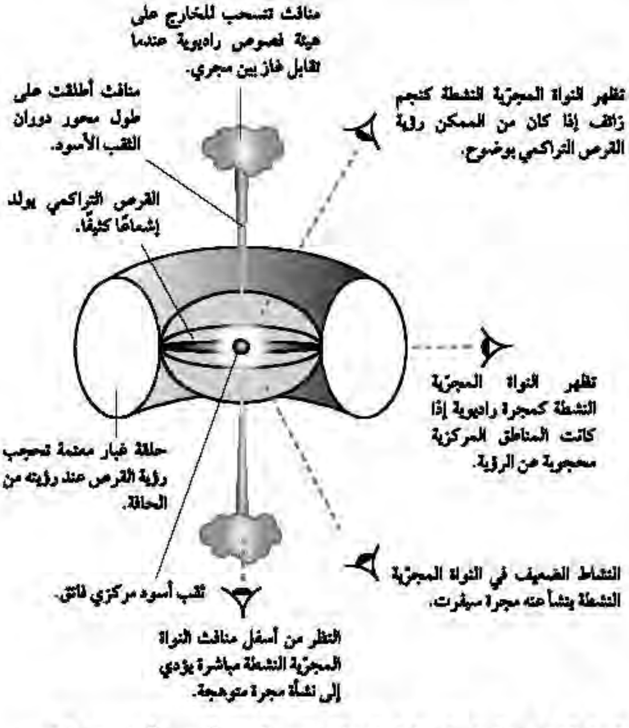
وأخيرًا حدثت طفرة في الفهم في 1963 عندما أدرك الزميل الهولندي لـ«سـانداج»؛ وهو «مارتن شـميت» أن الخطوط الطيفية للنجم المزيف المسمى 3C 273 في الواقع تتطابق مع خطوط انبعاث معروفة يشعها الهيدروجين إذا تمت إزاحتها إلى النهاية الحمراء للطيف إلى درجة حرارة غير مسبوقة إذا كانت هذه الإزاحة الحمراء ـ كما يبدو ـ سببها تأثير دوبلر، فإن هذا يشير إلى أن 3C 273 كان يتحرك مبتعدًا عن كوكب الأرض بسرعة تساوي سدس سرعة الضوء.

حاول بعض علماء الفلك تفسـير هذا الجرم الغامض على أنه نجم هارب، ارتفعت سرعته إلى السرعـة القصوى بفعل آلية غير معروفة إلى الآن، لكن هذه الجهود تعثرت حيث تم العثور على انزياحات حمراء شديدة في النجوم الزائفة الأخرى، ولكن لم تظهر أي تحولات زرقاء متطرفة مشابهة (كما قد يكون المتوقع إذا كانت هناك آلية عشوائية تعمل) وبدلًا من ذلك، استنتج معظم الخبراء أن النجوم الزائفة تدين بسرعتها الزائدة إلى توسـع الكون ككل (انظر الفكرة 40) ومن ثم فإنه طبقًا لقانون هابل، لا بد أن يكون بعيدة جدًّا وسـاطعة جدًّا. وما هو أكثر من ذلك، أن مصدر الضوء المعني لا بد أن يكون ضئيلًا نسبيًّا: بينت سرعة التغيرات غير المسبوقة في سطوع النجوم الزائفة أن عرضها لا بد أن يكون على الأكثر ساعات ضوئية قليلة وربما ليست أكبر من نظامنا الشـمسي. وفي نهاية المطاف، عن طريق ملاحظة المجرات المضيفة الأكثر خفوتًا المحيطة بالنجـوم الزائفة، تم إثبات نظرية أن النجوم الزائفة هي مناطق لنشـاط كثيف مضمن في أنوية المجرات البعيدة.

نظرية موحدة

وقــد أصبحت الروابط بين الأنواع الثلاثة من المجرات النشــطة:- ســيفرت الراديوية الهادئة، والمجرات الراديوية، والنجوم الزائفة أوضح في الفترة ما بين الستينيات والسبعينيات. ومع تحسن دقة التلسكوبات الراديوية أصبح من الواضح أن فصوص المجرات الراديوية تكونت عندما قابلت المنافث دقيقة التركيز من المادة التي تظهر بسرعــات عالية من قلب المجرة المركزية الغاز المحيط (انظر صفحة 240) في الوســط بين المجرات وانسحبت للخارج لتصبح سحبًا ضخمة. وقد ثبت أن بعض النجوم الزائفة أيضًا لها فصوص توأم للانبعاثات الراديوية في حين أن مجرات سيفرت أيضًا تنبعث منها إشارات راديوية ضعيفة، كما أن اكتشاف فئة جديدة من المجرات النشطة تسمى النجوم الزائفة المتوهجة أضاف إلى المجموعة المتنوعة للنشــاط الذي تم رصده.

في مطلــع عــام 1969 قال «دونالد ليندن» إن سلوك المجــرات الراديوية، ومجرات ســيفرت القريبــة يمكن أن يكون نســخة مصغــرة من نشــاط النجــوم الزائفة وأن جميع المجرات النشطة في نهاية المطــاف يعزى ســلوكها إلى ثقب أســود عملاق مركزي يســحب كميات شاسعة من المادة من محيطه.



البنية المعقدة للنواة المجرّية النشطة تؤدي إلى نشأة عدة أنواع مختلفة من المجرات النشطة اعتمادًا على الزاوية التي تُرى منها.

عــلى الرغم من أن فكرة ليندن بيل كانت مثيرة للجدل في ذلك الوقت، إلا أن الأدلة المتنامية لصالحها أدت إلى نموذج موحد للنواة المجرّية النشــطة (AGNs) التــي تم تطويرها في ثمانينيات القرن العشرين.

وفي هذه النظرية، ينبعث الإشــعاع بفعل قرص تراكمي ســاخن للغايــة في منتصف الثقب المركزي الأســود، بينما تعمل منافث الجســيمات التي تهرب من أعلى القرص وأسفله على تكوين الفصــوص الراديوية. يعتمد نوع المجــرة الذي نلاحظه بالضبط على قوة النشــاط وتوجه النواة المجرّية النشطة بالنسبة إلى الأرض.

الفكرة الرئيسة

الثقوب السوداء الهائلة يمكن أن تُحدث نشاطًا في المجرات

39

الكون الفسيح

The large-scale Universe

تتجمع المجرات معًا في مجموعات متنوعة الأحجام، مع وجود مجموعات مضغوطة نسبيًا، وتجمعات تتداخل عند الحواف لتنتج تجمعات فائقة أكبر، وبنى في حجم الكون من الخيوط والفراغات. إن توزيع أنواع المجرات المختلفة لا يكشف عن أسرار نشأة المجرات فحسب لكنه يخبرنا أيضًا بشيء مهم عن الأوضاع التي كان الكون عليها في وقت مبكر.

عندما اكتشف علماء الفلك المجرات الحلزونية، والمجرات الإهليلجية بأعداد متزايدة خلال القرنين: الثامن عشر، والتاسع عشر، أصبح توزيعهما غير المتكافئ في السماء واضحًا. إن أوضح تجمع للنجوم يقع في كوكبة العذراء، لكن كان هناك أيضًا تجمعات بارزة في كوكبات الهلبة، وبيرسوس، والكوكبات الجنوبية للكور، ومسطرة النقاش. وقد أكد اكتشاف «إدوين هابل» للعلاقة بين بعد المجرة والانزياح الأحمر في ضوئها عام 1929 (انظر صفحة 245) أن هذه المناطق بالفعل تحتوي على مئات المجرات الساطعة متكدسة في مساحة صغيرة نسبيًا من الفضاء.

الخط الزمني

1929م	1933م	1936م	1953م
حدد «هابل» العلاقة بين بعد المجرة، والانزياح الأحمر لضوئها.	طبّق «زفيكي» نظرية فيريال على تجمع مجرات كوما واكتشف المادة المظلمة.	حدد هابل المجموعة المحلية من المجرات القريبة من درب التبانة.	أشار دو فوكوليمور إلى وجود تجمع فائق يجمع بين المجموعة المحلية وتجمع العذراء.

مجموعتنا الصغيرة «المجموعة المحلية» أقل إثارة للإعجاب كثيرًا من تلك المجموعات البعيدة. وتحتوي هــذه المجموعة التي عرفها «هابل» عام 1936 المكونة من بضع عشرات من المجرات على ثلاثة فقــط من المجرات الحلزونية ـ درب التبانة، والمرأة المسلســلة، والمثلث ـ واثنتين من المجرات غير المنتظمة (سحب ماجلان).

وخلال الثلاثينيات، تم تحديــد العديد من تجمعات المجرات، وبدأ علماء الفلك في تطبيق نهج أكثر تطــورًا لتحليل انتماء المجرة، مع تعريف المجرة ليس على حســب قربها البســيط بل حســب المجرات التي ترتبط ببعضها بفعل تجاذب لا يمكنها الإفلات منه. ومن المقبول عمومًا أن تجمعات المجرات هي أكبر بنى «مرتبطة بالجاذبية» في الكون. نظرًا إلى أن الجاذبية تقل بسرعة مع المسافة، فإن التجمعات والمجموعات عادة ما تشغل مساحة عرضها حوالي 10 ملايين سنة ضوئية بصرف النظر عن عدد المجرات التي تحتوي عليها.

خصائص التجمعات

في عام 1933، استخدم «فرتز زفيكي» أسلوبًا رياضيًا يسمى «نظرية فيريال» لتقدير كتلة تجمع كوما من سرعات مجراتها. وقد قاده هذا إلى التنبؤ بأن التجمعات تحتوي إلى حد كبير على مادة أكثر وكتلة أكثر مما تشير مجراتها المرئية. وكشفت أولى أقمار الأشعة السينية الاصطناعية التي أطلقت في الســبعينيات أن مراكز التجمعات الكثيفة كانت غالبًا مصادر لإشــعاعات كثيفة،

1958م

نشر «آبيل» النسخة الأولى من كتالوجــه لتجمعات المجرات.

1977م

بــدأ علــماء الفلــك في مركز هارفرد ســميثونيان للفيزياء الفلكية أول مسح انزياح أحمر لمجرة كبيرة.

1982 - 1985م

نتائــج مســوحات الانزياح الأحمــر تكشــف عــن البِنى الكونية للخيوط والفراغات.

2014م

استبدال تجمع العذراء الفائق ببنية أكبر تُسمى تجمع لانياكا.

يُفهم الآن أنها تنبعث مــن الغاز المتناثر «بين التجمعات» بدرجات حرارة تزيد على 10 ملايين درجة مئوية (18 مليون درجة فهرنهايت). وهذا الغاز الذي تنبعث منه الأشعة السينية يضيف كثيرًا إلى كتلة التجمع، لكن مع ذلك يترك الغالبية العظمى من مادة «زفيكي» المفقودة بلا تفسير (انظر صفحة 274).

ومــن الجوانــب الأخــرى المهمــة مزيج أنــواع المجــرات المميز للتجمعــات. «المجرات الميدانية» - نسـبة الـ20٪ من المجرات المجاورة غير المرتبطة بأي تجمع محدد - هــي غالبًا مجــرات غير منتظمــة أو حلزونية بينما المجــرات في المجموعات الواسعة مثل منطقتنا تأتي في جميع الأشــكال. ومع ذلك، فالتجمعات الكثيفة تهيمــن عليهــا المجرات الإهليلجية، كما أن المركز غالبًا مــا يتميز بمجرات عملاقــة إهليلجية هائلة حقًا (انظر المربع).

المجرات الإهليلجية العملاقة

مجرة مســييه 87 في مركز تجمع العذراء هي أكبر مجرة في منطقتنا من الكــون. وهذه الكرة الضخمة مــن النجوم والتي عرضها 120000 ســنة ضوئية تحتوي تقريبًا عــلى 2.5 تريليون كتلة شمسية من المادة. إنها المجرة الإهليلجية العملاقة الأولى المعروفة أيضًا بـ«المركزيــة المهيمنة» أو المجرة مــن النوع CD. المجرات الإهليلجيــة العملاقة هي مجرات آكلة للمجرات، وهي النتيجة النهائية لعدة اندماجات مجرّية شــهدت ابتلاع مجرات إهليلجية وحلزونية أصغر. ونتيجة لذلك فإنها تكون غالبًا محاطة بهالات خافتة من النجوم تمتد حتى قطــر كلي يبلغ تقريبًا نصف مليون ســنة ضوئية. وهي النجوم الضالة بعد أن نجت من تصادمات ماضية، وانطلقت في مدارات غريبة حول المجرة المركزية.

وغالبًا ما يكون لهــا مواكب من تجمعات كروية تدور في المنطقة نفسها - مجرة مسييه 87 لديها 12000 (مقارنة بدرب التبانة التي لديهــا 150 أو نحو ذلك) وإذا كانــت العلاقة بين التجمعات الكرويــة، وتجمعــات النجــوم الفائقة (انظــر صفحة 227) صحيحة فإن هذا أيضًا على الأرجح ناتج عن تصادمات كونية. المزيد من الأدلة لدعم نشــوء المجرات الإهليلجية العملاقة من تصــادم المجرات يأتي من عدة أمثلة تخفي أكثر من ثقب أســود فائق الكتلة في ألبابها. ومسييه 87 لديها واحدة فقط لكن بفضل أحدث اندماج لها أصبحت نواة مجرّية نشطة وأحد أكثر المصادر الراديوية سطوعًا في السماء.

وفي عام 1950، ناقش «ليمان سبتزر» الابن، و«والتر بادي» أن هذا التوزيع يشير إلى أن المجرات الإهليلجية نشأت من الاصطدامات، والتي من المرجح حدوثها في البيئات المزدحمة للتجمعات الكثيفة. وقد توقعا أن مثل هذه التصادمات تنزع الغاز بين النجمي من المجرات، وهي نتيجة استحوذت على نظريات نشأة المجرات في سبعينيات القرن العشرين (انظر الصفحة 227)، والتي تم إثباتها من خلال اكتشاف الغاز بين التجمعات الذي تنبعث منه الأشعة السينية.

«لقد وضعنا أخيرًا الخطوط العريضة التي تحدد التجمع الفائق للمجرات التي يمكن أن نطلق عليها موطننا.»

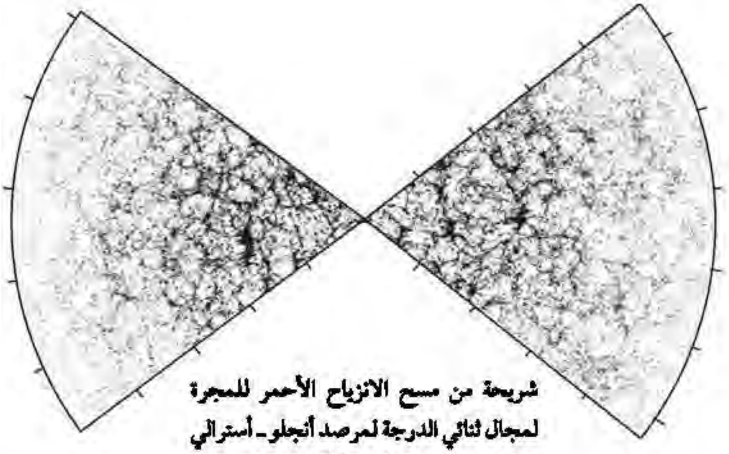
آر برينت تولي
عن تجمع لانياكيا الفائق

في الخمسينيات بدأ «جورج أوجدن أبيل» تجميع فهرس شامل للتجمعات والذي لم يكتمل حتى عام 1989. وقد أدى فهرس أبيل إلى العديد من الاكتشافات الجديدة المهمة، لكن ربما أبرز هذه الاكتشافات كان «دالة لمعان التجمع» ـ العلاقة بين السطوع الجوهري لأكثر المجرات لمعانًا في التجمع وعدد المجرات فوق مستوى سطوع معين. ونظرًا إلى أن السطوع النسبي لتجمع المجرات يسهل قياسه فإن دالة اللمعان تقدم طريقة لتوقع لمعانها الحقيقي، ومن ثم فهي «شمعة معيارية» مهمة لقياس المسافات الكونية الكبيرة.

بِنى ما بعد التجمعات

دعم كل من «أبيل»، وعالم الفلك الفرنسي ـ الأمريكي «جيرارد دي فوكوليرس» وجود مستوى أكبر من البنى يتخطى تجمع المجرات. في عام 1953 أشار «دي فوكوليرس» إلى وجود «مجرة محلية فائقة» متمركزة في تجمع العذراء وتحيط بالكثير من التجمعات الأخرى بما فيها مجموعتنا المحلية، لكن لم تثبت مسوحات الانزياح الأحمر وجودها بما لا يدع مجالًا للشك قبل أوائل الثمانينيات. وسرعان ما تم تحديد عدة «تجمعات فائقة» أخرى إلا أن تعريفها الدقيق ظل مفتوحًا

للمناقشة لأنها ليســت مرتبطة عن طريق الجاذبية بالطريقة نفســها التي ترتبط بها المجرات في التجمعات الفردية. ويدلًا من ذلك، تعرف التجمعات الفائقة ببســاطة على أنها تركيزات من التجمعات في منطقة من الفضاء، غالبًا مصحوبة بحركة عامة مشتركة. وهذا التعريف المائع هو أحد الأســباب التي من أجلها تمت تنحية تجمع العذراء الفائق جانبًا في عام 2014 لصالح بنية جديدة وكبيرة تســمى لانياكيا عرضها حوالي 500 مليون سنة ضوئية وتحتوي على 100000 مجرة كبيرة على الأقل.



شريحة من مسح الانزياح الأحمر للمجرة لمجال ثنائي الدرجة لمرصد أنجلو-أسترالي تكشف توزيع عشرات الآلاف من المجرات في شبكة كونية من الخيوط والفراغات.

وقــد أتاح التقدم في مجــال التكنولوجيا منذ ســبعينيات القرن المــاضي تجميع الأطياف والانزيــاح الأحمر لأعداد هائلة من المجرات، مما ســمح بوضع خرائط دقيقة للكون واســع النطــاق. وتبين هذه الخرائط أن التجمعات الفائقة تندمج عند حوافها لتكوين خيوط تشــبه السلاســل، طولها مئات ملايين الســنين الضوئية حول مناطق شاسعة وفارغة ظاهريًّا تعرف باســم الفراغات، وهذا الاكتشاف غير المتوقع كان مخالفًا للافتراضات التي تذهب إلى أنه من الضروري أن الكون هو نفســه في جميع الاتجاهات. وعلى الرغم من أن هذا التماثل يبدو أنه بدأ

في الأحجام الأكبر التي تبلغ مليارات السنين الضوئية إلا أن البنية الكبرى التي نراها لا يمكن أن تكون قد نشــأت من تفاعلات الجاذبية على مــدى عمر الكون، وهذا يضع قيودًا مهمة على الطريقة التي تكون بها الكون نفسه (انظر الفكرة 41).

الفكرة الرئيسة

هناك بنية لجميع الأحجام في الكون

40

الكون المتوسع

The expanding cosmos

لقد أحدث الاكتشاف المذهل بأن الكون ككل يتوسع ثورة في علم الفلك في منتصف القرن العشرين إلا أن علماء الفلك قد تجادلوا حول معناه لعدة عقود. ومن ناحية أخرى، فإنه من المذهل أن المعدل الحقيقي للتوسع، بالإضافة إلى الآثار المهمة لأصل الكون ومصيره، لم تحدد حتى وقت قريب.

عادة ما ينسب الفضل في اكتشاف الكون المتوسع إلى «إدوين هابل»، الذي قام بعمل رائد في قياسات بعد المجرة وحساباتها الرئيسية في عام 1929 لكن القصة الحقيقية أكثر تعقيدًا. ففي عام 1912 قام «فيستو سيلفر» في مرصد «لويل» في فلاجستاف بأريزونا بمسح الطيف الخطي للسدم الحلزونية واكتشف أن أطياف معظمها بها انزياحات حمراء كبيرة. وبافتراض أن هذا سببه هو تأثير دوبلر نتيجة تحرك السدم مبتعدة عنا، حسب «سيلفر» أن هذه السدم كانت تنحسر بسرعات تصل إلى مئات الكيلومترات كل ثانية. وقد كان ذلك دليلًا مهمًا على أن السدم لم تكن ببساطة سحب نجمية صغيرة تدور حول درب التبانة، لكن الدليل الدامغ جاء من قياسات هابل للنجوم المتغيرة القيفاوية (انظر صفحة 223).

الخط الزمني

1912م	1922م	1927م	1929م
اكتشف «سيلفر» الانزياح الأحمر الكبير للكثير من السدم الحلزونية.	وجد «فريدمان» حلًا للنسبية العامة يتوسع فيه الكون.	تنبأ «لوميتر» بأن المجرات الأبعد ينبغي أن تظهر انزياحًا أحمر أكبر.	حدد هابل العلاقة بين الانزياح الأحمر والمسافة.

النظرية والممارسة

في عام 1915 نشر «آينشـــتاين» نظريته النســبية العامة (انظر صفحــة 289). لقد اجتازت الاختبارات الأولية بنجاح منقطع النظير إلا أنها ســببت مشــكلة كبيرة في نظريات الكون: فطبقًا لأبسط تفسير فإن وجود كميات كبيرة من الكتلة في الكون حتماً سيؤدي إلى انهيار الكون على نفسه.

كان هناك إجماع علمــي على أن الكون قديم بلا حدود وأنه ثابت، لذا حل «آينشـــتاين» المشــكلة عن طريق إضافة ما يســمى بـ«الثابت الكوني» إلى معادلاته. وهــذه القوة الضعيفة المضــادة للجاذبية لا تعمل إلا على الأحجام الكبيرة وذلك لمواجهة الانكماش في الفضاء، وقد سمى ذلك في وقت لاحق بخطئه الأكبر على الرغم من أن الاكتشاف الأحدث للطاقة المظلمة برر هذه الفكرة إلى حد ما (انظر صفحة 282).

وفي عام 1922، جاء عالم الفيزياء الروسي «ألكســندر فريدمــان» بحل بديل لمعادلات آينشتاين، وأوضح أن كليهما صحيح بالمقدار نفسه إذا كان الزمكان في توسع، لكن عمله قوبل بالتجاهل إلى حد كبير بســبب عدم كفاية الأدلة التي تدعم ذلك. وبعد بضع سنوات، في عام 1927 وصل عالم الفلك البلجيكي والكاهن «جورج لوميتر» إلى اســتنتاجات مشابهة، لكنه توقع بشــكل حاسم نتيجة الرصد: ينبغي أن تكون جميع المجرات في تباعد عن بعضها البعض على أوسع نطاق وأن المجرة كلما كانت أبعد كانت سرعة انحسارها عن درب التبانة أكبر.

1931م

ذهب «لوميتر» إلى أن توســع الكون يشــير إلى أن الكون قد بــدأ من ذرة بدائية عالية الحرارة.

1958م

قدّم «ساندايج» أول تقدير حديث لثابت هابل.

2000م

نــشر نتائــج مــشروع هابل الرئيسي.

يبــدو أن عمل «فريدمــان»، و«لوميتر» لم يؤثر مباشرة على «هابــل» عندما بدأ في أواخر العشرينيات في مقارنة قياساته لمسافات المجرة مع الانزياحات الحمراء التي سجلها «سيلفر»، وزميل «هابل» الذي يدعى «ميلتون هامسون». بيد أنه سرعان ما اكتشف العلاقة الدقيقة التي تنبأ بها «لوميتر». وفي عام 1929 نشر دليله، متضمنًا رسـمًا بيانيًّا يبين العلاقة بين سرعة المجرة والمســافة. وتعرف هذه العلاقة الآن بقانون هابل، بينما يعرف تدرج الرســم البياني ـ المعدل الذي تزيد به سرعة انحسار المجرة مع المسافة ـ باسم ثابت هابل (يرمز له بالرمز H_0).

معنى التوسع

«النظريات تنهار، أما الملاحظات الجيدة فلا تتلاشى أبدًا.»

هارلو شابلي

كان لاكتشاف هابل آثار ضخمة على تاريخ الكون على الرغم من أن هابل نفسه كان بطيئًا في تبني هذه الاكتشافات (انظر الجدول صفحة 247). إذا كان كل شيء في الكون يبتعد عن درب التبانة فإن هناك احتمالين.

أن منطقتنا الفضائية على نحو فريد لا تحظى بشــعبية لدرجــة أن المجرات تهرب مبتعدة عنها أو أن الكون ككل يتوســع، وأن جميع المجرات داخله تحمل بعيدًا عن بعضها البعض كما توقــع «لوميتر». لم يأخذ أي عالم فلك الاختيــار الأول على محمل الجد، حيث أنه ينطوي على أن لنا موقعًا متميزًا في الكون (وهو ما يتعارض مع الدروس القاســية التي تعلمناها منذ زمن كوبرنيكوس). لكن الاقتراح الذي حمله الكون المتوسع في طياته، والذي له أصل في القياسات الماضية، كان تقريبًا غير مريح لعلماء الفلك الذين آمنوا عمومًا بأزلية الكون. وقد كان «لوميتر» هو الذي تبناها تمامًا عام 1931، وقال إن توســع الكون ينطوي على أن الكون الذي كان أكثر حرارة وكثافة في الماضي نشأ في النهاية من «ذرة بدائية». وقد كان ذلك مقدمة لنظرية الانفجار العظيم (انظر صفحة 250).

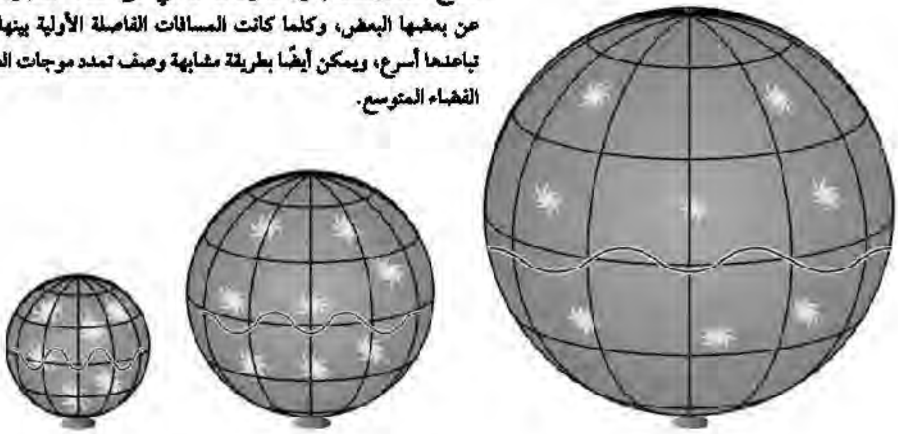
مع اكتشاف إشـــعاع الخلفية الكونية الميكروي عام 1964 (انظر صفحة 271) اعتبر معظم علماء الكونيات أن قضية الانفجار العظيم قد أثبت، وقد احتل القياس الدقيق لثابت هابل الآن أهمية جديدة حيث أن معدل التوسع في الوقت الحاضر يمكن قلبه رأسًا على عقب لتقدير عمر الكون. وبتحسن تكنولوجيا الرصد تحسنت القدرة على الكشف عن النجوم المتغيرة القيفاوية في المجرات الأبعد (والقدرة على التمييز بين النجوم المتغيرة القيفاوية، وشبيهات متغير

خطأ هابل

كان اكتشـاف «إدوين هابل» للعلاقة بين الانزياح الأحمر وبعد المجرة في غاية الأهمية، لكن هابل نفسه رفض تمامًا فكرة أن الكون في توسع. ففي الوقت الذي أجرى فيه قياساته، لم يكن علماء الفلك يميزون على نحو كامل بين «النجوم المتغيرة القيفاوية الكلاسيكية» (نجوم الجمهرة الأولى التي تحتوي على كميات كبيرة من العناصر الثقيلة) والمجموعة الأكثر خفوتًا قليلًا وهي نجوم الجمهرة الثانية (بعلاقتها المميزة بين الفترة واللمعان) وقد أدى ذلك بهابل إلى التقليل بشكل كبير من المسافات بين المجرات (على سبيل المثال، وضع مجرة المرأة المسلسلة على بعد 900,000 سنة ضوئية في حين أن القياسات الحديثة تقترح أنها على مسافة 2.5 مليون سنة ضوئية).

ونتيجة لذلك بالغ هابل في تقدير معدل زيادة الانزياح الأحمر مع المسافة ومن ثم حسب أنه إذا كانت الانزياحات الحمراء ناتجة عن تأثير دوبلر فإن الانحسار لا بد أن يكون في تزايد مع المسافة بسرعة 500 كم/ ثانية/ مليون فرسخ فلكي. وبتقفي أثر هذا التوسع إلى الوراء في الوقت سنرى أن جميع المجرات تتزامن في النقطة نفسها في الفضاء (ذرة لوميتر البدائية) منذ 2 مليار سنة فقط. ولما كان ذلك مساويًا لنصف عمر كوكب الأرض المعروف آنذاك فإن هابل رفض تفسير دوبلر لصالح أفكار افتراضية أخرى، مثل مفهوم الضوء «المتعب» الذي يتزايد انزياحه الأحمر عبر المسافات الكبيرة نتيجة لتأثيرات أخرى.

الشلياق العاشر التي تشبهها على نحو مضلل)، وفي عام 1958 نشر «آلان ساندإج» تقديرًا محسنًا إلى حد كبير لـ«ثابت هابل» مشيرًا إلى أن معدل انحسار المجرات البعيدة زاد بمقدار 75 كم لكل ثانية لكل مليون فرسخ فلكي من المسافة (الفرسخ الفلكي وحدة تكافئ 3.26 مليون سنة ضوئية).



من المماثلات الشائعة عند التفكير في توسع الكون تخيل الفضاء كبالون متنفخ. عندما يتمدد البالون تتحرك النقاط التي على سطحه (المجرات) متباعدة عن بعضها البعض، وكلما كانت المسافات الفاصلة الأولية بينها أكبر كان تباعدها أسرع، ويمكن أيضًا بطريقة مشابهة وصف تمدد موجات الضوء بفعل الفضاء المتوسع.

وقد كانت هذه القيمة تقريبًا سدس القيمة التي حسبها هابل (انظر المربع في الصفحة السابقة) وتعني ضمنًا أن عمر الكون ظاهريًا كان أكثر بكثير 13 مليار سنة.

على مدى العقود القليلة التالية تقلبت قياسات ثابت هبل كثيرًا حول قيمة ساندإج بين حوالي 50 إلى 100 كم/ ث/ مليون فرسخ فلكي، مما يعني ضمنًا أن الكون يتراوح عمره بين 10 و20 مليار سنة. كانت تسوية هذه المسألة هي «المشروع الرئيسي» لتلسكوب هابل الفضائي، وقد دفعت تصميم التلسكوب من بدايته في السبعينيات حتى إطلاقه في عام 1990. وبين الملاحظات رفيعة المستوى قضى تلسكوب هابل الفضائي الكثير من عقده الأول في جمع البيانات وقياس منحنيات ضوء النجوم المتغيرة القيفاوية في المجرات

حتى حـــــوالي 100 مليون سنة مما أدى إلى نشر نهائي في عام 2000 بقيمة 72 كم / ساعة/ مليون فرســـخ. وقد تراوحت قياسات أخرى حول القيمة نفسها مما أدى إلى حساب أن عمر الكون 13.8 مليار سنة وهو مقبول على نحو واسع.

الفكرة الرئيسة

الكون يتوسع في كل لحظة

41

الانفجار العظيم

The Big Bang

فكرة أن الكون بــدأ بانفجار هائل منذ حوالي 13.8 مليار ســنة هي الدعامة الأساســية لعلم الكونيات الحديث، وهي مفتاح تفســير الكثير من الجوانب الملاحظة في الكون. لكن عندما طرحت فكرة الكون المحدود لأول مرة كانت محرمة في نظر الكثيرين من أعضاء المؤسسة العلمية.

على الرغم من أن الفيزيائي الروسي «ألكســـندر فريدمان» أوضح في بدايات عام 1922 أن فكرة توســـع الكون متسقة مع نظرية آينشتاين النســـبية العامة (انظر صفحة 245) إلا أن الفضل في نظرية الانفجار العظيم عادة ما ينسب إلى الكاهن البلجيكي «جورج لوميتر» الذي نـــشر نظريته «الذرة البدائية» عام 1931. للوهلة الأولى قد يبدو غريبًا على كاهن كاثوليكي أن يسهم مساهمة أساسية كهذه في الفيزياء الحديثة، لكن «لوميتر» كان قد درس علم الكونيات في كامبريدج على يد «آرثر إدينجوتن»، وفي هارفرد مع «هارلو شـــابلي». وقد دعم توسع الكون قبل أن يثبته «إدوين هابل» بكثير.

الخط الزمني

1931م	1948م	1948م
أوضح «لوميتر» أن التوســع الكوني يبرهن على أن الكون نشــأ من ذرة بدائية ســاخنة كثيفة.	أوضح «ألفــير وجامو» كيف أن الظــروف في الكون في وقت مبكر يمكن أن تؤدي إلى تكون عناصر.	توقَّع «ألفير»، و«هيرمان» وجود إشعاع من حواف الفضاء كنتيجــة لنظرية الذرة البدائية.

النظريات المتنافسة

لمدة ثلاثة عقود، اعتبرت نظرية «لوميتر» ليست إلا واحدة من عدة تفسيرات متنافسة لتوسع الكون، ولأن «فريدمان» لم يكن قادرًا على تقبل مفهوم لحظة الخلق، جادل مؤيدًا لفكرة أن الكون دوري ومر بمراحل متناوبة من التوسع والانكماش. وفي الأربعينيات، في هذه الأثناء، نشر «هيرمان بوندي»، و«توماس جولد»، و«فريد هويل» حججًا مؤيدة لفكرة كون «في حالة مستقرة»- وهو كون متوسع بشكل دائم، حيث يتم إنشاء المادة باستمرار للحفاظ على كثافة ثابتة. وفي عام 1948، تنبأ عالما الفيزياء «رالف ألفير»، و«روبرت هيرمان» بأن كرة «لوميتر» النارية البدائية من شأنها أن تكون قد خافت وهجًا قابلًا للكشف مكافئًا للإشعاع الصادر من جسم أسود درجة حرارته أعلى ببضع درجات من الصفر المطلق، وليس معقولًا أن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي قد نشأ بفعل أي من النظريات المنافسة، واكتشافه عن طريق المصادفة إلى حد ما على يد «أرنو بنزياس»، و«روبرت ويلسون» في عام 1964 كان دليلًا دامغًا على لحظة الخلق في «الانفجار العظيم» (انظر صفحة 271).

«حساباتك صحيحة لكن فيزياءك فظيعة.»

ألبرت آينشتاين لجورج لوميتر

إن التحدي الذي يواجه أيًا من نظريات الخلق هو إنتاج كون له ظروف مماثلة لتلك التي نراها اليوم، وهنا أثبتت نظرية الانفجار العظيم جدارتها قبل اكتشاف «بنزياس»، و«ويلسون».

1949م
صاغ «هويل» مصطلح «الانفجار العظيم» باعتباره إهانة للنظرية.

1964م
اكتشف «بنزياس»، و«ويلسون» إشعاع الخلفية الكونية الميكروي.

1981م
اقترح «آلان جوث» أن التضخم وسيلة لإنتاج البنية الملاحظة في الكون.

1992م
رسم مسبار كوبي الفضائي خريطة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، مما أدى إلى إثبات وجود بنية في الكون في العصور المبكرة جدًا.

ويكمن الدليـــل الرئيسي في حقيقة أن الكتلـــة والطاقة متكافئتان ويمكـــن أن تتبادلا في الظروف القصوى، وهي حقيقة متضمنة في معادلة آينشـــتاين الشـــهيرة (الطاقة تساوي الكتلـــة مضروبة في مربع سرعة الضوء) (انظـــر صفحـــة 287). ومن ثم فإنه إذا تـــم اقتفـــاء أثر توســـع الكون منذ العصور المبكرة فإن ارتفاع درجة الحرارة سيشهد تفكك المادة إلى الجسيمات المكونة لها وفي النهاية تختفي في عاصفة من الطاقة الخالصـــة. في عـــام 1948، نشر «رالف ألفـــر»، و«جـــورج جامو» ورقة تاريخية تبين كيف يمكن أن يســـفر التناقص من

من طاقة إلى مادة

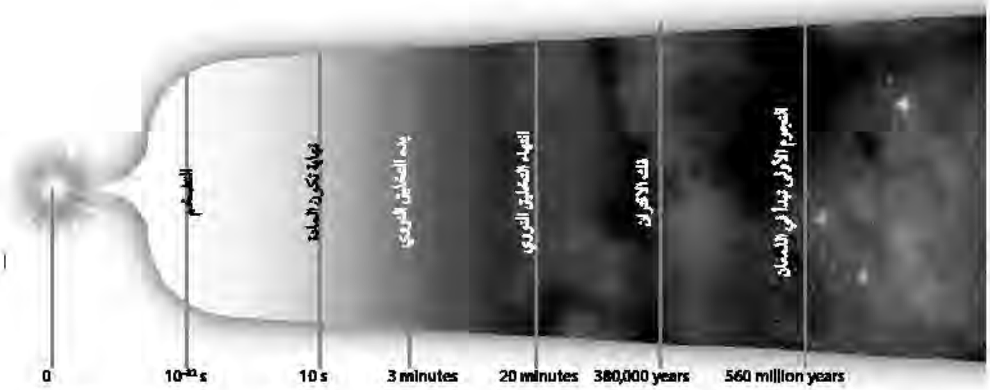
الكثير من فهمنـــا لنظرية الانفجار العظيم، ولا ســـيما الطريقة التي تســـببت فيها الطاقة الخام بسرعة في نشأة المادة مستمدة من التجارب باســـتخدام معجلات الجســـيمات. هذه الآلات الضخمة تستخدم مغناطيسيات كهربية قوية لتعزيز جسيمات تحت ذرية مشحونة لكي تصـــل إلى ما يقرب من سرعة الضوء، ثـــم تصدمها ببعضها البعض وتراقب النتائـــج. إن تصادمات مثل تلك التـــي تحدث في «مصادم هاردون الكبير» في ســـويسرا تحول كميات من المادة إلى طاقة صرفة، والتـــي تتكثف بعد ذلـــك في صورة وابل من الجســـيمات ذات كتل وخصائص مختلفة. وبهذه الطريقة، نعرف أن الجسيمات الثقيلة نسبيًّا والتي تســـمي «كواركات» لم تكن قادرة على التكون إلا في درجات حـــرارة متوهجة لأول مليون جزء من الثانيـــة بعد الانفجار العظيم نفســـه، وبعد ذلك ارتبطت ببعضها في ثلاثيات لتكون البروتونات والنيوترونـــات اللازمة للتخليق النـــووي (انظر صفحة 256). أما جســـيمات لبتون الأخف وزنًا (أساسًـــا إلكترونات) اســـتمرت في التكون إلى أن أصبح عمر الكون 10 ثوان تقريبًا.

ومع ذلك فمن المثير للفضول أنه ليس هناك شيء متأصل في الانفجار العظيم لتفسير السبب الذي يجعل جسيمات المادة «الباريونية» تسود الكون بدلًا من المادة المضادة (جســـيمات طبق الأصل ذات شحنات كهربية معاكسة). في الواقع يعتقد بعض علماء الكونيات أن الانفجار الأولي أنشـــأ كميات متســـاوية من جســـيمات المادة والمادة المضادة، والغالبية العظمى منهـــا اصطدمت لتبيد بعضها البعض في دفعة من الطاقة. أكدت عملية ما غير معروفة لنشأة الباريونات أنه كان هناك زيادة ضئيلة من مادة عادية بقيت في النهاية. وهذا هو المســـؤول عن كل المادة الباريونية الموجودة في الكون اليوم.

كرة النـــار الكثيفة هذه عن عناصر ذات أبعاد مماثلة لتلك المتوقعة في بدايات الكون (انظر صفحة 257).

مشكلة البنية

في حين أن العمل النظري اللاحق، وكذلك النتائج التي جاءت من معجلات الجسيمات في بداياتها (انظر المربع صفحة 253) دعمت فكرة أن العناصر الكونية الخام تكونت في الانفجار العظيم، إلا أن الاكتشـــافات حول بنية الكون في السبعينيات أثارت تساؤلات جديدة. وعلى الرغم من أن هذه التســـاؤلات معقدة إلا أنها اختزلت في اللغز الأساسي وهو: كيف نتج عن الانفجار العظيم كون ســـلس بما يكفي لئلا يظهر اختلافات شاسعة من مكان إلى مكان (على النحو الوارد من درجة الحرارة الموحدة ظاهريًّا القادمة من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي)، لكنها تنوعت بطريقة أو بأخرى بما يكفي لنشأة البنى كبيرة الحجم للتجمعات الفائقة، والخيوط والفراغـــات (انظر صفحة 242). وقد تنبأت نظرية الانفجار العظيم الأساســـية بكرة بدائية نارية كانت المادة فيها موزعة توزيعًا مســـتقرًّا. وحتى بعد حوالي 380000 سنة بعد الانفجار العظيـــم، منعت درجات الحرارة المتوهجة أنوية الذرات مـــن الانضمام للإلكترونات لتكوين الذرات، كما أن الكثافة العالية للجسيمات أدت إلى جعل فوتونات الضوء تحيد وتتشتت مرارًا وتكرارًا مما أدى إلى منعها من الانتقال في خطوط مســـتقيمة (تقريبًا الشيء نفســـه الذي يحدث في الضباب الكثيف). وفي هذه البيئة، يؤدي ضغط الإشـــعاع على الجســـيمات إلى التغلب على الجاذبية ويمنعها من الائتلاف لتشـــكيل بذور البنية اللازمة لنشأة الخيوط الضخمة الموجودة اليوم. وفي نهاية المطاف، بردت حرارة الكون بما يكفي لجعل الإلكترونات والأنوية ترتبط معًا وانخفضت كثافة الجســـيمات وانقشـــع الضباب فجأة. والضوء الذي أفلت من هذا الحدث - المعروف بـــاسم «فك اقتران» الإشعاع بالمادة - يشكل الآن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي.



خط زمني مبسط يوضح المراحل الرئيسية في تطور المادة من الانفجار العظيم نفسه حتى تكون أولى النجوم والمجرات.

من الواضح إذن أن ثمة شيئًا ما كان يحدث. ففي عام 1981، اقترح «آلان جوث» في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا حلًّا ممكنًا: ماذا لو أن حدثًا كارثيًا ما في اللحظات الأولى من الانفجار العظيم كان قد أخذ جزءًا واحدًا ضئيلًا منتظمًا من الكون البدائي ونفخه إلى حجم هائل؟ فقاعة المكان والزمان الناتجة والتي تحيط بكوننا الملاحظ كله وأبعد من ذلك، ستكون درجة حرارتها منتظمة بكفاءة، لكن الاختلافات الضئيلة الناشئة من عدم التأكيدات المتأصلة في فيزياء الكم سوف تنتفخ على نطاق كبير، مما يؤدي إلى نشأة بقع باردة وقليلة نسبيًا جنبًا إلى جنب مع المناطق الأكثر دفئًا والأكثر كثافة. وبمرور الوقت استطاعت الاختلافات الطفيفة أن تعمل بمثابة أنوية تراكمت حولها المادة.

وقد تبنى بحماس العديد الآخرون بمن فيهم «آندري ليندي» نظرية جوث التي سرعان ما أطلق عليها اسم «التضخم» (انظر صفحة 300). وقد ساعدت معقولية نماذجهم على الاعتراف المتزايد بالدور الذي قامت به ما تسمى بالمادة المظلمة والتي ستكون محصنة من ضغط الإشعاع الذي يجبر المادة العادية على التفرق (انظر الفكرة 45) ومن ثم تكون قادرة على بدء تشكل البنية الأولية جيدًا قبل مرحلة فك الاقتران، وقد برزت هذه الفكرة في نمط مذهل

عام 1992 بفعل نتائج مسبار كوبي الفضائي (انظر صفحة 272) وحظيت بدعم المزيد من التجارب الأخرى. وعلى الرغم من أن علماء الكونيات لا يزالون في صراع مع بعض الآثار الأوسع المترتبة على التضخم إلا أنه يشكل عنصرًا أساسيًّا في الانفجار العظيم كما نفهمه اليوم.

الفكرة الرئيسة

بدأ الكون بانفجار طاقة ساخن وكثيف

42

التخليق النووي، ونشأة الكون

Nucleosynthesis and cosmic evolution

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

جميــع المادة في الكون اليــوم مكونة من ذرات، وكل ذرة تتكون مــن نواة ذرية (مجموعة من بروتونات ونيوترونات ثقيلة نســبيًّا) محاطة بســحابة من إلكترونات أخف كثيرًا. وتتميز ذرات العناصر المختلفة عن بعضها البعض بعدد البروتونات الموجودة في النواة بينما يؤثر عدد النيوترونات على اســتقرارها. لذا فإن تصنيع العناصر في الأســاس هو مســألة تكون الأنوية المختلفة في عملية تعرف باسم التخليق النووي.

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

الخط الزمني

1904م

حدد «هارتمــان» وجود غاز بــين نجمي بارد عــن طريق تأثيره على أطياف النجوم.

1930م

أوضح «روبــرت ترامبلر» آثار امتصاص الغبار بين النجمي في درب التبانة.

1948م

أوضحت الورقــة 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 باســم «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 مــن نيوترونات بدأت في الانحــلال تلقائيًا إلى بروتونـات وإلكترونات عندما قل الضغط المحيط.

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

آرثر إدينجوتن

وبالتالي أصبح تشكل أنوية أكثر تعقيدًا من الهيدروجين ســباقًا مع الزمن- كــم عــدد النيوترونات التي تســتطيع البروتونــات اكتســاحها لتكوين نــواة أثقل قبــل أن تنحل النيوترونات نفسها؟.

وعندما نظر «ألفر»، و«جامو» إلى المشــكلة من حيث احتمالات التقاط مختلف الجسيمات للنيوترونات، وجدا أن أكثر العناصر وفــرة في الكون حتى الآن هو الهيدروجين، الذي يمثل 75 ٪ مــن كتلة الكون، والهيليوم الــذي يمثل الـ25 ٪ الباقية وتكونــت كميات ضئيلة من الليثيــوم والبريليوم أيضًا بهذه الطريقة واتضح بعد ذلك أن هذه التوقعات تطابق القياســات الجديدة لوفرة العناصر الكونية. الخطــأ 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 تتفــكك بقدر السرعة التي يمكن أن تتشــكل بها. ومثل هذه الفراغات لا يمكن ســدها عن طريق إضافة جســيمات خطوة في كل مرة، ويعني هذا أن البريليوم المتوســط هو أثقل عنصر يمكــن تكوينه من البداية بهذه الطريقة. وبدلًا مــن ذلك، يتطلب تصنيع عناصر أثقل قفزة في عدد الجسيمات من النوع الذي لا يمكن أن يوفره سوى تفاعل ألفا الثلاثي.

مواد النجوم

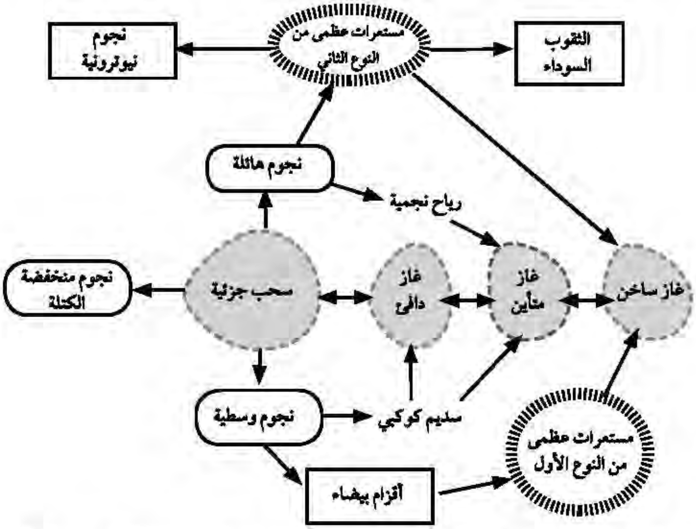
أدى الفهم الأفضل لكيفية تكون العناصر والطريقة التي تتغير بها وفرتها بمرور الزمن إلى نشأة نظرة أكثر انتظامًا بكثير لدورات حياة النجوم وفي الوقت نفسه، كشف عن صورة أعمق للعلاقة بين النجوم والوسط بين النجمي؛ أي المادة التي تحيط بها ومنها تُولَد.

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 نسبيًّا 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 جدًّا 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 تدريجيًّا 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 تدريجيًّا 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

43

النجوم الضخمة والمجرات البدائية

Monster stars and primordial galaxies

الأجرام المبكرة في الكون هي حاليًّا خارج نطاق حتى التلسكوبات الأكثر تقدمًا. ومع ذلك فإن معظم علماء الفلك يؤمنون بالدليل الذي يشير إلى وجود جيل أول من نجوم عملاقة رائعـــة، ولكنها قصيرة العمر؛ حيث موتها العنيف إلى تهيئة الظروف لتشكل المجرات فيما بعد.

أحد الأسئلة المركزية في علم الكونيات هو ما إذا كانت بنية الكون واسع الحجم تكونت من «أســـفل لأعلى» أم من «أعلى لأســـفل». وبعبارة أخرى، هل تكونت الأجرام الصغيرة تقريبًـــا بانتظام ثم انجذبت إلى بعضهـــا البعض عن طريق الجاذبية لتكـــون بنى أكبر، أم أن الاختلافات الأولية في توزيع المادة كبيرة الحجـــم التي توزعت في أعقاب الانفجار العظيم نفسه (انظر صفحة 254) تحكم أين تتجمع المادة؟.

الخط الزمني

1974م	1978م	2002م
اقترح «كاميرون»، و«تروران» وجود نجوم جمهرة ثالثة مميزة.	اقترح «ريس» نجـوم الجمهرة الثالثة باعتبارها مصدرًا ممكنًا للمادة المظلمة (أجرام هالية مضغوطة ثقيلة).	أوضح «بروم»، و«كوبي»، و«لارسون» كيف تغلبت النجوم الأولية على الحدود الحديثة للكتلة النجمية.

من أعلى إلى أسفل أم من أسفل إلى أعلى؟

تشير الدلائل الحالية إلى أن خليطًا من العمليتين متحقق ـ فالاختلافات كبيرة الحجم في توزيع المادة مسؤولة عن الترتيب العام للتجمعات الفائقة للمجرات على شكل خيوط ضخمة حول فراغات خاوية على ما يبدو. وفي الوقت نفسه، البنى الأصغر حجمًا، من المجرات حتى التجمعات، جميعها تنجذب مع بعضها البعض بفعل قوة الجاذبية.

وهذا يطرح سؤال: ما هي أولى البنى صغيرة الحجم التي أصبحت بذورًا للمجرات؟ إن وجود ثقوب سوداء فائقة في مركز معظم المجرات، وهيمنة النجوم الزائفة اللامعة في الكون المبكر يشير إلى سلسلة من الأحداث التي سحبت

مشكلة إعادة التأين

الإشعاع الشديد الصادر من نجوم الجمهرة الثالثة يقدم حلًّا محتملًا لأحد أكبر ألغاز الكون واسع النطاق: وهو مشكلة إعادة التأين. ببساطة، تنشأ المشكلة بسبب أن سحب الهيدروجين الهائلة الموجودة في الفضاء بين المجرّي توجد إما مشحونة كهربيًّا أو متأينة، أي أن ذراتها نزعت منها إلكترونات. لكن وفقًا لنظرية الانفجار العظيم، لا بد أن تكون المادة قد خرجت من كرة نارية بدائية في صورة ذرات غير مشحونة– في الواقع، كانت «إعادة اتحاد» أنوية الذرات مع الإلكترونات هي المرحلة النهائية من الانفجار العظيم نفسه (انظر صفحة 253). يبدو أن عملية ما اضطرت إلى إعادة تأيين الوسط بين المجرات قبل أن تتكون المجرات الأولى، ويعتقد أن الإشعاع فوق البنفسجي عالي الطاقة الصادر من النجوم الهائلة هو المرشح الأرجح.

2003م

وضع «ألكسندر هيجر»، وآخرون نموذجًا للعمليات التي تنهي حياة معظم النجوم الهائلة.

2005م

كشف تلسكوب سبتزر الفضائي وهجًا من الأشعة تحت الحمراء يعتقد أنه ينشأ من نجوم الجمهرة الثالثة.

فيها الثقوب السوداء المادة والتهمت نفسها لتكون النجوم الزائفة، وأثارت موجات من ولادة النجوم في المواد التي تجمعت حولها على مسافة أكثر أمانًا. لكن من أين أتت تلك الثقوب السوداء في المقام الأول؟

لقد فكر علماء الفلك في هذا السيناريو منذ السبعينيات، غالبًا باستخدام نماذج حاسوبية لتوضيح كيف يمكن أن تكون المادة قد انهارت وتجمعت تحت تأثير الجاذبية. وفي حين جادل البعض في أن الثقوب السوداء الفائقة يمكن أن تكون قد تكونت ببساطة من انهيار سحب الغاز في بواكير الكون، أشار آخرون إلى أنها على الأرجح تكونت من اندماج ثقوب سوداء أصغر حجماً خلفها الجيل الأول من النجوم.

الجمهرة الثالثة

إن مقارنة النجوم ذات الأعمار المختلفة في مواقع مختلفة من مجرتنا والكون الأوسع تبين أن نسبة العناصر الأثقل، التي يسميها علماء الفلك بالمعادن داخل المواد الخام لتشكل النجوم قد ازدادت عبر مليارات السنين من تاريخ الكون. وقد تعرف «والتر بادي» على الفرق بين الجمهرة الأولى الشابة الغنية بالمعادن، والجمهرة الثانية الأقدم الفقيرة في المعادن عام 1944، لكن لم تظهر احتمالية وجود جمهرة ثالثة مميزة مكونة بالكامل من عناصر خفيفة تكونت في الانفجار العظيم حتى السبعينيات على يد «إيه جي دبليو كاميرون»، و«جيمس تروران».

وقد أصبحت قضية نجوم الجمهرة الثالثة أكثر إلحاحًا في التسعينيات، بعد أن اكتشف علماء الفلك أنه حتى أكثر النجوم الزائفة والمجرات البدائية بعدًا وأقدمها كانت بالفعل غنية بالعناصر الثقيلة من مصدر سابق ما.

«هذه النجوم هي التي كونت أولى ذرات العناصر الثقيلة التي سمحت لنا في النهاية أن نكون هنا.»

دايفيد سوبرال

في هذا الوقت، بدأ علماء الكونيات دراسة تطور الكون في وقت مبكر عن طريق نماذج حاسوبية. وقد تعقبوا -بدءًا من البيانات القادمة من الأمور غير المنتظمة لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي (انظر صفحة 271)- الطريقة التي تتصرف بها كل من المادة اللامعة والمادة المظلمة غير المرئية (انظر صفحة 286). وقد وجدوا أنه في خلال حوالي 200 مليون سنة من الانفجار العظيم بدأت «مجرات أولية» صغيرة في الاندماج، وباحتواء كل منها على ما يصل إلى مليون كتلة شمسية من الغاز المكون للنجوم في منطقة عرضها بضع عشرات من السنين الضوئية كانت أماكن ميلاد مثالية لنجوم الجمهرة الثالثة.

وضع نماذج للنجوم العملاقة

وفي الوقت نفسه، كان هناك علماء فلك آخرون يضعون نماذج لخواص النجوم نفسها. وسرعان ما أصبح جليًّا أنه بسبب كون غاز المجرة الأولية أكثر دفئًا وأسرع حركة بكثير من الوسط بين النجمي في الوقت الحاضر لزم وجود جاذبية أكبر بكثير لجعله ينهار متحولًا إلى نجم. وبعبارة أخرى،

موت العمالقة

يعتقد أن النجوم الضخمة كتلك التي يمكن أن تكون قد تكونت في الجمهرة الثالثة تموت في نوع فريد من المستعرات العظمى يطلق عليه مستعر فائق الانحلال الضوئي. والانحلال الضوئي هو عملية تحدث إلى حد ما في ألباب جميع النجوم المقيدة بالمستعر الأعظم، ويتضمن تجزئة أنوية الذرات عندما تصطدم بأشعة جاما عالية الطاقة. وهذه العملية عادة تمتص طاقة وتساهم إسهامًا صغيرًا في العملية الكلية للتخليق النووي في المستعرات العظمى، لكن عندما تقترب النجوم التي تزيد كتلتها عن 250 كتلة شمسية من نهاية حياتها يمكن أن يحدث بمعدل متسارع إلى حد كبير. وامتصاص الطاقة يسبب هبوطًا سريعًا في الضغط في لب النجم مما يؤدي إلى نشأة ثقب أسود يلتهم النجم من الداخل. وقد تنتشر نسبة من مادة النجم، الغنية بالعناصر الثقيلة التي تكونت أثناء حياته، من الأقطاب في منفثين بسرعة قريبة من سرعة الضوء، لكن الغالبية العظمى من كتلة النجم يستحوذ عليها الثقب الأسود مما يجعل هذه طريقة محتملة للتكون السريع للثقوب السوداء التي تعادل كتلتها مئات الكتل الشمسية.

أصغر مجموعات ابتدائية مكونة للنجوم ستكون أكثر ضخامة من تلك الموجودة في الكون حاليًا بعشرات أو ربما مئات المرات. وفي الظروف العادية، من شأن ذلك أن يكون طريقًا مؤديًا إلى كارثة وتفكك- فعندما يسخن مركز السحابة المنهارة عن طريق انهيار الجاذبية، فإنه ينبغي له أن يضخ الكثير من الإشعاع لدرجة أن المناطق الخارجية يمكن أن يُعصف بها. لكن في عام 2002، أوضح الباحثون أن الظروف الفريدة للكون في بداياته، مع كون المادة العادية والمادة المظلمة قريبتين وبلا عناصر ثقيلة، استطاعت أن تتغلب على هذه المشكلة مما سمح بتكون نجوم كتلتها تعادل عدة مئات من الكتل الشمسية.

وبمجرد تكون هذه النجوم الهائلة تصبح مستقرة وهادئة على نحو مدهش. وافتقارها إلى العناصر الثقيلة كان من شأنه في البداية أن يكبح جماح عمليات الاندماج النووي فيها ويجعلها عملية بسيطة هي سلسلة تفاعل بروتونات مع بروتونات (انظر صفحة 115) مما أدى إلى تقليل كمية الإشعاع المولد، ومنعها من أن تنفصل. وعلى الرغم من هذا فإن الظروف في اللب كانت تعني أن هذه النجوم ستظل تحترق خلال مخزونها من الوقود الهيدروجيني الذي في اللب في غضون بضعة ملايين من السنين، وتبدأ في تكوين عناصر أثقل بطريقة مشابهة للطريقة التي تفعل بها العمالقة الحمر، والعمالقة الضخمة ذلك في الوقت الحالي. وفي نهاية المطاف، فإن مصادر الوقود هذه تنفد أيضًا، وتلقى النجوم حتفها في مستعر أعظم مذهل أقوى بكثير من أي مستعر أعظم نعرفه في الوقت الحالي (انظر المربع). في العملية، تشتت عناصرها الثقيلة عبر الفضاء المحيط بها مما يؤدي إلى إثراء خليط المادة في المجرات الأكبر والتي كانت بالفعل تتجمع حولها.

تجدر الإشارة إلى أن الكتلة من هذه النجوم الأولى لا تزال موضع جدال. تشير بعض خطوط الأدلة إلى أنها كانت محددة بالكتل الأكثر مماثلة لتلك التي في الكون في الوقت الحالي، وقد يأتي الدليل على النموذج الصحيح من خلال تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لوكالة ناسا،

والذي يأمل في التقاط الضوء من نجوم الجمهـــرة الثالثة هذه لأول مرة بعد إطلاقه لأول مرة في عام 2018.

الفكرة الرئيسة

كانت أولى المجرات الأولية مأهولة بالنجوم الهائلة

44

حافة الكون

The edge of the Universe

ربما يكون الضوء هو أسرع الأشـيـاء لكن سرعته لا تزال محدودة. وهذا يعني أننا عندما ننظر في الفضاء الشاسـع، فإن ما نـراه أيضًا هو الماضي ولأن الكـون له تاريخ محدد، جعلت سرعة الضـوء المحدودة أيضًا حدًّا كونيًّا لا يمكننا أن نرى بعده أبدًا.

لقـد برهنت حقيقة أن الضوء ينتقل في الفضاء بسرعـة 300000 كم/ ث (186000 ميـل/ ث) في القرنين الثامن عشر، والتاسـع عـشر. ولقد لقيت نتائج مجموعـة متنوعة من التجـارب البارعة الدعم نظريًّا من حسـابات عـالم الفيزياء الأسـكتلندي «جيمس كليرك ماكسـويل» الذي أوضح في ورقة بحثية بارزة عام 1864 أن الضوء موجة كهرومغناطيسية- اتحاد من اضطرابات كهربية ومغناطيسية تنتشر في الفضاء بسرعة ثابتة.

لقـد حولت سرعة الضوء المحدودة كوننا إلى آلة زمـن كونية لأن الضوء من الأجرام البعيدة لا بد أن يسـتغرق بعض الوقت حتى يصل إلينا. وفي عام 1676، كانت أول محاولة معقولة لقياس سرعـة الضوء على يد عالم الفلك الدنماركي «أولي رومـر» اعتمدت على هذه الفكرة بعينها،

الخط الزمني

1864م

أثبت ماكسويل سرعة الضوء الثابتة في الفراغ.

1948م

تنبـأ «ألفير»، و«هيرمـان» بأن حافة الكون المنظـور ينبغي أن ينبعث منها إشعاع ضعيف.

1964م

اكتشـف «بنزيـاس»، و«ويلسـون» إشـارات راديوية من إشـعاع الخلفية الكونية الميكروي.

فقد لاحـظ «رومر» تغـيرات في مواقيت الكسـوف حدثـت بسـبب أن الأقـمار الجاليليـة لكوكـب المشتري (انظر صفحة 16) كانـت تـدور حول كوكبهـا الأم، وأعزى تلك التغيرات إلى التغيرات في الوقت الذي يستغرقه الضوء للوصول إلى الأرض بسـبب المواضـع المتغيرة للكوكبين.

الكون المنظور

الحد النهائي على ملاحظتنا للكون يتحدد بالمسافة التي قد تمكن الضوء من قطعها في المدة المقدرة بـ13.8 مليار سنة منذ الانفجار العظيم (انظر صفحة 250). ويقال لهذا الحد، والذي نشـأ فيه إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، حافة «الكون المنظور». يمكن للمرء أن يفترض بالمنطق أنه يقع على بعد 13.8 مليار سنة ضوئية في كل الاتجاهات، إلا أن الواقع أكثر تعقيدًا من ذلك. فتوسـع الفضاء أثناء انتقـال الضوء عبره لم يتمدد وتنزاح أطواله الموجية نحو اللون الأحمر فحسـب بل إنه أيضًا زاد المسافة بين مصدره وكوكب الأرض ولذلك فبينما قد يكون شـعاع الضوء نفسه قد انتقل لمدة 13.8 مليار سـنة، فإن توسع الكون يعني أن مصدره الآن أبعد بكثير عن 13.8 مليار سـنة ضوئية. وفي الواقع، تشير أحدث التقديرات أننا يمكننا افتراضًا أن نرى الضوء من أجرام تبعد حوالي 46.5 مليار سـنة ضوئية ومن ثم فإن هذا هو الحد الحقيقي للكون المنظور.

وفي معظم الحالات، يأخذ علماء الفلك هذا التأثير المعروف باسـم الزمن الرجعي على أنه من المسـلمات، لكن عبر المسافات الكبيرة يكون له بعض الآثار الجانبية المفيدة. عندما ننظر إلى الأجرام

1992م

قاس مسـبار كوبي الفضائي تموجات إشعاع الخلفية الكونية الميكـروي، أول إرهاصات وجود البنية في الكون.

2005م

قدّر «جيه ريتشـارد جوت الثالث» وآخرون قطـر الكون المنظور بحوالي 46.5 مليار سنة ضوئية.

2009م

تم إطلاق قمـر صناعي بلانك التابع لوكالة الفضاء الأوروبية، مما أدى إلى رسم الخرائط إشعاع الخلفية الكونية الميكروي بتفصيل لم يسبق له مثيل.

التـــي تقع على بعد مليارات الســنين الضوئية في الفضاء، فإننا أيضًا نراها منذ مليارات الســنين في التاريخ. انظـــر بعيدًا بما فيه الكفاية وســتجد أن الضوء القادم من المجــرات والذي يصل إلينا في تلسكوباتنا غادر في رحلته الطويلة إلى كوكب الأرض في مرحلة سابقة إلى حد كبير في تطورها. وهذا يفسر الســبب الذي يجعل المجرات النشــطة العنيفة مثل النجــوم الزائفة (انظر صفحة 233) تميــل إلى أن تكون بعيدة جدًا في الفضاء ـ إنها تمثل مرحلة مبكرة جدًا من نشــأة المجرة والتي كانت فيها الثقوب الســوداء الفائقة تتغذى بشراهة أكثر مما تفعل المجرات الهادئة نسبيًا التي نشأت في الوقت الحاضر.

قياس الماضي

«لقد رصدت نجومًا، يمكن إثبات أن الضوء الصادر منها لا بد أن يستغرق 2 مليون سنة ليصل إلى كوكب الأرض.»

ويليام هيرشل

يســتخدم علماء الفلك منذ التسعينيات قدرات فريدة من نوعها لتلســكوب هابل الفضائي للاســتفادة من هذا التأثير، مما يؤدي إلى نشأة سلسلة من «حقول هابل العميقة» التي تجمع بين الضوء الخافت الملتقط عبر الكثير من الســاعات عندما يكون التلسكوب محدقًا بــلا التفات في منطقة فضائيــة وحيدة وفارغة على ما يبدو. وقــد خضعت مناطق مختلفة من السماء إلى الدراسة بهذه الطريقة وجميعها كشفت عن قصة مشابهة- عدد لا يحصى من المجرات تمتد بعيدًا حتى حدود الرؤية. ولا تظهر سوى المجرات الإهليلجية في مقدمة مثل هذه الصور، بينما تظهر النطاقات الوســطى المجرات الحلزونية في عملية التكون. أما المجرات البعيدة فهي المجرات غير المنتظمة بشكل كبير ومضاءة بسبب تشكل النجوم العنيف.

ومع ذلــك، في نهاية المطاف تعاني المجرات الأبعد من انزياحــات حمراء تجعل معظم الضوء الصادر منها ينبعث على هيئة أشــعة تحت حمراء. ويحمل تلسكوب هابل الفضائي أدوات قريبة من الأشعة تحت الحمراء والتي تسمح له بتتبع المجرات وراء حدود الضوء المرئي لكن ليس وراءه كثيرًا،

ولا يزال هناك حد لخفوت المجرات التي تستطيع حتى صور التعرض الطويل لحقل هابل العميق التقاطها. ولذلك فإن أبعد الأجرام التي صورت حتى الآن هي مجرات نادرة (معظمها أشعة تحت حمراء) تم تكبير ضوئها بالتأثير المعروف باسم العدسات التثاقلية (انظر صفحة 289). ومع ذلك، فمن المعتقد عامة أن انفجارات أشعة جاما بالغة القوة لكن قصيرة العمر والتي تصل إلى الأرض أحيانًا من جميع أنحاء السماء تنشأ من الأحداث الكارثية التي تقع في المجرات والتي لا يمكن الكشف عنها في الوقت الحاضر (انظر صفحتي 188، و200).

تلسكوب جيمس ويب الفضائي لوكالة ناسا، خليفة هابل للأشعة تحت الحمراء، ينبغي أن يكون قادرًا على تصوير العديد من هذه المجرات القديمة، وأجرام أخرى في الكون المبكر (انظر صفحة 266)، لكن في الوقت الحاضر، تتلاشى حواف الكون في النهاية في ظلام على بعد حوالي 13 مليارسنة - بضع مئات محبطة من ملايين السنين بعد الانفجار العظيم نفسه. لكن لحسن الحظ، ليست هذه تمامًا هي نهاية القصة.

إشارات من الحافة

في عام 1964 أثناء قيام عالمي الفلك الراديوي «آرنو بنزياس»، و«روبرت ويلسون» على هوائي راديو في مختبرات بل للتليفونات بنيو جيرسي وجدا أن نظامهما يعاني من مصدر مجهول من ضوضاء راديوية ضعيفة لكن مستمرة. وبعد التحقيق في جميع مصادر التلوث الممكنة (بما فيها إمكانية وجود انبعاثات من روث الحمام الذي بنى عشه في الهوائي) استنتجا أن الإشارة كانت حقيقية. والأكثر من ذلك أن الضوضاء الراديوية كانت قادمة من جميع أنحاء السماء ومتطابقة مع جسم أسود منتظم (انظر صفحة 91) درجة حرارته تقريبًا 4 كلفن (4 درجة مئوية فوق الصفر المطلق). وقد تطابق هذا تمامًا تقريبًا مع تنبؤ «رالف ألفر»، و«روبرت

هيرمان» عام 1948 الذي قدم تفسيرًا نظريًا بأن أصل «الانفجار العظيم» للكون سيخلف شفقًا من ضوء أساسي من الوقت الذي أصبحت فيه كرة النار المعتمة للكون في مهده شفافة (انظر صفحة 253). وبعد مليارات السنين من انتقال الضوء في الفضاء وصل أخيرًا إلى كوكب الأرض لكن قد حدث له انزياح أحمر إلى الجزء الميكروي من الطيف مما أدى إلى نشأة ما يسمى إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMBR).

خريطة مفصلة لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي من مسبار ويلكينسون لتباين الأشعة الكونية لوكالة ناسا تضم نتائج تسع سنوات من الرصد. المناطق الأفتح لونًا أكثر دفئًا قليلًا من متوسط درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي الذي يبلغ 2.73 كلفن، بينما المناطق الأغمق أكثر برودة قليلًا.

في السنوات التي تلت أول اكتشاف لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي، قام علماء الفلك بتحسين قياساتهم لدرجة الحرارة ووجدوا أنها فعلًا 2.73 كلفن منتظمة (2.73 درجة مئوية فوق الصفر المطلق، أي ما يعادل 270.4- درجة مئوية أو 454.8- فهرنهايت). ومع ذلك أصبح الانتظام الظاهري للإشعاع في حد ذاته مشكلة نظرًا لأنه من الصعب أن يتطابق مع خصائص الكون كما نعرفه اليوم (انظر صفحة 253). في عام 1992، حل مستكشف الخلفية الكونية مسبار كوبي الفضائي هذه المشكلة أخيرًا باكتشاف اختلافات صغيرة (حوالي جزء من 100000) في درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وهذه هي بذور البنى كبيرة الحجم الموجودة في جميع أنحاء الكون المعاصر.

ومنذ ذلك الحين، أصبح إشعاع الخلفية الكونية الميكروي يقاس بدقة متزايدة فأصبح أداة مهمة لفهم الظروف في أعقاب الانفجار العظيم.

الفكرة الرئيسة

كلما رأينا إلى حد أبعد، ازداد عمق نظرتنا إلى الماضي

45

المادة المظلمة

Dark matter

فكرة أن أكثر من 80 ٪ من جميع المادة في الكون ليست فقط مظلمة بل إنها ببساطة لا تتفاعل مع الضوء على الإطلاق هي أحد أكثر الجوانب المحيرة في علم الكونيات الحديث. الدليل على وجود المادة المظلمة دليل دامغ لكن المعلومات بشأن تكوينها الحقيقي لا تزال بعيدة المنال على نحو محبط.

في عام 1933، بعد مدة ليست بطويلة من إثبات وجود مجرات أبعد من درب التبانة، والاعتراف الأولي بتجمعات المجرات باعتبارها بنى مادية (انظر صفحة 238)، قام «فريتز زفيكي» بأولى المحاولات الدقيقة لتقدير كتلة المجرات. وقد حقق في وسائل مختلفة، لكن أكثرها إثارة للاهتمام كان أسلوبًا رياضيًّا يعرف باسم «نظرية فيريال» – وسيلة لتقدير كتلة المجرات في تجمع ما من حركتها وموضعها. وعندما طبق «زفيكي» هذه النظرية على تجمع كوما المعروف، اكتشف أن مجراته كانت تتصرف كما لو كانت كتلتها تساوي 400 ضعف الكتلة التي أشار إليها ضوؤها المرئي. وقد عُزي هذا الاختلاف إلى ما أطلق عليه «المادة المظلمة».

الخط الزمني

1932م	1933م	1975م
حدد «أورت» مشكلات في دوران النجوم حول درب التبانة والتي تعني ضمنًا أن هناك كتلة مفقودة.	استخدم «زفيكي» نظرية فيريال لوزن تجمع كوما، واكتشف كميات ضخمة من المادة المظلمة.	نشر «روبن» دليل وجود المادة المظلمة من دراسة مفصلة لدوران المجرة.

وقد تطابقت فكرة «زفيكي» مع مكتشــفات «جان أورت» الذي كان مشغولًا إلى أقصى حــد بقيــاس دوران درب التبانة (انظر صفحة 209). وقد اكتشــف «أورت» أنه في حين أن سرعة الأجرام التي تدور حول مركز مجرتنا تقل كثيرًا بزيادة المسافة (تمامًا كيفما تدور الكواكب الأكثر بعدًا في نظامنا الشمسي حول الشمس ببطء أكثر) إلا أنها لا تبطئ بالمقدار نفسه الذي قد يتوقعــه المرء إذا كان توزيع درب التبانة يطابق توزيع نجومها. ومن ثم أشــار «أورت» إلى أنه كان هنــاك كمية كبيرة من مادة غــير مرئية تملأ منطقة هالة درب التبانــة، وراء الأذرع المرئية للمجرة الحلزونية عــلى الرغم من هذه التحقيقات المبكرة إلا أن دراســة المــادة المظلمة انقطعت لعدة عقــود بفعل التقــدم في مجالات أخــرى من علم الفلك. وقد بدا أن اكتشــاف ســحب ضخمة من الغاز بين النجمي المرئي في أطوال موجية راديوية- والذي رسم «أورت» بنفســه الكثير منه- قد حل المشكلة بدقة. ثبت أن المجرات، على وجه التحديد، تحتوي على مواد أكثر بكثير مما يشــير الضوء المرئي وحده. وبقيام التلســكوبات التي تحملها الصواريخ وتلسكوبات الأقمار الصناعية بالكشف عن المزيد من الطيف المرئي من الخمسينيات فصاعدًا، ســلط الضوء على المزيد من هذه المادة من ســحب الغبار تحت الحمراء بين النجوم وغاز الأشعة السينية الساخن المحيط بتجمعات المجرات (انظر صفحة 239).

> **«في المجرة الحلزونية، نسبة المادة المظلمة إلى نسبة المادة المضيئة حوالي مضاعفات الـ10 وربما هذا عدد لا بأس به لنسبة ما نجهله إلى ما نعلمه.»**
>
> فيرا روبن

1998م

أكد باحثون يابانيون أن النيوترونات لها كتلة تمثل جزءًا صغيرًا من المادة المظلمة.

2003م

استخدم «ريتشارد ماسي»، وآخرون العدسات التثاقلية لقياس توزيع المادة المظلمة فيما يسمى بتجمع الطلقة.

إعادة اكتشاف المادة المظلمة

وبالتالي بقيت المشكلة مهملة حتى عام 1975 عندما نشرت عالمة الفلك الأمريكية «فيرا روبن» نتائج تحقيقها المضني الجديد في مشكلة دوران المجرة. وقد وجدت أنه حتى عندما أخذ الغاز بين النجمي والغبار في الحسبان فإن مدارات النجوم لا تزال لا تتصرف كما ينبغي. كانت أرقام «زفيكي» خارج الحدود إلى حد كبير لكـــن بدت المجرات تتصرف وكأنها تزن حوالي 6 أضعاف المادة المرئية داخلها أو أكثر.

كانت مزاعم روبن مثيرة للجدل بشكل مفهوم، ولكن عملها كان دقيقًا وعندما تم تأكيد ذلك بشكل مســـتقل في عام 1978، حول معظم الفلكيين انتباههم من مسألة ما إذا كانت المادة المظلمة موجودة، إلى ما يمكن أن تكون هذه المادة وكيف يمكن دراستها.

اندرجـــت معظـــم محـــاولات تفســـير المادة المظلمة تحـــت فئتين: إما أنهـــا ناتجة عـــن كميات كبيرة من المـــادة العادية التي لا نســـتطيع ببساطة رؤيتهـــا لأنهـــا بالـــكاد تنبعث منها إشـــعاعات (تســـمى المـــادة المظلمة الباريونيـــة) أو أنها ناتجة عن شـــكل مـــا جديد وغريب من المادة (المادة المظلمة غير الباريونية).

المادة المظلمة، والانفجار العظيم

وهناك خط آخر من الأدلة يشـــير إلى وجود المـــادة المظلمة غير الباريونية- نظريـــة الانفجار العظيم نفســـها. لا يطابق نموذج التخليق النووي للانفجار العظيم لتكون العناصر بدقة نســـب المادة البريونية المرئية في الكون المبكر (دون أن تدع مكانًا للأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة (MACHOs) فحســـب بل إن شكل من من جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة يلزم لتفسير تكون البنية في الكون نفســـه. التغيرات الصغيرة في إشـــعاع الخلفية الكونية الميكـــروي (انظر صفحة 271) تشـــير إلى أن تركيزات من المادة والكتلة كانت قد بدأت في التكون في الكون في وقت مبكر جدًّا، جيدًا قبل أن تصبح شـــفافة (انظر صفحة 253) التفاعلات مع الضوء كان من شـــأنها أن تخلق ضغط إشعاع منع المادة الباريونية مـــن التجمع حتى بعد تلاشي الكرة النارية الأولية (انظر صفحة 253). ولحسن الحظ، كانت المادة المظلمة بالفعل قادرة على بدء بناء إطار تكونت حوله فيما بعد تجمعات المجرات الفائقة.

في الثمانينيات، صاغ الباحثون مختصرات جذابة للمرشحين الأكثر احتمالًا- أجرام هالية مضغوطة ثقيلة باريونية، وجسيمات التفاعل الضعيف الضخمة غير الباريونية.

الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة (MACHOs) هي تراكمات صغيرة لكن كثيفة من المادة العادية يعتقد أنها تدور في هالات المجرة. وقد تضم الكواكب الضالة الافتراضية، والثقوب السوداء، والنجوم النيوترونية الميتة، والأقزام البيضاء التي بردت. ومثل هذه الأجرام يمكن أن تكون قد خرجت على نحو كبير عن قدرة التلسكوبات القديمة على كشفها، ويمكن أن تمثل نسبة كبيرة من الكتلة. ومع ذلك أتاحت التحسينات في تكنولوجيا التلسكوبات والتقنيات الجديدة البارعة دراسات استقصائية مكثفة في منطقة الهالة المجرّية في التسعينيات، وعندما اكتشفت بعض الأجرام الضالة استنتج الباحثون أنها ببساطة لا توجد بالأعداد التي تجعلها تساهم مساهمة كبيرة في المادة المظلمة.

البحث عن جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة

مع رفض الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة (MACHOs)، بقي علماء الفلك وعلماء الكونيات مع فكرة جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة الغريبة غير المستقرة- مادة شبحية توجد بطريقة ما بالتزامن مع المادة الباريونية اليومية لكن نادرًا ما تتفاعل معها. جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة لا تمتص الضوء أو تشتته أو ينبعث منها ضوء، وقد تمر في خط مستقيم خلال ذرات المادة العادية كما لو كانت غير موجودة. والسبيل الوحيد إلى رؤيتها هو من خلال تأثيرات الجاذبية الخاصة بها على الأجرام.

والخطوة الأولى المهمة لفهم جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة هي قياس توزيعها بالنسبة للمادة العادية: هل هي باردة ومعلقة في ارتباط وثيق مع الأجرام اللامعة أم أنها حارة

تحلق عبر مسافات كبيرة ولا تحتفظ سوى بأقل ارتباط مع الكون المرئي؟ منذ التسعينيات يطور علماء الفلك أسلوبًا جديدًا لقياس وزن المادة المظلمة وحتى رسم خريطة لها باستخدام العدسات التثاقلية، أي الطريقة التي تنحني بها التجمعات الكبيرة من المادة مثل تجمعات المجرات وتشوه الضوء القادم من الأجرام البعيدة (إحدى عواقب نظرية النسبية العامة، انظر صفحة 289).

ومن المفارقات أن «زفيكي» كان يدعم استخدام العدسات التثاقلية لوزن المجرات في وقت مبكر من عام 1937، أكثر من 40 سنة قبل اكتشاف أول أمثلة لهذه الأجرام.

من خلال مقارنة قوة تأثيرات العدسة (التي تسيطر عليها المادة المظلمة) مع الضوء المنبعث من المادة المرئية، اكتشف الباحثون أن الاثنين يميلان إلى توزيعات مماثلة، مما يشير إلى أن المادة المظلمة الباردة هي النوع المهيمن. المادة المظلمة الساخنة بما فيها النيوترينات (الشكل الوحيد الذي اكتشف تجريبيًا من جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة- انظر المربع) تسهم إسهامًا

مساهمة النيوترينو

تتطابق خصائص جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة جيدًا مع خصائص النيوترينات، وهي جسيمات تبدو عديمة الكتلة، تنبعث أثناء تفاعلات نووية معينة والتي يستخدمها علماء الفلك في فحص النجوم من الداخل وكإنذار مبكر للمستعرات العظمى الأولية (انظر صفحة 187). ترصد النيوترينات على أفضل وجه باستخدام أجهزة الكشف عن أعماق الأرض، والتي تعتمد على تفاعلات نادرة بين النيوترينات والمادة الباريونية التي تنتج ناتجًا قابلًا للقياس مثل ومضة ضوء باهتة. في عام 1998 استخدم باحثون في مرصد نيوترينات «سوبر كاميوكندي» باليابان هذا الأسلوب لتحديد الظاهرة التي تسمى التذبذب، والتي فيها تتنوع النيوترينات بين ثلاث «نكهات» مختلفة. طبقًا لفيزياء الجسيمات، يمكن أن يحدث ذلك فقط إذا كانت النيوترينات في الحقيقة تحمل كميات صغيرة من الكتلة على الرغم من أنها على الأرجح أقل من 1 في المليار من ذرة الهيدروجين.

ضئيلًا نسبيًّا. لكن على الرغم من هذه النجاحات، فإن سر طبيعة المادة المظلمة نفسها تجعل من المرجح أن تخضع للحل عن طريق البحث في معجلات الجسيمات مثل مصادم الهادرون الكبير أكثر من الرصد التلسكوبي.

الفكرة الرئيسة

يتكون 80 ٪ من الكتلة في الكون من مادة غامضة غير مرئية

46

الطاقة المظلمة

Dark energy

اكتشاف أن توسع الكون يتسارع بدلًا من أن يتباطأ هو أحد الاكتشافات العلمية الأكثر إثارة في العصر الحديث. لا يـزال علماء الفلك غير متأكدين بالضبط ما هي الطاقة المظلمة، لكن الحلول الممكنة لها آثار ضخمة على فهمنا للكون.

عندما أطلقت وكالة ناسا تلسكوب هابل الفضائي في أبريل عـام 1990، كان مشروعه الأساسي أو «الرئيسي» هو تحديد ثابت هابل (معدل توسع الكون) ومـن ثم عمر الكون، عن طريق توسيع نطاق الاستخدام الموثوق به للنجوم المتغيرة القيفاوية كشموع قياسية (انظر صفحة 223) إلى مسافات لم يسبق لها مثيل. وقد أسفر ذلك في نهاية المطاف عن تحديد عمر مقبول على نطاق واسع للكون يقدر بحوالي 13.8 مليار سنة.

المستعرات العظمى الكونية

في منتصف التسعينيات، قاد فريقان منفصلان أسلوبًا جديدًا لقياس المسافات بين المجرات باستخدام المستعرات العظمى من النوع Ia كـ«شموع مقياسية» بهدف التحقق من نتائج هابل.

الخط الزمني

1915م	1929م	1998م
أضاف «آينشتاين» حد «الثابت الكوني» إلى النسبية العامة من أجل الإبقاء على الكون ثابتًا.	أظهر اكتشاف توسع الكون أن استخدام الثابت الكوني أمر زائد.	قدّم فريقان من علماء الفلك دليلًا على أن الكون في توسع.

نظريًا، هذه الأحداث النادرة– التي تثار عندما يتجاوز قزم أبيض في نظام ثنائي قريب حد شاندراسيخار، ويدمر نفسه في انفجار للطاقة (انظر صفحة 199)– دائمًا تطلق كمية الطاقة نفسها وينبغي دائمًا أن تظهر ذروة اللمعان نفسها. والحد الأقصى للسطوع كما يرى من كوكب الأرض يسفر بسهولة عن مسافة المستعر الأعظم. والتحدي الرئيسي هو أن هذه الأحداث نادرة الحدوث للغاية، لكن كلا الفريقين كان قادرًا على استخدام تكنولوجيا بحث مميكن لمسح مجموعة من المجرات البعيدة للتنبيه بالعلامات المبكرة للسطوع والإمساك بها قبل أن تصل إلى حدها الأقصى فكرة كلا المشروعين– «فريق البحث عن المستعرات العظمى العالية – الانزياح»، و«مشروع المستعر الأعظم الكوني» ومقرها في كاليفورنيا– كانت مقارنة المسافات المستقلة من قياسات المستعر الأعظم بتلك التي ينطوي عليها قانون هابل (انظر صفحة 245). وفي المجمل، حصد الفريقان بيانات 42 مستعرًا أعظم عالي الانزياح بمسافات قدرها عدة مليارات من السنين الضوئية، و18 أكثر في الكون القريب

في عام 1994 التقط تلسكوب هابل الفضائي صورة لمستعر أعظم من النوع الأول (أسفل اليسار) في المجرة القريبة نسبيًا NGC 4526 على بعد 50 مليون سنة ضوئية من كوكب الأرض كانت قريبة جدًا لدرجة أنها لم تتأثر بالطاقة المظلمة.

1998م

صاغ «مايكل تيرن» مصطلح «الطاقة المظلمة» لوصف التسارع الكوني الغامض.

2011م

تم منح «بيرلموتر»، و«شميت»، و«رايس» جائزة نوبل في الفيزياء.

2013م

أظهرت بيانات «بلانك» أن الطاقة المظلمة تمثل 68.3 ٪ من كل الطاقة الموجودة في الكون.

ولأن قياساتهما امتدت إلى ما أبعد نسبيًّا من النطاق المحلي للمشروع الرئيسي لهابل توقع علماء الفلك أن يجدوا دليلًا على أن توسع الكون قد أبطئ قليلًا منذ الانفجار العظيم. وفي هذه الحالة يكون البعد الفعلي لأبعد المستعرات العظمى أقل من ذلك الذي أشار إليه الانزياح الأحمر، ومن ثم تبدو أكثر سطوعًا مما كان متوقعًا.

«ينبغي أن يكون علماء الفلك قادرين على طرح أسئلة أساسية بدون معجلات (الجسيمات).»

سول بيرلموتر

ما لم يتوقعه أحد أن العكس كان هو الصحيح، فالمستعرات العظمى الأبعد بدت باستمرار أكثر خفوتًا مما تنبأ انزياحها الأحمر. وقضى علماء الفلك شهورًا في التحقيق في الأسباب الممكنة للاختلاف قبل أن يعرضوا نتائجهم على المجتمع الأوسع نطاقًا عام 1998. وقد كان الاستنتاج الذي لا مفر منه أنه عند أخذ العوامل الأخرى في الاعتبار، فإن المستعرات العظمى البعيدة من النوع الأول هي حقًّا أكثر خفوتًا مما كان متوقعًا مما يعني أن توسع الكون لا يتباطأ مع مرور الوقت، بل يتسارع. وأصبحت هذه النتيجة المذهلة الآن مدعومة بالدليل من عدة نهوج أخرى، بما فيها قياسات مفصلة لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي، ودراسات بنية الكون واسع النطاق. وقد صيغ مصطلح «الطاقة المظلمة» عام 1998 وفي عام 2011 شارك «سول بيرلموتر» من مشروع المستعر الأعظم الكوني جائزة نوبل في الفيزياء مع «بريان شميت»، و«آدم رايس» من فريق البحث عن المستعرات العظمى العالية - الانزياح.

طبيعة الطاقة المظلمة

إذن ما هي الطاقة المظلمة بالضبط؟ طُرحت تفسيرات مختلفة، لكن الشيء الوحيد الذي يمكن أن يتفق عليه الجميع هو، من حيث الطاقة، أن المادة المظلمة هي المكون الرئيسي للكون في الوقت الحاضر. في عام 2013 أشارت قياسات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي من قبل القمر

الصناعي بلانــك لوكالة الفضاء الأوروبية إلى أن المادة المظلمة تمثــل 68.3 ٪ من كل الطاقة في الكون، والمادة المظلمة تشكل 26.8 ٪، والمادة الباريونية العادية تهبط إلى مجرد 4.9 ٪ وفي الوقت نفسه، عقّد اســتمرار التحقيق في المســتعرات العظمى عالية الانزياح الأحمر الأمــور عن طريق بيان أن التوســع كان بالفعــل يتباطأ كما كان متوقعًا في المراحل المبكرة من تاريخ الكون، ولم تفرض الطاقة المظلمــة نفوذهــا إلا في الـــ7 مليــارات ســنة الأخيرة فســببت تزايد معدل التوسع.

وعند ســماع علماء الفلــك للاكتشــاف الجديد، تذكروا الثابت الكوني لأينشتاين. فقد أضــاف عــالم الفيزياء العظيــم هــذا الحــد الإضــافي إلى نظريتــه النســبية العامة من أجل منع الكون (الذي اعتقد

مطاردة طاقة الفراغ

إذا كانت الطاقة المظلمة تفسر أفضل تفسير حقًّا بحقل طاقة كوني ثابت ينتشر في الفضاء فإنه قد يســاعد في حل مشكلة قرن تُعرف باســم كارثة الفراغ. نظرية الكم (فيزياء العالم دون الذري الذي فيه تكون الموجات والجســيمات متبادلة، وفيه التأكيدات المألوفة تحل محلها الاحتمالات) تتنبأ بأن أي منطقة فارغة تحتوي مع ذلك على «طاقة فراغ». وهذا يســمح لها تلقائيًّا بإنشاء أزواج افتراضية من الجسيمات ومضادات الجسيمات للحظة وجيزة.

ويمكن التنبؤ بقوة هذه الطاقة من مبادئ معروفة في فيزياء الكم، ووجود جســيمات افتراضية تظهر في الوجود وتختفي حولنا طول الوقت يمكن إثباته وحتى قياســه عن طريق ظاهرة غريبة تعرف باســم تأثير كازيمير. ومع ذلك فإن القيم المقيســة لفراغ الطاقة أضعف بـــ(10^{100}) مرة على الأقل من التأثــير المتوقع (1 متبوع بـ100 صفــر). فلا عجب إذن من أن طاقــة الفراغ يطلق عليها أسوأ تنبؤ نظري في تاريخ الفيزياء.

للوهلــة الأولى تبدو طاقــة الفراغ مثل نهــج الثابت الكوني نحو الطاقــة المظلمة، وقد يكــون من المذهــل أن الظاهرتــين كانتا مستقلتين. لكن، إذا كان الأمر كذلك فإن الطاقة المظلمة لن تزيد الوضع إلا ســوءًا: فطبقًا لأفضل التقديرات فهي أضعف بحوالي (10^{120}) لدرجة أنها لا تتطابق مع التوقعات!

حينذاك أنه ثابت) من الانهيار على نفسـه (انظر صفحة 245) لكن آينشـتاين ندم على تضمين هذا الحد عندما أثبت بعد ذلك توسـع الكون. ومع ذلك، فالنسخة المعدلة من مفهوم آينشتاين واحدة من الاحتمالات المعقولة المرشـحة للطاقة المظلمة. في هذا النمـوذج، الثابت هو كمية ضئيلة من الطاقة الذاتية لحجم ثابت في الفضاء ولما كانت الطاقة مكافئة للكتلة من خلال المعادلة الشـهيرة (الطاقة= الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء) من ثـم فإن الثابت له تأثير جاذبية تمامًا كأي كتلة، على الرغم من أن هذا التأثير تنافري في هذه الحالة لأسباب معقدة. على الرغم مـن أن محتوى الطاقة لكل كيلومتر مكعـب من الفضاء ضئيـل إلا أن التأثيرات تتراكم عبر مسافات كبيرة، وهي أيضًا تزداد بمرور الوقت مع توسع الكون وحجم الفضاء داخله.

يظهر هذا المخطط الدائري هيمنة الطاقة المظلمة في محتوى الكون من الكتلة والطاقة وفقًا لقياسات عام 2013 من تلسكوب بلانك.

تسمى التفسيرات البديلة الرئيسية المحتملـة بنظريات «القوة الخامسـة» التي لا تنتظم فيها كثافة الطاقة المظلمة في جميع أنحاء الفضـاء لكنها بدلًا من ذلك ديناميـة، وتتراكم في أماكن أكثر من الأخرى مما يتسـبب لها في توسـع أكـبر. وقد طرحت نظريـات متنوعة من هذا النوع، بعضهـا يعامل «القوة الخامسة» على أنها قوة خامسـة للطبيعة ترتب جنبًا إلى جنب مع الجاذبية، والكهرومغناطيسية وقوى الأنوية الذرية.

وأيًا كانت طبيعة الطاقة المظلمة، فإن العلماء سيستمرون في دراسة تأثيراتها في الكون اليوم وفي الماضي. وفي الوقت نفسه، الآثار المترتبة بالنسبة لمستقبل الكون ضخمة ويحتمل أن تقدر عليه موتًا طويلًا باردًا (انظر صفحة 304).

الفكرة الرئيسة

توسع الكون يتسارع، ولكننا لسنا متأكدين من السبب

47

النسبية وموجات الجاذبية

Relativity and gravitational waves

لقد أحدثت نظريتا آينشتاين التوأم: النسبية الخاصة والعامة ثورة في الفيزياء في أوائل القرن العشرين. فبالنسبة لعلماء الكونيات الأكاديميين، قدمت النظريتان أسسًا لفهم طبيعة الكون في حين أنهما بالنسبة لعلماء الفلك التطبيقيين يمكنهما أن تقدما أدوات جديدة لملاحظة تطرفات الكون.

كان «ألبرت آينشتاين» عاملًا أكاديميًا فاشلًا في مكتب براءات الاختراع السويسري عندما نشر في عام 1905 سلسلة مكونة من أربع أوراق بحثية دفعت به إلى الشهرة العلمية، منهما اثنتان تعلقتا بالعالم الذري ودون الذري لكن الزوج الآخر بحث في سلوك الأجسام في حركة غير متسارعة بسرعة قريبة من سرعة الضوء ـ النظرية المعروفة بالنسبية الخاصة. وقد دفعت المشكلات التي تجلت في علم الفيزياء في العقد السابق ـ ولا سيما التساؤلات حول سرعة الضوء آينشتاين للبحث في نقيضي الحركة.

الخط الزمني

1865م	1887م	1905م	1907م
حسب «ماكسويل» السرعة الثابتة للضوء وإشعاع كهرومغاطيسي آخر في الفراغ.	وضع فشل تجربة ميكلسون – مورلي الفيزياء في أزمة.	وضع آينشتاين نظرية النسبية الخاصة وضمّن فيها تكافؤ الكتلة والطاقة.	أوضح «مينكوفسكي» كيف يمكن التعامل مع النسبية الخاصة كتأثير هندسي في الزمكان رباعي الأبعاد.

وكان عالم الفيزياء الأسكتلندي «جيمس كلارك ماكسويل» قد أثبت في عام 1865 أن الضوء له سرعة ثابتة في الفراغ (يرمز إليها بالرمز c) وتساوي حوالي 300000 كم/ ث (186000 ميل في الثانية). وقد افترض علماء الفيزياء في هذا الوقت أن هذه السرعة هي سرعة انتقاله عبر وسط واسع الانتشار بالكامل، وناقل للضوء، وأسموه الإثير المضيء. ومع أساليب القياس الحديثة ينبغي أن يكون من الممكن قياس الاختلافات الطفيفة في سرعة الضوء من اتجاهات مختلفة والتي تسببها حركة الأرض في الإثير.

ولذلك في عام 1887 استنبط «ألبرت ميكلسون»، و«إدوارد مورلي» تجربة جديدة بارعة وحساسة لاكتشاف هذا الفرق. وعندما فشلت تجربتهما وقعت الفيزياء في أزمة وقد طرحت نظريات مختلفة لتفسير النتيجة السلبية لكن لم يجرؤ أحد سوى «أينشتاين» على تقبل النتيجة والنظر في احتمالية ألا يكون الإثير موجودًا حقًّا. وبدلًا من ذلك، تساءل، ماذا لو كانت سرعة الضوء ببساطة ثابتة بغض النظر عن الحركة النسبية بين المصدر والمراقب؟

«يؤدي السعي نحو المطلق إلى العالم رباعي الأبعاد.»

آرثر إدينجوتن

النسبية الخاصة

أعادت الورقة البحثية الأولى لأينشتاين تخيل القوانين البسيطة للميكانيكا بناء على مسلمتين: سرعة الضوء الثابتة، و«مبدأ النسبية» (أي أن قوانين الفيزياء ينبغي دومًا أن تظهر

1915م

نشر آينشتاين نظريته النسبية العامة مبينًا كيف تؤدي الكتلة إلى انحناء الزمكان.

1919م

أثبت «إدينجوتن» تأثير العدسات التثاقلية الناجم عن النسبية العامة.

2016م

أثبت فريق علماء (LIGO) وجود موجات الجاذبية، آخر تنبؤ غير مثبت من تنبؤات النسبية العامة.

كما هـي للملاحظين في الإطارات المرجعيـة المختلفة لكن متكافئة). وبعـد أن أرجأ حالات الجاذبية، أخذ في الاعتبار فقط الحالة الخاصة من الأطر المرجعية العطالية (غير المتسارعة). وفي معظم المواقف اليومية، أوضح أن قوانين الفيزياء ستكون هي نفسها كتلك التي حددها إسحق نيوتـن في أواخـر القرن السابع عشر. لكن عندمـا يكون الراصـدون في إطاريـن مرجعيين مختلفـين في حركة نسـبية بسرعة قريبة من سرعـة الضوء، فإنهما يبدآن في تفسير الأحداث بطريقتين مختلفتـين اختلافًـا جذريًـا. وتشـمل هـذه الآثـار التي تسمى آثارًا «نسبية» انكـماش الطول في اتجـاه الحركـة، وتباطـؤ الزمـن (تمدد الزمن). أما في الورقـة البحثية

العدسات التثاقلية

يحدث تأثير العدسـات التثاقلية عندما تمر أشـعة الضوء القادمة من أجرام بعيدة بالقرب من كتلة كبيرة وتنحرف مساراتها بفعل الزمكان المشوه حولها. وبالنسـبة لجسم كالشمس، لا يكاد التأثير يكون قابلًا للاكتشـاف (الانحرافات في الموضع الظاهري للنجوم التي قاستها بعثة الكسوف لإدينجوتن تصل إلى أقل من واحد من الألف درجة) لكن النتائج لتركيزات أكبر من الكتلـة يمكن أن تكون مذهلة أكثر من ذلك بكثير. وأول جسم متأثر بالعدسات التثاقلية اكتشف في عام 1979 هـو التوأم الزائف- نجم زائف بعيد يصل ضوؤه إلى كوكب الأرض مـن اتجاهين بعـد أن ينحرف حول المجرة المتوسـطة ومنذ ذلك الحين وجد علماء الفلك العديد من الأمثلة على تأثير العدسات التثاقلية- ولا سيما حول تجمعات مجرّية كثيفة التي ينحرف فيها غالبًا الضوء من الجسـم الخلفي العدسي إلى سلسلة من الأنماط الشبكية. ويقدم تأثير العدسـات أداة قوية لرسـم توزيـع الكتلة داخل هذه التجمعات لتعلم المزيد عن وجود المادة المظلمة (انظر صفحة 244) لكـن يمكن أن يكون لها أيضًا تطبيق أكثر مباشرة. تمامًا مثل عدسـة التلسكوب الزجاجية، يستطيع تأثير العدسات التثاقلية أن يزيد من شدة ضوء الأجرام الأبعد مما يؤدي إلى جلب المجرات بالغة الخفوت إلى حدود الرؤية داخل مجموعة من التلسكوبات القوية. وفي الواقع، هذه هي الطريقة التي اكتشف بها علماء الفلك أبعد مجرة مكتشفة إلى الآن، والتي تبعد 13.2 مليار سنة ضوئية.

الثانية لأينشـــتاين فأوضح أن الأجسام التي تتحرك بسرعات نســبية تزداد كتلتها أيضًا، ومن ذلك أثبت أن كتلة الجســم وطاقته متكافئتان مما أدى إلى اســتنتاج معادلته الشهيرة (الطاقة= الكتلة في مربع سرعة الضوء) وفي جميع الحالات، لا تظهر التشوهات إلا للراصد خارج الإطار المرجعي، أما لأي شخص داخله، فيبدو كل شيء طبيعيًا.

النســبية الخاصة مهمة لعلماء الفلك لأنها تعني أنه ليس هنــاك إطار مرجعي محدد لقياس الكــون - أي أنه ليس هناك أي مكان ثابت أو الزمن يمر فيه بسرعة مطلقة. ولم تثبت التأثيرات التي تنبأت بها النسبية الخاصة في تجارب قائمة في كوكب الأرض فحسب بل أيضًا أثبتت فائدتها في تفســير مجموعة متنوعة من الظواهر الفلكية، تتراوح من ســلوك المنافث النسبية (المنبعثة من أقطاب النجوم النيوترونية والمجرات النشطة) إلى أصل مادة الانفجار العظيم نفسه.

إحدى الطرق المشهورة في التفكير في النسبية العامة هي تخيل الزمكان على أنه ورقة من المطاط تحدث الأجسام الضخمة تشوهًا داخلها. وهذا لا يؤثر فقط على مدارات الأجسام لكنه أيضًا يحرف مسار الضوء، مما يؤدي إلى الظاهرة المعروفة باسم العدسات التثاقلية.

من النسبية الخاصة إلى العامة

في عام 1915، نشر «آينشــتاين» نظرية أكثر عمومية والتي حينئذ شملت الحالات التي فيها يكون التســارع متضمنًا. وجاءت الانطلاقة الرئيســية في عام 1907، عندما أدرك أنه نظرًا إلى أن الجاذبية تسبب تسارعًا فإن الشــخص في حالة التسارع الثابت ينبغي أن يلاحظ

بالضبط قوانين الفيزياء نفســها تمامًا مثل الشــخص الذي يقف على ســطح كوكب في مجال جاذبية. بالنســبة لعلماء الفلك، فإن لهذا أثرًا مهمًا: تمامًا مثلما يــرى الراصد الذي يتحرك في صاروخ بتسارع متزايد المسار الذي يتخذه شعاع ضوء منكسر لأسفل، ينبغي للشيء نفسه أن يحدث في مجال جاذبية قوي. وهذا هو الســبب الجذري للظاهرة المذهلة المعروفة بالعدسات التثاقلية (انظر المربع صفحة 289).

وعلى مدى الســنوات الثمانية التالية عمل آينشــتاين على الآثار المترتبة على اكتشافه، متأثرًا بشــدة بأفكار معلمه الجامعي الســابق «هيرمان مينكوفســكي» حول النســبية الخاصة. وكان «مينكوفسكي» قد اســتطلع التشوهات النسبية عن طريق قواعد الهندســة، وتعامل مع الأبعاد المكانية الثلاثة، والبعد الزمني على أنها بنية موحدة أو تفرع زمكاني بداخله يمكن المفاضلة بين كل بعد على حدة وقد تخيل «آينشتاين» الجاذبية على أنها تشوه في الزمكان ووضع معادلات لوصفها.

وقد طبقت ورقته البحثية عام 1915 النظرية الجديدة لتفسير سمات مدار كوكب عطارد الذي لم يمكن تفسيره في ضوء الفيزياء الكلاســيكية، لكن، لأنها نشرت في ألمانيا في ذروة الحرب العالمية الأولى لم يلاحظهــا أحد. إلا أنه في عام 1919 قدم «آرثــر إدينجوتن» إثباتًا رائعًا للنظرية الجديدة، عن طريق قياس تأثير العدسات التثاقلية على النجوم القريبة من الشمس أثناء كسوف الشمس.

موجات الجاذبية

في القرن العشرين، ثبتت صحة النسبية الخاصة والعامة مرارًا وتكرارًا لكن حتى وقت قريب جدًّا بقي تنبؤ رئيسي واحد دون إثبات. موجــات الجاذبية هي تموجات ضئيلة في الزمكان، تظهر كتغيرات على نطاق ذري في أبعاد المكان، وهي تنشأ بفعل الدوران السريع للكتل غير المتماثلة (مثل الثقوب السوداء أو النجوم النيوترونية التي تدور معًا في أنظمة ثنائية- انظر صفحة 200).

إلا أنه في فبراير عام 2016، أعلن علماء أمريكيون أخيرًا اكتشاف تموجات في الزمكان من زوج من ثقبين أسودين مندمجين باستخدام أدوات مرصد مقياس التداخل للأمواج الثقالية في ولايتي واشنطن ولويزيانا. وهذا الاكتشاف لم يثبت فقط نظرية آينشتاين (وفي الواقع يثبت وجود الثقوب السوداء بما لا يدع مجالًا للشك) بل أيضًا يفتح الباب لطريقة قوية جديدة لرصد الكون. ولما كانت موجات الجاذبية تنشأ بفعل الكتلة لا المادة المضيئة فإن مراصد موجات الجاذبية في المستقبل ينبغي أن تكون قادرة على دراسة المادة المظلمة وأن يدققوا حتى خارج حدود عصر فك الاقتران (انظر صفحة 253) لدراسة الأحوال في الانفجار العظيم نفسه.

الفكرة الرئيسة
المكان والزمان متشابكان

48

الحياة في الكون

Life in the Universe

البحث عن حياة خارج كوكب الأرض وذكاء هو أحد أكثر مجالات علم الفلك الحديث تحديًا وإثارة في الوقت نفسه. ولكن، حتى بدون اكتشافات أكثر، فإن وجود كوكبنا الصالح للحياة يطرح سؤالًا مثيرًا للاهتمام: لماذا ينبغي أن يكون الكون قادرًا على دعم الحياة على الإطلاق؟.

لقد شهدت القرون القليلة الماضية ثورة في آفاق الحياة في مجرتنا وفي الكون الأوسع (انظر الفكرتين 12، و26). ولكن السؤال الأكبر هو الذكاء: فدليل وجود حياة خارج كوكب الأرض من شأنه أن يغير فهمنا للكون إلى الأبد، لكن الاتصال بأنواع فضائية مع علمها الخاص بها وتقنياتها وفلسفتها يمكن أن يكون حدثًا أكثر عمقًا وتحويلية.

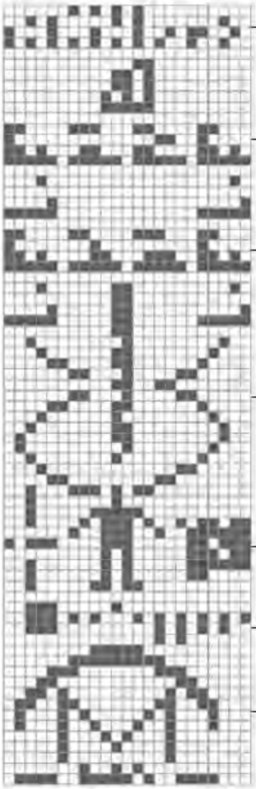
التقاط إشارات من خارج الأرض

وقد نظمت مشاريع مختلفة تهدف إلى اكتشاف علامات للحياة الفضائية منذ أوائل الستينيات. وقد أطلق عليها جميعًا مصطلح «البحث عن ذكاء خارج الأرض»، وهي تركز عمومًا على مسح

الخط الزمني

1960م	1961م	1973م
استخدم «فرانك دراك» تلسكوب جرين بانك الراديوي في أول الأبحاث الحديثة للبحث عن ذكاء خارج الأرض.	صاغ «دراك» معادلة لإيجاد عدد الحضارات في مجرتنا على الرغم من أنها تحتوي على الكثير من العوامل المجهولة.	استخدم «كارتر» مبدأه الأنتروبي لتفسير السبب الذي يجعل الكون صالحًا للحياة.

السماء عند الأطوال الموجية الراديوية بحثًا عن إشارات لا يمكن تفسيرها من خلال الظواهر الطبيعية. على الرغم من أن هذا النهج ربما يكون أفضل نهج لدينا إلا أن له مساوئ واضحة: الإشارات الراديوية، مثل الموجات الكهرومغناطيسية- تنتشر وتتلاشى بسرعة ما لم يتم تسديدها في شعاع موجَّه ضيق مما يعني أننا أساسًا نعتمد على «حضارة اتصال» تبعث بإشارة متعمدة نحو منطقتنا الصغيرة من الفضاء. وقد لا يكون هذا غير مرجح كما يبدو نظرًا لأننا قد نفعل شيئًا مشابهًا جدًّا إذا كنا قد اكتشفنا في أي وقت مضى علامات لحياة على كوكب خارجي والأكثر إشكالية، أن أي مبعوثين فضائيين يجب أن يبقوا الهوائيات الخاصة بهم مشيرة إلى اتجاهنا لمدة طويلة من الزمن، لأن فرص نظرنا في الاتجاه الصحيح في اللحظة الصحيحة باستخدام تلسكوبات مضبوطة على التردد الصحيح صغيرة للغاية.



رسالة آريسيبو (بالأعلى) كانت دفقة من 1679 خانة ثنائية - حاصل ضرب العددين الأوليين 23 و73 . عند وضع الرسالة على شبكة من 23 عمودًا، و73 صفًّا تشكل رسمًا تخطيطيًّا بسيطًا.

1974م

تعاون «دراك»، و«كارل سيجان»، وآخرون لإرسال رسالة آريسيبو الرمزية إلى تجمع نجوم بعيد.

1977م

اكتشف «إيهمان» إشارة راديوية قوية غير متكررة، بدا أنها نشأت من اتجاه القوس.

1986م

أعاد «بارو»، و«تيبلر» صياغة مبادئ الأنثروبيا القوية والضعيفة في شكلها الحديث.

وحتى ولو وقعت مثل هذه الصدفة التي تتسم بالحظ فإنها قد ترفض بسهولة على أنها ضارة ما لم تتكرر. المرشح الأكثر إثارة للإشارة حتى الآن من خارج الأرض – ما تسمى بإشارة «Wow!» التي اكتشفها العالم «جيري إيهمان» من علماء البحث عن ذكاء خارج الأرض في أغسطس 1977 – فشل في هذا المعيار. هذه الدفقة من الموجات الراديوية، المنبثقة من القوس على ما يبدو، لم تتكرر قط على الرغم من العديد من عمليات البحث.

وفي ضوء هذه المشكلات للنهج الراديوي التقليدي، قاد بعض علماء فلك البحث عن ذكاء خارج الأرض أفكارًا بديلة. يدعو «البحث الضوئي عن ذكاء خارج الأرض» إلى البحث عن إشارات أرسلت عن طريق الضوء المرئي، في حين أن داعمي «البحث النشط عن ذكاء

لغز نجم «تابي»

في سبتمبر عام 2015، أعلن فريق من علماء الفلك تقوده «تابيتا بوياجيان» بجامعة ييل اكتشافه لاختلافات في ضوء نجم يسمى KIC 8462852 (وأطلق عليه في وقت لاحق نجم تابي) لا يمكن تفسيرها. اكتشف هذا النجم، الذي يقع على بعد حوالي 1480 سنة ضوئية في كوكبة الدجاجة، كجزء من بحث كيبلر عن الكواكب الخارجية (انظر صفحة 152) لكن الانخفاضات المتقطعة في ضوئه لا يمكن تفسيرها بعبور الكواكب، وبدلًا من ذلك، بدت أنها تشير إلى سرب من الأجرام الصغيرة تدور حوله. ومن ثم بدا التفسير الطبيعي الأكثر عقلانية هو أن هناك عددًا كبيرًا من المذنبات في مسارات إهليلجية بدرجة عالية كانت تمر أمام النجم أثناء رصد كيبلر، لكن كما أوضح عالم البحث عن ذكاء خارج الأرض «جيسون رايت» هذه الانخفاضات يمكن أيضًا أن يكون سببها «كرة دايسون» أو بنية مشابهة يجري تجميعها في المدار. وقد فشلت المسوحات الراديوية في اكتشاف أي إشارات غير عادية قادمة من المناطق المجاورة للنجم، لكن اللغز ازداد غموضًا في بدايات عام 2016 عندما فحص عالم الفلك «برادلي شافر» السجلات التاريخية ووجد أن KIC 8462852 قد خفت في سطوعه بنسبة 20٪ منذ 1890، وتقريبًا استبعد تفسير المذنب، نجم «تابي» على الأرجح ليس موطنًا لموقع بناء فضائي لكن من المؤكد أنه اشتهر بأنه «النجم الأكثر غموضًا في مجرتنا».

خارج الأرض» قد أرسلوا رسـائل متعمدة في الفضاء وأشهرها رسـالة آريسيبو عام 1974 (انظر الرسم التوضيحي).

وهناك نهج واعد آخر هو البحث عن «دلائل تكنولوجية» بدلًا من رسـائل متعمدة. وهذه الدلائل التكنولوجية هي أمور شاذة في ضوء النجوم والكواكب لا يمكن إنشاؤها إلا من خلال أنشـطة حضارة متقدمة. إن الأمر في البداية يبدو كخيال علمي لكن البنى مثل مدن الكواكب، و«محركات شـكادوف» المزيحة للنجوم، وكرات دايسـون (أغلفة ضخمة مبنية حول نجم لكي تحصد الطاقة) جميعها مشروعات هندسـية معقولة من شـأنها أن تنتج إشارة مميزة. والأكثر من ذلـك أن هذا النهـج بالفعل قد أنتج أكثر مرشـحي البحث عن ذكاء خـارج الأرض إثارة في السنوات الماضية (انظر المربع صفحة 294).

هل الكون ممهد للحياة؟

في حين كان علماء فلك البحث عن ذكاء خارج الأرض مشغولين في البحث عن الذكاء كان بعض علماء الكونيات منهمكين بالقدر نفسـه في السـؤال عن السبب الذي يجعل أي كوكب في الكون ينبغي أن تكون فيه حياة، بل سـبب وجود أي كواكب أو نجوم أو مجرات على الإطلاق. عندما وضعت نظرية الانفجار العظيم منذ الخمسينيات، أصبح من الواضح على نحو متزايد أن الكثير من جوانب كوننا، من البنى كبيرة الحجم لتجمعات المجرات والتجمعات الفائقة وحتى سـلوك العناصر الفردية، يعتمد على حفنة من الثوابت الفيزيائية. وإذا كان أي من هذه الثوابت له قيمة مختلفة قليلًا فإن الكون كله سـوف يكون مختلفًا جدًّا - على الأرجح بما يكفي لمنع تطور الحياة. ونظرًا إلى أن الانفجار العظيم نفسـه لا يقدم أي آلية محددة للتحكم في قيم هذه الثوابت، فإن حقيقة أنها تبدو ممهدة للحياة تبدو مصادفة غير عادية.

كان عـــالم الفيزياء «روبرت ديكي» أول من ناقش تفســيرًا ممكنًا لهذا التمهيد في عام 1961 عندما لاحظ أننا فقط نســتطيع أن نكون موجودين لأننا نعيش في مرحلة معينة في تاريخ الكون مناســبة لتطور الحياة، لذلك، لا ينبغي لنا أن نفاجأ بحقيقــة أننا نعيش في ذلك الوقت الصالح للحياة بشــكل خــاص. تكمن الفكرة الأساســية نفســها في قلب «مبدأ الأنتروبيــا (القصور الحراري)» الذي طرحه عالم الفيزياء الفلكية «براندون كارتر» في شكلين عام 1973. ينص مبدأ «الأنتروبيا الضعيفة» لكارتر على أننا لأننا ببســاطة هنا فإن موقعنــا في المكان والزمان لا بد أن يكون هو الصالح لنشــأة الحياة، ومبدؤه القوي له الحجة نفسها لقيم الثوابت الفيزيائية موضحًا أنها إذا كانت مختلفة إلى حد كبير فإننا كان من شأننا ألا نكون موجودين لقياسها.

«هناك احتمالان: إما أننا وحدنا في هذا الكون أو أننا لسنا وحدنا. وكلاهما مرعب بالدرجة نفسها.»

آرثر سي كلارك

في عــام 1986، أعاد عالمــا الكونيات «جون باراو»، و«فرانك تيبلر» النظر في السؤال في الكتاب الأكثر مبيعًــا «مبدأ الأنتروبيــا الكونية» وعلى نحو مشوش توصلا إلى تعريفاتهما الخاصة للمبادئ الضعيفة والقوية التي كانت مختلفة عن تلك التي توصل إليها «كارتر» وهذه هي الإصدارات المستخدمة بشكل عام في المناقشات في الوقت الحالي. ويشــمل مبدأ الأنتروبيا الضعيفــة لـ«باراو»، و«تيبلر» أساسًــا كلا الخيارين القوي والضعيف لكارتر، محتجين بأن جميع جوانب فيزياء الكون ســتكون بطبيعة الحال ملائمة للحياة؛ ببســاطة لأننا هنا لقياســها. أما مبدؤهما القــوي فقد ذهب إلى أبعد من ذلك، فقــد اقترح أنه ربما يكون هنــاك شيء في الكون يعطيه أمرًا حتميًّا لإنتاج حياة، أي بعبارة أخرى أنه حقًّا ممهد من قبل تأثير خارجي. وقد طرح المؤلفان ثلاثة تفســيرات ممكنة للمبدأ القوي الخاص بهما: إما أن الكون كان مصممًا عن عمد لنشــأة الحياة من قبل قوة خارجية، أو أن وجود الملاحظين بطريقة ما ضروري

لكي ينشـــأ الكون (نهج يقلد بعض عناصر فيزياء الكـــم)؛ أو أخيرًا أن كوننا هو مجرد واحد من كُثُر في مجموعة واسعة تسمح لجميع البارامترات الممكنة أن تستكشف كما سنرى في الفكرة 49، الخيار الثالث قد لا يكون غير مرجح كما يبدو.

الفكرة الرئيسة

ملاءمة الكون للحياة تثير أسئلة محرجة

49

الأكوان المتعددة

The multiverse

هــل يمكن أن يكون كوننا هو مجرد جــزء ضئيل من أكوان متعددة أكبر كثيرًا وربما لا نهائيــة؟ يتزايد حرص الكثير من علماء الكونيات على هذه الفكرة، لكن ما الدليل الذي يمكن أن يوجد لدعمها؟ وما هو الشــكل الذي تأخذه هذه الأجزاء غير المرئية من الأكوان المتعددة؟.

على الأرجح، الشــكل الأكثر شهرة على نطاق واســع للأكوان المتعددة هو أيضًا أصعبها تخيــلا. إنه مجموعة من أكوان متوازية غير نهائية اقترحها تفســير «العــوالم المتعددة» لميكانيكا الكــم، ويحبها كُتّاب الخيال العلمي. ووفقًا لهذه الفكرة، التــي طرحها لأول مرة عالم الفيزياء «هيــو إيفرت» عام 1957، فإن الحل للنواتج غير المؤكدة المتأصلة في العالم دون الذري لنظرية الكم هو أن يتفرع الكون باســتمرار ناشرًا نسخًا فيها يتحقق كل ناتج ممكن لكل حدث ممكن. ولحسن الحظ، نوعا الأكوان المتعددة الأكثر شيوعًا التي يؤيدها علماء الكونيات هي إلى حد ما سهلة الفهم على الرغم من أن الآثار المترتبة عليها من نواحٍ عديدة آثار عميقة.

الخط الزمني

1957م	1981م	1983م
صــاغ «هيــو إيفرت» تفســير العوالم المتعددة لميكانيكا الكم.	اقترح «آلان جوث» أن كوننا هو مجرد فقاعة متضخمة من الانفجار العظيم الأصلي.	ناقش «ســتنهاردت» أن التضخم يمكن أن يكون عملية أبدية.

خارج الحدود

أبسط كائن يمكن أن يطلق عليه كونًا متعددًا هو ذلك الذي يمكننا أن نتيقن من وجوده- امتداد كوننا أبعد من حدود الـ 46.5 مليار سـنة ضوئية للكون المنظور والتي حددتها سرعة الضوء (انظر صفحة 269). إن وجود كون متعدد كهذا واضح إلى حد ما عندما تضع في اعتبارك حالة مراقـب افتراضي على كوكب على حافة كوننا المنظـور. فبالنظر في أحد الاتجاهات يرى خليـج الفضاء في اتجاه كوكب الأرض، لكن بالنظر في الاتجاه الآخر يمكنه أن يرى مناطق من الزمكان خارج حدود ملاحظاتنا إلى الأبد.

استنادًا إلى الأدلة التي تشير إلى أن كوننا المرئـي «متجانـس، ومتماثل» على النطاقات الكبـيرة (وبعبـارة أخـرى، يبـدو كما هو تقريبًـا بغـض النظر

أربع نكهات للكون المتعدد؟

عرّف المنظِّـر ورائد الأكوان المتعددة «ماكـس تيجمارك» يعرف المستويات الأربعة للأكوان المتعددة:

1. زمكان طبيعي خارج حدود الكون المنظور.
2. أكوان لها ثوابت فيزيائية مختلفة، مثل تلك التي أنشـأها التضخم الأبدي.
3. الأكـوان المتوازية المولدة من تفسـير العـوالم المتعددة لميكانيكا الكم.
4. المجموعة النهائية ـ بنية رياضية بحتة تشـتمل على جميع الأكوان المتعددة الممكنة.

1986م

اقـترح «آنـدري لينـد» نموذج التضخم الفوضـوي الذي ينتج عنه عـدد لا نهائي مـن الأكوان الفقاعية.

1995م

طوّر «إدوارد ويتن» نظرية الأغشـية كاختلاف عن نظرية الأوتار.

2001م

نشر «سـتنهاردت»، و«تورك» نظرية الأغشية الكونية للأكوان المتعددة.

عـــن مكان وجودك أو الاتجاه الذي تنظر فيه)، فمن المنطقي اســتنتاج أن هذا الكون المتعدد هو في الأســـاس «المزيد من نفس الـــشيء»، لكن ما مدى كبره؟ إن إجابة هذا الســـؤال تتوقف على انحناء الزمكان نفسه، والذي يتحدد بتوازن المادة، والمادة المظلمة، الطاقة المظلمة في الكون (انظر صفحـــة 304). فإذا انحنى الزمكان للداخل مثل الكرة، فـــإن الكون المتعدد يكون مغلقًا وربما لا يكـــون أكبر بـ250 مرة من كوننـــا المرئي. أما إذا انثنى الزمكان للخـــارج مثل السرج (مثلما يقترح اكتشاف الطاقة المظلمة) فإن الكون المتعدد مفتوح وبالفعل يكون حجمه غير نهائي. ومن الغريب أن الكون غير النهائي الحقيقي يحمل معه الآثار المترتبة نفسها التي تحملها فرضية العوالم المتعددة- في مكان ما خارج كوننا، كل نتيجة ممكنة لكل حدث تجري في كون «مواز».

التضخم الأبدي

النوع الثاني من الكون المتعدد الذي يثير اهتمام علماء الكونيات هو أكثر غرابة حيث يقدم إمكانية وجود أكوان مختلفـــة جذريًا عن كوننا. وله جذوره في نظريـــة التضخم التي وضعها «آلان جوث» وآخرون في بدايات الثمانينيات كوســـيلة لتفجير جزء صغير من الكون البدائي وخلق كون مثل الكون الذي نراه اليوم (انظر صفحة 253).

الســـؤال البديهي في ذلك الوقت كان عن الســـبب الذي جعل التضخم ينتهي، وفي عام 1986، آثار «أندري ليندي» مســـاعد «جوث» في بعض الأحيان إمكانية أكثر جرأة – ماذا لو لم ينته التضخم قط؟

في نموذج التضخم الأبدي أو الفوضوي، تنشـــأ «أكوان فقاعية» جديدة باستمرار بفعل عملية تغير في الطور، وهي مماثلة لتشكل الفقاعات في المياه الغازية. في الحياة اليومية نحن على دراية بأطوار المادة: الصلب، والســـائل والغازي، وربما نكون على وعي يشوبه الغموض بأن

التحــولات بين هذه الأطوار تمتــص طاقة أو تطلق طاقة. لكن في الفيزياء الأساســية، هناك خواص أكثر بكثير لها أطوار تتراوح ما بين خصائص الجسـيمات الأولية وحتى أبعاد الزمكان نفسه، وطاقة الفراغ التي تتخلل الكون (انظر صفحة 283).

تطلــق التحولات بين هذه الأطــوار طاقــة أكبر من التحولات بــين أطوار المــادة، ويمكــن أن تظهر أطوار جديدة عفويًّا في فراغ الفضاء. ثم يعتمد مصيرها بعد ذلك على مزيجها الدقيق من الخــواص- فتلك التي تحتوي على طاقة فراغ سلبية تنهار على نفسها سريعًا، أما تلك التــي تحتوي على طاقة إيجابية تبدأ في التمدد، ومن المحتمــل أن تصبــح كونًا فقاعيًّــا له خواصــه المميزة وقوانــين الفيزيــاء وحتى مزيجه الخــاص من الأبعاد. وفي الكثــير مــن الحالات، يمكن أن تكون طاقة الفراغ

الأغشية والأبعاد الأعلى

لقد أدت محاولات إيجاد نظرية فيزياء جسـيمات موحدة في العقود القليلة الماضية إلى نشــأة أشــكال أخرى ممكنة من الأكوان المتعددة، تعرف باســم الأغشــية الكونية. يشترط المرشح الأرجح حاليًّا لتوحيد القوى الأساسية في الطبيعة- فكرة معقدة تعرف باســم نظرية M- أن الزمكان ينبغي أن يحتوي على ســبعة أبعاد مكانية إضافية لســنا على وعي بها حاليًّــا، بعض هذه الأبعاد يمكن أن يكــون «منطويًا»، أو ملتفًا حول نفسه في مساحات صغيرة لدرجة أنها تكون غير ملحوظة في كوننا (بالطريقة نفسها التي تظهر بها كرة صغيرة مــن الخيط كنقطة صغيرة إذا نظر إليها من مكان بعيد) لكن ماذا لو كان أحدها ليس كذلك؟

في أواخــر التســعينيات وضع علماء الكونيــات نظرية بأن كوننا يمكن فقط أن يكون منطقة من الزمكان تشبه الغشاء، وتفصله عن الأكوان المتعددة لأغشــية مشــابهة مســافات صغيرة في بعــد «فوق مكاني» غير مرئــي. في عام 2001، اســتخدم «بول ســتنهاردت»، و«نيل توروك» الأغشــية كأساس لنموذج دوري جديد للتطور الكوني، مشيرين إلى أن الأغشية تتحرك ببطء بعيدًا في المكان الفائق وهذا يظهر نفسه في صورة طاقة مظلمة داخل كل غشاء. والتصادمات بين الأغشية على نطاقات زمنية تصل إلى تريليون عام تحرك أحداث ســحق (انظــر صفحة 305) تتبعهــا انفجارات عظمى جديدة.

أكــبر بكثير مما هي في كوننا، ربــما يدفع ذلك الكون إلى التوســع أضعافًا مضاعفة. ووراء فقاعتنا الخاصة، الكون المتعدد الأوســع يمكن أن يكون أي شيء إلا أن يكون متجانسًا أو موحد الخواص.

تشكيلة لا حصر لها

إذا كان هــذا النمــوذج للكون المتعــدد صحيحًــا، إذن فإنه يحل الكثير مــن ألغاز علم الكونيــات الحديث. على ســبيل المثال، وجود عدد لا حصر له من الأطــوار التي لها خواص مختلفة جذريًّا يمكن أن يجعل طبيعة كوننا الممهدة، والقيمة المنخفضة لطاقة الفراغ أقل إشكالية (انظر صفحة 283 و295). الســؤال الذي يسأل عما حدث قبل «الانفجار العظيم»، وكيف بدأ ســيصبح أخيرًا ذا معنى، لكن على العكس من ذلك، ســنحتاج إلى التخلي عن الصورة التي طال احتفاظنا بها عن الكون ذي الـ13.8 مليار ســنة، لأن هذا سيكون فقط عمر فقاعتنا الخاصة في عملية أبدية.

«هناك احتمالان: إما أننا وحدنا في هذا الكون أو أننا لسنا وحدنا. وكلاهما مرعب بالدرجة نفسها.»

آرثر سي كلارك

بيد أنه في الوقت الراهن لا تزال هذه النظرية الرائعة غير مثبتة وقد يتساءل البعض عما إذا كان من الممكن في أي وقت التأكد من وجود مثل هذه الأكوان المتنوعة خارج كوننا، لكن أحد مزايا التضخم الأبدي هي أن تعطي تنبــؤات يمكن اختبارها. نظريًّا، ينبغي للفقاعات أحيانًا أن تؤثــر على بعضها البعض مع اصطدام جدرانها الخارجية معًا عند سرعات عالية. والنتيجة في كوننا يمكن أن تكون «موجةكونية» سيكون لمرورها تأثيرات مختلفة من شأنها أن تطبع أنماطًا

مميزة على إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وعلى الرغم من أن هذه الأنماط لم تكتشف بعد، ربما تكون على حافة أساليب الرصد الحالية، ومن ثم فإن حالة هذا النوع من الكون المتعدد لا تزال غير مثبتة على نحو محير.

الفكرة الرئيسة

قد يكون كوننا مجرد واحد من أكوان لا نهائية

50

مصير الكون

Fate of the Universe

ما هو المصير النهائي لكوننا بالضبط؟ منذ ميلاد علم الكونيات الحديث سعى علماء الفلك إلى التمييز بين عدة بدائل مميزة، لكن الاكتشاف الأخير للطاقة المظلمة قدم عاملًا جديدًا مهمًا يبدو أنه يحتم على الكون موتًا طويلًا وباردًا.

فكرة أن الكون في يوم من الأيام قد ينتهي كانت غريبة على علماء الفلك في بدايات القرن العشرين كفكرة أنه كان له بداية. وحتى هذه النقطة، اعتبر الكون عامة أنه أزلي وأنه كان في الماضي البعيد كما هو الآن إلى حد كبير. أول شخص يضع في الاعتبار بجدية الأمر المغاير كان «ألكسندر فريدمان» الذي بنى في عام 1924 على فكرته السابقة للزمكان المتوسع (انظر صفحة 245) مع أفكار حول كيف يمكن أن يكون الكون قد نشأ. وقد ناقش «فريدمان» أن الكون لا بد أن يتوسع من أجل التغلب على تأثير جاذبية المادة الموجودة داخله. ومدة استمرار هذا التوسع اعتمدت على عامل مهم يعرف باسم بارامتر الكثافة (يرمز إليه بالرمز الإغريقي أوميجا Ω) ـ متوسط توزيع الكتلة والطاقة بالمقارنة بكثافة حرجة معينة.

الخط الزمني

1924م	1934م	1969م	1977م
درس «فريدمان» التوسع الممكن للزمكان.	أوضح «تولمان» أن الكون المتذبذب ينتهك قوانين الديناميكا الحرارية.	بحث «ريس» الظروف المحيطة بكون الانسحاق العظيم المغلق.	درس «جمال نصر الإسلام» المصير طويل الأجل للمادة في الكون المفتوح.

إذا كانت (Ω) تساوي 1 تمامًا (متوسط كثافة الكون تساوي الكثافة الحرجة) فإن الجاذبية ستكون كافية لإبطاء توسع الكون، ولكنها إلى حد كبير لن تكون كافية لإيقافه. أما إذا كانت (Ω) أقل من 1، فإن التوسع سيستمر إلى الأبد بينما إذا كانت أكبر من 1 فإنها ستبطئ وفي النهاية تنعكس وينهار الكون على نفسه. وصف «فريدمان» هذه السيناريوهات الثلاثة بـ مفلطح، أو مفتوح، أو مغلق على الترتيب.

«وُضعت قوانين الطبيعة بطريقة تجعل الكون مكانًا مثيرًا للاهتمام قدر الإمكان.»

فريمان دايسون

بعد عمل «فريدمان»، وتأكيد «هابل» عام 1929 على توسع الكون، وضع «آينشتاين»، و«لوميتر»، وآخرون في الاعتبار احتمالية وجود كون دوري أو متذبذب يتوسع ويتقلص دوريًّا مارًّا بحالة حارة كثيفة في كلتا نهايتي الدورة (الانفجار العظيم، والانسحاق العظيم). بدا الكون الدوري أكثر أبدية من لحظة الخلق المحددة التي أشار إليها نموذج التوسع المباشر، لكن في عام 1934 أوضح «ريتشارد تولمان» أنه ليس هناك كون متذبذب يستطيع الاستمرار إلى الأبد دون أن ينتهك قوانين الديناميكا الحرارية. فهو لا يزال في حاجة إلى بداية محددة، لذا كان المؤيدون يستبدلون لحظة خلق حديثة بلحظة خلق أقدم فحسب.

انسحاق عظيم أم موت حراري؟

بعد هذا الوقت المبكر من الاهتمام، بقي التطور المستقبلي للكون شيئًا أشبه بالمياه الراكدة حتى منتصف الستينيات، عندما أثبتت نظرية الانفجار العظيم إثباتًا قاطعًا اكتشاف إشعاع

1998م

اكتشف علماء الكونيات الطاقة المظلمة لتوسع الكون مما يدل على أن الكون لا بد أن يكون مفتوحًا ولا نهائيًّا.

2001م

أعاد «ستنهاردت» و«توروك» إحياء فكرة الكون الدوري بالنظرية الخاصة بهما؛ نظرية الأغشية الكونية.

2002م

ناقش «ليندي» أن الطاقة المظلمة يمكن أن تكون قادرة على عكس نفسها في المستقبل.

الخلفية الكونية الميكروي. في عـام 1969، أعاد «مارتن ريس» النظر في الموضوع مع مراجعة الظـروف في الكون المنهار المغلق، وقد وجد أن الكون انكمش، وأن حرارته ازدادت ووصل في النهاية إلى درجات حرارة من شأنها أن تتسبب في ذوبان النجوم نفسها قبل أن يُدمَّر أي شيء في نقطة تفرد أو يعاد تدويره في كون متذبذب.

في عام 1977، أجرى عالم الكونيات البنجلاديشي «جمال نصر الإسـلام» الدراسة الأولى حـول مـا يمكـن أن يحدث في كون مفتوح، وقـد تنبأ أنه على مـر تريليونات السـنين أو أكثر سـينتهي الحال بالكثير من المادة الموجـودة في المجـرات في نهاية المطاف إلى ثقوب سوداء منهارة تشـع كتلتهـا ببطء عـن طريق إشعاع «هوكينج» (انظر صفحة 205). وعـلاوة على ذلك، على فترات زمنية أطول، فإن العديد مـن الجسـيمات دون الذرية في المـادة العادية قـد تكون عرضة للتضرر الإشـعاعي. والطريقة الأخرى التي يمكـن النظر من خلالها إلى هذا السيناريو هي عن

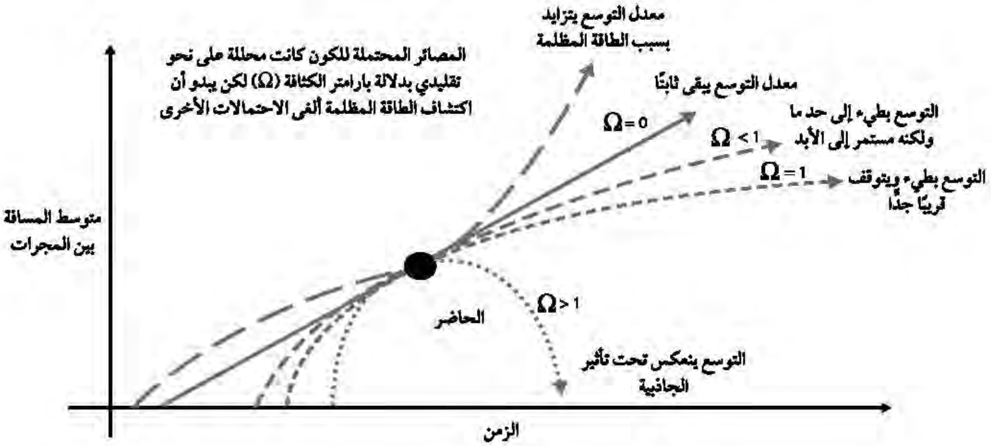
التهام كبير؟

منذ السـبعينيات، أصبح علماء فيزياء الجسـيمات على دراية بالمصير المحتمل للكون والـذي ينزع إلى تجاهله في المناقشات الكونية محل الاسـتفهام. إنها احتمالية أن الفـراغ الحالي في الفضاء ليس مسـتقرًا كما يبدو بل هو «شـبه مسـتقر» وهو عرضة لتغيير جذري محتمل عند نقطة ما. في الفيزياء، الحالة شبه المستقرة هي تلك التي يبدو أن لديها حدًا أدنى من الطاقة وستكون مستقرة في معظم الحالات لكن يمكـن أن تنهار فجأة إذا ظهرت إمكانية الانخفـاض إلى حالة طاقة أقـل. وفي النطاق الكوني يمكن أن يقع حدث كهذا إذا ظهرت في الوجود فقاعة صغيرة من حالة فراغ حقيقي في فترة وجيزة نتيجة لتأثيرات كمية (بطريقة مشابهة للجسيمات الافتراضية- انظر صفحة 283). وستتوسـع الفقاعة بسرعة الضوء مدمرة أي مادة في طريقها عن طريق فك روابط القوى الأساسـية- وهي كارثة تعرف باسم الالتهام العظيم. وعلى الرغم من أن مثل هذا الحدث سـيكون بالتأكيد بعد عشرات المليارات من السنين في المستقبل على وجه التقريب، إلا أن الحسـابات المبنية على بيانات مثل كتلة بوزون هيجز تشـير على نحو متزايد إلى فكرة أن كوننا فعلًا في حالة هشة شبه مستقرة.

طريق قوانين الديناميكا الحرارية كما فعل «ويليام تومســـون» (لورد كلفن) في الخمســـينيات من القرن التاسع عشر.

في الواقع، يزداد انتشـــار الطاقة والمعلومات أكثر فأكثـــر إلى أن يصبح الكون موحدًا على نحو فعال، وهي حالة تعرف بالموت الحراري. في عام 1979، تناول «فريمان دايســـون» جميع هذه المفاهيم بتفاصيل أكثر في دراسته بالغة التأثير «وقت بلا نهاية» حيث وضع سيناريو يعرف عمومًا باسم «البرد العظيم».

أصبح التمييز بين ســـيناريوهي الكون المفتوح والكون المغلق الشـــغل الشـــاغل لعلماء الكونيات في الثمانينيات، وأصبح أكثر صعوبة بســـبب الحاجة إلى قياس مساهمة المادة المظلمة بدقـــة. وتقترح معظم التقديرات أن الكون كان يحوم بالقرب مـــن الكثافة الحرجة مما أدى إلى مضاعفة الجهود.



بيد أن اكتشـــاف الطاقة المظلمة عام 1998 غيّر كل شيء. حقيقة أن التســـارع الكوني في ازدياد بالفعل بدأت تســـتبعد سيناريو الزمكان المغلق والمنبســـط. وحل محلهما «البرد الكبير» الذي انضم كخيـــار أكثر مدعاة للقلق. حتى الآن، لا نفهم الطاقـــة المظلمة فهمًا كافيًا لنعرف

كيف ستتصرف في المستقبل، لكن أحد الاحتمالات (يطلق عليها اسم الطاقة الوهمية على يد «روبرت كلادويل» في 2003) هي أن قوة الطاقة المظلمة ستستمر في التزايد أضعافًا مضاعفة، وفي النهاية ستصبح قوية بما يكفي لتؤثر على أصغر الأحجام وتمزق المادة إربًا إربًا فيما يسمى بـ«التمزق العظيم». اقترح «آندري ليندي» في عام 2002 أنها يمكن أن تكون قادرة على عكس نفسها فترسل الكون متدافعًا إلى الوراء نحو انسحاق عظيم في النهاية. وإثبات أن الطاقة المظلمة تبدو أنها غيرت سلوكها على مر الزمن (انظر صفحة 283) لا يقوم إلا بإضافة المزيد من الشكوك المحيطة بأي تنبؤات عن قوتها في المستقبل.

ليست نهاية المطاف؟

إذا كانت فكرة شفق كوني طويل وبارد أو تمزيق درامي للمادة كلها لا تريح القلب فإن الأفكار حول الكون المتعدد (انظر صفحة 301) على الأقل تحمل بعض الأمل للمستقبل البعيد. فوفقًا لنموذج التضخم الأبدي، هناك أكوان جديدة تظهر في كل وقت، وقد يظهر أحدها في منطقة الزمكان الخاصة بنا قبل أن يحل الظلام الطويل. وبدلًا من ذلك، يمكن أن يقدم نموذج الكون الدوري لـ «بول ستنهاردت»، و«نيل توروك» طريقة جديدة لإعادة توليد الكون ولو بعد فترة طويلة من ذبول كل شيء جميل في كوننا.

الفكرة الرئيسة

كيف سينتهي الكون؟ إذا كان مقدَّرًا له أن ينتهي أساسًا

مسرد المصطلحات

Glossary

المجرة النشطة ـ Active galaxy : مجرة ينبعث من المناطق المركزية فيها كميات كبيرة من الطاقة.

كويكب ـ Asteroid : أحد الأجرام الصخرية التي لا تحصى في النظام الشمسي الداخلي.

وحدة فلكية ـ Astronomical unit : وحدة قياس تكافئ متوسط بُعد كوكب الأرض عن الشمس- حوالي 150 مليون كيلومتر (93 مليون ميل).

الغلاف الجوي ـ Atmosphere : غلاف من الغازات يبقى حول الكوكب أو النجم بفعل الجاذبية.

نجم ثنائي ـ Binary star : زوج من النجوم يدوران حول بعضهما البعض.

قزم بني ـ Brown dwarf : «نجم كف عن أداء وظيفته» تنقصه الكتلة لدمج الهيدروجين في لبه.

مذنب ـ Comet : قطعة من الصخر والجليد من المراكز الخارجية للنظام الشمسي.

كوكب قزم ـ Dwarf planet : جرم يشبه الكوكب يفتقر إلى الكتلة حتى يؤهل ككوكب فعلي.

النجوم الثنائية الكسوفية ـ Eclipsing binary : نظام ثنائي يمر نجماه بانتظام أمام بعضهما البعض مما يؤدي إلى وجود انخفاض في السطوع الكلي.

الإشعاع الكهرومغناطيسي ـ Electromagnetic radiation	:	نوع من الطاقة يتكون من الجمع بين موجات كهربية ومغناطيسية قادرة على نشر نفسها في الفراغ بسرعة الضوء.
الوهج ـ Flare	:	إطلاق شديد لجسيمات فائقة الحرارة فوق سطح نجم، تسببها دائرة قصر كهربي لمجالها المغناطيسي.
المجرة ـ Galaxy	:	نظام مستقل من النجوم، والغاز ومواد أخرى بحجم يقاس بآلاف السنين الضوئية.
مجموعة كروية ـ Globular cluster	:	كرة كثيفة من نجوم قديمة عاشت فترة طويلة، وتدور في مدار حول المجرة.
حزام كايبر ـ Kuiper Belt	:	حلقة تشبه الدونات مكونة من عوالم جليدية تقع بعد مدار نبتون.
السنة الضوئية ـ Light year	:	المسافة التي يقطعها الضوء (أو أي إشعاع مغناطيسي آخر) في سنة واحدة، وهي تكافئ حوالي 9.5 مليون مليون كم (5.9 تريليون ميل).
النسق الأساسي ـ Main sequence	:	مصطلح يستخدم لوصف المرحلة الأطول في حياة النجم، والتي خلالها يكون مستقرًا نسبيًا ويشرق بفعل الهيدروجين الذي يندمج مع الهيليوم في لب النجم.
السديم ـ Nebula	:	سحابة من الغاز أو الغبار تطفو في الفضاء. السدم هي المادة التي تولد منها النجوم وإليها تتبعثر مرة أخرى في نهاية حياتها.
نجم نيوتروني ـ Neutron star	:	اللب المنهار لنجم هائل والذي يخلفه انفجار المستعر الأعظم. تتصرف الكثير من النجوم النيوترونية في البداية كالنجوم النابضة.
المستعر ـ Nova	:	نظام ثنائي فيه قزم أبيض يسرق المادة من النجم المرافق له ويتسبب في انفجارات عرضية.

اندماج نووي ـ Nuclear fusion	:	اندماج أنوية ذرات خفيفة لتكوين أنوية أثقل عند درجات حرارة وضغط مرتفعين جدًا، مما يؤدي إلى إطلاق طاقة زائدة في العملية. والاندماج هو العملية التي تلمع عن طريقها النجوم.
سحابة أورت ـ Oort Cloud	:	غلاف كروي من مذنبات خاملة، عرضها يصل إلى حوالي سنتين ضوئيتين، ويحيط بالنظام الشمسي كله.
تجمع مفتوح ـ Open cluster	:	مجموعة كبيرة من نجوم ساطعة شابة ولدت حديثًا من السديم المشكل للنجوم نفسه.
كوكب ـ Planet	:	منطقة دائرية تدور حول نجم، لها كتلة وجاذبية كافيتان لإخلاء الفضاء حول مدارها من الأجرام الأخرى ماعدا أقمارها الخاصة.
سديم كوكبي ـ Planetary nebula	:	سحابة غازية ممتدة تكونت من الطبقات الخارجية المطرودة من عملاق أحمر ميت.
نباض ـ Pulsar	:	نجم نيوتروني سريع الدوران، معه مجال مغناطيسي كثيف يقسم إشعاعه إلى شعاعين ضيقين.
قزم أحمر ـ Red dwarf	:	نجم كتلته أقل كثيرًا من كتلة الشمس- صغير وباهت ودرجة حرارة سطحه منخفضة.
عملاق أحمر ـ Red giant	:	نجم يمر بمرحلة من مراحل حياته التي يزداد فيها لمعانه بشدة مما يتسبب في جعل طبقاته الخارجية وسطحه يبردان.
النفثات النسبية ـ Relativistic jets	:	حزم من الجسيمات تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء وهي تتولد حول الأجرام مثل الثقوب السوداء.
خط الثلج ـ Snowline	:	نقطة في أي نظام شمسي عندها يكون إشعاع النجم المركزي ضعيفًا بما يكفي لجليد الماء والمواد الكيميائية المتطايرة الأخرى أن تبقى في حالة صلبة.

الزمكان ـ Spacetime	:	متشــعب رباعي الأبعاد تكون فيه الأبعــاد المكانية الثلاثة مترابطة مع بعد الزمن، مما يؤدي إلى نشأة تأثيرات النسبية الخاصة والعامة.
التحليل الطيفي ـ Spectroscopy	:	دراســة توزيع ألوان الضوء الصادر من النجوم والأجسام الأخرى، والتي تكشف معلومات مثل التركيب الكيميائي للجسم، وحجمه وحركته في الفضاء.
الشمعة القياسية ـ Standard candle	:	أي جرم فلكــي يمكن أن يعرف لمعانه على نحو مســتقل، مما يسمح باستنتاج مسافته من سطوعه الظاهري.
نجم ـ Star	:	كرة عملاقة من الغاز، مركزها ســاخن وكثيف بما يكفي لبدء تفاعلات اندماج نووي تسمح له باللمعان.
عملاق فائق ـ Supergiant	:	نجم هائل ولامــع للغاية، وكتلته تقع بيــن 10 إلى 70 مرة كتلة الشمس.
ثقب أسود فائق ـ Supermassive black hole	:	ثقب أسود كتلته تساوي ملايين النجوم، ويعتقد أنه يقع في مركز الكثير من المجرات.
المستعر الأعظم ـ Supernova	:	انفجار عنيف يشير إلى موت نجم.
عبور ـ Transit	:	مرور جسم سماوي واحد أمام وجه جسم سماوي.
نجم متغير ـ Variable star	:	نجم يتغير ســطوعه إما نتيجة للتفاعل مع نجم آخر أو بسبب بعض سمات النجم نفسه.
قزم أبيض ـ White dwarf	:	اللب الكثيف الــذي يبرد ببطء، الــذي يخلفه موت نجم كتلته أقل من 8 أضعاف كتلة الشمس.
نجم وولف ـ رايت ـ Wolf–Rayet star	:	نجــم كتلته كبيرة جدًّا ينشــئ رياحًا نجمية شــديدة تطيح بخارجه.