

إيما تشابمان

الضوء الأول

بزوغ النجوم في فجر الزمان

ترجمة أسماء عزب

الضوء الأول

بزوغ النجوم الأولى في فجر الزمان

تأليف

إيما تشابمان

ترجمة

أسماء عزب

مراجعة

هبة عبد المولى أحمد



First Light

Emma Chapman

الضوء الأول

إيما تشابمان

الناشر مؤسسة هنداوي

المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

يورك هاوس، شبيث ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة

تليفون: ١٧٥٣ ٨٣٢٥٢٢ (٠) ٤٤ +

البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org

الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

إن مؤسسة هنداوي غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره، وإنما يعبر الكتاب عن آراء مؤلفه.

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩٧٨ ١ ٥٢٧٣ ٣٧٣٩ ٨

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢٠.

صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٤.

جميع حقوق النشر الخاصة بتصميم هذا الكتاب وتصميم الغلاف محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بالترجمة العربية لنص هذا الكتاب محفوظة لمؤسسة هنداوي.
جميع حقوق النشر الخاصة بنص العمل الأصلي محفوظة لدار نشر بلومزبري بابليشينج بي إل سي.

Copyright © Emma Chapman. This translation of *First Light* is published by Hindawi Foundation by arrangement with Bloomsbury Publishing Plc.

المحتويات

٩	شكر وتقدير
١١	مقدمة
٢١	١- فوق قوس قزح
٤٣	٢- أين تقع نجوم الجبهة الثالثة؟
٥٧	٣- الانفجار الصغير
٧٣	٤- سحابة غاز محظوظة
٩١	٥- العصور المظلمة
١١٥	٦- تشظي النجوم
١٣١	٧- علم الآثار النجمي
١٤٧	٨- الالتهام المجري
١٦٩	٩- الغسق الكوني
١٨٥	١٠- عصر إعادة التأين
٢١١	١١- المجهولات المجهولة
٢٢٥	ملحق الصور
٢٣٩	المراجع

إلى ليرا وكاسي وأوليف.
لا تكفوا أبدًا عن طرح الأسئلة.

شكر وتقدير

لأصدقكم القول لم يكن تأليف هذا الكتاب سهلاً. فبعد وقت قصير من توقيع العقد اكتشفت أنني حامل، ومن ثمَّ انتهى بي الأمر ليس فقط بولادة طفل، ولكن أيضاً تأليف كتاب ... ولا أستطيع أن أجزم أيهما كان أصعب. والسبب الوحيد لنجاحي في ذلك هو ما تلقيتُه من مساعدة وحب من كل مَنْ سترد أسماؤهم فيما يلي.

ما كان هذا العمل ليرى النور لولا الدعم السخي من الجمعية الملكية متمثلاً في زمالة دوروثي هودجكين، التي تضرب مثلاً يستحق أن يُحتذى به في مرونة عملية البحث الأكاديمي. وأتوجه بالشكر والامتنان إلى محرّري بلومزبري، جيم مارتن وأنا ماكديرميد، اللذين ما كان لهذا الكتاب أن يخرج إلى العالم لولا دعمهما، أشكركما على المجازفة. وأودُّ أن أشكر ليون كوبمانز وأبراهام لوب وهوارد بوند الذين تكرموا بمشاركتي وقتهم والإجابة عن أسئلتي العديدة. كما أعرب عن امتناني إلى كل من ماتيس ماج، وبول كلارك، وجوشوا سيمون، وكاتي باترسون، ومانو بالميكلي، وريتشارد بوركاس، ووكالة ناسا، والمرصد الجنوبي الأوروبي، ووكالة الفضاء الأوروبية، ومايكل جوه، والمركز الدولي لأبحاث علم الفلك الراديوي، ومؤسسة إليوسترز على السماح لي باستخدام الأشكال والصور والرسوم التي لديهم. كما سأظل مدينة بالشكر دائماً إلى ريان ستيمبسون، وفيل باركر، وبريت هاندلي، وبول وودز، وستيفن تشابمان لتعليقاتهم واقتراحاتهم القيمة بشأن مسودة الكتاب، شكراً جزيلاً على وقتكم. وأودُّ أن أشكر جوناثان بريتشارد، لقد لعبت دوراً محورياً في تحديد مساري العلمي؛ فلم أكن لأبقى في علم الفلك أو أوّلَف هذا الكتاب دون دعمك.

ستيف، لقد تحمّلت من أعباء الطهي والتنظيف والتشجيع ما يفوق طاقتك، من دون تذمر أو تأفف. أحبك وأحب الحياة من أجلك. شكراً لك. نجومى الثلاثة الصغار؛ ليرا، وكاسي، وأوليف. ليرا، فضولك ملهم ويزدّجني بمدى روعة العلم عندما أمعن التركيز على

الأمر المعقّد. كاسي، شغفك بالحياة يذكّرني بأخذ قسط من الراحة والاستمتاع. أوليف، ضحكاتك تجعلني أشعر بالغبطة. أمي وأبي، أشكركما على تربيّتي على رؤية الجمال في كل شيء، فضلًا عن عدم الكف عن طرح الأسئلة. ماكسين، وسارة، وفيل، وبيل، شكرًا جزيلاً لكم على مجالسة الأطفال، واستقبالهم في منازلكم، وإعداد العشاء لهم أثناء عملي. راتشيل، وكريستين، وسو، شكرًا لكم على كونكم أصدقاء رائعين، وعلى تفهمكم الدائم عندما كنت أشكو من تعقيدات تأليف الكتاب.

وأودّ بالطبع أن أشكر كلّ مَنْ اشترى الكتاب وقرأه حتى نهايته. أملُ أن يكون هذا خير دليل على استمتاعكم به بقدر ما استمتعت أنا بكتابته. ففي النهاية، تظل هذه التجربة — رغم صعوبتها — الأروع في حياتي على الإطلاق.

مقدمة

علميني طباعك أيتها النجوم الصبورة،
التي تتلأل كل ليلة في السماء الممعة في القدم،
دون أن تترك في الفضاء أي ظل، أو أثر،
لا تعتريتها آثار الزمن، ولا يغييها الموت.

رالف والدو إمرسون

في عصرٍ بتنا نمتلك فيه تلسكوبات فضائية ومصادمات لتسريع الجسيمات، من الصعب تخيل وقت لم يكن بمقدورنا فيه حلُّ أكبر ألغاز الكون إلا بمجرد النظر إلى أعلى. انظر إلى السماء ليلاً، ماذا ترى؟ إذا كنت محظوظاً بالعيش في منطقة ذات تلوث ضوئي منخفض، فربما تتمكن من رؤية مجرة درب التبانة تمتد عبر السماء. أو ربما يظهر القمر مكتملاً. ومع ذلك، فالسمة الرئيسية التي تميز السماء ليلاً بوجه عام هي أنها مظلمة. والسؤال هنا: لماذا السماء مظلمة؟ وعلى الرغم من بساطة الإجابة، فإنها تحمل في طياتها تبعات مهمة.

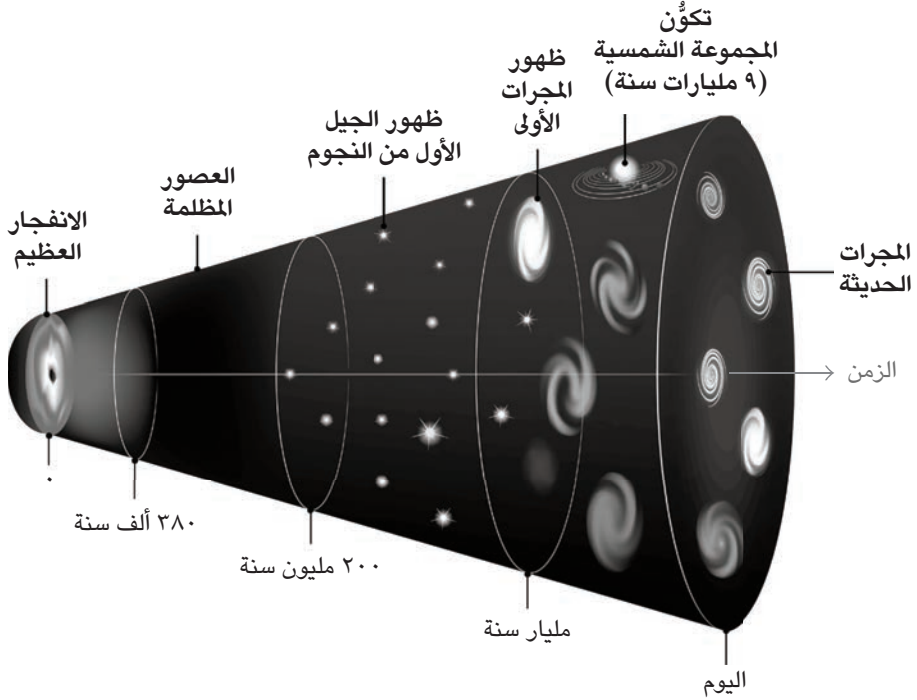
لقرن، تساءل فلاسفة علوم الطبيعة، والفيزيائيون، وعلماء الفلك، وحتى الشعراء عن السبب وراء ظلمة السماء. واعتقدوا أن الكون قديم وشاسع على نحو لا متناهٍ؛ إذ لم يجدوا أي دليل يثبت عكس ذلك. تنص مفارقة أولبرز (التي سُميت بذلك تيمناً بعالم الفلك الألماني هاينريش فيلهلم أولبرز) على أنه إذا كان الكون ساكناً وقديماً قدمًا أبدياً لا متناهيًا، فمن المفترض أن ترى نجمًا في كل اتجاه تنظر إليه. استحوذت تلك المسألة على خيال الكثيرين؛ حتى إن إدجار ألان بو أدلى برأيه في قصيدته النثرية «يورिका» (وجدتها) عام ١٨٤٨ قائلاً: «لو كانت النجوم متعاقبة بلا نهاية، فإن خلفية السماء ستسطع بضياءٍ

موحد، كالذي تُظهره المجرة؛ لأنه يستحيل أن يوجد موضع على الإطلاق، في كل تلك الخلفية، إلا وفيه نجم.»

إذن هل يعني هذا أن السماء لا بد أن تكون مشرقة وساطعة، مثل الشمس، في كل مكان؟ حسنًا، هذا ليس صحيحًا؛ لأنه إذا كان الأمر كذلك، فلا حاجة لنا بإنارة الشوارع. ولهذا السبب، ظللنا، لأجيال، نتساءل عما جعل السماء مظلمة. ولحل هذه المفارقة، عليك التحرر من بعض الفرضيات، وفي هذه الحالة تنتفي صحة الفرضيتين كليهما حول العمر الأبدي اللامتناهي وانعدام الحركة. فقد بدأ الكون مع الانفجار العظيم، الذي أعلن عن بداية تمدد الزمكان. يستوجب الانفجار العظيم كلا الأمرين معًا: وجود بداية للكون (بمعنى أنه غير متناهٍ في القدم) وتمدده (بمعنى أنه ليس ساكنًا). يمكننا حل هذه المفارقة لأنه، على الرغم من مرور ١٤ مليار سنة على الانفجار العظيم، لم يتكوّن عدد كافٍ من النجوم يجعلك تشاهد نجمًا في كل اتجاه تنظر إليه. حتى في أعماق الصور التي التقطها تلسكوب هابل الفضائي في الفضاء، نرى أن المجرات لا تشكّل سوى جزء صغير من الصورة، وكل مجرة تستضيف مليارات النجوم. إن التحرر من فرضية أن الكون متناهي القِدَم تحمل في طياتها عواقب وخيمة. فقد نشأ الكون. ولم تظهر النجوم حينها دفعة واحدة، بل ظهر الجيل الأول من النجوم، وتلاه الجيل الثاني ثم الثالث. وما نختبره الآن هو مرحلة واحدة فقط من حياة كونية أكبر بكثير (شكل ١). إنها حياة يمكننا أن نتباهى بمدى ما حققناه في سَبَر أغوارها. فلقد تمكّنا من رصد نجوم قديمة وأخرى ناشئة، ومجرات قديمة وأخرى تشكّلت حديثًا. ونحن نعيش في عصر نتمتع فيه بإمكانات غير مسبوقة لاكتشاف الكون وتاريخه، وقد زادت قدرتنا على سد تلك الفجوات المعرفية بسرعة البرق.

لقد تطوّر علم الفلك من مجرد كونه ضرورة في الحضارات القديمة، إلى هواية تثير اهتمام الأثرياء وفضولهم، وصولاً إلى أنه أصبح علمًا وجوديًا بإمكان الجميع متابعة آخر اكتشافاته. لقد أصبح جزءًا يوميًا من حياتنا؛ وبينما كنا نحتفل سابقًا باكتشاف نجوم ومجرات جديدة، نكاد لا نشعر بأي دهشة عند اكتشاف كوكب جديد. فنحن الآن نفهم تاريخ كوننا، بدءًا من قصة نشأته التي عنوانها «الانفجار العظيم». لدينا الكثير من البيانات ... ولكنها ليست كافية. وعلى الرغم من الطفرة الهائلة في مجال التكنولوجيا والتقدم العلمي، هناك فترة في عالمنا لم تشهد أي عمليات رصد على الإطلاق حتى وقت قريب. فقد ظل الكون قابلاً في العصور المظلمة في الفترة بين ٣٨٠ ألف سنة ومليار سنة بعد الانفجار العظيم. تكوّنت النجوم الأولى بعد الانفجار العظيم بأقل من ٢٠٠ مليون سنة.

نشأة الكون



شكل ١: لدينا فجوة في البيانات للفترة بين ٣٨٠ ألف سنة ومليار سنة بعد الانفجار العظيم.

وقبل ذلك، كان الكون مظلمًا وفارغًا حتى بزغ نجم ولید. وبدأت سلسلة من التفاعلات النووية الداخلية، نتج عنها ضوءٌ وحرارة في الفضاء القاحل المحيط. ووُلِدَ نجم آخر، وتبعه نجمٌ آخر، وهكذا حتى أُضيئت السماء ببزوغ فجر الضوء الأول. كان الوقت مبكرًا جدًا على تكوّن الكواكب، ومن ثَمَّ لم يكن هناك أحد ليشهد ميلاد النجوم الأولى أو يحزن على موتها الذي كاد يكون لحظيًا. ومع نشأة نجوم الجُمهرة الثانية، سرعان ما طوى النسيانُ الجيلَ الأول من النجوم، ومع ذلك كان ظهور هذه النجوم هو السبب الرئيسي الذي أعدَّ الكونَ للتنوع الهائل الذي نشهده اليوم في بنية الكون وأشكال الحياة عليه. يشعر علماء الفيزياء الفلكية المعاصرون بالقلق إزاء عدم وجود عمليات رصد من عصر النجوم الأولى، وذلك للسببين التالي ذكرهما.

(١) بيانات غير كاملة = استنتاجات غير صحيحة

في البداية، يُعد نقص البيانات على هذا النطاق أمرًا مهمًا حقًا. فغياب البيانات في أي موقف يكون مدعاةً للقلق؛ حيث إننا نستخدم البيانات في تطوير فهمنا واتخاذ قراراتٍ مستنيرة. ونقص البيانات يمكن أن يؤدي إلى عدم اليقين وسوء الفهم أو الإخفاق. دعونا نتأمل النهج الذي ربما تسلكه الكائنات الفضائية في مجرة أندروميда، الأقرب إلى مجرتنا، في محاولة فهم دورة حياة الإنسان. إذا كان الباحثون الفضائيون يشبهون الباحثين على كوكب الأرض، فهذا يعني أنهم يعملون فوق طاقتهم ويعلقون الآمال على أهواء وكالات التمويل لمنحهم المال والوقت اللزمين للدراسة. لا تمتلك الكائنات الفضائية الموارد التي تسمح لها بقضاء ٣٠ عامًا في جمع البيانات عن طريق الفحص الدقيق للبشر في أنحاء الأرض، وبدلاً من ذلك فإنها تحذو حذو جميع العلماء عند دراسة مجموعاتٍ أحيائية هائلة الحجم، وذلك بأخذ عينة. على سبيل المثال، قد تلتقط صورة في دار حضانة أو دار رعاية مسنين، أو على أحد شواطئ أستراليا أو نوادي لاس فيجاس. وإذا كانت الكائنات الفضائية تشعر حقًا بوطأة الاقتطاعات الأخيرة التي حدثت في ميزانية البحث، فقد ترصد موقعًا واحدًا، وربما يقع الاختيار العشوائي على صف انتظار أمام «جبل الفضاء» في عالم والت ديزني. وستجمع البيانات وترحل غير مدركة أنها قد تجاهلت قطاعًا عريضًا من المجتمع بأخذها تلك العينة، ولا سيّما النساء الحوامل ومن هم دون السابعة. ولسوء حظ الكائنات الفضائية، غالبًا ما تنتج عن البيانات غير الكاملة استنتاجاتٍ غير صحيحة. فمن دون هذه الفئات المجتمعية، يصعب فهم دورة حياة الإنسان، ويكون الانحراف عن المسار الصحيح سهلاً ووارداً. وربما تقرأ الكائنات الفضائية، خلال مراجعة سريعة للأبحاث السابقة، قصة الأطفال الذين يوصلهم طائر اللقلق وتصيح قائلة: «يوريكا!» (وجدتها!)، حيث يتناسب هذا الاكتشاف بما يكفي مع بياناتها. ولذلك لا بد من طرح السؤال التالي. هل هذه البيانات غير كاملة؟ إذا كانت الإجابة نعم، فهذا يعني أن الاستنتاجات بدورها غير صحيحة.

فيما يتعلق بالبشر، يعادل نقص البيانات الكونية نقص كل شيءٍ منذ لحظة حدوث الحمل وحتى أول يوم في المدرسة، ربما باستثناء إجراء فحص واحد بالموجات فوق الصوتية. وقد يمثل هذا جزءًا صغيرًا من الزمن مقارنة بحياة الإنسان الكاملة، ولكن عندما تفكر في مدى أهمية هذه السنوات الأولى لبني البشر، فلا عجب أن علماء الفيزياء الفلكية ينزعجون من عدم توفر هذه البيانات فيما يتعلق بتاريخ الكون. ولك أن تتخيل مقدار ما

يقودنا إليه هذا النقص في البيانات من استنتاجاتٍ غير صحيحة بشأن النجوم من حولنا أو بشأن آلية تصرف الكون حاليًا.

فيما يلي السبب الثاني الذي يجعل علماء الفيزياء الفلكية الحاليين يشعرون بالقلق حيال نقص البيانات على هذا النحو.

(٢) عصر النجوم الأولى فريد من نوعه

إن النجوم الأولى لا تشبه إحدى الطبقات الأولى لرواية «هاري بوتر» التي تضم بين طياتها القصة نفسها ولكنها مطبوعة في صفحاتٍ قديمة. فالنجم الأول هو نوعٌ في حد ذاته، وهو الحلقة المفقودة التي قد تكون منقرضة الآن تمامًا. لكن هل تشبه النجوم بعضها بعضًا؟ لدينا نجم قريب جدًا منا، ويمكننا توفير الكثير من الجهد إذا تمكّنا من دراسته. انظر إلى سماء الليل وسترى بضعة آلاف فقط من مئات المليارات من النجوم الموجودة في درب التبانة. بالنسبة إلى كوننا، تعتبر الشمس نجمًا عاديًا. ومع ذلك، فإن إطلاق أحكام عامة على كل تلك النجوم من خلال النظر إلى النجم الأقرب إلينا سيكون مثل رصد الكائنات الفضائية العشوائي لإنسان واحد فقط وتعميم أن جميع البشر اسمهم إلفيس، ويبلغ طولهم ١,٨ متر ويستمتعون بتناول شطائر زبدة الفول السوداني. فنحن لم نفهم إلا خلال الـ ٢٥٠ عامًا الماضية أنه ليست كل النجوم تشبه شمسنا (في الواقع معظم النجوم ليست كذلك).

تتكوّن النجوم في الغالب من الهيدروجين والهيليوم، ولكن يمكننا تقسيم النجوم التي نراها إلى ثلاث مجموعات، بناءً على كمية المعادن الموجودة داخلها. في علم الفلك عندما نتحدث عن المعادن، فإننا لا نعني تحديداً الذهب والفضة والبلاتين وما إلى ذلك. وعندما ننظر إلى العناصر المتوفرة بكثرة في الكون، نجد أن الهيدروجين والهيليوم هما السائدان. ولهذا السبب، وبما أن علماء الفيزياء الفلكية معتادون على تقريب المسافات الفلكية والجدول الزمنية الضخمة، فقد قربنا الجدول الدوري أيضًا. ولأنني عالمة فيزياء فلكية، سأشير في هذا الكتاب إلى جميع العناصر الكيميائية على أنها معادن باستثناء الهيدروجين والهيليوم. وللتوضيح، أضفت الجدول الدوري لعالم الفيزياء الفلكية إلى الجدول الدوري لعالم الكيمياء في شكل ٢.

فلنستكمل حديثنا عن مجموعات النجوم. عندما نشأ الكون، كان مليئًا بالهيدروجين والهيليوم بالأساس. وكان لا بد من تكوّن أي عناصر أثقل من ذلك في مراكز النجوم

1 H	هیدروجین ←																→ هیلوم																2 He
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																	

الساخنة كالأفران أو في الانفجارات النشطة التي أنهت حياتها. ومع كل جيل من النجوم، أصبح الغاز أكثر تشبعًا بالمعادن، وزاد عدد المعادن الموجودة داخل نجوم الجيل التالي التي تشكّلت من هذا الغاز. ويعتبر الجيل الأحدث، أي نجوم الجبهة الأولى، نجومًا شابة تحوي الكثير من المعادن داخلها. وهي مضيئة وساخنة وتعيش في قرص المجرة. أما نجوم الجبهة الثانية فهي أكبر سنًا وتحتوي على معادن أقل. وتكون موجودة في مركز المجرة أو الهالة الخارجية. لا يتطلب الأمر الكثير من الخيال للمضي قدمًا والتساؤل عن أكبر النجوم سنًا. إنها النجوم التي لا تحتوي على أي معادن على الإطلاق ومثلّت بداية كل شيء. لكن السؤال هنا: أين تقع؟ لقد أنتجت النجوم الأولى المعادن الأولى، ونثرت بذور الكون، وأتاحت الإمكانية لتكوّن المجرات. وكانت هذه النجوم خالية من المعادن منذ نشأتها، وأطلقنا عليها اسم نجوم الجبهة الثالثة. ويرجع الترتيب العددي غير المنطقي لهذه المجموعات إلى تاريخ اكتشافها وتجميعها.

كانت نجوم الجمهرة الثالثة تشبه حيوانات الماموث القديمة ذات الأحجام العملاقة، حيث كانت تزيد كتلة هذه النجوم عن كتلة شمسنا مئات المرات. وكانت حيواتها تمتد لفترات قصيرة، حيث لا يتجاوز عمرها بضعة ملايين من السنين، وذلك مقارنةً بعُمر النجوم الأقل ضخامة مثل شمسنا التي يبلغ عمرها ١٠ مليارات سنة. في علم الأجناس البشرية، يعادل هذا التنوع في الأعمار العثور على أنواع من البشر الأوائل يشيخون ويموتون بعد ثلاثة أيام فقط من ولادتهم. ولكن، على الرغم من تلك الأعمار القصيرة، كانت تلك النجوم هي المسؤولة بدرجة أكبر عن تغيُّر الكون. وما إن جاءت إلى الحياة حتى أضاءت الكون بأشعتها ونثرت فيه المعادن التي كانت حينها بمثابة بذرة تكوين النجوم والكواكب والإنسان.

عندما انتهيتُ من تأليف نصف هذا الكتاب، نشرتُ صورة لي على تويتر وأنا أعمل على أحد الفصول بوجه عابس، بينما أحمل على كتفي ابنتي التي كانت تبلغ من العمر وقتها خمسة أسابيع. كان ذلك حوالي الساعة التاسعة صباحًا. وفي الرابعة عصرًا، بدأتُ أشعر أنني لست على ما يرام بعض الشيء وظللت أخطئ في حساب مجموع أعداد مكوَّنة من رقم واحد أثناء المساعدة في أداء الفروض المنزلية. وفي الخامسة مساءً كنت أعاني صعوبة في التنفس انتقلت على أثرها إلى قسم الطوارئ بمستشفى قريب. لقد أصبتُ بتسمم في الدم، وهي حالة تهدد الحياة حيث تدمر العدوى جهاز المناعة، مما يؤدي إلى فشل العديد من أجهزة الجسم، و ٢٠٪ من هذه الحالات في إنجلترا تفضي إلى الوفاة. لماذا أخبرك بهذا؟ حسنًا، يُعزى الأمر جزئيًا إلى أنني آمل في استعطاف أرهف الناس حسًا وتعاطفًا لشراء الكتاب أثناء تجولهم في المكتبة؛ فقد كدتُ أموت وأنا أولُفهِه. ومن ثَمَّ، لا تترددوا في شرائه! ولكن، يبقى السبب الحقيقي الذي يجعلني أخبرك بذلك هو أن أحد العوامل التي ساهمت في انهيار جسدي هو عدم تعرضي لضوء النجوم، أو ما يُعرف لدينا بضوء الشمس باعتبارها أقرب نجم إلينا. فقد اتضح، بعد أشهر من التعافي والفحوصات الطبية، أنني كنت أعاني نقص فيتامين «د»، وهو فيتامين ينتجه الجسم بمساعدة أشعة الشمس فوق البنفسجية. فنحن نربط بين التعرض لأشعة الشمس وخطر الإصابة بحروق الشمس وسرطان الجلد وضربة الشمس، وكلها مخاوف مهمة، ولكن عدم التعرض تمامًا لضوء الشمس يمكن أن يضر أيضًا بحياة الإنسان. ويعد النقص الشديد في فيتامين «د» عاملًا رئيسيًا يساهم في ضعف العظام ويرتبط بضعف جهاز المناعة. وبوصفي عالمة الآن، فأنا أدرك أنه باعتباري عينة

من شخص واحد لا أستطيع الجزم بمدى مساهمة نقص فيتامين «د» في حالتي المرضية. ولذلك فلتسمحوا لي باستخدام قصة درامية شخصية لتوصيل رسالة أعم. يعتمد الجنس البشري على الشمس، ليس فقط لدعم بيئتنا المادية والحفاظ عليها، ولكن لبقاء بيئتنا البيولوجية، ألا وهي أجسادنا، أيضًا. فأجسادنا تتكوّن من المعادن التي تشكّلت في النجوم الأولى، وكذلك في الأجيال التي تلتها. فنحن آلة مصنوعة من بقايا النجوم المحتضّرة، ونحتاج إلى ضوء الشمس من أجل استمرارية عمل هذه الآلة.

إن حل ألغاز الكون المحيط بنا أمر مهم لأسباب عديدة، ويتميز عصر النجوم الأولى بقدرته على إمالة اللثام ليس فقط عن السنوات الأولى في عُمر الكون، ولكن أيضًا عن الألغاز المعاصرة التي تحيّر علماء الفيزياء الفلكية اليوم. فلكي نفهم ما يطرأ على الشخص المراهق من اضطرابات، علينا أن نأخذ بعين الاعتبار كل ما مرّ به في طفولته. وربما يمكن للتحديات التي واجهت المجرات أثناء نموها بعد ٥٠٠ ألف سنة من الانفجار العظيم أن تفسّر لنا سبب وجود الكثير من المجرات القزمة التي تدور حول مجرة درب التبانة الآن.

يتمحور العلم حول طرح الأسئلة، ومن ثمّ أتوقع أن الأسئلة التي كانت تدور داخلك قد زادت بعدما أنهيت قراءة هذه المقدمة. وأمل بنهاية هذا الكتاب أن تجد لديك إجابة عن العديد من هذه الأسئلة ... ولكن نظرًا إلى الطبيعة العلمية للكتاب، فمن المحتمل أيضًا أن يثير مزيدًا من الأسئلة التي تتميز بأسلوب الاستفسارات العلمية المعقّد. ربما لا نزال نتعثّر في الظلام، لكننا أثبتنا بعض الحقائق المهمة التي سنستهل بها بحثنا عن الضوء الأول. فنحن نعلم بوجود نجوم أولى لأن الكون بدأ بانفجار عظيم، ومن ثمّ توجد بداية لكل شيء. ونحن نعرف الكثير عن تاريخ الكون منذ الانفجار العظيم، لكن عصر النجوم الأولى يشكّل فجوة في ذلك الجدول الزمني تبلغ مليار عام. ولا تقتصر رغبتنا في سد هذه الفجوة على الحصول على معلومات كاملة، فالفيزياء الفلكية مثيرة للاهتمام وتستحق البحث. والنجوم الأولى تمثل نوعًا مميزًا في حد ذاتها: حيث كانت ساخنة وضخمة ولم تستمر طويلاً. وقد أنتجت المعادن (عناصر أثقل من الهيليوم) التي شكّلت البذرة الأولى لنشأة الكون في هيئته الحالية، وكوّنت كوكبنا وأجرامًا أخرى. إن الاطلاع على مراحل الكون المبكرة يمكن أن يساعدنا أيضًا في فهم الألغاز الحديثة المستغلقة، مثل كيف أصبح الثقب الأسود الموجود في مركز مجرتنا كبيرًا للغاية. ويوضح هذا الكتاب ما نعرفه عن عصر النجوم الأولى، والثقوب السوداء الأولى، والمجرات الأولى. كما أنه يتطرق إلى سباق اكتشاف نجوم الجوهرة الثالثة، إما عن طريق استخدام تقنيات علم الآثار النجمي أو عن طريق

البحث عن أدلة احتضارها منذ فترة طويلة. وسنُفك شفرة رموز الانفجار العظيم ونتبع بقايا أقدم المجرات الموجودة في عالمنا. وسنحتاج إلى عدد لا يحصى من التلسكوبات، بدءًا من تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء الخاصة بالفضاء وحتى أجهزة الراديو البسيطة التي تُوضَع في الصحاري والحقول حول العالم. ولكن الأهم من ذلك كله أننا سنعتمد على فضولنا العلمي وحب الاستطلاع عند إزاحة الستار عن حقبة زمنية لم تَرَ النور حتى الآن. ولذا فإننا مع كل ما سنكتشفه من مفاجآت، ندعوك إلى الاسترخاء والاستعداد لمشاهدة «فجر الكون».

الفصل الأول

فوق قوس قزح

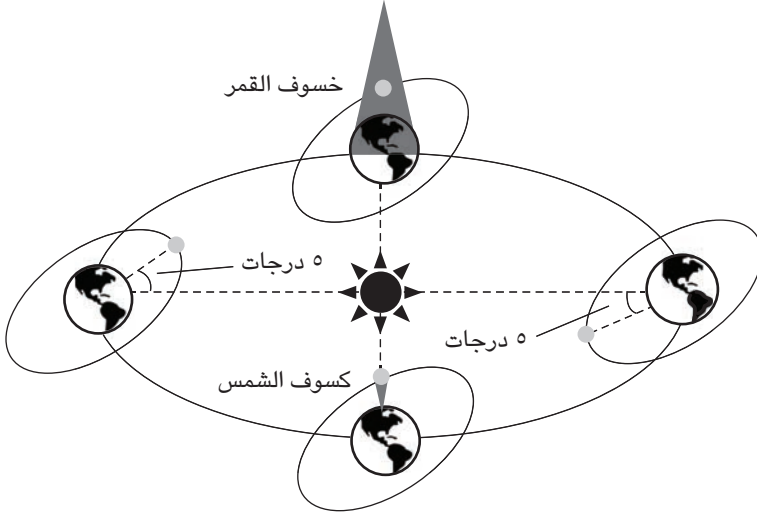
في يناير ١٩٢٥، عاد ملّاح البحرية الأمريكية ألفين بيترسون إلى داخل المنطاد الآلي وأدرك أن خديّه وذقنه وأصابعه قد أصيبت بقضمة الصقيع.¹ لم يلحظ بيترسون هذا من قبل؛ لأنه كان مشغولاً للغاية حيث كان واقفاً أعلى المنطاد المحلّق على ارتفاع ٢٠٠ متر (٦٥٠ قدمًا)، ليدير بثبات كاميرا تصوير أفلام لتصوير أول فيلم عن كسوف الشمس. كان المنطاد «يو إس إس لوس أنجلوس» أكبر منطاد آلي على الإطلاق، وقد صُنِعَ في ألمانيا ضمن مجموعة التعويضات الخاصة بالحرب العالمية الأولى. واستخدمه العلماء في هذه الرحلة الخاصة. أسفل المنطاد «يو إس إس لوس أنجلوس» بكثير، وقفت مجموعات صغيرة من ممثلي شركة إديسون على أسطح المباني السكنية في مانهاتن.² كانوا يرتدون معاطف طويلة وقبعات فيدورا، ووجوههم جامدة كالْحجارة من شدة التركيز، وكأنهم يتربعون حدوث أمر جلل. في كل مجموعة، رصد شخص واحد الكسوف ولاحظ الدرجة التي حجبَ بها القمرُ الشمسَ، وما إذا كانت الحجب الكلي الكامل قد تحقّق. وكفحص ثانوي، كان موظفُ آخر يراقب الأرض لتحديد ما إذا كانوا يقفون في ظل القمر أم لا. وفي الشوارع بالأسفل، كان علماء الفلك الهواة وتلاميذ المدارس يملئون استبياناتٍ توضح بالتفصيل ما يرونه.³ وقد أنفقت موارد هائلة لرصد هذا الكسوف، بدءًا من استئجار مركبات الجيش وحتى تجنيد عامة الناس للعمل متطوعين في خدمة البحث العلمي. وقد نُظِّمَت هذه المشاركة الواسعة النطاق لتحسين نماذج حركة القمر، وليشهد أكبر عدد ممكن ذلك الجزء من الشمس الذي لا يظهر إلا أثناء الكسوف. أثناء تحرك القمر أمام قرص الشمس، كان هناك شخص واحد يقف فوق المنطاد الآلي وكان بذلك أقرب شخص إلى الشمس. وقفَ ألفين بيترسون وحيدًا في الظلام ليكون بذلك أفضل مَنْ في مقدوره رؤية الطبقة الخارجية للشمس، التي تُسمى بالإكليل، وهي تُومض في الأفق. عادةً ما يكون الإكليل (وهي كلمة يعادلها في اللغة

الإنجليزية كلمة Corona المشتقة من الكلمة اللاتينية Crown بمعنى «تاج»، خفيًا لأن القرص المركزي للشمس يفوقه سطوعًا بفارق كبير. وقد أشارت حالات الكسوف السابقة إلى أن الإكليل يحتوي على عنصر كيميائي جديد يسمى الكورونيوم،⁴ وقد أتاح كسوف عام ١٩٢٥ الفرصة لدراسته باستفاضة أكثر. ومع ذلك، إذا فحصت النسخة المدمجة من الجدول الدوري في القرن الحادي والعشرين، فستلاحظ أنه لا يتضمن عنصر الكورونيوم. وهنا سيدور في ذهنك السؤال التالي: ماذا حدث؟

كسوف الشمس واكتشافاته

لمشاهدة الكسوف الكلي للشمس، يجب أن يكون القمر في المكان المناسب بين الأرض والشمس وفقًا للراصد. يميل مستوى مدار القمر (وهو المسار الذي يمر به القمر أثناء دورانه حول الأرض) حوالي ٥ درجات مقارنة بمدار الشمس، وهو الاسم الذي نطلقه على مستوى مدار الأرض حول الشمس. فلو كان أحدهما في محاذاة الآخر، لكان بإمكان أي شخص على الأرض رصد حدوث الكسوف الكلي للشمس مرة كل شهر. ولكن في الواقع لا يمر القمر عبر مستوى مدار الأرض حول الشمس، عند وقوعه بينهما، إلا مرتين في السنة فقط. وثمة عامل آخر يزيد الأمور تعقيدًا وهو مكان وجود القمر في مداره، حيث إن مداره إهليلجي وليس دائريًا. ولتخيل ذلك، حاول مدّ إبهامك والنظر إليه بعين واحدة مع غلق الأخرى. عندما تحرك إبهامك بعيدًا عنك، فإنه يحجب مساحة أصغر من الخلفية. وبالمثل، إذا كان القمر في أبعد نقطة من مداره عن الأرض أثناء تحركه أمام الشمس، فسيظهر القمر صغيرًا جدًا، وبذلك لن يحدث كسوف كلي وتظهر خلف القمر حلقة من النار: وهذا ما يُطلق عليه اسم الكسوف الحلقي.

إذا مرّ القمر عبر مدار الشمس، وأصبح في موقع وسط ما بين الشمس والأرض، وكان حجمه الزاوي مناسبًا لحجب الشمس، ففي هذه الحالة يحدث كسوف كلي للشمس ويجتاز الظل الناتج جزءًا طويلاً ورفيعاً من الأرض أثناء دورانه. ومع أخذ هذا كله في الاعتبار، يحدث الكسوف الكلي للشمس في مكان ما على الأرض كل ١٨ شهرًا تقريبًا. وسيشهد الموقع الواحد على كوكب الأرض كسوفًا كلياً للشمس بمعدل مرة واحدة كل ٣٧٥ عامًا تقريباً.⁵ وسيشهد خسوف القمر، حيث يمر القمر في ظل الأرض بحيث تكون الأرض بين الشمس والقمر، نسبة أكبر بكثير من الأشخاص في كل مرة يحدث فيها. ويعود ذلك إلى أن ظل الأرض على القمر يكون أوسع نطاقاً من ظل القمر على الأرض، ومن ثمّ يتمكن كل شخص على جانب الأرض الذي يخيم عليه الظلام من رؤية خسوف القمر عند حدوثه.



شكل ١-١: كيفية حدوث ظاهرتي الكسوف والخسوف. نظرًا إلى الشكل الإهليلجي لمدار القمر وميله، نادرًا ما يحدث الكسوف الكلي للشمس، كما هو مُلاحَظ من أي مكان على الأرض.

في الماضي، كان الناس يستقبلون الكسوف بخوف، حيث كانت ندرة حدوثه تشكّل بيئة خصبة للتأويلات الغريبة والغامضة. قد تكون هذه الظاهرة نادرة الحدوث، لكن دوران الأرض والقمر كان معروفًا لدى البعض منذ زمن طويل، مما أتاح الفرصة للتنبؤ بحدوث الكسوف لعدة قرون. في عام ١٥٠٤، عندما رسا المستكشف الإيطالي كريستوفر كولومبوس في جامايكا، كان يواجه تمرّدًا على متن سفينته بعد أن امتنع السكان المحليون عن إرسال العطايا من الطعام والإمدادات التي أرغموا عليها بالإكراه.⁶ أخبر كولومبوس الزعماء المحليين أن الرب غاضب منهم بسبب امتناعهم عن إرسال الطعام وتنبأ (مستعينًا بجداوله الفلكية) أنه عما قريب سيتجلى هذا الغضب من خلال القمر. عندما حدث خسوف القمر كما كان متوقعًا، عادوا إلى إرسال العطايا. من أروع المحاولات وأكثرها مثابرة للتنبؤ بحدوث الكسوف هي آلة أنتيكيثيرا التي صُنعت منذ أكثر من ٢٠٠٠ عام في اليونان القديمة.⁷ تتكوّن آلة أنتيكيثيرا من أكثر من ٣٠ ترسًا، ويُعتقد أنها كانت أول كمبيوتر تناظري. كانت التروس تعمل معًا لتحاكي حركات القمر والأرض والتنبؤ بالموعد الذي يصبح فيه كل منهما محاذيًا للآخر بما يؤدي إلى حدوث الكسوف. لم تكن الآلة مثالية،

حيث يتطلب الأمر فهمًا متطورًا للجاذبية من أجل التوصل إلى التنبؤات العالية الدقة التي يمكن تحقيقها اليوم، ولكنها كانت محاولة مذهلة في ذلك الوقت. تخيل كيف بُنيت الآلة بشق الأنفس وكيف أنهم كانوا ينتظرون حدوث الكسوف للتحقق من تنبؤاتهم، ثم يضيفون ترسًا آخر لتعديلها، وينتظرون حتى الكسوف التالي. فالتوصل إلى فهم لظاهرة الكسوف هو مسألة تتطلب بالأساس كثيرًا من الصبر والتقرب. أضاف علماء الفلك على مر السنين مزيدًا من التعقيدات إلى النماذج الرياضية التي تتبّع حركة القمر والأرض والشمس والكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية. فحتى تأثير الجاذبية الضئيل لكوكب المشتري البعيد يمكن أن يؤثر في توقيت حدوث الكسوف الشمسي. وقد أجرى عالم الفلك الإنجليزي إدموند هالي واحدة من المحاولات الأولى الرائدة والموثقة للتنبؤ بالكسوف الكلي للشمس في عام ١٧١٥⁸. وقد اكتسب هالي مزيدًا من الشهرة لاستخدامه قوانين نيوتن للجاذبية في حساب دورية المذنب الذي يحمل اسمه. وفي عام ١٧١٥، استخدم القوانين نفسها في التنبؤ بحدوث الكسوف محدّدًا هامش خطأ أربع دقائق فقط. وبحلول أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، تمكّن العلماء من تقليل هذا الهامش في تقديرات حدوث الكسوف إلى نصف دقيقة فقط.

في عام ١٩٢٥، عندما نزل موظفو شركة إديسون عن أسطح المنازل في مانهاتن، أبلغوا البروفيسور إرنست براون في جامعة ييل بنتائجهم.⁹ واكتشف أن مَنْ وقفوا شمال شارع رقم ٩٦ رأوا الكسوف الكلي، في حين أن مَنْ كانوا في نهاية الشارع لم يروه، ومن ثَمَّ حدّد بدقة حافة ظل القمر وفقًا لعرض الشارع. واتخذ براون كذلك ترتيبات لقياس سرعة ظل القمر وكان لديه عمّال تلغراف على طول مسار الظل لإرسال برقيات إلى مختبرات «بل تليفون» في مانهاتن على الفور بمجرد تأكدهم من بدء الكسوف الكلي. وبوصول الإشارات اللاسلكية من المحطات المنتشرة في جميع أنحاء الولاية، استخدم براون التوقيعات في إثبات أن الظل يتحرك بسرعة مذهلة تبلغ ٥٦٣٣ كيلومترًا في الساعة (٣٥٠٠ ميل في الساعة). وهكذا كان إرنست براون يختبر نموذج الجديد للتنبؤ بالكسوف. وظلت نظرية هيل-براون العملية الحسابية الأكثر تعقيدًا حتى الآن، وقد تنبأت بكسوف الشمس عام ١٩٢٥ بهامش خطأ مقداره أربع ثوانٍ. ومن الغريب أن صحيفة نيويورك تايمز قد أضفت مسحةً سلبية على هذا النجاح بأن صاغت عنوانها الرئيسي كالتالي: «تأخّر الكسوف ٤ ثوانٍ، لكن العرض كان رائعًا».¹⁰

أصبحت تعقيدات المجموعة الشمسية مفهومة الآن لدرجة أن أجهزة الكمبيوتر يمكنها التنبؤ بالكسوف بهامش خطأ مقداره ثانية واحدة، وهو مستوى دقة من غير المرجح أن

يتحسّن. ولا يُعزى هذا الركود في مستوى الدقة إلى الحاجة إلى أجهزة كمبيوتر أفضل، أو إلى وضع نظريات معقدة أخرى، أو إلى وقوف مزيد من الرجال الواجمين على الأسطح. فالمعدل الذي تدور به الأرض، المقدّر بحوالي ٢٣ ساعة و٥٦ دقيقة و٤ ثوانٍ لكل دورة، يتباطأ بسبب تأثير الكبح الناجم عن قوة جاذبية القمر. وبالتالي، سيصبح اليوم أطول في المستقبل، ولا يمكننا التنبؤ بمقدار الزيادة الحادثة في طول اليوم؛ لأن المعدل يتناقص على نحو عشوائي. وبالنظر إلى ببطء وتيرة هذا التغيير، فإن توقعاتنا ستكون صحيحة بهامش خطأ مقداره ثانية واحدة لمدة ١٠٠٠ عام أو نحو ذلك.

من النادر أن يرى أي إنسان كسوف الشمس الكلي، ولذلك فمن غير المستغرب أن نظل نتعامل معه على أنه أمرٌ مثير يسترعي الدهشة والإعجاب، وأن يجوب مطارده الكسوف أنحاء العالم المختلفة طمعاً في مشاهدته. وينعكس هذا الاهتمام الشديد داخل المجتمع العلمي أيضاً، وإن كان هذا لا يرجع إلى ما يخفيه القمر، بل ما يكشفه.

بعد مرور ٩٢ عاماً على وقوف ألفين بيترسون متجمداً أعلى المنطاد، شاهد علماء الفيزياء الفلكية اللقطات في دفءٍ وثيرٍ من داخل طائرتين تابعتين إلى الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) كانتا تتعقبان ظل القمر. إن استخدام الطائرات في مطاردة الكسوف وتعبه ليس بالأمر الجديد. فقد انطلقت خمسٌ وعشرون طائرة إلى جانب «يو إس إس لوس أنجلوس» في عام ١٩٢٥، ولكنها لم تحصل على أي لقطات مفيدة بسبب الاهتزازات الميكانيكية داخلها. وكان الرسام هوارد بتلر صاحب واحدة من أوضح الرسومات التي سجلت الإكليل خلال كسوف عام ١٩٢٥. فقد اعتلى سطح أحد المنازل في ولاية كونيتيكت، ورسم الشواظ الشمسية (وهي نتوءات غازية تمتد خارج الشمس) وسجّل الألوان ليرسم لوحة دقيقة قدر الإمكان لاحقاً. وقد تحسّنت تقنيات التصوير الجوي والفوتوغرافي لدينا منذ ذلك الحين، الأمر الذي أسعد علماء الفيزياء الفلكية الذين يكرهون الظروف الجوية القاسية. وكان «الكسوف الأمريكي العظيم» الذي حدث في ٢١ أغسطس ٢٠١٧ هو أول كسوف كلي للشمس يمكن مشاهدته عبر البر الرئيسي للولايات المتحدة منذ ما يقرب من ١٠٠ عام. وقد حلّقت طائرات ناسا النفّاثة على ارتفاع ١٥٢٤٠ مترًا (٥٠ ألف قدم)،¹¹ أي أعلى بحوالي ٥٠٪ من معظم الطائرات التجارية، لتجنب بخار الماء، الذي يشوّه صور الفضاء تماماً مثلما تحجب الشبورة أو الضباب الصور الفوتوغرافية على الأرض. تتباين سرعة دوران القمر حول الأرض وسرعة دوران الأرض حول الشمس في مداريهما، وبالتالي تتباين مع كل كسوف سرعة الظل وطول الفترة الزمنية التي نشهد

فيها الكسوف الكلي. وفيما يتعلق بالكسوف الأمريكي لعام ٢٠١٧، فإن الراصد المستقر على الأرض سيشهد الكسوف الكلي لمدة دقيقتين ونصف فقط.* ورغبة في الحصول على أكبر قدر ممكن من البيانات، طاردت الطائرتان النفاثتان ظل القمر أثناء اجتيازه ولايات ميزوري وتينيسي وإلينوي الأمريكية. وقد مكّن هذا العلماء من دراسة الإكليل لمدة تقرب من ثماني دقائق. في عام ٢٠١٧، لم يكن الهدف هو البحث عن عنصر الكورونيوم، بل محاولة فهم شيء غير منطقي بشأن الشمس. فقد اتضح أن الإكليل الخافت المحيّر أكثر سخونة بكثير من الشمس نفسها. تبلغ درجة حرارة مركز النجم حيث يحدث الاندماج النووي حوالي ٢٧ مليون درجة فهرنهايت، بما يعادل ١٥ مليون درجة مئوية، وتنخفض درجة الحرارة كلما ابتعدت عن المركز بحيث تبلغ درجة حرارة السطح المرئي، أو «الغلاف الضوئي»، للشمس حوالي ٩٩٠٠ درجة فهرنهايت، بما يعادل ٥٥٠٠ درجة مئوية. بعد ذلك، وعلى ارتفاع ٢١٠٠ كيلومتر (١٣٠٠ ميل) فوق سطح الشمس، يرفع الإكليل درجة الحرارة مرة أخرى إلى مليوني درجة فهرنهايت أو أكثر. لماذا؟ وكيف؟ هذا أمر غريب، يشبه ما يحدث عندما يضبط شخص مقيم في نيويورك الفرن الخاص به على ٤٠٠ درجة فهرنهايت، أي ما يعادل ٢٠٠ درجة مئوية، ثم يدرك أنه أحرق قطعة شخص ما في الألباما. والواقع أن مشكلة ارتفاع درجة حرارة الإكليل^{12,13} لم تحل بعد، وقد أتاح هذا الكسوف للعلماء فرصة نادرة لدراسة الإكليل بدقة عالية لفترة طويلة. لقد كانوا يأملون في معرفة السبب وراء هذه الحرارة العالية، على غرار أسلافهم عندما شاهدوا لقطات ألفين بيترسون وتساءلوا عن ماهية الكورونيوم. ففي الماضي والحاضر على حد سواء، يقدم لنا كسوف الشمس فرصة لتجاوز واحدة من العقبات الكبرى التي تعترض مسيرة علم الطاقة الشمسية، وهي الشمس نفسها.

الأطوال الموجية للضوء

ماذا سترسم إذا طلبت منك رسم الشمس؟ أراهن أنك سترسم أو تتخيل شيئاً مثل دائرة محاطة بخطوط مشعة (يشار إليها في اللغة الإنجليزية، وتحديدًا في لغة الرسوم المتحركة، بكلمة Solrads التي تعني «أشعة الشمس»)، وهو نفسه ما كنت تفعله عندما كنت طفلاً. فالشمس من أول الأشياء التي نتعلم رسمها، لكن قدرتنا على تصويرها لم تتحسن كثيرًا، وهذا أمر مفهوم لأننا لا نستطيع النظر إليها مباشرة دون تعريض بصرنا للخطر. وبرسم الخطوط الممتدة من القرص المركزي نثبت وجود الشمس ونشاطها وأهميتها لنا. فحتى

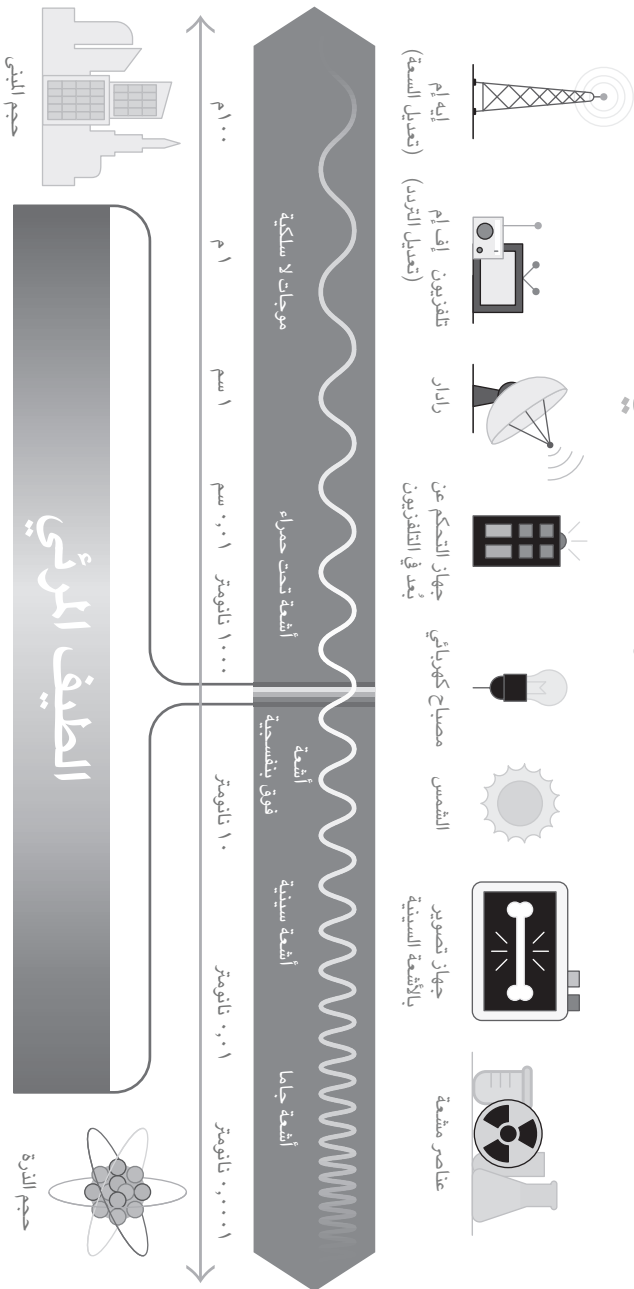
لدى أقدم الحضارات وأصغر الأطفال، معروف أن الشمس تمنحنا الضوء والدفع، وعلى نحو جوهري، تمنحنا الحياة.

إن الضوء هو الوسيلة الرئيسية التي ندرك من خلالها العالم، ولكن من الصعب تحديد ماهيته. يمكننا التفكير فيه باعتباره إشعاعاً ينتقل على شكل موجة، والمسافة بين القمم في تلك الموجة تُسمى بالطول الموجي. يشكّل الضوء سلسلة متصلة من الأطوال الموجية المختلفة التي تسمى الطيف الكهرومغناطيسي.

لقد اعتدنا على استخدام الأطوال الموجية المختلفة للضوء في حياتنا اليومية، ولكننا قد لا ندرك دائماً أنها ضوء. يُعد الضوء ذو الطول الموجي الطويل للغاية، أو ما يسمى بموجات الراديو اللاسلكية، مفيداً لنقل المعلومات عبر مسافات طويلة. على سبيل المثال، تتيح لنا موجات الراديو اللاسلكية الاستماع إلى الأخبار الوطنية عبر المذياع، ربما أثناء استخدامنا لأفران الميكروويف لطهي وجبة غداء سريعة. وإذا سمعنا أخباراً عن هروب نمر وفتحنا التلفزيون، فقد نشاهد لقطات من مروحيات الشرطة وهي تستخدم الأشعة تحت الحمراء لتعقب النمر أثناء تسله إلى حديقتنا. وإذا تعرضنا لسقوط شديد أثناء اندفاعنا لإغلاق أبواب الفناء، فإننا نتوقع استخدام الأشعة السينية لفحص أي كسر قد يُشتبه فيه ... وليس فقط من خلال إلقاء نظرة سريعة باستخدام مصباح يصدر ضوءاً مرئياً. إن الجزء الصغير من الطيف الذي نشير إليه في الحياة اليومية باسم «الضوء» ما هو إلا الجزء المرئي الذي تكيفت أعيننا معه، ونستخدم كلمة «اللون» للتحدث عن الأطوال الموجية المحددة في هذا الجزء الصغير.

عالم الفيزياء الإنجليزي إسحاق نيوتن هو أول من أدرك أن الضوء يتكوّن من ألوان مختلفة. ففي عام ١٦٦٦، وضع منشوراً زجاجياً بمحاذاة شعاع من ضوء الشمس ولاحظ انبعاث قوس قزح من الجانب الآخر من المنشور.¹⁴ ولأن المجال لا يتسع في الكتاب لعرض رسومات توضيحية، كل ما عليك هو البحث عن غلاف ألبوم «الجانب المظلم من القمر» (ذا دارك سايد أوف ذا مون) لفرقة بينك فلويد. وقد لوحظ من قبل كيف أن أي منشور ينتج ألواناً مختلفة عند وضعه في مواجهة أشعة الشمس، وكذلك الحال مع أي قطعة من زجاج مكسور. وكانت المفاجأة أنه عندما ركّز نيوتن الضوء على جدار بعيد، أصبح قوس قزح مستطيل الشكل وانبعثت منه الألوان المختلفة. وحتى هذه اللحظة، كان الافتراض السائد هو أن السبب وراء تأثير قوس قزح هو المنشور الذي يعكس اللون بطريقة ما. وضع نيوتن منشوراً ثانياً أمام أحد الألوان المنبعثة من الضوء المنقسم. وعندما عكس هذا المنشور اللون نفسه ولكن دون الألوان الأخرى التي كان من المفترض أن يعكسها، أثبت

الطيف الكهرومغناطيسي



شكل ١-٢: الطيف الكهرومغناطيسي.

نيوتن أن السبب في إنتاج قوس قزح ليس المنشور. كما أثبت إمكانية تقسيم الضوء إلى ألوان مختلفة.

لا يقتصر الأمر في تجربة مثل تجربة المنشور على انقسام الضوء المرئي فحسب. فقد صنع عالم الفلك الألماني البريطاني ويليام هيرشل¹⁵ منشوراً يشبه منشور نيوتن لقياس درجة حرارة ألوان الضوء المرئي، ولكن أعلى قراءة سجلها كانت في الحيز أعلى الضوء الأحمر؛ أي أعلى قوس قزح. وأطلق على هذه الأشعة الضوئية غير المرئية اسم «الأشعة الحرارية»¹⁵ لكننا نعرفها الآن بتسمية أدق بالأشعة تحت الحمراء.

لقد وصفتُ الضوء حتى الآن بأنه موجة، لكن هذا مجرد نصف الحقيقة فقط. في بعض الأحيان يُفهم الضوء على نحو أفضل باعتباره جسيماً. قد يبدو هذا غريباً، لكنها ظاهرة تُعرف باسم ازدواجية الموجة والجسيم، وهي إحدى النتائج المترتبة على ميكانيكا الكم. فنحن نطلق على الجسيمات المكوّنة للضوء اسم «الفوتونات». وقد أثبت عالم الفيزياء الألماني ألبرت أينشتاين أن الطول الموجي للضوء يعادل فوتوناً يحمل كمية معينة من الطاقة.¹⁶ وكلما كان الطول الموجي أقصر، زادت طاقة الفوتون. وفي ظني أن نيوتن كان سيسعد كثيراً بهذا الأمر؛ لأنه أصرَّ طوال مسيرته العلمية على أن الضوء «جسمي»، أي مكوّن من جسيمات. ومع أن أدلة نيوتن كانت تفتقر إلى الصحة إلى حد كبير، فإنني متأكدة من أنه ما كان ليتردد في إعلان انتصاره رغم ذلك.

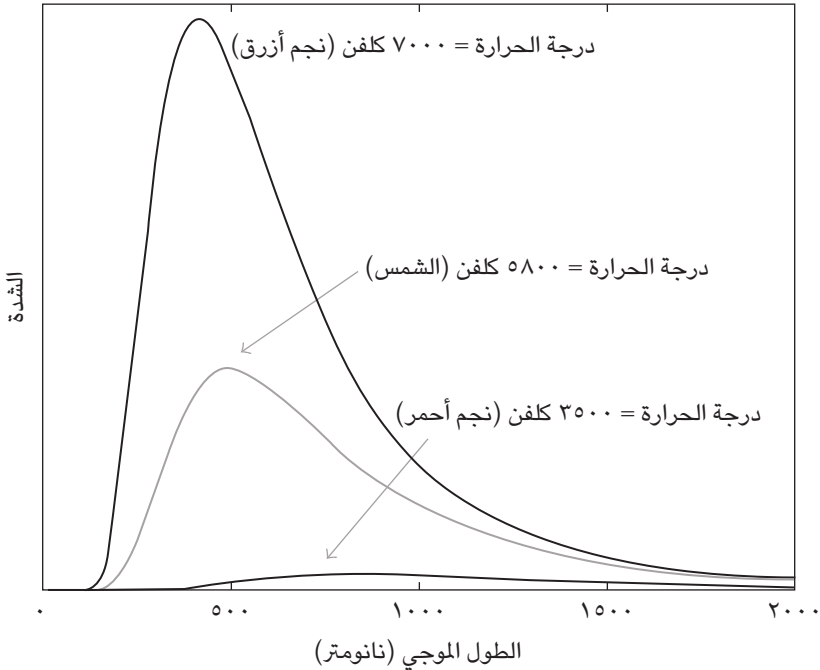
وعلى صعيد التطور، أفادنا كثيراً التكيف مع رؤية الضوء المرئي لأنه سمح لنا بتقييم البيئات من حيث المعيشة أو التهديدات الخطرة. وعلى الرغم من أن الرؤية بالأشعة تحت الحمراء كانت ستفيد في تتبع النمر وسط الأشجار المتشابكة، لم تكن الطفرة الجينية/التحور الجيني المسئول عن هذا الأمر قد حدث بعد لدى النمر. وتوجد أمثلة في حيوانات أخرى تتمتع بأساليب أغرب وأكثر استثنائية في التكيف البصري، فيما هو أشبه بالرؤية بالأشعة السينية لدى سوبرمان. على سبيل المثال، بعض الثعابين لديها «فتحات صغيرة» في وجهها تحتوي على غشاء يتيح لها رصد الأشعة تحت الحمراء.¹⁷ ويسمح لها هذا برؤية الضوء المرئي بأعينها، وكذلك الحصول على صورة بالأشعة تحت الحمراء لفريستها في الليل. ويرد مثال آخر في حيوان الرنة، الذي يتمتع بعيون تتكيف لمعالجة الضوء فوق البنفسجي.¹⁸ ففي القطب الشمالي، ينخفض الضوء المرئي، ولكن الثلج يعكس الكثير من الضوء فوق البنفسجي، مما يسمح للرنة بتتبع بول المفترس/الفريسة وتحديد مكان نبات الأشنة الذي يمثل مصدر غذائها الرئيسي[‡]

في علم الفيزياء الفلكية، نستخدم الأطوال الموجية المختلفة للضوء لتمييز العناصر المتباينة التي يتألف منها الكون. فعلى الرغم من تفوق الضوء المرئي في إنتاج صور مذهلة للمجرات، فإن الأشعة السينية وأشعة الراديو اللاسلكية مناسبتان تمامًا للكشف عن الثقوب السوداء المخفية. تأمل صورة ٣ لمجرة «قنطورس أ»، المعروضة في ملحق الصور بنهاية الكتاب. على اليمين، تظهر المجرة كما رُصدت عند استخدام الضوء المرئي. وعلى اليسار، توجد صورة مركبة للمجرة المرئية نفسها، ولكن مع إضافة ملاحظات الرصد الراديوية. ومن خلال الرصد باستخدام أطوال موجية مختلفة من الضوء، اكتشفنا مجرة أكبر بكثير مما كنا نتصور. والأكثر إثارة في الأمر أننا اكتشفنا ما يثبت وجود ثقب أسود في المركز من خلال رصد تلك النتوءات المستديرة العملاقة من المواد المنبثقة. تنتج النتوءات المستديرة الراديوية عن جزء صغير من الغاز المتناثر حول الثقب الأسود والذي يخرج على شكل نفثات كبيرة من الجسيمات. ولو كنا رصدنا «قنطورس أ» باستخدام أطوال موجية مرئية، فما كان الثقب الأسود ليبدو بهذا الوضوح البالغ، في حين أننا في حال استخدام الأشعة الراديوية سنكون كمن يرى لافطة أمامه على شكل سهم مكتوب عليها «الثقب الأسود في هذا الاتجاه».

قياس درجة حرارة النجوم

لنعد إلى اللوحة التي رسمناها للشمس كي نلوّنها. إننا غالبًا ما نرسم الشمس باللون الأصفر، ولكن، كما نعلم من إسحاق نيوتن وويليام هيرشل وبينك فلويد، يتألف ضوء الشمس من نطاق كامل من الأطوال الموجية المختلفة. ويمثل نطاق الأطوال الموجية للضوء المنبعث من أحد النجوم رمزًا شريطيًا فريدًا لذلك النجم، أي طيفًا نجميًا، وتتميز الأنواع المتماثلة من النجوم بأن لها طيفًا متماثلًا. يوضح الطيف الشمسي أن الشمس تشع نطاقًا من الأطوال الموجية، لكن العين البشرية لا تستطيع أن ترى منه إلا ٤٠٪ فقط. ويصل الطيف الشمسي إلى ذروته في الطول الموجي للونين الأزرق والأخضر في الطيف الكهرومغناطيسي، ومن ثم فإن الضوء الأصفر ليس الضوء الأكثر شيوعًا المنبعث من الشمس. ولكننا لا نرى شمسًا خضراء في السماء لسببين. أولاً، تلك الذروة في اللونين الأزرق والأخضر ليست الطول الموجي الوحيد المنبعث، والضوء الذي نستقبله هو مزيج من تلك الأطوال الموجية المختلفة، في حركته مقتربًا من الضوء الأبيض. ثانيًا، يشتت الغلاف الجوي للأرض الضوء مثلما تبعثر ماكينات الألعاب المعدنية، حيث يعيد توجيه الضوء في اتجاهات عشوائية. وكلما كان الطول الموجي أقصر (أي كلما اقترب الضوء إلى

الأزرق)، زاد تشتت الضوء. وفيما يتعلق بأشعة الشمس، يعني هذا أن الغلاف الجوي يشتت الضوء كلما أصبح أزرق في جميع الاتجاهات، مما يجعلنا نراه من جميع الاتجاهات ويجعل السماء تبدو أمامنا زرقاء اللون. ومع تشتت جزء الطيف الأقرب إلى اللون الأزرق، يبقى الجزءان الأحمر والأصفر من ضوء الشمس، مما يجعل الشمس تبدو صفراء أكثر. وعند غروب الشمس، عندما تكون الشمس على مستوى منخفض، ويقطع الضوء مسافة أطول عبر الغلاف الجوي ويتشتت الضوء الأصفر على نحو ملحوظ، تظهر الشمس باللون البرتقالي المحمر. وبالمثل، يفسر تشتت ضوء الشمس في الغلاف الجوي سبب إطلاق اسم «القمر الدموي» أحياناً على خسوف القمر. فعندما يمر ضوء الشمس عبر الغلاف الجوي للأرض، فإنه يشتت فعلياً كل الأطوال الموجية الأقصر، تاركاً فقط الأطوال الموجية الحمراء الأطول لتنتقل وتنعكس على القمر وصولاً إلى أعيننا.



شكل ٣-١: سلسلة الطيف الشمسي المتصلة. من خلال مقارنة شكل الأطياف النجمية بمنحنيات درجة حرارة الجسم الأسود المختلفة، يمكننا تقدير درجة حرارة سطح نجم.

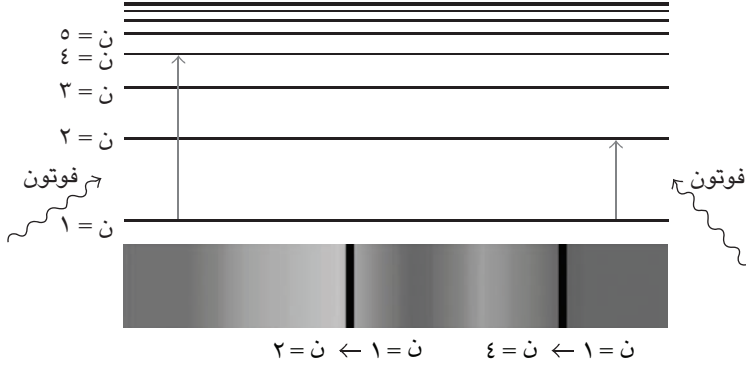
يمكننا استخدام الشكل العام لطيف الجسم الأسود لقياس درجة حرارة أي نجم. فأشكال الأطياف النجمية تشبه إلى حد كبير منحنيات تسمى منحنيات الجسم الأسود. و«الجسم الأسود» هو جسم مثالي يمتص كل الإشعاعات الساقطة عليه ويصدرها في شكل طيف مستمر أو «سلسلة متصلة»، وكأنه في ذلك شخص يستمع إلى وجهات نظر مختلفة، ثم ينطق بتفاهات لا نهاية لها لإرضاء الجميع. ونظرًا إلى أن الشمس ليس لديها سطح صلب لتشتت الإشعاع الساقط عليها، فإنها تمتص بالفعل الغالبية العظمى من الإشعاع الساقط، وكما رأينا فإنها تصدر الضوء عبر الطيف الكهرومغناطيسي. وبما أنه يمكننا تشبيه الشمس — وجميع النجوم — بالأجسام السوداء، فيمكننا استخدام قانون الجسم الأسود الذي ينص على أن الطيف المتصل المنبعث يعتمد فقط على درجة الحرارة. ويمكننا من خلال قياس طيف النجم مقارنته بمنحنيات الجسم الأسود المعروفة وتحديد منحنى درجة الحرارة الذي يطابقه. وإذا طبقنا ذلك على الشمس، فسنجد أن الغلاف الضوئي للشمس تبلغ درجة حرارته حوالي ٥٨٠٠ كلفن.^٥

خطوط امتصاص الكورونيوم

يبدو طيف الجسم الأسود للشمس كخط متصل، غير متقطع، ولكن إذا نظرت عن كثب، فسترى أنه يتكوّن في الواقع من الكثير من النقاط الفردية. إن ظهور الطيف كسلسلة متصلة ملائم جدًا لمقارنته بمنحنيات الجسم الأسود وتقدير درجات حرارة سطح النجوم، ولكن توجد طريقة أكثر شيوعًا نميل إلى استخدامها في النظر إلى الأطياف، وهي النظر إليها كما لو كنا ننظر إلى هذا المنحنى من أعلى، فنحصل بذلك على ما يشبه شكل الرمز الشريطي. تعرض صورة الطيف الشمسي وهي صورة ٨ في ملحق الصور بنهاية الكتاب، رصدًا عالي الدقة للطول الموجي للجزء المرئي من الطيف الشمسي. تنشأ الخطوط المظلمة، التي يطلق عليها اسم خطوط الامتصاص، عن امتصاص الذرات الموجودة في المنطقة الخارجية للشمس لتلك الأطوال الموجية للضوء عند خروجها من أعماق الشمس. تمتص ذرات عنصر معين الضوء عند أطوال موجية محددة جدًا تتعلق بمستويات الطاقة التي تستطيع الإلكترونات شغلها داخل تلك الذرة. وتختلف هذه الفجوات في مستويات الطاقة بين العناصر، ومن ثمّ تتباين أيضًا الأطوال الموجية للضوء الممتص وخطوط الامتصاص الناتجة المميزة لكل عنصر.

يمكننا على الأرض تعريض عنصر كيميائي محدد، مثل الهيدروجين، للإشعاع لمعرفة الأطوال الموجية التي سيفضل امتصاصها، وبالتالي خطوط الامتصاص التي ستنبعث في

فوق قوس قزح



شكل ١-٤: انبعاث خطوط الامتصاص. لا تمتص الذرات سوى الفوتونات (يُشار إليها عادةً بالرمز λ) المكافئة في طاقتها لمستويات طاقة الإلكترونات الخاصة بها (بالأعلى)، مما يؤدي إلى انبعاث خطوط امتصاص مميزة في الطيف (بالأسفل).

الطيف. ويمكننا بعد ذلك النظر إلى طيف نجم ما، ومن خلال معرفة الأطوال الموجية التي امتُصت، يمكننا مضاهاتها بمجموعة التجارب التي أجريناها على جميع العناصر الكيميائية المعروفة واستنتاج الذرات الموجودة في الشمس، إن كانت معروفة على الإطلاق. عندما لاحظ عالم الفلك الإنجليزي نورمان لوكير وجود خط امتصاص غير محدد في طيف الشمس عام ١٨٦٨،¹⁹ أطلق على العنصر المسئول عن ذلك الذي لم يكن معروفًا سابقًا اسم الهيليوم، تيمناً باسم إله الشمس الإغريقي هيليوس. وقد اكتُشِفَ الهيليوم على الأرض بعد مرور ٢٧ عامًا آخر.

يبدو الطيف الشمسي أثناء الكسوف مختلفًا تمامًا، ولأن القرص الرئيسي للشمس محجوب، فإننا لا نرى سوى الضوء الصادر من الإكليل. عندما نظر العلماء لأول مرة إلى الطيف الإكليلي أثناء كسوف الشمس في ٧ أغسطس ١٨٦٩، وجدوا خط امتصاص قويًا بطول موجي يبلغ ٥٣٠,٣ نانومتر، لا يتوافق مع أي من التجارب التي أجروها على الأرض: لم يُنتِج أيُّ عنصر معروف خط امتصاص بهذا الطول الموجي. وفي نهاية المطاف، كان من المفترض أن يشير هذا إلى عنصر جديد في الغلاف الجوي للشمس، أطلقوا عليه اسم «كورونايوم». استمرت الأبحاث على هذا العنصر لعقود من الزمن، وكان هذا هو أحد الأسباب التي جعلت ألفين بيترسون يقف على قمة المنطاد في عام ١٩٢٥، حيث تجمدت أصابعه، من أجل أن يعزز فهمنا لهذا العنصر الجديد. ولم يُكتشَفَ حتى ثلاثينيات القرن

العشرين أن ظهور خط الامتصاص هذا لم يكن يُعزى إلى وجود عنصر جديد على الإطلاق، ولكنه كان شكلاً مختلفاً من عنصر الحديد المعروف سلفاً. يحتوي الحديد عادةً على ٢٦ إلكترونًا ويرتبط بمجموعة معروفة من خطوط الامتصاص. إذا انتزعنا بعضاً من تلك الإلكترونات (حيث نكون بصدد تأيين الحديد)، حينها ستتغير خطوط الامتصاص تلك. كان خط الامتصاص المرتبط بعنصر الكورونيوم الوهمي مطابقاً لخط الامتصاص الذي تنتجه ذرة الحديد التي انتزع منها ١٣ إلكترونًا. إن انتزاع الإلكترونات ليس مهمة سهلة ويتطلب درجات حرارة عالية جدًا لتوليد تصادمات عالية الطاقة لها القدرة على طرد الإلكترونات. يتطلب انتزاع ١٣ إلكترونًا درجات حرارة عالية جدًا، مما يشير إلى أن درجة حرارة الإكليل تبلغ ملايين الكلفن مقارنة بدرجة حرارة الغلاف الضوئي البارد نسبيًا التي تبلغ ٥٨٠٠ كلفن. ومن ثمَّ تزداد درجة حرارة الشمس بالفعل عند المغامرة والاقتراب من الإكليل، وهو وضع غير بديهي على الإطلاق. وربما تكون درجات الحرارة المرتفعة ناتجة عن مجالات مغناطيسية معقدة تقذف بعنف جسيمات مشحونة من الغلاف الضوئي إلى الإكليل، أو ربما انفجارات تشبه القنابل تسمى التوهجات النانوية تقذف الحرارة إلى الغلاف الجوي. وعلى الرغم من تقليص عدد النظريات، فما زالت مشكلة ارتفاع درجة حرارة الإكليل معضلة غير محسومة.

ربما يخيب ظنك عندما تعلم أنني لم أتمكن من حل مشكلة ارتفاع درجة حرارة الإكليل على نحو فعالٍ ومُرضٍ. فمن المزعج حقًا عدم معرفة الإجابة. بل إنه أمر مثير للدهشة أيضًا بالنظر إلى الموارد التي نمتلكها. فقد طوّروا مسابير سافرت إلى الفضاء الخارجي، ويستطيع تلسكوب هابل أن يرصد جيدًا ما هو أبعد من مجرة درب التبانة وحتى العديد من المجرات الأخرى. نعي كيف تطوّر كوننا، بدءًا من نظرية نشوئه الراسخة، وهي الانفجار العظيم. ومع ذلك، ما زلنا نبذل قصارى جهدنا للاستفادة من كل مفهوم من المفاهيم العلمية التي نستطيع الحصول عليها من كسوف كلي مدته سبع دقائق وكأننا في سباق مع الزمن، تمامًا مثلما كان يفعل العلماء في عام ١٩٢٥، وإن كان ذلك يحدث الآن بوسائل تكنولوجية أكثر تقدمًا. فمن ناحية، نثري معرفتنا (حيث اكتشفنا أن الإكليل لا يحتوي على عنصر غير مألوف؛ بل كل ما في الأمر أنه ساخن جدًا!!)، ومن ثمَّ تزداد أسئلتنا من ناحية أخرى (انتظر، كيف ترتفع درجة حرارته إلى هذه الدرجة؟!). سأعترف بأن مشكلة ارتفاع درجة حرارة الإكليل كانت جديدة إلى حد ما بالنسبة إليَّ في وقت الكسوف الأمريكي العظيم.

ولكوني عالمة فيزياء فلكية أدرس النجوم الأولى، لم يخطر ببالي مطلقاً أن أولي اهتماماً كبيراً بأقرب نجم، وهو الشمس، التي نراها من الأرض والتي يمكن إخضاعها للتنبؤ. فقد اعتبرت أنه أمر مفروغ منه أن نكون قد أطمنا اللثام عن كل ما يتعلق بها نظراً إلى قربها. وانبهرتُ وسعدتُ باكتشاف أنه لا تزال هناك أسرار دفعتنا إلى الاستفادة من ظاهرتي المصادفة المطلقة لمجموعتنا الشمسية: وهما الكسوف والخسوف.

إنها مصادفة مذهلة أن يغطي القمر قرص الشمس، مثل غطاء العدسة، خلال كسوف الشمس الكلي. وبمحض المصادفة يتساوى الحجم الزاوي للشمس والقمر في السماء. فالحجم الزاوي لجسم ما يعتمد على حجم الشيء ومدى بعده. تخيل أننا ننظر إلى أبقار. إذا لاحظنا أن البقرة اللُعبة، الأصغر بعشر مرات من البقرة الحقيقية، تبدو بحجم البقرة الحقيقية نفسه، فإننا نعلم أن البقرة الحقيقية يجب أن تكون عشر مرات أبعد. وفي حالتنا، نلاحظ أن الشمس والقمر متماثلان في الحجم الزاوي. لكن الشمس أبعد من القمر بحوالي ٤٠٠ مرة، ولكنها أيضاً أكبر من القمر بحوالي ٤٠٠ مرة، لذا يبدو وكأن لهما الحجم الزاوي نفسه. وما يزيد من أهمية الكسوف والخسوف هو أن لهما تاريخ انتهاء. فقد ذكرتُ سابقاً أن قوة جاذبية القمر تُعرّض الأرض لتأثير الكبح. ويؤثر هذا في قدرتنا على التنبؤ بالكسوف والخسوف؛ لأنه يبطئ معدل دوران الأرض على نحو غير متوقع مع مرور الوقت. والتأثير الآخر لهذا هو ابتعاد القمر عن الأرض بحوالي ٤سم (١،٥ بوصة) سنوياً ... أي إن البقرة اللُعبة تبتعد، مما يفسد وهم تماثل الحجم. ولذا فإن الكسوف الكلي للشمس الذي نستمتع به اليوم لن يستمر إلى الأبد، وإذا تواجد أي بشر بعد حوالي ٦٥٠ مليون سنة من الآن، فلن يشاهدوا سوى الكسوف الجزئي. ولكن، ما زال ذلك احتمالاً بعيداً، فبالنظر إلى أن أسلافنا البشر لم يظهروا على الأرض إلا منذ بضعة ملايين من السنين فقط، فربما تتطور قدرتنا على رؤية الأشعة السينية وبهذا سنرى الكون بطريقة تجعل الكسوف أمراً غير ذي أهمية.

نحن الآن في زمن لا نقتصر فيه على مجرد انتظار حدوث الكسوف التالي. فهناك، على سبيل المثال، جهاز رصد الإكليل، وهو جهاز تلسكوبي ملحق يحجب جزءاً كبيراً من الغلاف الضوئي. وبعد عام بقليل من الكسوف الأمريكي الكبير، أطلقت وكالة ناسا بعثة جديدة غير مسبوقة تسمى مسبار باركر الشمسي.²⁰ وعلى مدى سبع سنوات، شق هذا المسبار طريقه نحو الشمس، ليصل إلى مسافة ٣,٨ ملايين ميل من سطحها، وهي منطقة لم تُستكشف من قبل. قد لا يبدو هذا قريباً جداً، ولكن كما رأينا، فإن سطح الشمس لا

يمثل «حافة» النجم. فالإكليل يمتد بعيدًا في الفضاء ومن الصعب تحديد نهاية له. ويتدفق من الغلاف الجوي الساخن العالي الطاقة تيارًا من الجسيمات يسمى الرياح الشمسية، التي تطوق الكواكب الثمانية في مجموعتنا الشمسية. وهذا يعني أنه على الرغم من أن قلب الشمس الساخن بعيد، فإننا على الأرض نعيش داخل غلافها الجوي. كان على الرياح الشمسية التي تصل إلينا على الأرض أن تقطع على مدى عدة أيام ما يزيد على ٩٣ مليون ميل، مما أدى إلى تشوهها وتغيرها بسبب جميع الجزيئات الأخرى في الطريق. وهذا يجعل دراسة الإكليل الداخلي أشبه ما يكون بمراقبة الطيور عبر ضباب كثيف من مسافة ١٠٠ متر (٣٢٨ قدمًا). ولاستيعاب الأمر، علينا الاقتراب من الضباب والوقوف على مسافة أربعة أمتار (١٣ قدمًا) فقط. سيلتقط مسبار باركر صورًا عالية الدقة ويرصد تلك التوهجات النانوية المراوغة وخطوط المجال المغناطيسي، مما يساعد العلماء على فهم الكيفية التي يمكن بها لنجمنا أن يصل إلى درجات الحرارة العالية هذه بعيدًا عن مصدر الحرارة الداخلي. ومن المثير للاهتمام أنه نظرًا إلى وجود مسبار باركر بالقرب من الشمس، فقد شهد أيضًا أحداثًا مثل التوهجات الشمسية على الشمس قبل أن نشاهدها نحن على الأرض. يرصد مسبار باركر التوهج الشمسي بعد ٢٠ ثانية من حدوثه فعليًا، بينما يراه من الأرض بعد ثماني دقائق كاملة، وذلك بسبب سرعة الضوء المحدودة.

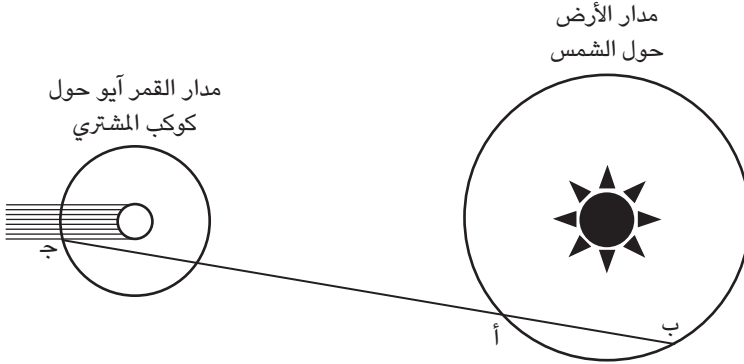
سرعة الضوء المحدودة

توصل عالم الفلك الدنماركي أولي رومر إلى حقيقة أن الضوء لا ينتقل بسرعة لا نهائية، وذلك من خلال مراقبته الكسوف والخسوف. كان من بين الأسئلة العلمية الملحة خلال القرن السابع عشر السؤال حول كيفية تحديد خط الطول (قياس موقع نقطة على سطح الأرض شرقًا أو غربًا بالدرجات) عند الإبحار في أعالي البحار. فنحن نعلم أن الأرض تكمل دورة كاملة حول نفسها (٣٦٠ درجة) خلال ٢٤ ساعة، ولذلك إذا عرفت الفارق الزمني بين نقطتين، فيمكنك تحديد الفارق الطولي أيضًا. في زمننا الحالي، نلاحظ أنه عند تشغيل أجهزة الكمبيوتر المحمولة، فإن الوقت بها يتزامن تلقائيًا مع المكان الذي سافرنا إليه في العالم. ولكن كيف كانوا يحسبون فارق التوقيت في القرن السابع عشر؟ كان المطلوب هو وقوع حدث في أوقات متوقعة من اليوم. ربما تكون على دراية بالمشهد في بداية فيلم «ماري بوبينز» الذي أنتجته شركة ديزني، حيث يطلق الجار الغريب الأطوار مدفعه كل يوم في تمام السادسة مساءً. وأي شخص على مقربة من شارع تشيري تري سيعرف

عندما يسمع ذلك الصوت أنها السادسة مساءً، على الأقل وفقاً لساعة الرائد. وقد اقترح عالم الفلك الإيطالي جاليليو جاليلي فكرة مماثلة على نطاق أوسع بكثير. لقد كان بحاجة إلى حدث يمكن رؤيته من أي مكان على الأرض، ومن ثمّ نظر إلى السماء ووجد مثلاً على ذلك الحدث في نظام كوكب المشتري (النظام الذي يشمل كوكب المشتري وأقماره). أثناء دوران أقمار كوكب المشتري حوله، كانت تختفي عن الأنظار عند مرورها خلفه. وعندما يُكمل القمر دورته، يخرج من خلف كوكب المشتري، وهو الحدث المعروف باسم الظهور. ونظراً إلى أن الأقمار تدور حول المشتري بانتظام، فقد أدرك جاليليو أنه من خلال مراقبة أوقات ظهورها ستصبح لديك ساعة سماوية،²¹ أي مدفع بين كوكبي. كانت هذه الفكرة صعبة التنفيذ على سفينة متحركة في ذلك الوقت، ولكن في عام ١٦٦٨، نشر عالم الفلك الإيطالي جيوفاني دومينيكو كاسيني جداوله الخاصة بحركات أقمار كوكب المشتري، حيث قدّم جدولاً زمنياً يستطيع الناس ضبط ساعاتهم وفقاً له. على سبيل المثال، يمكن للبحارة الاستعانة بهذا الجدول وتوقع ظهور القمر أيو يوم ١٠ نوفمبر في وقت الظهيرة، كما لوحظ في نابولي. ومن ثمّ، فقد عرفت أنك عندما تشهد ظهور هذا القمر من أي مكان في العالم، فإن هذا معناه أنه وقت الظهيرة في نابولي. يمكنك بعد ذلك تحديد فارق التوقيت، وبالتالي خط الطول، من خلال مقارنة وقت ظهور قمر كوكب المشتري بوقت الظهيرة في مكان وجودك (أي الوقت الذي تكون فيه الشمس في أعلى نقطة في كبد السماء). في البداية بدت كل التوقعات صحيحة، بفارق نصف دقيقة على الأقل، ولكن مع مرور العام بدأ أيو يتأخر عن الظهور بحوالي ١٠ دقائق عن الموعد المتوقع. وأشار كاسيني إلى أن السبب وراء ذلك هو إما سرعة الضوء المحدودة وإما حدوث اختلاف في قطر المشتري. واستقر كاسيني نفسه على الرأي الأخير، أو على الأقل عارض الرأي الآخر، لكن زميله أولي رومر كان من أنصار الرأي الأول.

لفهم السبب وراء صحة رأي رومر، انظر إلى مخطط نظام كوكب المشتري-الشمس-الأرض في شكل ١-٥. خلف المشتري، يوجد مخروط الظل يدخله أيو ويخرج منه أثناء دورانه حول المشتري. وبالرصد من النقطة (أ)، ترى ظهور أيو عند النقطة (ج) في وقت معين، على سبيل المثال في الظهيرة. وفي اليوم التالي، يبدو أن القمر لا يزال يظهر في هذا الوقت المحدد تقريباً، ولنقل الساعة ١٢:٠١ ظهراً. ولكن عند القياس في وقت لاحق، أثناء حركة الأرض في مدارها إلى النقطة (ب)، يظهر القمر بعد عدة دقائق من الموعد المتوقع. أدرك رومر أنه بسبب زيادة المسافة بين نظام كوكب المشتري والأرض، كان على الضوء

الضوء الأول



شكل ١-٥: سرعة الضوء المحدودة. نسخة معدلة لشكل مستقي من أبحاث رومر عام ١٦٧٦،²² يوضح أنه كلما ازداد طول المسار الذي يجتازه الضوء، فإنه يستغرق زمناً أطول في اجتيازه. يستغرق الضوء زمناً أطول للانتقال من القمر آيو في موضع ظهوره عند النقطة (ج) إلى الأرض عند النقطة (ب) أثناء دورانها حول الشمس، وذلك مقارنةً بالزمن الذي يستغرقه لاجتياز المسار نفسه انطلاقاً من النقطة (أ).

القادم من آيو أن يجتاز مسافة أطول. في الشكل، كانت المسافة بين النقطة (ج) والنقطة (ب) أطول بكثير من المسافة بين النقطة (ج) والنقطة (أ). ولذلك لو كانت سرعة الضوء لا نهائية، فلن يحدث ذلك فارقاً؛ لأن الضوء سيجتاز أي مسافة على الفور. ولكن اتضح من تأخر ظهور القمر أن الضوء استغرق وقتاً أطول كلما ازدادت المسافة التي يقطعها. فسرعة الضوء محدودة، ولكنها ليست بطيئة. وفي الحياة اليومية نعتبرها سرعة لحظية. بلغت سرعة الضوء التي أشارت إليها أبحاث رومر بشأن ظهور قمر كوكب المشتري $212,000,000$ م/ث (متر في الثانية).^{24,23} كانت هذه سرعة فائقة على شكل لا يمكن تصوّره في ذلك الوقت (ولا تزال كذلك)، ولكنها قريبة جداً إلى ما يمكننا قياسه الآن في مختبر على الأرض، وقيمتها $299,792,458$ م/ث بالضبط. عندما نلاحظ أن صديقاً يلوح من الجانب الآخر من الشارع، فإننا نعلم أنه يمكننا التلويح له قبل أن ينطلق بعيداً نظراً إلى وجود مسافة صغيرة بيننا بالمقياس البشري. فنحن نرى صديقنا يلوح ولكن بعد الحدث الفعلي، بتأخير لا يتعدى 0.0000003 ثانية فقط، ومن ثمّ فإن حدث التلويح لحظي من منظور أعيننا. ولكن عندما نصعد إلى المقياس السماوي، نجد أن صديقنا الذي يعيش الآن على قمر المشتري آيو يمكنه التلويح لنا، لكننا لن نرى ذلك إلا بعد مرور نصف ساعة (وبحلول ذلك الوقت، سيعتقد أننا وقحون لعدم التلويح له).

ونظرًا إلى سرعة انتقال الضوء المحدودة، فكلما بعدت المسافة بيننا وبين الشيء الذي نراه، فإن ما نراه يكون قد مضى على زمن حدوثه الفعلي وقتً أطول. فعندما ننظر إلى سطح الشمس، يبلغ عمر التوهج الشمسي الذي نراه ثماني دقائق^{١١}. وعندما ننظر إلى واحد من أقرب النجوم إلينا، وهو ألفا سنتوري، نجد أن عمر الضوء يزيد على أربع سنوات. وما قادني إلى هذه الحقيقة المذهلة أنه إذا كان الباحثون الفضائيون يراقبون الأرض بالفعل في نظام أندروميديا، فهذا يعني أنهم لا يشاهدونها ونحن نرُكِّب لعبة «جبل الفضاء». وبدلاً من ذلك، يسجلون أن هذه الصخرة الثالثة التي تلي النجم المتوسط تتوي أنواعاً مثل بارانثروبوس إيثوبيكس وأسترالوبيثيكوس أفريكانوس، وهما نوعان من أسلاف البشر القدماء عاشا قبل ما يزيد على ٢,٥ مليون سنة. فمجرة أندروميديا بعيدة جداً لدرجة أننا نراها بالشكل الذي كانت عليه قبل ٢,٥ مليون سنة، والعكس صحيح. ومع وجود مسافات أكبر، يصبح الضوء بوابة للنظر إلى الماضي.

نحن في الواقع على دراية بهذا المفهوم لأنه يحدث في حياتنا العادية. ففي كل مرة تسمع فيها صوتَ الرعد في إحدى ليالي الصيف الحارة، ما تسمعه يكون حدثاً وقع بالفعل قبل ثوانٍ في الغلاف الجوي. وعندما تكون السحابة الرعدية فوقك مباشرة، فقد يبدو وكأنك تسمع صوت الرعد في الوقت نفسه الذي ترى فيه البرق. ومع ابتعاد السحابة، تصبح المسافة التي يقطعها الصوت والضوء أطول، لكن الضوء يكون أسرع بمليون مرة تقريباً، لذلك هناك تأخير متزايد بين رؤية البرق وسماع الرعد. يمكننا أيضاً أن نتساءل عما كان سيحدث لو كانت سرعة الضوء أبطأ بكثير. إذا غطى الضوء متراً واحداً فقط (حوالي ٣ أقدام) في بضع ثوانٍ، فيمكننا أن ننظر إلى القمر الآن ونرى نيل أرمسترونج وهو يخطو خطواته الأولى عليه من أجل البشرية. قد يبدو الأمر ضرباً من الخيال، ولكننا نستفيد من هذه الخاصية بالمقاييس الكونية. ونبني تلسكوباً لرصد الإشارات التي استغرقت ١٣ مليار سنة للوصول إلى الأرض. وتعتبر هذه إحدى الطرق التي نقتفي بها أثر النجوم الأولى، من خلال العودة بالزمن إلى الوراء، لمشاهدتها وهي تتشكّل وتعيش وتموت.

يتمحور هذا الفصل مثلما اتضح حول الضوء وغياهبه. تشكّل أنواعُ الضوء العديدة الطيفَ الكهرومغناطيسي، وهو سلسلة متصلة من الأطوال الموجية بدءاً من أشعة الراديو اللاسلكية، مروراً بالأشعة المرئية، ووصولاً إلى أشعة جاما. يمكن استخدام هذه الأطوال الموجية المختلفة للضوء للكشف عن عناصر الكون المختلفة، تماماً كما تُستخدم الأشعة

السينية للكشف عمّا بداخل الإنسان. ويمكن الكشف عما يدور بباطن النجوم من خلال نمط الضوء الذي تصدره، أي طيفها النجمي. وتكشف شدة الطيف عن درجة حرارة النجوم. كما يكشف النمط الطيفي للخطوط المظلمة عن العناصر الكيميائية التي تمتص الفوتونات في الغلاف الجوي النجمي، مما ينتج عنه وجود خطوط امتصاص مظلمة في الأطياف. قد تبدو السرعة التي ينتقل بها الضوء كبيرة، ولكن في المسافات الفلكية، تؤدي هذه السرعة المحدودة إلى تأخير في الوقت. فالشمس التي نراها هي الشمس كما كانت منذ ثمانين دقائق. ومن ثمّ، لرؤية النجوم الأولى، قد نحتاج إلى النظر لمسافات بعيدة جدًا يستغرق الضوء ١٣ مليار سنة للوصول إلينا. وهذا يتطلب إلقاء نظرة على مناطق بعيدة حجمها أكبر بكثير من حجم مجموعتنا الشمسية، بعيدًا عن أطراف مجرتنا، بل أبعد من المجموعة المحلية من المجرات، انطلاقًا إلى أعماق الكون.

كنت أتصفح كتابًا في مكتبة جامعتي منذ فترة ورأيت إهداءً غريبًا. في عام ١٩٦٤، نشر عالم الفيزياء الفلكية جورج جاموف كتابه المعنون «نجم اسمه الشمس».²⁵ وكتب فيه: «من الطبيعي أن أهدي كتابي الجديد إلى ذكرى الكتاب القديم»، وكان يقصد هنا كتابه «الذي عفى عليه الزمن على نحو ميئوس منه»، الذي نُشر قبل ٢٤ عامًا فقط. وتماشياً مع هذا الإهداء، وبعد استكشاف الخلفية الكامنة وراء أقرب نجم لنا والوقوف على حقيقة ما نعرفه ومقداره، علينا الآن أن نمضي قدماً ونجهّز أنفسنا لمواجهة ما لم نره من قبل.

هوامش

* في واقع الأمر هذه هي مدة الكسوف الكلي نفسها لعام ١٩٢٥. وقد حدث أطول كسوف في القرن الحادي والعشرين قبالة ساحل جنوب شرق آسيا في ٢٢ يوليو ٢٠٠٩، واستمر لمدة ست دقائق ونصف. وحتى أقصر فترات الكسوف لديها القدرة على إثارة الدهشة والإعجاب، على غرار ما عرضته فيرجينيا وولف في مذكراتها عن الكسوف الذي استمر ٢٤ ثانية في ٢٩ يونيو ١٩٢٧ في شمال إنجلترا: «... فجأة اختفى الضوء. لقد سقطنا. لقد انطفأ واندثر. لم يكن هناك لون ... لقد شهدنا موت العالم».²⁶

† وبالمناسبة، هناك عالم فلك آخر لم يمانع برودة الجو. فقد كتبت أخته كارولين هيرشل، التي عيّنها مساعدة له على غير رغبتها في البداية، عن تجمد تنورتها تمامًا،²⁷ أثناء أدائها لأعمالها. ولكنها في نهاية المطاف لم تكن تهتم بالبرد كثيرًا لأنها عثرت أخيرًا على شغفها فيما تفعله؛ إذ كانت تود أن تصبح أول عالمة تحصل على أجر مقابل عملها

وفازت بالميدالية الذهبية المرموقة للجمعية الفلكية الملكية في عام ١٨٢٨، في وقت لم يكن يُسمَح فيه للنساء حتى بحضور الاجتماعات.

[‡] وهكذا فإنك إذا فُكِّرت في الأمر، فستلاحظ أنه بمساعدة رودولف سيتمكَّن بابا نويل من التعرف على النقود المزيفة، بل حتى اقتفاء أثر كميات ضئيلة من الكوكباين والأمفيتامينات. ويعتبر هذا بُعدًا جديدًا مزعجًا لبابا نويل لمعرفة ما إن كنت مشاغبًا أم لطيفًا.

[§] الكلفن هو وحدة قياس لدرجة الحرارة مثل الفهرنهايت أو الدرجة المئوية. ونستخدمه لأننا لا نحب الخوض في مسألة درجات الحرارة السالبة في الفيزياء الفلكية، ومن ثَمَّ نحدد صفر كلفن على أنها أبرد درجة حرارة ممكنة، ونطلق عليها اسم الصفر المطلق، أي ما يعادل -٢٧٣,١٥ درجة مئوية. وللتحويل من الكلفن إلى الدرجة المئوية، كل ما عليك هو طرح ٢٧٣,١٥ كلفن.

^{||} الجزء الداخلي من الشمس عبارة عن كتلة شديدة الاضطراب من الجسيمات المستتارة، وقد يستغرق الفوتون مئات الآلاف من السنين ليشق طريقه من قلب الشمس إلى سطحها.²⁸ ومن الجدير بالذكر أنه على الرغم من أن الضوء قد غادر الغلاف الضوئي منذ ثماني دقائق، فالواقع أنه قد غادر قلب الشمس منذ فترة أطول كثيرًا: منذ حوالي ٥٠,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٨ دقيقة.

الفصل الثاني

أين تقع نجوم الجماهرة الثالثة؟

عندما تعلمتُ كيفية التدحرج بمهارة تحت بوابة أمن المتجر المتحركة كان ذلك في عام ١٩٩٧، أو ربما ١٩٩٨. فقد اعتدتُ كلَّ سبتٍ على مدى عدة أشهر أن أنتظر أنا ومجموعة من الأطفال خارج المتجر المحلي المتعدد الأقسام الموجود لدينا. وكنا نركض جميعاً ما إن نسمع صوت فتح البوابة، ونتدافع لنرى مَنْ يمكنه التدحرج أو الزحف تحت البوابة قبل غيره. وبمجرد انتهاء هذا التحدي الأول، كنا نقفز لأعلى، ونستدير إلى اليسار ونركض في المتجر بأقصى سرعة، قاصدين قسم الألعاب. بجوار درج النقود مباشرةً، كانت هناك سلة كبيرة من الخوص مليئة بدمى بيني ببلي. كنا نأخذ كلَّ ما يمكننا أخذه، ونتخلص من الأشكال الشائعة العديمة الفائدة، ونطلق صيحات البهجة المفعمة بالإنثارة عندما نجد ألعاب الدببة النادرة، مثل دب «بريتانيا بيني ببلي» الثمين، وهو دمية محشوة لدب بُني بسيط ومطرز على صدره علم المملكة المتحدة. ضرب من الجنون، أليس كذلك؟ إنها فترة من حياتي لا أفخر بها كثيراً. ولم أفخر كثيراً بالجانب الرأسمالي الذي أظهرته عند بيع الدببة نفسها في السوق الخارجية مقابل خمسة أضعاف ثمنها، مع الاحتفاظ بالدببة التي لم تكن موجودة في مجموعتي. ولحسن حظي، كان والداي يدعمان هوسي بلطف، ويسمحان لي بإنفاق أموالي (أو كسبها) كما يحلو لي، ودون تدخل شخصي من جانبيهما. وبعد عام أو نحوه، تلاشت الضجة التي صاحبت دمية بيني ببلي (فيما عُرف بفقاعة بيني ببلي)، مما جعل مجموعتي عديمة القيمة. لم أتكدَّ خسارة كبيرة جراء ذلك، على عكس أولئك الذين استثمروا آلاف الدولارات أو ما يزيد في الدمية المحشوة. أنفقت إحدى الأسر أكثر من ١٠٠ ألف دولار، بهدف استخدام الأرباح لتغطية رسوم الدراسة الجامعية.¹ وأدت استراتيجية الشركة المصنعة في «وقف» إنتاج تصميمات معينة في أوج شعبيتها إلى ظهور فقاعة بيني ببلي، مما أدى إلى ندرة المعروض في مقابل زيادة

الطلب، وبالتالي ارتفاع أسعارها. لكل مجموعة من المقتنيات عناصرها النادرة الفريدة من نوعها. إذا عثرت على طابع بريـد أصلي في اليوم طوابع أجدادك، فقد تكسب نصف مليون جنيه إسترليني. ومع ذلك، فإن الاستثمار ليس سوى دافع واحد لجمع الأشياء واقتنائها. فهناك مَنْ يجمعون الأشياء من أجل المتعة ليس إلّا. كلُّ شخص لديه عم يملك مجموعة من الضفادع، أو جدة لديها إبريق شاي فريد من نوعه على كل رفق. وإذا أمتعنت البحث جيّدًا، فسوف تعثر على أفراد يجمعون أيّ شيءٍ تقريبًا: أقماع المرور التحذيرية، علب صفيح، دمي باربي، أدوات حك الظهر. في ديفون، يمكنك الدفع مقابل التجول في أرجاء عدة أفدنة من الأراضي الشجرية التي تحوي ما يزيد على ٢٠٠٠ تمثال من تماثيل الأقزام. ففي اللحظة التي نقتني فيها شيئًا ما ونملكه، تزداد قيمته بالنسبة إلينا؛ فنحن نكوّن روابط شبه فورية مع الأشياء ومن ثمّ نستنكف التخلي عنها. قسّم مجموعة اختبار إلى مجموعتين وأعط كل مجموعة منهما شيئًا مختلفًا (لا تهم ماهية هذا الشيء: نقود أو تذكرة يانصيب، شوكولاتة أو كوب، كوبان مختلفان)؛ سوف يعتزون بما أُعطي لهم، ويرفضون مقياضته.² يُطلق على هذا الأمر اسم تأثير الهبة. فهناك شيء داخلنا يحتاج إلى فرز الأشياء وتصنيفها، ثم اقتنائها والاحتفاظ بها. قال الفيزيائيّ البريطاني إرنست رذرفورد عبارته الشهيرة إن «العلم كله إما فيزياء وإما جمع طوابع»، وذلك في تلميح ساخر إلى وجهة نظره الراضة، على سبيل المثال، لتصنيف علم الأحياء لمملكتي الحيوان والنبات إلى أنواع، وأجناس، وفصائل، وما إلى ذلك. وفي هذه الحقبة نفسها، في أوائل القرن العشرين، تصوّر عالم الفلك الأمريكي إدوين فروست نظامًا يقسّم النجوم إلى شعب وطوائف، مقترحًا بذلك تأسيس مملكة النجوم. لم نصل بعد إلى مستوى تعقيد الممالك الأحيائية، ولكننا توصلنا إلى استنتاجاتٍ مبتكرة حول تكوين النجوم عندما طبّقنا عليها مبادئ التصنيف الحيوي.

تصنيف النجوم

عندما بدأنا في تصنيف العالم من حولنا، بدأنا ببساطة شديدة: نحن البشر بالأسفل، وكل ما عدا ذلك هناك بالأعلى. لقد ترسخت الأهمية الثقافية لعلم الفلك في دوره في الخرافات والأساطير. فالمصريون القدماء كانوا يقدسون إله الشمس رع أكثر من بقية الآلهة، ويصورونه على أنه خالق الحياة بكل أشكالها. وفي القارة نفسها، يخشى شعب السان في صحراء كالاهاري الشمس حيث يعتقدون أنها نذير شؤم وتجلب الموت. ومن

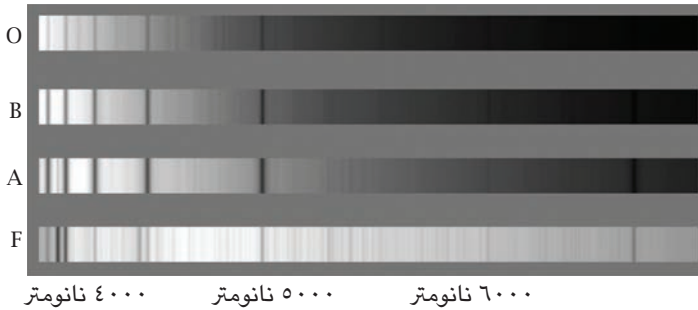
ثمَّ، كانوا يلودون بحياتهم من الحرارة الحارقة عن طريق حفر أغوار غير عميقة في الرمال، والتبول فيها، ثم الاستلقاء داخلها دون حركة وتغطية أنفسهم بطبقة من الرمال والانتظار حتى انقضاء فترة الحرارة الشديدة.³ كانت مجموعات النجوم هي مستودع القصص التي تهدف إلى التعليم أو التحذير أو حتى مجرد الترفيه. ففي اليونان القديمة، كانت كوكبة الجوزاء تمثل صيادًا عظيمًا، يطارد شقيقات الثريا السبع. وفي إحدى أساطير شعب الإسكيمو، يمثل حزام كوكبة الجوزاء زلّاجة، تطارد دبًا يمثلته منكب الجوزاء.⁴ وفي أستراليا، اختُزل حزام كوكبة الجوزاء إلى قدر صغير، والخنجر إلى مقبض. وحتى في وقتنا الحاضر، كثيرًا ما يُنسب السبب في وقوع بعض الأحداث أو الخيارات الحياتية إلى برج الشخص أو تأثير اصطافاف الكواكب ومحاذاتها. وقد انفصلت ممارسات علم التنجيم عن علم الفلك بوصفه حقلًا معرفيًا منذ فترة طويلة، وذلك عندما تبَيَّن أنه لا يوجد دليل على أن حركات الكواكب والنجوم يمكن أن تؤثر في تصرفاتنا على المستوى الفردي.

نشأت المساعي العلمية لعلم الفلك من حاجتين بشريتين، وهما حساب الوقت والملاحة. استخدمت الشمس والقمر لقياس مرور الوقت في جميع الثقافات، واسترشد البولينيزيون بظهور النجوم البعيدة واختفائها للتنقل في المحيط الهادئ قبل وقت طويل من حمل البحارة الأوروبيين أجهزة الأسطرلاب والسدس الفلكية. ومع أن رسم النجوم وتجميعها ورسم خرائط لها قد بدأ منذ آلاف السنين، فإن تقسيمها إلى مجموعات على أساس التكوين ودرجة الحرارة والحجم لم يحدث إلا بعد ظهور التحليل الطيفي النجمي.

بدأت المحاولات الأولى لتصنيف النجوم علميًا في عام ١٨٦٣، حيث قسّمها عالم الفلك الإيطالي أنجيلو سيكي إلى خمس مجموعات، أو إلى ما عُرف بفئات سيكي، اعتمادًا على شكل أطيافها. جُمعت بعض النجوم معًا لكثرة خطوط الامتصاص في أطيافها، وجُمع البعض الآخر معًا لقلّة خطوط الامتصاص في أطيافه، أو لوجود خطوط عريضة، وغير ذلك من أوجه تشابه أخرى. وكانت هذه المجموعات تصنّف بشكل عام حسب اللون: فطيف النجوم الحمراء يبدو متشابهًا، بينما تتميز النجوم الزرقاء بطيف مختلف.

شهدت تسعينيات القرن التاسع عشر عملية تصنيف النجوم، ليس باستخدام أجهزة الكمبيوتر كما نعرفها، ولكن عن طريق توظيف النساء، اللاتي أُطلق عليهن اسم «مسئولات الإحصاء». سمحت عمالة النساء الرخيصة لويليامينا بي فليمنج بالحصول على وظيفة مساعِدة لعالم الفيزياء الفلكية بجامعة هارفارد إدوارد سي بيكرينج. قيّمت فليمنج الأطياف النجمية وخصّصت لكل منها حرفًا وفقًا لقوة خطوط امتصاص الهيدروجين.

بدءوا بتخصيص الحرف A للنجوم التي تحتوي على أكبر قدر من الهيدروجين، والحرف B لتلك التي تحتوي على كمية أقل نوعاً ما من الهيدروجين، وهكذا حتى الحرف Q. كان هذا مرهقاً نوعاً ما، ولذلك أعادت مساعدة بيكرينج اللاحقة، آني جامب كانون، ترتيب النظام في عام ١٩٠١ وفقاً لدرجة الحرارة، ودمجت الفئات المتشابهة.⁵ وكانت تقوم مقام الكمبيوتر، حيث كانت تصنف مئات النجوم في الساعة حتى أُعيد تنظيم الفئات الأبجدية في النهاية إلى ١٠ فئات: OBAFGKMRNS، وهي الحروف الأولى لكلمات العبارة التالية: Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now Sweetheart والتي تعني «فلتكوني فتاة مطيعة ولتقبليني الآن يا عزيزتي» وعادة ما يستخدمها علماء الفلك لتذكر هذه الحروف. وتنقسم كل فئة من هذه الفئات إلى تقسيماتٍ عديدة أدق وفقاً لدرجة الحرارة، وبذلك تصبح شمسنا نجماً من الفئة G2.



شكل ٢-١: الأطياف النجمية. مثال لأطياف التصنيفات النجمية O و B و A و F. تختلف خطوط الامتصاص من حيث العدد والعرض.

صنفت مسئولات الإحصاء بجامعة هارفارد مئات الآلاف من الأطياف النجمية استناداً إلى قوة خطوط الامتصاص المرتبطة بالهيدروجين، وانتقلنا من مجرد التعجب من النجوم إلى تصنيفها وكأنها مجموعة من طوابع البريد. ومع ذلك، كان السبب العلمي وراء تصنيف النجوم إلى مجموعاتٍ هكذا غير مؤكد. ومن هنا طُرِح السؤال التالي: لماذا تكون للنجوم أنماط مختلفة من خطوط الامتصاص؟ بغض النظر عن قوة الخطوط المميزة، كان العلماء في أوائل القرن العشرين واثقين من أن وجود الخطوط نفسها في كل طيف، وإن اختلفت في قوتها، يشير إلى حقيقة أن جميع النجوم تتكون من العناصر نفسها.

علاوة على ذلك، لاحظ العلماء أن وجود عناصر مثل الحديد يعكس تكوين كوكبنا. وعندما لاحظ العلماء الخطوط الناتجة عن ذرات المعادن في الأطياف الشمسية، استنتجوا أنه نظرًا إلى وجود العناصر نفسها على الأرض وفي الأطياف الشمسية، فلا بد أن الأجرام تتكون من المادة نفسها. وعزوا اختلاف كثافة الخطوط إلى وجود اختلاف في درجة الحرارة. وفي عام ١٩٢٥، كانت وجهة نظرنا هي أنه إذا تعرضت الأرض لحرارة كافية، فستصدر الطيف نفسه الذي تصدره الشمس. فالنجوم لم تكن في نظرها سوى كواكب فائقة الحرارة. في ذلك العام، كتبت سيسيليا باين-جابوشكين أطروحة دكتوراه تطرح وجهة نظر مختلفة، أو بعبارة أدق، قدمت على استحياءٍ دليلاً على أن هذا الرأي غير صحيح، قبل أن تشير إلى أن الدليل محض خيال حتى إنه ربما يكون خاطئاً، والواقع أنه ربما يكون من الأفضل تجاهل ذلك تمامًا. ويُعدُّ هذا مثالاً نادرًا على أطروحة دكتوراه تمثل تحولًا جذريًا في الفهم، على الرغم من تجاهلها في ذلك الوقت.

اتساع الأفق

كانت سيسيليا باين-جابوشكين، على حد قول العديد من معاصريها، واحدة من أعظم علماء الفلك في القرن العشرين، وأكثرهم إثارة للاهتمام، على حدِّ تعبير ابنتها، أنها كانت «حياكة مبدعة».⁶ وُلِدَت باين-جابوشكين عام ١٩٠٠ في ويندوفر، باكينجهامشير (على بُعد ٨,٥٢ كيلومترات/٥,٣ أميال فقط من مسقط رأسي)، وبدأ اهتمامها بعلم الفلك في سن مبكرة. عندما رأت نيزكًا في السماء وهي في الخامسة من عمرها، أعلنت عن نيتها في أن تصبح عالمة فلك، مشيرةً إلى أنه من الأفضل لها أن تفعل ذلك بسرعة خشية نفاذ الأبحاث عندما تكبر. كان حبُّها الحقيقي الأول لعلم النبات، الذي ورثته من عمتها الكبرى دورا، وكانت تقضي ساعات في التجول عبر تلال تشيلترن، للتعرف على النباتات النادرة، وفهرسة النباتات غير العادية والتفكير بعمق في الأساس العلمي وراء التنوع المذهل للنباتات. التحقت بكلية نيونهام في جامعة كامبريدج بمنحة دراسية كاملة، بهدف متابعة اهتماماتها. ومع ذلك، اتضح أنه لا يوجد مَنْ يحاكي عمق تفكيرها في علم النبات، وسرعان ما أُصيبَت بخيبة أمل بسبب المنهج المقيد، وافتقار مقررها الدراسي إلى الحماس والبحث وإعمال الذهن. ولذلك لم يكن من المستغرب أن يتحوَّل اهتمامها نحو الفيزياء حيث كان العظماء مثل رذرفورد يعيدون تعريف تكوين الكون، ويحددون ماهية الذرة، ويتهامسون حول فكرة جديدة تسمى ميكانيكا الكم. كانت الفيزياء في ذلك الوقت علمًا

ديناميكياً سريع التطور، ومن ثمَّ استهوتها كغيرها فكرة الانضمام إلى كوكبة الفيزيائيين، ولو لم يكن المرءُ قادراً على التفكير بعمق في الكون المادي، فالأولى له ألا يطرق بابه. وبالفعل لم يمضِ وقتٌ طويل حتى بدأت باين-جابوشكين في دراسة المزيد من العلوم الطبيعية.

كان الانتقال إلى هذا المجال الذي يهيمن عليه الذكور في عشرينيات القرن الماضي أمراً له تحدياته الخاصة التي لا بد من التغلب عليها. وتذكَّرت أنها كانت في كل مرة تدخل قاعة المحاضرات تسمع أصوات الحاضرين وهم يضربون الأرض بأقدامهم تعبيراً عن استيائهم من انضمامها. ومن الموهن للعزيمة أنني سمعتُ عالمة الفيزياء الفلكية من أيرلندا الشمالية، جوسلين بيل بورنيل، تقول الشيء نفسه عن الفترة التي قضتها في الجامعة في الستينيات. ومع ذلك، ثابرت باين-جابوشكين، وتحملت غضب أحد محضري المختبر العملي صاح في النساء أن يخلعن مشداتهن خشية أن تتداخل مع التجارب الكهرومغناطيسية. ووسط كل هذه الظروف، حصلت على تذكرة مجانية في اللحظة الأخيرة لحضور محاضرة لآرثر إدينجتون عن رحلته إلى البرازيل من أجل مشاهدة كسوف عام ١٩١٨ والتحقق من نظرية النسبية. وكان لمحاضرة إدينجتون عن النسبية تأثير عميق في باين-جابوشكين.

كانت النتيجة هي تحوُّل كامل في تصوري عن العالم ... عندما عدتُ إلى غرفتي، وجدتُ أنني أستطيع كتابة المحاضرة كلمة كلمة ... ولادة ثلاث ليالٍ، على ما أعتقد، لم يغمض لي جفن. لقد انقلب عالمي رأساً على عقب لدرجة أنني شعرتُ بما يشبه الانهيار العصبي ... لقد اكتفيت من علم الأحياء، وكَرَّست حياتي للعلوم الطبيعية إلى الأبد.

يرد ذكر حالات الكسوف مراراً وتكراراً في هذا الكتاب نظراً إلى قدرتها الفريدة على الإلهام، مع أنها تحجب الشيء الذي نهدف إلى دراسته. فكسوف عام ١٩١٨ لم يقدم لنا تأكيداً للنسبية فحسب، بل كان سبباً في تخلي أحد أعظم العقول في علم الفلك عن اهتمامه بالنباتات الموجودة على الأرض، والنظر إلى النجوم، وإحداث ثورة في فهمنا للشمس.

قاد سعيُّ باين-جابوشكين الدؤوب وراء دراسة علم الفلك من جامعة كامبريدج إلى جامعة هارفارد في الولايات المتحدة، عندما قيل لها إن فرص العمل في إنجلترا غير متاحة لعالمات الفلك، سواء أكنَّ يرتدين مشدّاً أم لا. كانت سيسيليا باين-جابوشكين

امرأة من عصر النهضة بحق، حيث كانت تتقن عدة لغاتٍ سواء بدرجة عالية أو متوسطة من الطلاقة، وفي ذلك اللغة الأيسلندية. وكانت بارعة في الموسيقى الكلاسيكية، وأنشأت أوركسترا خاصة بها في مرصد هارفارد عندما اكتشفت عدم وجود أوركسترا هناك. ربما يُعزى هذا بدرجة كبيرة إلى تأثير جوستاف هولست، الذي كان مدرسًا في مدرسة التحقت بها في سنوات نشأتها الأولى. ومن الجدير بالذكر أنها حتى في شغفها الموسيقي وجدت نفسها متأثرة بعلم الفلك، حيث كان جوستاف هولست هو مؤلف أوركسترا «الكواكب» (ذا بلانيتس).

لقد كانت مخلصه ودقيقة في كل ما تفعله. وعندما سمعت بتعرُّض عالم زميل لها للاضطهاد في ألمانيا، ساعدته على الهروب إلى الولايات المتحدة. وعندما طلبت حكومة الولايات المتحدة من الناس زراعة المحاصيل الزراعية لصالح المجهود الحربي، لم تكتفٍ فقط بزرع القليل من البطاطس في حديقة منزلها الخلفية؛ بل اشترت قطعة أرض صغيرة وزرعت الخضراوات، وربّت الديوك الرومي، وخلّكت كل ما يمكن تخيله وتبرعت بحوالي ٥٠ ألف بيضة من دجاجاتها خلال فترة الحرب. فقد كانت سيسيليا باين-جابوشكين تنجز كل شيءٍ على أكمل وجه.

كانت هذه الإنجازات والتصرفات غير التقليدية تبدو ضئيلة بالمقارنة بإنجازاتها العلمية. فعادةً ما تكون رسالة الدكتوراه برنامجًا تدريبيًا يتضمن الإلمام بالمعلومات كافة التي تخص مجالًا معينًا وتطوير خبرتك فيه. انغمست باين-جابوشكين في رسالة الدكتوراه بتفانٍ مميّز، وعملت لأسابيع وشهور متواصلة دون راحة، لدرجة أن والدتها أرسلت خطابًا إلى المشرف على رسالة الدكتوراه تطلب منه إجبارها على أخذ إجازة. واعتمدت باين-جابوشكين على العمل الذي جرى تنفيذه سابقًا لإنشاء نظام لتصنيف النجوم. كان إنجازها هو تطبيق نظريات جديدة حول حالات تأيّن الذرة على الأطياف النجمية. وقد أدركت أن قوة خطوط الامتصاص لم تكن مؤشرًا مباشرًا على وفرة العنصر، بل علامة على حالة تأيّن العنصر. فالذرات تتكون من نواة تحيط بها إلكترونات. عند التسخين أو التعرض لضغط، يمكن أن تكسر الإلكترونات ارتباطها بالنواة وتخلص منها في عملية تسمى التأيّن. وستنتج الذرة الناتجة، أي الأيون، خطوط امتصاص مختلفة عن نظيرتها الأكثر اكتمالاً. ومن خلال تطبيق نظرية التأيّن على الأطياف النجمية، تمكّنت من إجراء تقديراتٍ أكثر دقة للوفرة النسبية للعناصر الكيميائية المختلفة الموجودة في النجوم. وبذلت جهودًا مضنية لمدة عامين للتحقق من الخطوط المميزة الموجودة في الأطياف وفهم

حالة التأين التي تشير تلك الخطوط إلى وجود الذرة بها. وأظهرت نتائج باين-جابوشكين أنه على الرغم من أن الشمس كانت تحتوي على عناصر موجودة أيضًا على الأرض، مثل الكربون والهيدروجين والهيليوم، كانت الوفرة النسبية لهذه العناصر مختلفة تمامًا. فالنجوم كانت تحتوي على هيدروجين أكثر بمليون مرة من نفحة المعادن البسيطة التي أظهرتها نتائجها. وكان هذا غريبًا جدًا بالنسبة إلى علماء الفلك في عام ١٩٢٥، لدرجة أنه على الرغم من كل الأدلة، قيل إن السبب وراء ذلك هو سوء تطبيق النظرية على عملية الرصد. وكان هنري راسل، عالم فلك زميل، «مقتنعًا بوجود خطأ خطير في النظرية الحالية. فمن الواضح أنه من المستحيل أن يكون الهيدروجين أكثر وفرة بمليون مرة من المعادن». وثقت باين-جابوشكين النتائج وأضافت بيانًا توضيحيًا مفاده أن الوفرة النجمية للهيدروجين والهيليوم «عالية على نحو غير محتمل، ويكاد يكون من المؤكد أنها ليست حقيقية».^{7,8} وحتى مع البيان التوضيحي، أدى نشر مثل هذه النتائج غير المتوقعة إلى الإضرار بسمعتها، وذكر أحد رؤساء العمل المحتملين أنه لا يستطيع النظر في توظيفها لسببين، أولهما أنها امرأة، وثانيهما أنه «شعر بخيبة أمل كبيرة» عند قراءة ورقتها البحثية. ليس الغرض من هذا إلقاء اللوم على راسل أو توبيخ باين-جابوشكين لعدم ثباتها على موقفها. فخلال تلك الفترة، أثارت تلك النتائج الحيرة، وحتى العلماء ذوو الرأي السديد يمكن أن يتشتت انتباههم عن الأدلة عندما تتعارض تمامًا مع نظرتهم المتأصلة إلى العالم. ولا يحتاج المرء سوى النظر إلى عالم الفيزياء الأشهر، ألبرت أينشتاين، وملاحظة مدى تجنبه للاستنتاج القائل بأن الكون يتمدد.

حوّلت باين-جابوشكين تركيزها إلى أبحاث أخرى، ولكن على مدى السنوات القليلة التالية ظهرت أدلة تكميلية أخرى تدعم النتائج التي كانت قد توصلت إليها. وفي غضون سنوات قليلة فقط، نشر راسل بحثًا أعلن فيه أن النجوم تتكوّن في الغالب من الهيدروجين. من المؤسف أن باين-جابوشكين لم تحصل إلا على القليل من الفضل مقابل عملها الرائد حول هذا الموضوع في ذلك الوقت، ولم يكن هناك أي ذكر لإصرار راسل على أن نتائجها ليست صحيحة. ووفقًا لرواية ابنتها، لم تجمل باين-جابوشكين كلامها قط ولم تتمكن من إخفاء مرارتها أو غيرتها جيدًا، وكانت مشهورة بالتعبير عما تشعر به تجاه موقف ما، حيث قالت:

كثيرًا ما يأتي الشباب إليّ، ولا سيّما الإناث منهم، طلبًا للنصيحة. فما هي نصيحتي إليكم، ويمكنكم تكييفها مع ظروفكم. لا تحض غمار مهنة علمية

بحثاً عن الشهرة أو المال. فهناك طرق أسهل وأفضل لتحقيق ذلك. ولا تتولّها إلا إذا لم يكن هناك شيء آخر يرضيك؛ فربما يكون هذا الرضا هو الشيء الوحيد الذي تحققه فيها. وستكون مكافأتك هي اتساع الأفق أمامك كلما تقدّمت خطوة في أبحاثك. وإذا نلت تلك المكافأة فلن تطلب غيرها.⁹

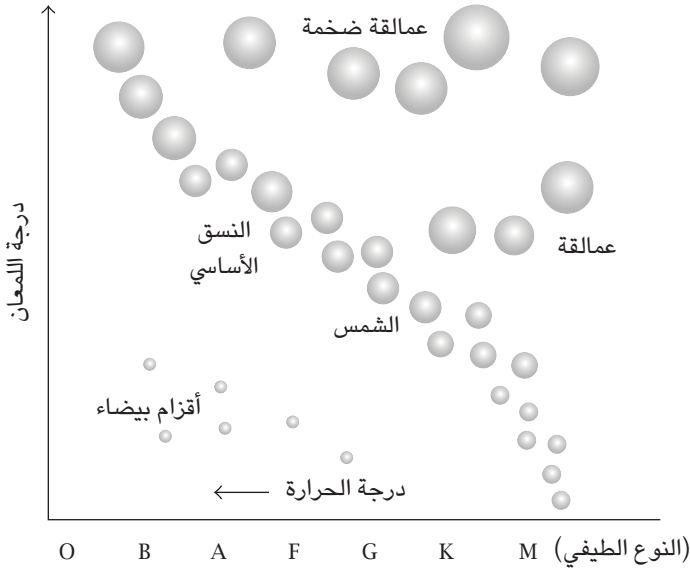
وبفضل باين-جابوشكين وراسل، توصل عالم الفلك إلى حقيقة مفادها أن النجوم تتكوّن في الغالب من العنصر الأخف في الكون، وهو الهيدروجين.

صور عائلية

عند النظر إلى كيفية اختلاف لون النجم ولمعانه، نجد أن النجوم تشكّل مجموعات لطيفة ومتسقة تساعدنا على فهمها ليس بوصفها كائنات ساكنة ولكن بوصفها كيانات متطورة. يمثل مخطط هرتسبرونج-راسل (الذي سمي بذلك تيمناً بهنري راسل نفسه، ويُعرف اختصاراً بمخطط إتش-آر) كل نجم بنقطة على رسم بياني حيث يحدد لون النجم مكانه على الإحداثيات الأفقية، ويحدد لمعان النجم مكانه على الإحداثيات العمودية. إذا اخترت مجموعة من النجوم ورسمت كل نجم على مخطط هرتسبرونج-راسل، فستجد أن النجوم غير موزعة بالتساوي عبر المخطط، بل تشكّل مجموعات وخطوطاً بدلاً من ذلك. والسبب في ذلك أننا عندما ننظر إلى نظام نجمي، فإننا نرى الكثير من النجوم، جميعها في مراحل مختلفة من حياتها. فلكل منها مراحل حياة وسماتها قابلة للتقسيم إلى عائلات وأجيال. اشتهرت باين-جابوشكين بالإشارة إلى نجوم معينة على أنها أصدقاء لها وإضفاء طابع إنساني عليها؛ يمكنني فهم السبب الذي دفعها إلى ذلك. فبالنظر إلى أي نظام نجمي، فإنك في الواقع تلتقط لقطة لحظية لتطور هذا النظام النجمي. ولأننا على دراية بكيفية تطور حياة الإنسان، فعندما نلتقط صورة لعائلة كبيرة، فإننا ندرك من الأعضاء الجدد، ومن كبار السن، ومن تربطهم صلة قرابة وثيقة. يمكننا تصنيف البشر إلى مجموعات تقريبية: الرضع والأطفال والمراهقين والشباب ومتوسطي العمر وكبار السن. ومع ذلك، عند النظر إلى مجموعة من النجوم، يصعب علينا فهم أي النجوم ربما يكون قد نشأ مع أي نجم آخر وأياً يمر بمراحل عمره الأخيرة، ولكن تتضح الفئات العمرية المختلفة على هيئة هذه المجموعات والمسارات المختلفة التي تظهر على مخطط هرتسبرونج-راسل. يمثل كل مسار ومجموعة مرحلة مختلفة من حياة النجوم. ومن ثمّ، أرى أنه من الخطأ

الضوء الأول

وصف النجم بأي طريقة ثابتة. فالنجم كيان متطور، منذ لحظة الانهيار الأولى في سحابة غازية، وحتى لحظة زواله العنيف في كثير من الأحيان.



شكل ٢-٢: مخطط هرتسبرونج-راسل. في الأنظمة النجمية الشابة، تقع غالبية النجوم في النسق الأساسي. وفي الأنظمة الأكبر سنًا، تطورت معظم النجوم ذات الكتلة الأكبر (الأكثر سخونة) خارج النسق الأساسي، وتحولت إلى عمالقة أو أقزام بيضاء.

يخبرنا مخطط هرتسبرونج-راسل عند أبسط مستوياته أن هناك نسقًا أساسيًا يمتد على نحو مائل عبر منتصف الرسم البياني، حيث تقضي معظم النجوم ٩٠٪ من حياتها. ويعتمد موقع النجم في النسق الأساسي على كتلة ذلك النجم أو بشكل متكافئ درجة حرارته، حيث تقع شمسنا في الثلث الأول من النسق الأساسي من ناحية الجزء السفلي. وسيبقى نجم مثل شمسنا في النسق الأساسي لحوالي ٩ مليارات سنة، مرًا منها ما يقرب من ٤,٦ مليارات سنة. ومن النسق الأساسي، يهاجر نجم متوسط الكتلة إلى مرحلة العمالق الأحمر، ويتضخم حجمه لدرجة أنه عندما تصل شمسنا إلى هذه المرحلة، فستكون على وشك الوصول إلى مدار الأرض. ما يحدث بعد ذلك يعتمد على كتلة النجم. فإذا كان

النجم يقع بالقرب من الحد الأدنى للمقياس، فسوف ينفد مصدر الطاقة الخاص به ولن يتبقى سوى بقايا صغيرة تعرف باسم القزم الأبيض. أما إذا كان على الجانب الأكثر ضخامة، فسينفجر على شكل مستعر أعظم، حيث يدمر نفسه ويطلق قدرًا كبيرًا من الطاقة يضاهي الطاقة التي تصدر من جميع النجوم الأخرى في المجرة في انفجار مفاجئ. وإذا نجا قلب النجم من الانفجار، فقد يستقر في حالة من الخمول الدائم في صورة نجم نيوتروني، وهو نجم ثقيل جدًا تبلغ كتلته كتلة شمسين محشورتين في مجال بحجم مدينة صغيرة. وإذا كانت بقايا النجم الناجية ضخمة بدرجة كبيرة، فحينها سينهار ما تبقى من النجم بالكامل، ويتشكل ثقب أسود. إن السرعات التي تنتقل بها النجوم على طول هذه المسارات تكون محكومة بكتلة النجم نفسه. فالنجوم الأكبر حجمًا تحرق وقودها بمعدل أسرع، مما يؤدي إلى قصر عمرها. وبالتالي، إذا رصدنا نظامًا قديمًا جدًا، فسنجد أن معظم النجوم الكبيرة الكتلة قد تجاوزت حد الكتلة الكبيرة للنسق الأساسي، ودخلت في مرحلة العملاق الأحمر أو أنهتها. تمامًا كما هو الحال في صورتنا العائلية، فإذا رأينا واحدة بعد مرور ٣٠ عامًا، فمن المرجح أن يكون بعض من أفراد العائلة الأكبر سنًا قد أصبحوا متقدمين في السن أو، للأسف، لم يعد لهم وجود في الصورة على الإطلاق.

في عام ١٩٤٤، لاحظ فالتر بادى أن بإمكانه تقسيم النجوم إلى نوعين، لكل منهما مخططات هرتسبرونج-راسل مختلفة جدًا، اعتمادًا على مواقعها في المجرة.^{10, 11} تتكون المجرة الحلزونية عادة من تجمع نجمي في المركز، يعرف باسم «الانتفاخ»، بالإضافة إلى «قرص» ذي هيكل على شكل ذراع حلزونية، و«هالة» مطوقة ذات بنية نجمية أكثر انتشارًا. وجد بادى أن النجوم الموجودة في المناطق المحيطة بالشمس (أي قرص المجرة) قد شكّلت مخطط هرتسبرونج-راسل مختلفًا عن مجموعات النجوم التي تقع بعيدًا في هالة درب التبانة، وقد نشأت هذه المخططات أيضًا من البيانات المستمدة من قرص مجرة أندروميديا وهالتها. كان بادى أول من روج فكرة أن نجوم النوع الأول كانت شابة وأن نجوم النوع الثاني كانت كبيرة في السن، من خلال ملاحظة أن نجوم الهالة من النوع الثاني الأكبر سنًا قد تطورت خارج النسق الأساسي، مما أنتج مخطط هرتسبرونج-راسل مختلفًا عما أنتجته نجوم النوع الأول الأصغر سنًا في القرص.¹² يبدو أن السمة الرئيسية المميزة للنجوم في المجموعتين هي عُمر خطوط المعادن وقوتها في الطيف، ولكن لم يكن يتوفر فهم لهذا التقسيم بمعايير علم الفيزياء.

لقد أقنعت أبحاث سيسيلىا باين-جابوشكين المجتمع العلمي أن الشمس تختلف في تركيبها عن الأرض وتتكوّن غالباً من الهيدروجين. كان الوضع الجديد حتى خمسينيات القرن العشرين هو أن مكونات الشمس، على الرغم من اختلافها عن الأرض، كانت في ذلك الوقت مثل أي نجم آخر. وفُهم خطأً أن اختلاف قوة الخطوط في الأطياف المختلفة تنجم حصرياً عن اختلاف درجات حرارة النجوم. في خمسينيات القرن العشرين، اكتُشفَ نجم فقير بالمعادن لديه خطوط معادن باهتة وهنا تعدّر تفسير ذلك باختلاف درجة الحرارة وحدها مقارنةً بالشمس. ونشأ مجال جديد تماماً، يُسمى علم الآثار النجمي، الذي سناقشه بإسهاب في الفصل السابع. أشارت خطوط المعادن الأضعف إلى محتوى معدني داخلي أقل، وعند اقتران ذلك بالنظرية القائلة بوجود مجموعتين مختلفتين من النجوم الصغيرة والكبيرة في السن، فإن هذا يعني ضمناً أن ما يحتويه الكون من معادن قد زاد بمرور الوقت. فنجوم النوع الثاني الأكبر سناً كانت أكثر فقراً في المعادن من نجوم النوع الأول الشابة. ولقد فهمنا لأول مرة أن هذه المعادن الثقيلة أُنتجت داخل النجوم، وتنتشر في الكون مع انفجار النجوم. وتتشكل النجوم الأصغر سناً من غاز مشبع بالمعادن بالفعل، مما يمنحها نسبة أعلى من محتوى المعادن. ولولا أن النجوم تنتج الكربون والحديد والنيوتروجين، لما كنا موجودين على الإطلاق، أو كما قال عالم الفيزياء الفلكية الأمريكي كارل ساجان: «نحن مصنوعون من غبار النجوم».

جواهر النجوم

ما زلنا نستخدم هذين النوعين اليوم، باستثناء أننا نشير إليهما بنجوم الجوهرة الأولى ونجوم الجوهرة الثانية. نجوم الجوهرة الأولى هي نجوم شابة غنية بالمعادن ويشيع وجودها في قرص المجرة. وتعتبر شمسنا نجماً من نجوم الجوهرة الأولى. أما نجوم الجوهرة الثانية فهي نجوم أكبر سناً وفقيرة في المعادن، وغالباً ما توجد في صورة مجموعاتٍ في الهالة التي تطوّق مجرتنا، أو في التركيز المركزي للنجوم، أو ما يسمى بالانتفاخ. على مدى النصف الأول من القرن العشرين، تطوّر فهمنا للنجوم بدءاً من كونها كياناتٍ مشابهة للأرض، ثم كياناتٍ مشابهة للشمس، وأخيراً مجموعة متنوعة. فهناك نجوم مختلفة الألوان والبنية والحجم والتكوين. وهناك نجوم صغيرة في السن ونجوم كبيرة في السن، ونجوم شائعة وأخرى نادرة. والنجم الأندر على الإطلاق هو ما نحتاج إليه لإكمال مجموعتنا. خلال النصف الأخير من القرن العشرين، أدرك علماء الفلك أن

الانفجار العظيم لم يكن هو المسئول الوحيد عن تكوين جميع العناصر التي نراها حولنا، ولا بد أن النجوم كان لها دور في ذلك. هذا الاستنتاج يحمل في طياته أيضًا حتمية أنه كان هناك في بداية نشأة الكون غاز فقير في المعادن، أو في حقيقة الأمر غاز يكاد يكون منعدم المعادن. ومن ثمّ تعتبر نجوم الجمهرة الثالثة فئة النجوم التي تشكّلت من الغاز البدائي الخالي من المعادن. فهذه هي النجوم الأولى، النجوم الخالية من المعادن، ويُستخدم هذان المصطلحان على نحو تبادلي في الكتاب. كانت نجوم الجمهرة الثالثة، وأعتقد أنها لا تزال كذلك، مفهومًا نظريًا. فهي نتيجة منطقية لملاحظاتنا وفهمنا للتطور الكيميائي للكون في مراحله الأولى، لكننا لم نؤكد بعد صحة نظريتنا بعمليات الرصد. وقد ظل علماء الفلك يبحثون منذ أن كان تصورهم مجرد فكرة، إلا أن النجوم قد نجحت حتى الآن في التملص من عمليات الفحص.

هناك مزحة في الأوساط الأكاديمية مفادها أنه إذا كانت الورقة البحثية تتضمن سؤالاً في عنوانها، فلا شيء يجبرك على إكمال القراءة لأن الإجابة ستكون دائمًا بالنفي. في عام ١٩٨١، كان من الممكن أن ينشر عالم الفيزياء الفلكية الأمريكي هارولد بوند البحث الذي أعدّه بعنوان: «هل وجدنا نجوم الجمهرة الثالثة؟» حيث ستكون الإجابة «لا». ولكنه، بدلاً من ذلك، عنوان ورقته البحثية بـ «أين تقع نجوم الجمهرة الثالثة؟»¹³ وهو سؤال لا يتطلب الإجابة بنعم أو لا، بل يثير في ذهن القارئ حيرة محبطة. وكانت رسالة الدكتوراه التي أعدها بوند تتمحور حول البحث عن النجوم الخالية من المعادن. وعلى مر السنين، كان يبحث في أكثر من نصف السماء عن أي نجوم تحتوي على ما يقل عن ١ / ١٠٠٠ من معدنية الشمس، وهو تعريف نجم الجمهرة الثالثة في ذلك الوقت. حقّق الاستقصاء الخاص به الكثير، وعثر على بعض النجوم المثيرة للاهتمام التي كانت تصل معدنيّتها إلى ١ / ٥٠٠ من معدنية الشمسية وأقل من ذلك ... ولكن لم يكن عددها كبيرًا. ولم يتجاوز أيّ منها حدود نجوم الجمهرة الثالثة. لقد تحدّثُ إلى البروفيسور بوند مؤخرًا وسألته عن مدى الاستياء الذي أثاره عنوان هذا البحث:

لقد بحثتُ فيما يقرب من نصف السماء ... وأخيرًا كتبتُ ورقة بحثية تشير إلى أن هناك بالفعل عددًا قليلًا جدًّا من النجوم ذات [المعدنية المنخفضة] ... أعلمين، لقد شعرتُ بخيبة أمل لأنني بذلتُ كل هذا الجهد للعثور على هذه النجوم؛ إذ كنت كمن يبحث عن إبرة في كومة قش. وكما تعلمين، كنت أحاول

فقط أن أوضح: «كيف يمكننا فهم هذا الأمر؟» ... ربما عندما بدأت كطالب ساذج، اعتقدت أن هذه النجوم موجودة وربما لو أُلقيت نظرة باستخدام التقنية المناسبة لعثرتُ عليها، ولذا ذهبتُ فعلياً لألقي نظرة، لكن أين هذه النجوم اللعينة؟ لم أعثر على شيء ... فكيف سأجد كل هذه النجوم المذهلة ... وهي غير موجودة بالفعل.

أخبرني بوند أن عنوان بحثه «أين تقع نجوم الجبهة الثالثة؟» كان اقتباساً مباشراً من مؤتمر حضره. وكان أحد الحضور، عالم الفيزياء الفلكية الأمريكي إيفان كينج، قد قدّم عرضاً تقديمياً بعنوان «الفصائح العلمية»، وكان لغز النجوم الأولى المفقودة أحدها. أحببتُ مصطلح «الفصائح العلمية»، وكأن الكون متورط في عملية تواطؤ وتستر. ومع ذلك، فهي بطريقة ما لعبة أُجبرنا فيها على لعب دور المحقق. ففي علم الفلك، لا تنبع التحديات في كثير من الأحيان من صعوبة العثور على إجابات؛ ففي نهاية المطاف، النجوم والمجرات ليست صغيرة إلى هذا الحد. فالإجابة واضحة للعيان، ولكنها موجودة وسط كميات هائلة من البيانات، ومهمتنا هي استنباط أسطر الأرقام القليلة، والانحرافات الحادثة في النظام، التي تكشف عن موقعها.

يجري البحث عن النجوم الأولى بحماس بالغ اعتباراً من عام ٢٠٢٠. كانت أساليب بوند سليمة ولكنها محدودة، ولم تكن قادرة إلا على استكشاف درجة سطوع معينة، وبالتالي مسافة معينة. لدينا الآن طرق يمكننا بها تعميق نطاق البحث، بحيث يشمل أيضاً مجراتٍ أخرى. وإلى جانب البحث المباشر عن هذه النجوم، لدينا أيضاً طرق لتتبع آثارها والكشف عن تأثيرها على بيئاتها واستنتاج خصائصها. إن نجوم الجبهة الثالثة بمثابة دمي «بيني بيبى» النادرة التي نفتقد وجودها على أرففنا، أو المكان الفارغ لطابع «بيني بلاك» أصلي مفقود من مجموعة طوابع بريد لدينا. وللعثور عليها، نحتاج إلى أفكار جديدة وموارد وقدرة على التحمل.

ولذا، من الأفضل أن نبدأ من البداية.

الفصل الثالث

الانفجار الصغير

تبدأ قصتنا بحمامة أو اثنتين. نحن نتعامل مع الحمام باعتباره مصدر إزعاج في المناطق الحضرية، وهو يحتل المرتبة الأولى بين الطيور المؤذية في الولايات المتحدة. يوجد ما يقرب من ٤٠٠ مليون حمامة في العالم، أستطيع أن أرى ثمانية منها خارج نافذتي الآن. في موطن نشأتي، نشير إلى الحمام على أنه فئران ذات أجنحة، لكنه ليس غيبياً كما تظن. وهناك عدد مذهل من الدراسات التي تدحض فكرة أن الحمام «أحمق». وهناك دلائل تشير إلى أن بإمكانه التمييز بين أعمال الفنانين المختلفين،¹ والتعرف على الكلمات،² والعد إلى تسعة،³ حتى التمييز بين الأورام الحميدة والخبيثة في صور الأشعة.⁴ ومن السمات الإيجابية الأكثر شيوعاً للحمام هي قدرته على العودة إلى منزله، التي يمكن أن تؤدي إلى تسابق الحمام في طريقه إلى منزله بسرعة تصل إلى ٩٧ كم/ساعة (٦٠ ميلاً في الساعة) على مسافات تصل إلى ١٦٠٩ كم (١٠٠٠ ميل). في عام ٢٠١٩، بيعت حمامة سباق تُدعى أرماندو بأكثر من مليون جنيه إسترليني،⁵ وهذا دليل على حجم الإشادة بقدرات الحمام على التسابق. وقد اهتم مربو الحمام بصقل قدراته على العودة إلى المنزل بصورة انتقائية لآلاف السنين؛ لأنه لفترة طويلة قبل تويتر والهواتف المحمولة، كان الحمام أسرع وسيلة لنقل الرسائل. فنتائج الألعاب الأولمبية الأولى، وأخبار غزو يوليوس قيصر لبلاد الغال وهزيمة نابليون في واترلو، قد نُقلت جميعاً عن طريق الحمام.⁶ وفي الآونة الأخيرة، تسببت رسائل استخباراتية حربية مهمة نقلها الحمام في إنقاذ الأرواح في جميع أنحاء أوروبا خلال الحربين العالميتين الأولى والثانية، ولكن لم يخلُ الأمر من التضحية بالطيور. وقد لقي عشرون ألفاً من حمام الجيش حتفها في هاتين الحربين.⁷ فقد طارت الحمامة شير آمي، التي تعني بالعربية «الصديقة العزيزة»، مسافة ٤٠ كيلومتراً (٢٥ ميلاً) في عام ١٩١٨، على الرغم من إصابتها بالعمى وتعرضها لطلق ناري في الصدر، وإصابة إحدى ساقيها

إصابة بالغة. وعلى الرغم من سقوط حمامتين أمامها، فقد نجحت في توصيل الرسالة التالية: «نحن على طول الطريق ٢٧٦,٤ الموازي. مدفعيتنا تقصفنا بوابل من النيران. أوقفوا القصف بحق السماء.»، وهو ما أدى إلى إيقاف وابل من النيران الصديقة وساعد في إنقاذ حياة ١٩٤ رجلاً.^٨ مُنحت اثنتان وثلاثون حمامة في وقت الحرب، وأرواحاً باسلة مثل جي آي جو، وسام ديكن، وهو أرفع وسام يُعطى للحيوانات التي تخدم في الجيش. وهناك حمامة واحدة على الأقل، وهي ماري من مدينة إكستر، لديها نُصب تذكاري صغير خاص بها.^٩ لعلك تتساءل الآن عن هدي من هذا كله؟ ما أقصده أنك أينما نظرت في أحداث التاريخ فستجد عادةً حمامة كان لها بالغ الأثر.

مادة عازلة بيضاء

في عام ١٩٦٤، كان عالما الفلك الأمريكيان روبرت وودرو ويلسون وأرنو ألان بنزياس يتساءلان عما يجب فعله بشأن حمامتين تعششان في هوائي بوقي مربع يبلغ طوله ٦ أمتار (٢٠ قدماً). بُني الهوائي الموجود في مختبر «بل تليفون» في نيو جيرسي قبل خمس سنوات ليكون بمثابة قناة اتصال بالأقمار الصناعية. وقد صمّم شكل مخروط الآيس كريم الجانبي الغريب ليكون بمثابة حاجز أمام أي إشارة تنبعث من الأرض أو ترتد عنها، مما يضمن الحصول على قناة اتصال واضحة مع القمر الصناعي. وتتمتع موجات الراديو بالطول الموجي المناسب للانعكاس عن طبقة الأيونوسفير للأرض، وهي إحدى طبقات الغلاف الجوي العليا ومكوّنة من جسيمات مشحونة. وهذا يعني أننا نستطيع أن نجعلها ترتد عن عمد، ونوجهها نحو هوائي موجود على سطح الأرض. ويُعدّ هذا أمراً رائعاً لأي شخص يستمع إلى محطة راديو ٤ في المرتفعات الاسكتلندية. ومع ذلك، فهو أمر غير مواتٍ لعلماء الفلك؛ لأن ما سيؤول إليه الأمر في نهاية المطاف أن أحدث حلقات المسلسل الدرامي «ذا أرتشيرز» (رماة الأسهم) ستغطي على الإشارة الفلكية المطلوبة وتحجبها. فالتركيز المحدود للهوائي على السماء جعل من الهوائي البوقي في بلدة هومديل جهازاً ممتازاً لإجراء عمليات الرصد الفلكية للسماء، دون أي تدخل أرضي.

قرر بنزياس وويلسون استخدام هوائي الاتصالات كتلسكوب راديوي استناداً إلى أطروحة الدكتوراه الخاصة بويلسون، والتي افترضت نظرياً وجود هالة خافتة من الغاز حول مجرة درب التبانة. لكن حتى ذلك الحين لم تكن لديه المعدات القادرة على قياس مثل هذه الخلفية الخافتة في مواجهة كل الإشارات الأرضية غير المفيدة. ولذا أجريا

قياساتهما على تردد ١٤٢٠ ميگاهرتز؛ لأنه في حال وجود هالة من الهيدروجين، فمن المؤكد أنها ستصدر إشعاعًا عند هذا الطول الموجي. كان المستخدمون السابقون للهوائي البوقي في هومديل قد تركوه جاهزًا لاستقبال تردد قيمته ٤٠٨٠ ميگاهرتز. ومن قبيل المصادفة، ستكون هالة درب التبانة النظرية غير مرئية عند تلك الترددات. كان هذا طولًا موجيًا غير متوقع لإجراء اختبار صفري للتلسكوب الخاص بهما؛ حيث شغلًا على تردد لا يُتوقع أن يستقبل عليه أي إشارة وتأكدًا من أن القراءة صفر للتحقق من المعدات. وفي يونيو ١٩٦٤، وجَّه التلسكوب إلى السماء، وحسبًا مصادر الإشارة المعروفة داخل الجهاز والسماء، وتوقعًا العثور على قيمة صفرية. لكن حسبما قال ويلسون: «كان أحد أهدافنا قياس الحد الأدنى لسطوع السماء ... وقد سار ذلك على نحو خاطئ للغاية».¹⁰

فبدلاً من القراءة الصفرية التي توقعها بنزياس وويلسون، حصلنا على ٣,٥ درجة فوق الصفر المطلق؛ أي إن درجة الحرارة عند هذه الإشارة كانت ٣,٥ كلفن. ولاستبعاد المصادر التي قد يكون للإنسان دخل فيها، وجَّه التلسكوب إلى أكبر تجمع قريب للبشر، في مدينة نيويورك. فلو كانت هذه الإشارة ناجمة عَرَضًا عن أجهزة التلفزيون أو الراديو أو أي نشاط بشري آخر، فإن التركيز الأعلى لهذا النشاط سينتج إشارة أعلى في التلسكوب. لكن للأسف، ظلت الإشارة كما هي، ٣,٥ كلفن بغض النظر عن اتجاه التلسكوب. فحص العالمان الأجزاء الداخلية للتلسكوب بحثًا عن مصدر هذه الإشارة المزعجة، لكن الإشارة ظلت موجودة؛ فقد كانت قادمة من كل حذب وصوب في السماء. تحضرني هنا لشيرلوك هولمز عبارة شهيرة يقول فيها: «عندما تستبعد المستحيل، فإن كل ما يتبقى هو حتمًا الحقيقة، مهما كان مستبعدًا».¹¹ لقد جرَّب بنزياس وويلسون كل شيء واضح، ومن ثَمَّ فلا عجبَ أنهما بدأ بعد ذلك في النظر إلى ما هو غير محتمل. ووجدوا أن هناك حمامتين استقرتا في أعماق بوق الهوائي بجوار صندوق المراقبة الساخن. وقد غلَّفتا الجزء الداخلي من الهوائي بما أشار إليه بنزياس بأدب على أنه «مادة عازلة بيضاء». أو كما نقول «فضلات حمام». تعمل الفضلات كمادة عازلة، وموصل رديء يمكن أن يسبب تداخلًا في الإشارة اللاسلكية. أثبت هذان الطائران أنهما عنيدان، ففي كل مرة كان بنزياس وويلسون يبحثان في منطقة جديدة من السماء، كان الهوائي بأكمله يدور، مما يؤدي إلى الإطاحة بالحمامتين كما لو كانا يركبان أحد ألعاب الملاهي.¹² فالمكان لم يكن مريحًا على الإطلاق ليقوما عشمهما فيه ولكن يُقال إن الحمام يتزاوج مدى الحياة ولذا اعتبرا التلسكوب موطنهما.

وفقاً لويلسون، احتُجِرَ الطائران في صندوق، وشُحِنَا إلى مربّي حمام. نظر إليهما مربّي الحمام، ووجد أنهما حمامتان غير مميزتين، ولذا أطلق سراحهما.¹³ وما إن نُظِّفَت المادة العازلة البيضاء من الهوائي، حتى عادت الحمامتان إلى عش حبهما النظيف بعد يومين. إن غريزة عودة الحمام إلى موطنه أمر عظيم حقاً، أليس كذلك؟ يروي بنزياس ما حدث بعد ذلك قائلاً:

في النهاية، قررنا التخلص منهما بالرغم من أنني لم أكن سعيداً بهذا القرار، لكننا وجدنا أخيراً أن التصرف الأكثر إنسانية هو إحضار بندقية. أحضرنا بندقية، ومن مسافة قريبة جداً، قتلناهما فماتا على الفور. لذلك، لم أكن سعيداً حيال هذا الأمر، ولكنه بدا التصرف الصحيح الذي ينبغي عمله. بدا وكأنه السبيل الوحيد لحل هذه الأزمة.¹⁴

إن دور هاتين الحمامتين في هذه القصة أسطوري جداً، حتى إنه يمكنك رؤية المصيدة التي استخدموها للإمساك بهما عند زيارة المتحف الوطني للطيران والفضاء في واشنطن العاصمة. كنت أعرف الجزء الأول من هذه القصة منذ أيام الدراسة الجامعية، وأثناء بحثي لتأليف هذا الكتاب أمضيتُ وقتاً في معرفة مصير الحمامتين على أمل الحصول على نهاية سعيدة لهما. لكنها كانت على الأقل نهاية سريعة. نُظِّفَ بنزياس وويلسون التلسكوب، وشغّلوا، ومع أنه كان خالياً من الحمام، فإن درجة حرارة الإشارة سجّلت ٣,٥ كلفن مجدداً. وقد أكّدا على مدى العام أن الإشارة ظلت كما هي خلال الدورات اليومية والموسمية. واستبعدا الإشارات المنبعثة من البشر والمعدات المعطلة وبراز الحمام. إذن ما كان مصدر هذه الإشارة؟ اتضح أنه بينما كان بنزياس وويلسون يعتقدان أن الانفجار الصغير للبندقية سيحل مشاكلهما، فقد أدى في واقع الأمر إلى اكتشافهما بقايا إشعاع الانفجار العظيم.

الانفجار العظيم

الانفجار العظيم فكرة واضحة مفادها أن كل المادة في الكون قد سُحِقت في ذات كثافة لا متناهية حتى انفجر الزمكان وانبعجَ نحو الخارج، فأدى ذلك بدوره إلى تمدد الكون الذي نعيش فيه اليوم. ليتني أستطيع تلخيص الأمر في جملة واحدة، ولكنه ليس بالفكرة التي يمكن للعقل البشري استيعابها بسهولة. فلا عجب أن يلقي الأمر معارضة شديدة من

العقول العلمية المحترمة في ذلك الوقت. ومن وجهة نظري، وعلى غرار العديد من العلماء الآخرين، فالانفجار العظيم نظرية منافية للعقل لكنها مقنعة تمامًا في الوقت نفسه. فهو نظرية فُرضت على عقولنا المحدودة الثلاثية الأبعاد، غير القادرة على تصوّر اللانهائية ولكنها قادرة على فهم الأدلة الدامغة. حتى أينشتاين نفسه كان يعاني من فكرة أن كوننا قد يكون أي شيء آخر عدا أن يكون ساكنًا. وكما هو معروف، فقد غير أينشتاين معادلات النسبية العامة التي وضعها لتشمل حدًا إضافيًا، وهو «الثابت الكوني»، لإيقاف التمدد الذي تقترحه معادلاته بطبيعة الحال، والحفاظ على كل شيء ثابتًا.¹⁵ لا عليك إذا كنت ترى أن فكرة الانفجار العظيم ... سخيفة أو حتى بلا معنى. فقد كان أينشتاين نفسه يراها هكذا، لذا هوّن على نفسك. وهنا يأتي السؤال التالي: لماذا يعتبر الانفجار العظيم مهمًا في قصة النجوم الأولى؟

وبينما كنت أجلس في غرفة مكتبي على الأرض، محدّد في السماء، راودني سؤال منطقي يتوجب طرحه: هل كان هناك حقًا نجم أول؟ فالكون يبدو من حولي منظّمًا وغير متغيّر. قد نستمتع بين الحين والآخر بكسوف الشمس، وستأتي أيام يظهر فيها كوكب الزهرة أكثر سطوعًا، وفي بعض الأحيان يعود مذنب هالي ليتابع آخر الأحداث. لكن على مدى عمر الإنسان، سيبدو الكون كما هو منذ بدايته وحتى نهايته. فهو يشبه إلى حدّ ما ذلك الصيف الذي قضيته عندما كان عمرك ١٤ عامًا. هل تتذكره؟ ذلك الصيف الذي كنت تحضر فيه كل يوم كيسًا من الوجبات الخفيفة، وكتابًا، ونقودًا لشراء الحلويات، وكان أصدقاؤك ينتظرونك بدراجاتهم عند البوابة. وكنت تنثر فتات الخبز للحمام، وتظن أن الوضع سيستمر هكذا إلى الأبد. ففي كون مليء بأطر زمنية لا يمكن تصورها، نجد — نحن البشر الضئيلين للغاية — أنفسنا نقضي إجازتنا الصيفية مرة أخرى. ولذا من الطبيعي أن نعتقد أن الكون اليوم هو نفسه الكون كما كان دائمًا وسيظل هكذا إلى الأبد — كون ساكن، غير متطوّر. ومن هذا المنظور، لطالما كانت النجوم موجودة طوال الوقت، وبذلك أصبح السؤال عن متى انبثق النجم الأول إلى الوجود سؤالًا بلا معنى.

انزياح الضوء نحو الأحمر والأزرق

عندما تشاهد انفجارًا في أحد أفلام الحركة، يظهر الكثير من المؤثرات. ويتطاير الحطام إلى الخارج، وتشعر الشخصيات بالحرارة الناتجة عن الانفجار وتبتعد عن الضوء الساطع. في يوم هادئ على كوكب الأرض، لا تتوافق هذه المؤثرات مع الكون الآمن المتوقع الذي

أعرفه، ولكن هذا لأنني أقرانه في ضوء أطر زمنية غير صحيحة. فأنا لا أشاهد الانفجار منذ بدايته وحتى نهايته، ولكنني أشاهد إطاراً واحداً من هذا الفيلم خلال الإطار الزمني الخاص بحياتي. قد يبدو أن الأشياء لا تتغير؛ لأنه خلال حوالي ٨٠ عاماً لن يكون التمدد ملحوظاً. ولكنه موجود، ويمكننا قياسه. وإذا نظرنا إلى صورة لمجرة أندروميديا، بصرف النظر عن ذلك النجم العابر الذي أنهى حياته في انفجار ساطع، فستبدو في الغالب كما هي إذا التقطت الصورة بعد يومين أو عامين. يمكن لأي شخص أن يكون لديه تصوّر مختلف لدى سرعة تحرك شيء ما اعتماداً على البيئة المحيطة. فعند مشاهدة الطائرات وهي تقلع من المطار تبدو سريعة. لكن عند مشاهدة طائرة بعيدة في الأفق، تتراجع درجة ملاحظة هذه السرعة. ومن ثمّ، لا يمكننا تقدير حركات المجرات لأنها بعيدة جداً وكبيرة جداً، وإن كانت تتحرك.

يتميز كل نجم برمز شريطي مميز خاص به، أو ما يسمى بالطيف. يغطي الضوء الذي ينبعث من النجم نطاقاً واسعاً من الأطوال الموجية، وتوضح الفجوات الموجودة في ذلك الطيف، التي يُطلق عليها اسم خطوط الامتصاص، وجود عناصر كيميائية معينة في أغلفة النجم الجوية. وينطبق الشيء نفسه على المجرات ولكنها تحتوي كذلك على الكثير من الغبار والغاز بين النجمي، الذي يمتص أيضاً الأطوال الموجية للضوء. لنفترض أن هناك مجرة تحتوي في الغالب على نجوم المجرة الثالثة وعدد قليل من نجوم المجرة الأولى والثانية الأصغر سناً التي تحتوي على عناصر أثقل مثل الكربون. يكاد طيف تلك المجرة ألا يحتوي على أي خطوط خاصة بالمعادن، وإذا ظهرت أي من تلك الخطوط فستكون باهتة. أما المجرة الأصغر سناً، فستحتوي على الكثير من خطوط المعادن بسبب النسبة الأكبر من نجوم المجرتين الأولى والثانية التي تحتوي على عناصر أثقل، وستتوافق خطوط الامتصاص مع الخطوط نفسها التي يمكننا اكتشافها من العناصر المشعة في مختبراتنا على الأرض.

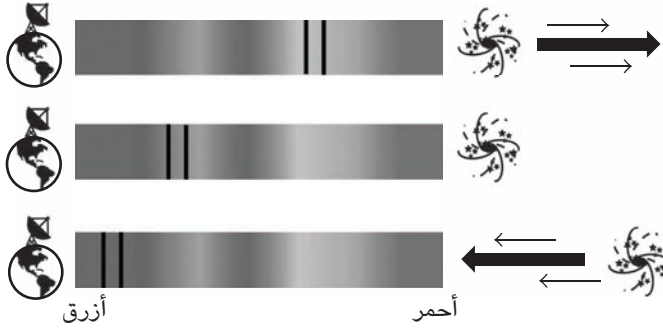
يوجد في طيف مجرة أندروميديا خطوط امتصاص مميزة تتطابق مع عنصر الكالسيوم. وتشير الفجوات في طيف مجرة أندروميديا إلى وجود الكالسيوم بكميات كبيرة في التريليون نجم الموجودة بمجرة أندروميديا، وهو أمر غير مثير للاهتمام في حد ذاته. فلا بد أن يحتوي الطيف القادم من مجرة أندروميديا على خطوط امتصاص الكالسيوم بالأطوال الموجية نفسها التي ينتجها الكالسيوم المشع على الأرض. فالكالسيوم الموجود في إحدى المجرات هو الكالسيوم نفسه الموجود في أي مجرة أخرى. ولا تختلف

مستويات الطاقة الموجودة في ذرات الكالسيوم اعتمادًا على موقع الذرة، ومن ثمَّ ينبغي أيضًا ألا تختلف الأطوال الموجية للضوء الممتص. ومع ذلك، عندما ننظر إلى طيف مجرة أندروميда، نجد أن خطوط الكالسيوم قد انحرفت عن مكانها المتوقع بمقدار بضعة أجزاء من المليار متر في الطول الموجي. ونظرًا إلى أن خطوط الامتصاص قد انحرفت إلى أطوال موجية أقصر مقارنةً بأطوالها الموجية على كوكب الأرض؛ أي انحرفت نحو الطرف الأزرق من الطيف الكهرومغناطيسي، فإننا نقول إنها قد تعرضت إلى انزياح أزرق. يبدو الأمر كما لو أن الكالسيوم الموجود في مجرة أندروميда يمتص فوتونات ذات أطوال موجية مختلفة بعض الشيء، وأن الإلكترونات الموجودة في ذرة الكالسيوم مرتبة على نحو مختلف هناك، ولكن لماذا تختلف العناصر الكيميائية بهذا الشكل؟ حسنًا، إن قوانين الكيمياء لا تتغير، وإنما ما يتغير هو الكيفية التي نرى بها الضوء القادم من المجرة.

تخيّل أننا أشعلنا نارًا. ألقي فيها كلّ ما تريد، تلك الكنزة المطرزة التي اعتقدت أنها ستبدو رائعة، صندوقًا عاديًا يحتوي على مخلفات رفقاء سابقين، المسودات الخمس الأولى من كتابك ... يا إلهي، لقد فقدت السيطرة على الحريق! بينما تشق سيارة الإطفاء طريقها إلى كومة الذكريات المريرة المشتعلة، أنصت جيدًا. عندما تقترب سيارة الإطفاء منا، تنبعث كلّ موجة صوتية متعاقبة من مكان أقرب قليلًا إلينا. ونظرًا إلى تحرك سيارة الإطفاء نحونا، فإن الموجات الصوتية المنبعثة تستغرق وقتًا أقل للوصول إلى آذاننا، مما يزيد التردد الذي تصل به إلينا، ومن ثمَّ نسمع صوتًا أعلى حدة. ثم تتركنا سيارة الإسعاف بوجوه شاحبة وإحساس بالإحراج، ويزداد الوقت بين وصول الموجات الصوتية المتعاقبة إلى آذاننا. وينخفض التردد الملاحظ للموجات الصوتية وتقل حدة صفارة الإنذار. نطلق على هذه الظاهرة اسم تأثير دوبلر. فعندما تقترب سيارة الإطفاء أو تبتعد، لا يتغير أبدًا صوت صفارة الإنذار التي تصدره، ولكن طريقة إدراكنا له تتغير. تنتهج مجرة أندروميда نهج سيارة الإطفاء، ولكنها تستخدم الضوء بدلًا من الصوت. فإذا كان مصدر الضوء يتحرك نحونا، فإن مقدمات الموجات تتراكم بعضها بجانب بعض ونقيس طولًا موجيًا أصغر، ونحصل على ضوء أكثر زُرقة، ناجم عن انزياح الضوء نحو الأزرق. وعلى العكس من ذلك، إذا كان مصدر الضوء يتحرك بعيدًا عنا، فحينها تكون مقدمات الموجة أكثر تشتتًا، ونقيس ترددًا أقل، ونحصل على ضوء أحمر، ناجم عن انزياح الضوء نحو الأحمر. في حالة أندروميда، تظهر خطوط امتصاص الكالسيوم عند أطوال موجية أكثر زُرقة

الضوء الأول

من تلك التي نعرفها والتي ينتجها العنصر، مما يشير إلى أن مجرة أندروميدا تتحرك نحونا.



شكل ١-٣: تأثير دوبلر في موجات الضوء. يعرض الصف الأوسط طيفاً مبسطاً يحتوي على خطوط امتصاص وفقاً لما جرى رصده في المختبر. ينزاح طيف مجرة أندروميدا نحو الأزرق؛ لأنها تتحرك نحونا (الصف السفلي). معظم المجرات الأخرى تبتعد عنا، ولذا فإن أطياها تنزاح نحو الأحمر (الصف العلوي).

في حالة سيارة الإطفاء، كلما زادت السرعة، أصبح التغير في حدة الصوت أوضح؛ إذ تقترب سرعتها من جزء صغير من سرعة الصوت؛ أي ما يزيد على 340 م/ث. ينتقل الضوء بسرعة تقل قليلاً عن $299,792,458$ م/ث. وهذا ما يفسر السبب في عدم ملاحظتنا لتغير لون ضوء المصباح الدوار فوق سيارة الإطفاء أثناء تحركها نحونا أو بعيداً عنا. فسيارة الإطفاء ليست سريعة بما يكفي للحاق بموجات الضوء بأي طريقة ملموسة، ومن ثم لا يمكن ملاحظة التغير في الطول الموجي لأنه يكون طفيفاً. في حالة مجرة أندروميدا، تظهر الحسابات أن التحول الطفيف في الطول الموجي لخطوط امتصاص الكالسيوم يشير إلى أن المجرة الحلزونية العملاقة في مسار تصادم مع مجرتنا درب التبانة بسرعة تبلغ حوالي 110 كم/ث.¹⁶ وفي غضون بضعة مليارات من السنين، سوف تصطدم المجرتان، لكن من الجدير بالذكر أن التصادم لن ينتج عنه انفجار عنيف كما قد يتراءى لك. فالنجوم في المجرات يتباعد بعضها عن بعض (٥٠ تريليون كيلومتر في المتوسط)، مما يجعل احتمالية تصادم أي نجمين منخفضة جداً. ومع ذلك، سيكون تشوهه جاذبية المجرتين عميقاً، وستندمجان لتشكيل مجرة إهليلجية عملاقة يشار إليها أحياناً باسم ميلكوميديا (يا له من اسم فظيع، أليس كذلك؟!).

تمدد الكون

لقد أثبتنا أنه عندما نراقب المجرات، يمكننا معرفة ما إذا كانت تتحرك نحونا أم بعيداً عنا. وعندما نجري قياساتٍ مماثلة للمجرات من حولنا، فإن الغالبية العظمى من أطياف المجرات الأخرى تنزاح نحو الأحمر، مما يعني أن المجرات تتحرك بعيداً عنا. فهي جزء من فضاء يتمدد طوال الوقت. وتعد مجرة أندروميدا استثناءً لهذه القاعدة، حيث تعمل الجاذبية القوية بين المجرتين على انجذابهما معاً. يبدو أن كوننا غير مليء بالمجرات التي تتجول على نحو عشوائي مثل الحمام في ميدان ترفلجار، بل هو طريق عام ذو اتجاه واحد مخصص لتسابق الحمام. فالنمط واحد أيّاً كان الاتجاه الذي تنظر إليه: الغالبية العظمى من المجرات تسبح بعيداً عن الأرض، مثل الحطام الناتج عن انفجار هائل. هناك شيء آخر مثير للاهتمام حول هذا الانزياح نحو الأحمر. كلما بعدت المجرة عنا، زادت السرعة التي تبتعد بها. كان الفلكي البلجيكي جورج لوميتر والفلكي الأمريكي إدوين هابل أول من اعترف بهذه العلاقة في أواخر عشرينيات القرن العشرين.^{17, 18} وينص قانون هابل-لوميتر على أن السرعة التي تبتعد بها المجرات عنا تتناسب طردياً مع المسافة التي تبعدنا: فكلما ابتعدت المجرة عن الأرض، زادت سرعتها.

عندما نعلم لأول وهلة أن كل شيء يتحرك بعيداً عنا، فمن السهل أن نستنتج أن ذلك معناه أننا في مركز الكون. ولإدراك السبب وراء عدم صحة هذه الفكرة، يمكننا أن نتخيل تغطية بالون مفرغ من الهواء بالملصقات. أثناء نفخ البالون، ستتحرك الملصقات بعيداً. وأياً كان الملصق الذي تتبّعه بعينيك، فستبدو جميع الملصقات الأخرى كأنها تبتعد عنه، تماماً مثل المجرات التي نرصدها. وستلاحظ كل مجرة في الكون أن غالبية المجرات الأخرى تبتعد عنها. ولذلك، فإن وهم المركزية هذا مشترك بين جميع المجرات، وبالطبع لا يمكن أن ينطبق عليها جميعاً. فإذا اتبعت أي ملصق، فستلاحظ أن الملصقات القريبة تبدو كأنها تتحرك إلى مسافة قصيرة. أما الملصقات البعيدة منذ البداية، فقد انتقلت إلى مسافة أبعد بكثير بسبب تمدد البالون فيما بينها. تقطع الملصقات القريبة والبعيدة هذه المسافة القصيرة أو الطويلة في الوقت نفسه، وبالتالي عند النظر إليها من الملصق الذي نتبعه فستبدو كأنها تتحرك بسرعاتٍ مختلفة. وتعتبر زيادة السرعة طردياً مع زيادة المسافة هي السمة المميزة لكيفية تصرف الأجسام أثناء التمدد. وقد كان تدفق المجرات بعيداً عن الأرض، حسبما رصده تلسكوب هابل، أحد الأدلة الأولى على أن كوننا يتمدد. إذا رجعنا بالأحداث إلى الوراء، فإن الاستنتاج الطبيعي لتحرك كل شيء بعيداً هو أنه في

الماضي كان كل شيء قريباً جداً من بعضه. وقد أشارت الأدلة إلى حدوث انفجار عظيم. ولكن كان هناك فريق آخر من علماء الفلك لم يقتصروا بذلك. ووجدوا أن نظرية تطوّر الكون أمر مقبوت، حتى لو كان بإمكانهم قبول حقيقة أنه يتمدد. وقد اعتقد علماء الفلك المؤيدون لنظرية الحالة الثابتة للكون أنه مع تمدد الكون، تملأ مادة جديدة الفجوات. وقد أدى هذا الاعتقاد إلى الاستغناء عن فكرة أن المادة التي تتطاير الآن في كل اتجاه كانت قريبة جداً من بعضها وتشكّل نقطة ذات كثافة لا متناهية. لم يتمكن علماء الفلك المؤيدون لنظرية الحالة الثابتة من تحديد مصدر هذه المادة الإضافية، ولم يتمكن علماء الفلك المؤيدون لنظرية الانفجار العظيم من معرفة سبب بدء كوننا كنقطة ذات كثافة لا متناهية. وكانت آراء كلا الفريقين مقبولة في ذلك الوقت.

وُضِعَ أولُ مسمار في نعش نظرية الحالة الثابتة عندما أجرى عالم الفلك الراديوي الإنجليزي مارتين رايل دراسة استقصائية عن المجرات في السماء. طبقاً لنظرية الانفجار العظيم في تفسير نشأة الكون، كانت المجرات الأقرب إلى الحاضر (من حيث المسافة والزمن) أكثر تباعداً؛ لأنه كان هناك تمدد أكبر. وهذا يعني ظهور المزيد من المجرات في مجال رؤية معين كلما نظرت بعيداً. وطبقاً لنظرية الحالة الثابتة، سيبقى عدد المجرات كما هو بغض النظر عن مدى العودة بالزمن أو المكان إلى الوراء؛ لأن النظرية تنص على وجود كون غير متطور. فكلما نظر رايل بعيداً، عاد بالزمن إلى الوراء، وزاد عدد المجرات التي أحصاها.¹⁹ ويعتبر هذا انتصاراً مدوياً لنظرية الانفجار العظيم. وبالنظر إلى المخاطر ومستوى الالتزام في كلا الفريقين، لم يكن هذا كافياً لإنهاء الجدل. وفي نهاية الأمر لم ينتهِ الجدل بين علماء الحالة الثابتة وعلماء الانفجار العظيم إلا بسبب السمة المميزة الثانية للانفجار، وهي إشعاع التوهج اللاحق.

إشعاع الخلفية الكونية الميكروي

بينما كان بنزياس وويلسون يحاولان اكتشاف الإشارة الغامضة، كان هناك أربعة علماء فلك يعدون هوائياً راديويّاً خاصاً بهم، على بُعد ٦٠ كيلومتراً (٣٧ ميلاً) في جامعة برينستون. كان لديهم هدف واضح، وهو الكشف عن إشعاع الخلفية المتبقي من الانفجار العظيم. لقد أدرك بي جيمس بيبلز، وروبرت ديك، وبيتر رول، وديفيد ويلكنسون أن الكون في مراحله الأولى كان ساخناً للغاية بعد الانفجار العظيم، كالحال تماماً عند حدوث أي انفجار. وكان الكون في مراحله الأولى مليئاً بالإلكترونات والبروتونات والنيوترونات

والفوتونات، كلٌّ عند درجة الحرارة نفسها، وفي حالة من التوازن الحراري. يمكن لجسم ما يتمتع بحالة من التوازن الحراري أن يبعث ضوءاً ذا أطوال موجية عبر الطيف الكهرومغناطيسي بكثافة لا تعتمد إلا على درجة حرارة ذلك الجسم. فإذا كان هناك انفجار عظيم، فحينها لا بد أن توجد بقايا إشعاع له الشكل الطيفي المميز للجسم الأسود، وهو ما رأيناه في شكل ١-٣. ومن ثَمَّ، فإن الخطوة الأولى هي العثور على أي إشارة على الإطلاق، بأي طول موجي، وتقع ضمن نطاق درجة الحرارة المتوقع. وقد بلغ الأمر بكل من رول وويلكنسون أن قررا تصميم الهوائي عندما سمعا عن اكتشاف بنزياس وويلسون. وزار فريق جامعة برينستون بنزياس وويلسون للتحقق من المعدات والبيانات. لم يتمكن أي من بيبلز أو ديكي أو رول أو ويلكنسون من العثور على أي خطأ في الإعداد، وكما قال ديكي حينذاك: «حسناً يا شباب، لقد سبقنا!» ووفقاً لبيبلز، صاح بنزياس قائلاً: «حسناً، هذا يبعث على الارتياح. فعلى الأقل فهمنا ماهية هذا الشيء. والآن يمكننا أن ننحيه جانباً ونمضي قدماً في استكشافاتنا العلمية!»²⁰

أُعلن عن هذا الاكتشاف في بحثين نُشرا عام ١٩٦٥، أحدهما من فريق نظرية برينستون،²¹ والآخر من بنزياس وويلسون.²² كان بحث بنزياس وويلسون متحفظاً في صياغته على نحو ملحوظ، حيث التزما بالنتائج التجريبية ولم يتجاوزا صفحة واحدة. لقد كان اكتشافاً على جانب مذهل من الأهمية في مسيرة فهمنا لعلم الكونيات، وبسببه فاز بنزياس وويلسون بجائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٨.²³ وفي أكتوبر عام ٢٠١٩، فاز بيبلز أيضاً بجائزة نوبل «نظير الاكتشافات النظرية في علم الكونيات الفيزيائي»، وهو ما كان يُعزى في جزء كبير منه إلى تنبُّئه بإشعاع الخلفية الكونية الميكروي (سي إم بي).²⁴ لقد اكتشفوا ما نعرفه الآن باسم إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، أو ما يُعرف بالإشعاع المتبقي من الانفجار العظيم. نشأ الكون مع الانفجار العظيم. وبدأت مراحل تطوره. وبدأ الزمن. وبدأت نشأة كل شيء، وفي ذلك النجوم.

يمثل قياس بنزياس وويلسون واحدة من نقاط البيانات على طيف الجسم الأسود المتوقع لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وقد تحوّل الاهتمام إلى استكمال بقية الأطوال الموجية. وفي النهاية، تتسم تجربة بنزياس وويلسون بالمحدودية؛ لأنها كانت مبنية على الأرض. ولم يتمكننا من إجراء قياساتها إلا عند ترددات منخفضة جداً، غير كافية للكشف عن طيف الجسم الأسود. وعلى الرغم من قدرة الفوتونات على التنقل عبر الغاز وبين المجرات دون أن يعوقها شيء عن المضي قدماً في طريقها، فإنها تتوقف تماماً عندما

تصل إلى الأرض. وذلك لأن طاقة فوتون إشعاع الخلفية الكونية الميكروي أصبحت الآن منخفضة جدًا بالقدر الذي يجعل الماء يمتصها بسهولة في الغلاف الجوي للأرض. ولكي ندرس إشعاع الخلفية الكونية الميكروي دراسةً وافية، علينا تجاوز الغلاف الجوي للأرض والتوجّه إلى الفضاء. هناك ثلاث بعثات قامت بذلك حتى الآن: بعثة مستكشف الخلفية الكونية (أطلقت عام ١٩٨٩)، ومسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي (٢٠٠١) وتلكسوب بلانك (٢٠٠٩)، حيث أخذت قياساتٍ عند ترددات متعددة وتأكدت من أن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي هو بالفعل طيف جسم أسود بدقة تصل إلى جزء واحد على الأقل من ١٠ آلاف. وأدت الانحرافات الصغيرة عن الطيف إلى تقلبات صغيرة في درجات الحرارة عبر السماء التقط تفاصيلها الدقيقة مسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي وتلكسوب بلانك. تقدّم هذه التقلبات معلوماتٍ بشأن بنية الكون عند النقطة التي انبعث عندها الإشعاع، بعد ٣٨٠ ألف سنة من الانفجار العظيم. وتحتوي البيانات أيضًا على أدلة حول حالة الكون منذ ذلك الحين، التي ستكون أساسية لبحثنا اللاحق عن تتبع آثار النجوم الأولى في الفصل العاشر.

المراحل الأولى للكون: التضخم

يمكننا الآن كتابة قصة عن نشأة الكون وتمهيد الطريق لاستكشاف تلك النجوم الأولى؛ تبدأ قصتنا كما يلي: منذ ١٣,٨ مليار سنة، بدأ الكون، والزمكان نفسه، في التمدّد من نقطة ذات كثافة لا متناهية. في البداية كان هذا التمدّد مطردًا، خلال فترة يسميها علماء الكونيات «التضخم». يمكننا تصور تأثير النمو المطرد استنادًا إلى قصة هندية الأصل عن لعبة الشطرنج.²⁵ في النسخة التي أعرفها، ينعم ملكٌ أناني يشعر بملل شديد بالولائم والحليّ والملابس المبهرجة بينما يتصوّر شعبه جوعًا، ويقدمون محصول الأرز الذي يزرعونه على هيئة ضرائب. في أحد الأيام يقترب أحد الفلاحين من الملك ويقول إنه اخترع له لعبة تسمى الشطرنج. وينهمك الاثنان في اللعب، ويسأل الملكُ الفلاحَ تعبيرًا عن امتنانه له عما يود أن يأخذه على سبيل الهدية أو المكافأة. ويجب الفلاح بأنه يود أن يضع الملك حبة أرز واحدة في أحد أركان لوحة الشطرنج. ثم يضع في المربع الثاني حبتين وأربع في الثالث وثمانين في الرابع، وهكذا، مضاعفًا عدد حبات الأرز في كل مرة. على الرغم من استخفاف الملك بالطلب، صاحَ منادياً على خدمه وطلبَ إحضار وعاءٍ من حبوب الأرز. ثم بدأت المهمة. مع نهاية الصف الأول، كان قد وضع ٢٥٥ حبة أرز وصاحَ

طالباً كيسيّاً من الأرز. ومع نهاية الصف الثاني، كان قد وضع ٦٥٥٣٥ حبة. وطلبَ المزيد من الأكياس وظلَّ يواصل تنفيذ المهمة حتى فرغ مطبخه ومخازنه من حبوب الأرز تماماً. وفي النهاية نفذت حبوب الأرز، وطلبَ من خدمه جمع المزيد من الأرز من الأرض. وهنا أوضح له الفلاح أنه لا يوجد أرز في الأرض كلها، لأن الناس يتضورون جوعاً. لم يكن هدفه سوى لفت انتباه الملك إلى المجاعة، وكل ما كان يتمناه هو أن يتوقف الملك عن أخذ الأرز من شعبه. يوافق الملك متأسفاً على أفعاله، وتنتهي الحكاية، على أمل ألا تأتي حماسة وتآكل أيّاً من الحبوب المتناثرة هنا أو هناك لأنها قد تتسبب في كارثة. إنها قصة رائعة حقاً. ولكنها ليست حقيقية؛ بل تعتبر من القصص الخيالية القديمة التي توارثت سردها الأجيال. ولو كان الملك انتهى من ملء لوحة الشطرنج تلك لبلغ عدد حبات الأرز التي استخدمها ١٨,٤٤٦,٧٤٤,٠٧٣,٧٠٩,٥٥١,٦١٥ حبة. لقد زاد عدد الحبات في كل مربع بما نطلق عليه معدل النمو الأسّي، وهو معدل النمو نفسه الذي مرَّ به الكون بعد الانفجار العظيم. فبعد الانفجار العظيم بجزء صغير من الثانية تمدّد الكون المبكر بعامل لا يقل عن ١٠٠ تريليون تريليون، قبل أن يستقر على تمدّد أكثر استرخاءً. ويعد التضخم مجالاً بحثياً مفتوحاً ونشطاً إلى حد كبير، ولكنه يشكّل، جنباً إلى جنب مع الانفجار العظيم، ما نقبله بوصفه نموذجاً كونياً قياسيًّا.

المراحل الأولى للكون: التخليق النووي

سأبدأ هذا الجزء بسؤال: «هل هناك نجم أول؟» تخبرنا نظرية الانفجار العظيم أن لكل شيء بداية؛ لأن الكون نفسه له بداية. وقد تطرقنا إلى موضوعاتٍ مثل تضخم الكون والنقاط اللامتناهية الكثافة، ولذا يبدو أن أي سؤال في هذه المرحلة بديهي وغير مستبعد. ومن ثمّ يمكننا التساؤل عما يلي: هل انبثق أول نجم بعد الانفجار العظيم بهيئته الكاملة؟ وهل تعتبر المجرات خطأً حقيقةً ناجماً عن انفجار هائل، وتضائل حجمها بطريقة ما لتتناسب مع النقطة اللامتناهية الكثافة ولكنها تضخّمت حتى وصلت إلى حجمها الكامل اليوم؟

بعد ثوانٍ قليلة من الانفجار العظيم، كان الكون يحتوي في الأساس على الإشعاع ووحدات البناء الأساسية لكل ما تراه حولك، أو ما يُطلق عليه اسم الجسيمات دون الذرية، مثل البروتونات والنيوترونات. في هذه المراحل المبكرة، كانت العناصر المكونة للكون متماثلة في درجة حرارتها وفي حالة من التوازن الحراري. وقد تساوت نسب تكوين

الذرات وتكسيورها، وظل كل شيء على حاله تقريباً من حيث النسب. تخيل غرفة في روضة مليئة بالأطفال الصغار ومكعبات الليجو. قد يعزم نصف الأطفال على بناء الأبراج، في حين قد يعزم النصف الآخر على الجري في أرجاء الغرفة وتحطيم الأبراج. إذا كان جميع الأطفال مفرطي النشاط، فبمجرد أن يبني أحدهم برجاً بمجموعة من المكعبات، سيتحطم على الفور. وقد تصبح القطع جزءاً من أبراج أخرى ... قبل أن تتحطم مرة أخرى. وفي أي وقت من الأوقات، سيوجد عدد معين من الأبراج، ولكن لن يدوم أي برج لفترة طويلة. في حالة التوازن الحراري، لا يتغير أبداً عدد المكعبات (البروتونات والنيوترونات)، ولا يتغير أبداً عدد الأطفال المفعمين بالحيوية (الإشعاع)، وعلى الرغم من أن عدد الأبراج قد يختلف في أي ثانية، فالوضع الفوضوي يحول دون أن يظل أي برج (ذرة) موجوداً لفترة طويلة للغاية على الإطلاق. ومن المؤكد أن الجو يكون حاراً جداً بما لا يسمح بتكوّن أي هياكل أكبر من الذرات، كالنجوم على سبيل المثال. وقد اعتدنا الحديث على نطاقات كبيرة من حيث المسافة والزمن، لدرجة أنه قد يكون من المفاجئ الحديث عن وتيرة المراحل الأولى للكون. فقد كانت الدقائق الثلاث الأولى من الكون مليئة بالأحداث لدرجة استحقت أن يُفرد لها كتاب خاص يحمل العنوان نفسه، وهو كتاب «الدقائق الثلاث الأولى» لستيفن واينبرج.²⁶ بعد حوالي ١٣,٨٢ ثانية من الانفجار العظيم، انخفضت مستويات طاقة الكون، حيث تمدد الكون وانخفضت درجة حرارته بما يكفي للسماح بتراكم النوى. فالنوى هياكل تتألف من الجسيمات دون الذرية المتمثلة في البروتونات والنيوترونات. وتشكّل النواة مع إلكترون واحد على الأقل ذرة، ولكن في المراحل الأولى للكون كان الجو حاراً جداً بما لا يسمح للإلكترونات بالارتباط بالنواة. في قصتنا، يفقد الأطفال الصغار المفعمون بالنشاط طاقتهم وبالتالي تبدأ الأبراج تكبر قليلاً. كلما ازداد طول البرج، أصبح أقل استقراراً، ويمكنني قول الشيء نفسه عن النوى المنخفضة الكتلة، وإن كان هذا التشبيه لا ينطبق على جميع عناصر الجدول الدوري. فعلى الرغم من إمكانية اندماج نوى الهيدروجين والهيليوم، لا يزال من الصعب للغاية اندماج أي شيء أكبر من ذلك. وبإمكان فوتون منخفض الطاقة تفتيت جزيئات متطايرة أثقل من الهيدروجين، تماماً كما يستطيع طفل صغير كسول تحطيم برج طويل متأرجح أثناء مروره بجواره. عندما انتهت التخليق النووي (وهو المصطلح الذي يُطلق على تكوّن النوى) بعد ٣ دقائق و٤٦ ثانية من الانفجار العظيم، استقر حوالي ٢٥٪ من الكتلة الطبيعية للكون في صورة هيليوم-٤، الذي تتكوّن نواته من بروتونين ونيوترونين (سنحدث عن الكتلة غير الطبيعية في الفصل الرابع). أما ما تبقى من الكتلة، وهو ٧٥٪، فقد تُرك على هيئة نوى هيدروجين (بروتونات)، مع حوالي ٠,٠١٪

من الديوتيريوم، وهيليوم-٣ (نظير للهيليوم يتكوّن من بروتونين ونيوترون واحد)، وقليل من الليثيوم. وفي فترة زمنية وجيزة جدًا، كان الكون قد أنهى عمله الشاق وأنتج كلّ الهيدروجين والهيليوم اللازمين لتكوين النجوم الأولى بعد مائة مليون سنة أو نحو ذلك. بعد تلك الدقائق الأربع من العمل الشاق، ظلّ الكون عبارة عن ساحة رقص مليئة بالنوى والإلكترونات والفوتونات، فوضوية للغاية بحيث لا يتوفر للفوتونات مسار واضح في أي مكان. كانت الفوتونات تتصادم مع الإلكترونات في كل مكان، وكانت مساراتها تبدو كأنها خط سير سكيّ مترنح. في حال أنك قدت سيارتك على أحد الطرق في يوم شديد الحرارة، فربما تكون قد شاهدت سرابًا على الطريق السريع؛ وهو عبارة عن تذبذب للهواء فوق الطريق. يؤدي اختلاف درجة حرارة الهواء فوق الطريق إلى اختلاف مقدار الانكسار في الهواء، مما يؤدي إلى انحراف الفوتونات عن مساراتها المستقيمة وتشكيل الوهم البصري لطريق متذبذب أو غير موجود. فنحن لم نتمكن من رؤية أي شيء باستخدام الضوء قبل ٣٨٠ ألف سنة؛ لأنّ البيئة كانت شديدة التقلب مما حال دون السماح بانتقال الفوتونات إلى تلسكوباتنا في مساراتٍ خالية من العوائق. في هذه المرحلة، بعد حوالي ٣٨٠ ألف سنة من الانفجار العظيم، اتحدت الإلكترونات الحرة مع البروتونات الحرة، مما أدى إلى تكوين ذرات الهيدروجين في حدث يسمى «إعادة الاتحاد». ومع انخفاض عدد الإلكترونات الحرة، وجدت الفوتونات نفسها قادرة على التنقل بحرية لأول مرة، ويمكن القول بأن الكون أصبح شفافًا أمام الإشعاع. يتبع طيف هذه الفوتونات توزيع طيف الجسم الأسود. وهذا الإشعاع هو ما قاسه بنزياس وويلسون بالهوائي البوقي ببلدة هومديل. إن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي موجود في كل مكان؛ لأنه انتشر في كل جزء من الكون الصغير الساخن عندما انفجر من نقطة لا متناهية الكثافة. وكان من الممكن أن يصبح الكون أكبر بكثير، لكن الإشعاع، أو بقايا الإشعاع، لا يزال ينتشر فيه. ولا تزال الفوتونات التي نقيسها اليوم تحتفظ بطيف الجسم الأسود، وهو التوزيع الدقيق الذي كنا نتوقّعه إذا بدأ الكون بانفجار عظيم. إن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي موجود، تمامًا مثلما كان في عام ١٩٦٤، ولا يزال يُرصد كدخايل من هوائيات الراديو. إذا كنت تتذكر أيام التلفزيون التناظري، فإن بعض التشويش الذي كان يظهر في القنوات غير مضبوطة التردد كان إشعاعًا من الانفجار العظيم.

يهدف هذا الفصل إلى تفسير النظرية القائلة بوجود نجوم أولى يتعيّن البحث عنها. وقد استشهدنا بدليّين رئيسيين على نظرية الانفجار العظيم هما: حركة المجرات المرتدة

من حولنا، واكتشاف إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وباستخدام خطوط الامتصاص المعروفة التي تنتجها بعض العناصر الكيميائية، يمكننا قياس سرعة المجرات واتجاه حركتها من حولنا. ويمكننا ملاحظة أن ضوءها جميعاً دون استثناءٍ ينزاح نحو الأحمر، مما يشير إلى أن المجرات تتحرك بعيداً عنا، الأمر الذي يكشف عن التمدُّد الضمني للكون. وعلى مدى عقود، تمكَّنّا أيضاً من تحديد آثار الإشعاع الناتج عن الانفجار العظيم، حتى نتَمَكَّن من إعادة إنتاج طيف الجسم الأسود المتوقَّع، والأكثر من ذلك، اكتشاف الانحرافات الصغيرة في درجات الحرارة عبر السماء. لقد عزَّز هذا الدليل من نظرية الانفجار العظيم وجعلها غير قابلة للدحض من الناحية العملية في أذهان معظم العلماء. يمكننا استخدام هذه النظرية للتوصل إلى استنتاجات حول حالة الكون في مراحله الأولى، ومنها أنه لم يكن من الممكن أن يتشكَّل أي شيء أثقل بكثير من الهيليوم؛ وذلك لأن الكون كان يتسم بدرجة عالية من الحرارة والفوضى. فالنجوم الأولى لم تنبثق بهيئتها الكاملة بعد الانفجار العظيم، بل كان عليها أن تتشكَّل لاحقاً من عناصر قليلة جداً، هي الهيدروجين والهيليوم فقط.

بعد أن أصبح الكون شفافاً أمام الإشعاع، استقر لفترة طويلة جداً. ولو أن أي شخص عاش في المراحل الأولى من الكون، فإنه كان سيجده مملاً ومظلماً وخالياً من الأحداث؛ حيث هدأت كل هذه الفوضى مع تمدُّد الكون. وسوف تمر مائة مليون سنة أو أكثر قبل أن يحدث شيءٌ جدير بالملاحظة.

الفصل الرابع

سحابة غاز محظوظة

في أعماق الجزر الجنوبية لليابان تقع مدينة ناها، عاصمة محافظة أوكيناوا. في كل عام، يُغلق أحد الطرق السريعة في «بلاد الشمس المشرقة» لبسط حبل طوله ١٨٣ مترًا (٦٠٠ قدم)، وقطره عدة أقدام ويضاهي في وزنه وزن ٣٠ سيارة.^١ ويمسك ١٥ ألف مشارك بحبال جانبية أصغر حجمًا، منسوجة في الحبل الأكبر ومبسوطة على طول الطريق بزاوية ٩٠ درجة. تعتبر لعبة شد الحبل بين فرق شرق اليابان وغربها حدثًا احتفاليًا، يعبر فيه المشاركون والمتفرجون عن رغبتهم في أن تعم السعادة والسلام والازدهار والصحة. مع إطلاق جرس بدء السباق، يبدأ صراع شرس؛ حيث يفوز الفريق الذي ينجح في سحب الحبل نحوه بمقدار ٥ أمتار (١٦ قدمًا) خلال نصف ساعة. واعتبارًا من أكتوبر ٢٠١٩، احتل فريق الشرق المركز الأول في تاريخ الحدث، مع ١٦ فوزًا و ١٤ خسارة و ١٦ تعادلًا.^٢ يمكن لأي شخص المشاركة في المسابقة ما دام وصل إلى هناك في وقت مبكر بما يكفي (حيث يحضر المسابقة إجمالًا ما يقرب من ٢٨٠ ألف شخص)، مما يجعل من هذا الحدث فرصة ممتازة لقياس الاحتمالات الإحصائية والقوة البدنية. إذا كانت الفرق المشاركة فرقًا مدربة، فستكون النتائج متباينة وغير متوقعة، ولكن مع وجود فرق مكونة من ٧٥٠٠ فرد تتألف من مجموعات عشوائية من النساء والرجال والأطفال، فمن المرجح أن تكون الفرق متساوية من حيث الكفاءة. ففوة تحمل الحشد تعادل قوة تحمل الشخص الرياضي المدرب تدريبًا عاليًا أو قوة جنود قاعدة أوكيناوا العسكرية. ولذلك، من المتوقع رؤية نتائج أكثر توافقًا في حالة وجود فرق متكافئة، وهذا بالضبط ما حدث حيث فاز فريق الشرق ١٦ مرة، وخسر أمام فريق الغرب ١٤ مرة، وتعادل معه ١٦ مرة.

عند التفكير في تكوّن النجوم، لا يسعني إلا أن أفكر في لعبة شد الحبل على نطاق فلكي. كانت الفوتونات حرة الحركة بعد الانفجار العظيم بحوالي ٣٨٠ ألف سنة، وشكّلت

إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، كما قرأنا في الفصل السابق. وقد استقر الكون بعد سنواته الأولى المضطربة وأصبح مخزنًا للعناصر الخفيفة في توسُّع مطرد. وفي جميع أنحاء الكون، شكَّلت هذه المكونات سحبًا ذات أحجام ودرجات حرارة مختلفة. ولكي يتكون نجم ما، لا بد أن تكون الظروف في سحابة الغاز مناسبة تمامًا. إنه صراع متكافئ القوى للغاية لدرجة أن الحدث يمكن أن يستمر للمليارات السنين. لكن إعلان التعادل ليس خيارًا في هذه الحالة. يتمتع أحد الفريقين — وهو الجاذبية — بقوة تحمُّل لا نهائية، ومع أن الضغط المعاكس الناتج عن التفاعلات النووية الداخلية يبعث على الاستقرار، فإن الوقود النووي سوف ينفد في النهاية. وسيتداعى النجم مع ضغط الجاذبية الذي لا هوادة فيه. يمكننا تعريف النجم بأدق المصطلحات العلمية وأبسطها بأنه جرم سماوي تحول مستويات الضغط الناتجة عن التفاعلات النووية الداخلية دون انهياره بفعل الجاذبية. لكن، في الواقع، النجم هو مجرد سحابة غاز محظوظة للغاية.

تزويد النجوم بالطاقة: الانكماش بفعل الجاذبية

دعونا نقدم المتسابق الأول لدينا. الجاذبية هي إحدى القوى الأربع الأساسية في الكون. أما القوى الأخرى، فهي القوى التي تتحكم في التفاعلات النووية والقوة الكهرومغناطيسية التي تعمل بين الجسيمات المشحونة، وتتفاوت من حيث القوة والضعف. الجاذبية عبارة عن قوة جاذبة توجد بين أي جسمين لهما كتلة. كلما زادت كتلة الجسم، زادت قوة الجاذبية التي يؤثر بها في الأجسام الأخرى. في الاستخدام اليومي، نميل إلى استخدام كلمة «ضخم» للإشارة إلى شيء كبير الحجم، ولكن من الناحية العلمية يتعلق الأمر بكمية المادة التي يتكوَّن منها جسم ما بصرف النظر عن حجمه. على سبيل المثال، تزيد كتلة الكرة الزجاجية الصغيرة (بلي الأطفال) عن كتلة كرة البينج بونج، مع أنها أصغر حجمًا. تشكَّلت سحابة الغاز في بداية الكون من مجموعة من ذرات الهيدروجين الطليقة، وربما كانت تصاحبها ذرة أثقل منها مثل ذرة الهيليوم. إذا تتبعنا إحدى ذرات الهيدروجين في هذه السحابة، فسنجد أنها تتعرض لجاذبية ضعيفة من كل ذرة أخرى في السحابة. وسوف تلغي قوى الجاذبية هذه تأثير بعضها على بعض حتى تشعر الذرة بقوة كلية تجذبها نحو مركز كتلة السحابة. إذا كانت الذرة تتحرك بسرعة منخفضة، فإنها يكون لديها ما نطلق عليه «طاقة حركية منخفضة». وهذا يعني أنها لا تملك الطاقة اللازمة لمقاومة قوة الجاذبية تلك، تمامًا مثلما لا يملك الإنسان الطاقة اللازمة لمقاومة جاذبية

الأرض والانطلاق إلى القمر. ولذلك، تقترب الذرة من مركز السحابة. تتمتع الذرة ذات الطاقة الحركية الكبيرة بكمية طاقة كافية لمقاومة قوة الجاذبية تلك ويمكنها الاستمرار في طريقها والإفلات من السحابة. إذا لم تتمكن معظم الذرات من مقاومة قوة الجاذبية الكلية للسحابة، فإننا نقول إن السحابة عبارة عن نظام مقيد بفعل الجاذبية. وعلى النقيض، إذا كانت معظم الذرات تتمتع بقدر كبير من الطاقة الحركية ويمكنها الإفلات من قوة الجاذبية، فإننا نقول إن السحابة غير مقيدة بفعل الجاذبية. ومن غير المرجح أن تظل على هيئتها كسحابة لفترة طويلة.

يمكننا تعميق فهمنا لتأثيرات الجاذبية من خلال التفكير في التسارع والطاقة. فعند تطبيق قوة على جسم ساكن، فإنه يتحرك. ويؤدي ذلك إلى تغيير في السرعة أو التسارع. على سبيل المثال، يبلغ التسارع الناجم عن الجاذبية الأرضية $9.81 \text{ م}^2/\text{ث}^2$. وهذا يعني أنه في غياب العوامل المعقدة مثل مقاومة الرياح، فإن الجسم الذي يسقط من ارتفاع فوق سطح الأرض سيتسارع نحو الأرض مكتسبًا سرعة تبلغ 9.81 أمتار في الثانية، كل ثانية. وكلما زاد تسارع الجسم، زادت القوة التي يتعرض لها. دعونا نتخيل ظهور حوت فجأة على ارتفاع عدة أميال فوق سطح الأرض كما فعل دوجلاس آدمز في كتابه «دليل المسافر إلى المجرة».³ «هذا ليس مكانًا طبيعيًا يمكن أن يأهله الحوت، ولم يكن لدى هذا المخلوق البريء المسكين سوى القليل من الوقت للتأقلم مع هويته كحوت قبل أن يضطر إلى التصالح مع حقيقة أنه لم يعد حوتًا بعد الآن.» الحوت الساكن دون حركة الذي يظهر على ارتفاع كيلومتر واحد (0.62 ميل) فوق الأرض سيجد نفسه يخضع لقوة جاذبية الأرض، وسيتسارع نحو الأرض، ويصطدم بها بسرعة تبلغ حوالي 140 مترًا في الثانية، أو 310 أميال في الساعة. وإذا أجرينا التجربة نفسها (مع حوت آخر) فوق سطح الشمس الأضخم بكثير، حيث تبلغ قوة الجاذبية حوالي $274 \text{ م}^2/\text{ث}^2$ ، فإن الحوت سيواجه حينها مصيرًا محمومًا بسرعة تزيد كثيرًا عن $740 \text{ م}^2/\text{ث}^2$. ومع ذلك، لنصدق القول، لن توجد أرض يرتطم بها، وإنما ما يشبه نقطة تبخر ... ولكن في كلتا الحالتين سيحدث ذلك بسرعة كبيرة. تعمل الجاذبية على تسارع الأجسام بالقدر نفسه، ومن ثم، بتجاهل مقاومة الرياح، إذا أسقطت مطرقة وريشة في اللحظة نفسها، فسوف تصطدمان بالأرض في آن واحد. يصعب فعل ذلك على الأرض؛ لأن مقاومة الرياح ستتأمر ضد مساحة سطح الريشة الأكبر لإبطاء سرعتها مقارنة بسرعة المطرقة. أجرت وكالة ناسا، التي كانت على استعداد دائمًا لإجراء مثل هذه التجارب الممتعة، هذه التجربة على القمر عام 1971 ،⁴

وبمشاهدة الفيديو، يمكنك ملاحظة أن الريشة والمطرقة تسقطان بالفعل على سطح القمر في الوقت نفسه.*

يمكننا أن نرى العلاقة بين القوة والتسارع ... ولكن ماذا عن الطاقة؟ عندما تنتج حركة عن قوة الجسم، فإن طاقته تتغير. قد يكتسب الجسم طاقة حركية (متحركة) ويتحرك بمعدل أسرع؛ وقد يكتسب ارتفاعاً، فيؤدي ذلك إلى اكتسابه طاقة وضع الجاذبية. وقد يقاوم قوة الاحتكاك، ويفقد الطاقة الحركية ويكتسب طاقة حرارية (الطاقة التي تنشأ عندما تتحرك الذرات والجزيئات بمعدل أسرع بسبب ارتفاع درجة الحرارة) مع ارتفاع درجة حرارة سطح التلامس. ولذلك، يتعين على المشاركين في لعبة شد الحبل العملاقة في مدينة ناها، البالغ عددهم ١٥ ألف مشارك، أن يبذلوا قدرًا هائلًا من الطاقة في شد الحبل. فهم سيفقدون بعض الطاقة الكيميائية المخزنة من وجبة الإفطار على شكل طاقة حرارية، حيث ترتفع حرارة عضلاتهم مع زيادة الجهد المبذول. وستنقل بعض الطاقة إلى الحبل، مما يؤدي إلى تشوّه شكله وشحنه بكمية صغيرة من الطاقة المرنة. وفي لعبة شد الحبل، يمكن أن يكون عدم مراعاة عملية انتقال تلك الطاقة المرنة الأخيرة خطأً فادحاً. وتكتسب الأربطة المرنة «مرونتها» بسبب ما لديها من قدرة كبيرة على تخزين الطاقة المرنة: فعندما تتشوّه، تستخدم كل تلك الطاقة المخزنة لتعود أوضاعها. وعندما يُستخدم حبل غير مناسب في لعبة شد الحبل، يمكن أن يحدث ارتداد مماثل. على سبيل المثال، يمكن لحبل النايلون تخزين كمية كبيرة من الطاقة المرنة. وفي حال تعرض الحبل لمستوى ضغط كافٍ، أثناء لعبة شد الحبل على سبيل المثال، فسيطلق الحبل كل تلك الطاقة عند ارتداده مرة أخرى. في عام ١٩٩٧ في تايوان، استخدم ١٦٠٠ مشارك حبلًا من النايلون يبلغ سُمكه ٥ سم (بوصتين) في لعبة شد الحبل. ونظرًا إلى عدم ملائمة هذا الحبل للمهمة، انقطع الحبل وارتد، مما أدى إلى قطع ذراع اثنين من المشاركين.^٥ أما حبل مدينة ناها، فهو مصنوع من قش الأرز ومجدول بحيث إنه عندما انقطع الحبل بالفعل أثناء اللعب لأول مرة في عام ٢٠١٩ لم يُبلغ عن وقوع أي إصابات وانتهت المباراة بالتعادل.^٦

في الكون المادي، لا بد من الحفاظ على الطاقة: فالطاقة لا تُفنى ولا تُستحدث من العدم، ولكن يمكن فقط تحويلها من صورة إلى أخرى. ولذا يُعدُّ قانون حفظ الطاقة ضروريًا ليس فقط لفهم كيف تتشكّل النجوم، بل لمعرفة كيف تنجو ثم تموت في النهاية. كما أنه يفسّر هلاك الحوت بسرعة فائقة. فالحوت الذي كان يحوم عاليًا فوق سطح

الكوكب، كان يتمتع بقدر كبير مما نسميه طاقة وضع الجاذبية. ولكي يرتفع الحوت فوق سطح الأرض بمقدار كيلومتر واحد، لا بد من توفير كمية كبيرة جدًا من الطاقة لمقاومة الجاذبية. ففكر في مقدار الطاقة التي تحتاج إليها للقفز سنتيمترًا واحدًا عن سطح الأرض. ففكر الآن في مقدار الطاقة التي تحتاج إليها للقفز مسافة ٢٠ سم (٨ بوصات) عن سطح الأرض. إذا كنت تريد القفز مسافة مترين (٦,٥ أقدام) عن سطح الأرض، فستحتاج إلى طاقة خارجية، على سبيل المثال من شخص آخر يستخدم طاقته المخزنة لرفعك أثناء القفز. طوال المدة التي تستغرقها في القفز، أنت تقاوم قوة الجاذبية الخاصة بالأرض. عند الوصول إلى أبعد نقطة أثناء قفزتك، تتحوّل كل تلك الطاقة الكيميائية الموجودة في ساقيك إلى طاقة وضع الجاذبية، التي تتحوّل بعد ذلك إلى طاقة حركية عندما تعود إلى سطح الأرض. عندما يظهر الحوت على ارتفاع كيلومتر واحد فوق سطح الأرض، يكتسب طاقة وضع الجاذبية حسب موقعه فوق الأرض. وعندما يسقط الحوت، تتحوّل طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة حركية؛ حيث يتحرك الحوت على نحو متسارع ... حتى يرتطم بسطح الأرض. إن طاقة وضع الجاذبية التي اكتسبها الحوت في بداية هذه التجربة ستتحول بالكامل تقريبًا إلى طاقة حركية. وفي الظروف المثالية، سيكون التحول كليًا، لكن ما يحدث في واقع الأمر أن الحوت سيتعرض لمقاومة الهواء، مما يؤدي إلى الاحتكاك بالجزيئات الموجودة في الغلاف الجوي المحيط، وهو ما يتسبب بدوره في زيادة درجة حرارة تلك الجزيئات بمعدل طفيف جدًا وتحويل جزء من طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة حرارية. عند تغيير طاقة أحد عناصر النظام، عن طريق زيادة ارتفاع جسم ما فوق سطح الأرض على سبيل المثال، فلا بد من توفير الطاقة اللازمة لذلك من مكان ما. وعلى النقيض، إذا قلّ ارتفاع جسم ما، وقلّ بالتبعية مقدار طاقة وضع الجاذبية فيه، فلا بد أن تنتقل هذه الطاقة إلى مكان ما؛ فلا يمكن أن تختفي ببساطة.[†]

عندما تنكمش سحابة ذرات الهيدروجين لدينا تحت تأثير قوى الجاذبية مجتمعة، فإن طاقة وضع الجاذبية الخاصة بها تتناقص. وتقترب كل ذرة من مركز السحابة، كأنها حوت صغير يندفع نحو الأرض. تتسارع الذرات نحو المركز وتحكك بعضها ببعض بشكل أكبر، مما يؤدي إلى توليد الكثير من الطاقة الحرارية. تزداد سرعة تحرك الذرات والجزيئات، وتزداد طاقتها الحركية ونفقد بعض الطاقة في صورة طاقة إشعاعية: حيث تهرب الفوتونات من السحابة، مُصدرة ضوءًا وحرارة. يمثل هذا الأمر مرحلة النجوم الأولى؛ أي مرحلة النجم الجنين. إنها بدايات تكوّن النجوم، لكننا لم نصل إلى هذه المرحلة بشكل كامل بعد.

لكن مهلاً ... أليست النجوم معروفة بأنها تصدر حرارة وضوءاً؟ هل هذا يعني أننا صنعنا نجماً بالفعل بمجرد تعريض سحابة من الهيدروجين لتأثير الجاذبية؟ في أوائل القرن العشرين، عندما كان علماء الفلك يحاولون معرفة السبب الذي يجعل الشمس تشرق، اقترحوا فكرة أن الانكماش الجذبي وحده هو المسئول عن الحرارة والضوء المنبعثين من الشمس. وهنا يظهر السؤال التالي: إذا أطلقت سحابة طاقة على شكل ضوء وحرارة أثناء انكماشها، فهل هذا يحدّد ماهية النجوم؟ المشكلة في هذه الفكرة هي أن الانهيار يحدث بسرعة كبيرة للغاية. ولا يمكن للشمس أن تطلق الطاقة بهذه الطريقة إلا لعشرات الملايين من السنين قبل أن تصل إلى مرحلة لا يمكنها الانكماش بعدها.⁷ وهذه فترة طويلة ولكنها أقصر بكثير من أن تتوافق مع الأدلة الجيولوجية التي تثبت أن عُمر الأرض، ومن ثمّ الشمس، يبلغ مليارات السنين.

نُعدُّ حتى الآن لعبة شد الحبل التي تحدثنا عنها أحادية الجانب إلى حد كبير. فالجاذبية تدفع بلا هوادة إلى الأسفل، وتضغط الهيدروجين. وفي حالة سُحب الغاز غير المحظوظة، يتزايد مستوى ضغط الغاز على نحو لا يمكن مقاومته، وتتبدّد سحابة الغاز. ويستمر الانهيار في حالة تلك السحب التي بإمكانها أن تنهار، وتنبعث منها الحرارة والضوء؛ ولكن لا يمكن أن يكون هذا هو مجمل القصة فحسب، وإلا لكانت الشمس قد توقفت عن إصدار الضوء بعد ١٠ ملايين سنة من نشأتها. فالضغط يأخذ في الازدياد في مركز السحابة حتى تصبح الذرات نشطة بما يكفي لبدء نوع جديد من التفاعل.

تزويد النجوم بالطاقة: الاحتراق

سواءً كنا نتحدث عن بداية الكون أو عن الوقت الحاضر، فإن المكون الرئيسي للنجوم هو الهيدروجين. إنه أخف عنصر في الوجود، ويتكوّن في صورته المعتادة من بروتون واحد وإلكترون واحد فقط. والهيدروجين عنصر عادي تماماً: فهو عديم الرائحة واللون والطعم، وغير سام، بل إنه متوفر بكثرة. فمن السهل العثور عليه على الأرض، على الرغم من جاهزيته لتكوين روابط مع ذرات أخرى، حيث يوجد غالباً ضمن مركبات أكبر؛ فهو يمثل، على سبيل المثال، الذرة H في H₂O (جزيء الماء). ولكن الواقع أن ذرات الهيدروجين تعزف عن العمل بمفردها، ولذلك تقتزن بغيرها من الذرات بسهولة، لتشكّل الهيدروجين الجزيئي، H₂، المكوّن من ذرتي هيدروجين مقترنيتين معاً.⁸ وحتى عند اقتران ذرة الهيدروجين بأخرى، ومضاعفة كتلتها نتيجة لذلك، يكون الهيدروجين الجزيئي

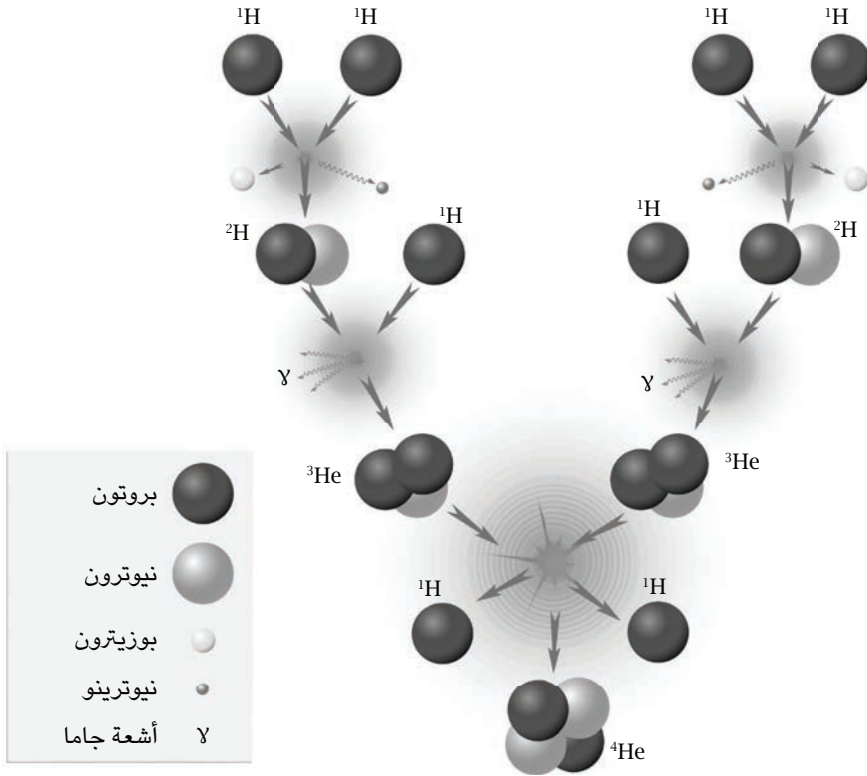
خفيفًا جدًا ويفيد كثيرًا في طفو الأشياء. ومع ذلك، فإن أهميته كوسيلة مساعدة في الطفو تقابلها قابليته المميزة للاشتعال. ومن المعروف أن منطاد الركاب الألماني المشنوم، هيندنبورج، اشتعلت فيه النيران عندما وصل إلى الأرض فوق نيو جيرسي في ٦ مايو ١٩٣٧.^٨ ولا يزال سبب الكارثة محل خلاف، ولكن من وجهات النظر الراضة أن شرارة الكهرباء الساكنة الناجمة عن تثبيت حبال الهبوط تسببت في اشتعال كمية صغيرة من الهيدروجين المسرب. وامتد هذا الحريق بعد ذلك إلى القماش الذي كان يغطي هيكل المنطاد السميكة الصلب. لقي ستة وثلاثون شخصًا مصرعهم، ويتعجب المرء عند مطالعة الصور كيف نجا الركاب الستون الآخرون. لم يكن المنطاد هيندنبورج أول منطاد يتعرض للاشتعال، لكن هذه الحادثة أخافت الناس بدرجة كافية لوقف رحلات المنطاد التجارية إلى الأبد، على الرغم من توفر بديل للغاز أكثر أمانًا. وصل المنطاد المذكور في الفصل الأول «يو إس إس لوس أنجلوس» إلى الولايات المتحدة قادمًا من ألمانيا مملوءًا بالهيدروجين ولكن جرى تغييره بسرعة عند التوصل إلى الهيليوم.^٩ تحتوي نواة الهيليوم على بروتونين ونيوترونين. ومن الصعب العثور عليه في الأرض، وبالتالي فهو مكلف. وتؤدي الكتلة الأكبر للهيليوم (التي تعادل أربعة أمثال كتلة الهيدروجين) إلى كونه أقل طفوًا مقارنةً بالهيدروجين. لكن الفارق بسيط، حيث إن الهيليوم يطفو مثل الهيدروجين بنسبة ٩٣٪ تقريبًا. وفي ظل الظروف الجوية المعتدلة، يمكن لمتر مكعب واحد من الهيدروجين (٣٥ قدمًا مكعبًا) أن يرفع ما يزيد بحوالي ٩٠ جرامًا مقارنةً بما يمكن أن يرفعه المقدار نفسه من الهيليوم. قد لا يبدو هذا فرقًا كبيرًا، ولكن عند تطبيقه على نطاق أكبر بحجم المنطاد هيندنبورج، فهذا يعني ترك حمولة تبلغ عشرات الآلاف من الأربطال (أي جميع الركاب) على الأرض، مما يجعل المنظور التجاري للمشروع معيًا. وعلى الرغم من أن التركيزات العالية من الهيدروجين تميل إلى الانفجار، فإن قابلية الاشتعال هذه لا تزال غير كافية لتفسير الطاقة المنبعثة من الشمس. وعلى أي حال، فإنك لكي تحرق شيئًا تحتاج إلى الأكسجين، والأكسجين نادر في كون يتكوّن في معظمه من الهيدروجين والهيليوم. وإذا نظرنا إلى أحد مصادر الطاقة الرئيسية لدينا، وهو الفحم، فيمكننا افتراض أنه إذا كانت شمسنا عبارة عن كومة من الفحم المحترق الذي تنبعث منه طاقة بالمعدل الحالي، فسوف ينفد الوقود خلال ٦٣٠٠ عام فقط.^{١٠} ومن الواضح أن الشمس لا تبدو ببساطة أنها تحترق. لكن الهيدروجين يمكن أن يفعل شيئًا أكثر كارثيةً من مجرد الاحتراق؛ حيث بإمكانه الاندماج.

تزويد النجوم بالطاقة: الاندماج النووي

على مسافةٍ تفوق ١٠٠٠ كيلومتر (٦٢١ ميلاً) شمال مدينة ناها، لا تزال توجد مدينتا ناجازاكي وهيروشيما في اليابان. ونظرًا إلى الأحداث المروعة والصادمة المرتبطة بهاتين المدينتين، ما عليك سوى سماع هذين الاسمين مرة واحدة لتتذكرهما إلى الأبد. ففي يومي السادس والتاسع من أغسطس عام ١٩٤٥، سقطت قنبلتان نوويتان أُطلق عليهما اسم «فات مان» (الرجل البدين) و«ليتل بوي» (الصبي الضئيل) على المدينتين، مما أسفر عن مقتل ما لا يقل عن ١٠٠ ألف شخص على الفور. وعلى مدى الأشهر التالية لذلك، لقي المزيد الأشخاص حتفهم جراء الأمراض الناجمة عن التعرض للإشعاع وما خلفه ذلك من حروق وإصابات أخرى ذات صلة. وقد دمرت القنبلتان المدينتين تمامًا، وسوّتهما بالأرض في مساحة يبلغ نصف قطرها ١,٦ كيلومتر (ميل واحد) من موقع إسقاط القنبلتين. عندما انفجرت القنبلتان، أطلقتا كمية هائلة من الإشعاع الحراري والضوء المتعدد الأطوال الموجية. في وقت لاحق، قال أحد الطيارين الذين شهدوا إلقاء قنبلة هيروشيما: «... لم تتحمل أعيننا هذا الضوء الساطع وكان الجزء العلوي من سحابة الفطر تلك هو الأكثر رعبًا، ولكنه أيضًا كان أجمل شيء يمكن أن يراه المرء في حياته. يبدو أن جميع ألوان قوس قزح كانت تنبعث منها.»¹¹ من الصعب استيعاب أن أصغر شيء على الإطلاق، وهو الذرة، قد أصدر هذه الطاقة المدمرة الواسعة النطاق.

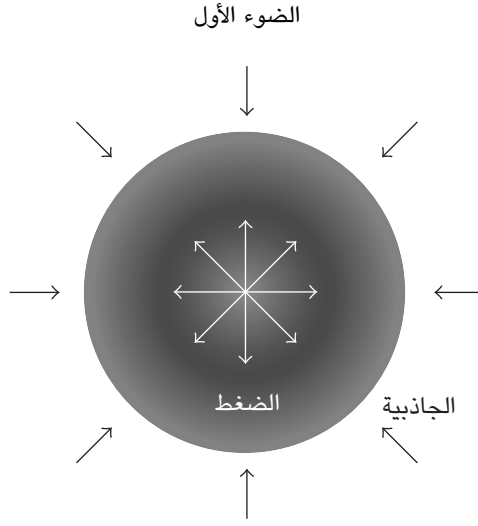
تعمل القنابل الذرية على مفهوم الانشطار النووي (أي «الانقسام»)، وتستخدم الوقود الذي يشتمل على نظائر. والنظائر هي ذرات عنصر ما ويكون لها نفس عدد البروتونات، ولكن عدد نيوترونات مختلف. فالديوتيريوم أحد نظائر الهيدروجين، وتتكوّن نواته من بروتون واحد ونيوترون واحد. والتريتيوم نظير آخر للهيدروجين ويحتوي على بروتون واحد ونيوترونين. إن نظائر الذرات شائعة جدًا، ولكن الهيدروجين فقط هو الذي تحمل نظائره أسماءً مختلفة. أما نظائر العناصر الأخرى، فنشير إليها باستخدام رقم يعبر عن إجمالي عدد البروتونات والنيوترونات (ما يُطلق عليه العدد الكتلي). على سبيل المثال، يحتوي الكربون-١٢ على ستة بروتونات وستة نيوترونات، بينما يحتوي الكربون-١٤ على ستة بروتونات وثمانية نيوترونات. يقع الاختيار على الوقود النووي، مثل اليورانيوم-٢٣٥ أو البلوتونيوم-٢٣٩، بسبب عدم استقرار نواته. فإذا اصطدم نيوترون بذرة يورانيوم-٢٣٥ بسرعة كافية، فستنقسم الذرة. وينتج عن ذلك ذرات أصغر حجمًا، تسمى شظايا الانشطار، فضلًا عن ثلاثة نيوترونات إضافية وكمية هائلة

الاندماج النووي



شكل ٤-١: الاندماج النجمي. يسود تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل في النجوم الحديثة التي تقل كتلتها عن ١٣٠٪ من كتلة الشمس، وفي النجوم الأولى بسبب نقص المعادن.

من الطاقة. تؤدي هذه النيوترونات إلى انقسام المزيد من اليورانيوم، وهو ما يؤدي بدوره إلى إطلاق مزيد من الطاقة والنيوترونات، وهكذا دواليك. ويستمر هذا التفاعل المتسلسل حتى يخرج النظام عن نطاق السيطرة وتنطلق كميات هائلة من طاقة الانفجار. يُعدُّ السلاح النووي الحراري، أو القنبلة الهيدروجينية، النسخة الأحدث من القنابل الذرية التي أُطلقت خلال الحرب العالمية الثانية. تتميز القنبلة الهيدروجينية بمرحلة إضافية إلى جانب المرحلة الانشطارية، من أجل توليد المزيد من القوة التدميرية. فالقنابل



شكل ٤-٢: لعبة شد الحبل في النجوم. ينكمش النجم بسبب قوة الجاذبية الناجمة عن كتلته. بينما توفر التفاعلات النووية في قلب النجم الطاقة، والأهم من ذلك، الضغط الذي يعمل على الدفع إلى الخارج.

الهيدروجينية تشعل المواد الانشطارية مثل اليورانيوم المخصَّب بالقرب من بعض الوقود الاندماجي مثل الديوتيريوم والتريتيوم. وتضغط الطاقة الناتجة عن التفاعل الانشطاري الوقود الاندماجي وتسخِّنه حتى يندمج وينبعث عنصر أثقل، هو الهيليوم. وتكون الكتلة الكلية للذرات الناتجة عن التفاعلات الاندماجية والانشطارية أصغر من الكتلة الكلية للذرات الأصلية. وفي كل من عمليتي الانشطار والاندماج، يؤدي فقدان الكتلة إلى إطلاق كمية كبيرة من الطاقة، وفي مقدور أينشتاين أن يوضح لنا السبب. تخبرنا أشهر معادلات أينشتاين، التي ربما تكون في الواقع المعادلة الأشهر على الإطلاق، أن الطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء، $E = mc^2$. وسرعة الضوء التي نعرفها تكون قيمتها كبيرة: ٣٠٠ مليون م/ث. ويؤدي فقدان جزء صغير من الكتلة إلى إطلاق كمية هائلة من الطاقة.

إن علم الاندماج النووي في النجوم هو نفسه علم الأسلحة النووية الحرارية، باستثناء أن النجوم تبدأ في الغالب بذرات هيدروجين، وبالتالي يتعيَّن عليها أولاً إنتاج الديوتيريوم والتريتيوم. يعد تفاعل بروتون-بروتون المتسلسل،¹² عملية الاندماج السائدة في النجوم مثل الشمس وكذلك النجوم الأولى. في النجوم الحالية التي تزيد كتلتها عن حوالي ١,٣

من كتلة الشمس، تحدث عملية اندماج أخرى بسبب المعادن مثل الكربون والنيتروجين والأكسجين. لا تصل النجوم ذات الكتلة المنخفضة إلى درجات حرارة عالية بما يكفي لتحفيز حدوث هذه العملية، وفي النجوم الأولى التي كانت تملأ من المعادن لم يكن ذلك خيارًا مطروحًا على الإطلاق، نظرًا إلى الغياب التام لهذه العناصر الثقيلة.

يؤدي اندماج الهيدروجين لتكوين الهيليوم إلى خسارة الكتلة كليًا، وإطلاق ما يعادلها على هيئة طاقة. فكتلة نواة الهيليوم أخف بحوالي ٠,٧٪ من كتلة البروتونات الأربعة. وهذا فرق بسيط ويعادل فقط ٤٠٠ جزء في المليار من جول واحد من الطاقة. وتقريبًا للفكرة، يمدك قالب واحد من الشوكولاتة بـ ١٠٠ ألف جول. ومع أن الاندماج الواحد يطلق طاقة أقل بكثير من قالب الشوكولاتة، فإن كمية الهيدروجين الهائلة الموجودة في الشمس تعني أن ٦٠٠ مليار كيلوجرام من الهيدروجين تتحول في كل ثانية إلى ٥٩٦ مليار كيلوجرام من الهيليوم. وبالتالي، ففي كل ثانية، تحوّل الشمس ٤ مليارات كيلوجرام من الكتلة إلى طاقة،¹³ وما زال يتبقى الكثير منها. إذا أردنا تحويل ١٠٪ فقط من هيدروجين الشمس إلى هيليوم، فسننتج طاقة تكفي لأن تشرق الشمس لمدة ١٠ مليارات سنة.¹⁴ تعتبر تفاعلات الهيدروجين الاندماجية أكثر من كافية لتفسير الطاقة التي تنتجها الشمس. والأهم من ذلك أن الطاقة الناتجة عن هذه التفاعلات تحافظ على الارتفاع الشديد لدرجات الحرارة في قلب الشمس، مما يؤدي إلى اندفاع الذرات بسرعة عالية وتوليد ضغط حراري وإشعاعي يمكن أن يقاوم قوة الجاذبية، ويوقف الانهيار. ثم يبدو الأمر كأن متسابقًا ثانيًا قد التقط الحبل، وهو ضغط الغاز. وبهذا يكون لدينا الآن فريقان متنافسان في لعبة شد الحبل، على الرغم من أن الأمر في حالة النجوم أشبه بلعبة دفع الحبل: فالجاذبية تدفع إلى الداخل وضغط الغاز يدفع إلى الخارج.

هل هناك ما يسمى بالقنبلة النجمية؟

استنادًا إلى ما سبق، فإن النجوم بمثابة أسلحة نووية حرارية عملاقة. أمر مثير للقلق، أليس كذلك؟ على الأرض، يمكننا التحكم في التفاعلات الانشطارية في المفاعلات النووية لإنتاج الطاقة. ويتحقق ذلك باستخدام السموم النيوترونية، وهي مواد شديدة الامتصاص للنيوترونات وتضمن أن نيوترونًا واحدًا فقط من النيوترونات الثلاثة المنبعثة في تفاعل الانشطار يمضي قدمًا لإحداث تفاعل آخر. تساعد هذه الطريقة في السيطرة على التفاعل المتسلسل. لكنه أمر غير مؤكّد النجاح دائمًا. وتعتبر كارثة فوكوشيما في اليابان مثالًا

على احتمالية فقد السيطرة. في الحادي عشر من مارس عام ٢٠١١، وقع زلزال بقوة ٩,٠ درجات على مقياس ريختر قبالة ساحل المحيط الهادئ في اليابان. وأسفر الزلزال عن إغلاق المفاعلات تماشياً مع إجراءات السلامة. ولكن حتى بعد إغلاق المفاعلات، تظل هناك كمية هائلة من الحرارة المتبقية، تتبدد عن طريق ضخ سائل تبريد حول قلب المفاعل. ونظراً إلى حدوث مشاكل في شبكة الكهرباء عقب الزلزال، كان لا بد من ضخ سائل التبريد باستخدام مولدات الديزل الاحتياطية. لكن هذا الإجراء لم يجدِ لمدة طويلة، حيث اجتاحت تسونامي المحطة، وأغرق المولدات. وبسبب عدم وجود أي سائل تبريد جديد، أخذت درجة حرارة القلب في الارتفاع الشديد، مما تسبب في انصهار ثلاثة مفاعلات نووية. وانصهر الوقود النووي بسبب درجات الحرارة المرتفعة، مما أدى إلى اختراق منطقة الاحتواء وحدوث تسرب خطير للإشعاع إلى مياه البحر والمنطقة المحيطة. بالإضافة إلى ذلك، ارتفعت درجات الحرارة بمعدلات جنونية لدرجة أن جزيئات الماء انفصلت عن الهيدروجين في بخار سائل التبريد، مما أدى إلى تكوّن هيدروجين عالي التركيز انفجر بعد ذلك، تماماً مثلما تفعل التركيزات العالية من الهيدروجين القابل للاشتعال. استغرق الأمر وقتاً طويلاً وجهوداً مُضنية من أجل احتواء الأزمة الناجمة عن كارثة فوكوشيما: ولم تكن هناك توقعات أن تبدأ عملية إزالة آثار الوقود النووي المشع المنصهر حتى عام ٢٠٢١.¹⁵ وبشكل عام، تُعد الطاقة النووية وسيلة آمنة وخاضعة للرقابة لتوليد الطاقة، وحتى في حال وقوع كارثة، لا تنشأ عنها تفاعلات متسلسلة لا يمكن التحكم فيها، مثل تلك التفاعلات التي تحدث عند استخدام الأسلحة النووية، والتفاعلات التي تحدث بشكل طبيعي داخل الشمس. ومن حسن الحظ أن الشمس تلعب دور منطقة الاحتواء الخاصة بها، وذلك لأن التفاعلات النووية تحدث فقط في قلبها. فالكتلة الهائلة للشمس وضغط الجاذبية الذي تمارسه الطبقات الخارجية للشمس على قلب الشمس يحولان دون إطلاق كمية كبيرة من الطاقة بمعدلات سريعة لا يمكن السيطرة عليها، تماماً كما هو الحال على الأرض: إذا ألقي شخص ما نفسه على قنبلة يدوية، فمن غير المرجح أن ينجو، لكن الانفجار الناتج سيكون أكثر احتواءً بكثير، ومن المحتمل أن ينقذ حياة جميع الموجودين في المنطقة المجاورة.

يُعدُّ تحفيز هذا الاندماج المتحكم فيه بمثابة الكأس المقدسة للفيزياء النووية. ففي حين أن اليورانيوم والنظائر الانشطارية الأخرى نادرة، فإن الهيدروجين رخيص ومتوفر، وينتج الاندماج النووي نفاياتٍ أقل إشعاعاً. إذا توصَّلنا إلى طريقة لتوفير ضغط الجاذبية

المذهل الذي يحفّر حدوث الاندماج، فسيكون لدينا مصدر طاقة شبه مجاني لدعم البشرية. ويُعدُّ هذا الأمر محاكاة للظروف الفيزيائية الموجودة في قلب النجوم.

حالة النجوم

كان من المفترض أن تفنى الشمس منذ فترة طويلة ولا تتمكّن من البقاء. فهناك خاصيتان للشمس تتناقضان تناقضاً مباشراً. فدرجة حرارة الشمس المرتفعة تشير إلى أنها على الأرجح مكوّنة من غاز. والغازات تميل إلى أن تكون ذات كثافات منخفضة للغاية، حيث الكثافة هي مقدار الكتلة الموجودة ضمن حجم محدد. وبالتالي، فإن مكعباً طوله متر واحد (٣,٢٨ أقدام) ومملوء بالماء يبلغ وزنه ١٠٠٠ كجم (٢٢٠٤,٦ رطل)، حيث تبلغ كثافة الماء ١٠٠٠ كجم/م^٣. ويبلغ وزن مكعب مماثل مصنوع من الخشب ٧٠٠ كجم (١٥٤٣ رطلاً)، حيث تبلغ كثافة الخشب ٧٠٠ كجم/م^٣، بينما تبلغ كثافة الخرسانة حوالي ٢٤٠٠ كجم/م^٣. تتميز الغازات بكثافة أقل بكثير، حيث تبلغ كثافة الهيدروجين ٠,٠٩ كجم/م^٣، عند مستويات الضغط ودرجات الحرارة العادية على الأرض، على سبيل المثال. عندما نفكّر في كتلة الشمس وحجمها، نجد أن متوسط الكثافة هو ١٤٠٠ كجم/م^٣. يشير هذا إلى أن الشمس ليست غازية، ومع ذلك فإن درجات الحرارة التي يطرحها الطيف الشمسي مرتفعة للغاية بحيث لا يمكن لمعظم المواد أن تظل في الحالة الصلبة أو السائلة. كان اكتشاف هاتين الخاصيتين بالشمس أشبه بلمس مكعب من الثلج واكتشاف أن درجة حرارته أعلى مما في حالة البخار. ومع ذلك، تواصل الشمس وجودها بعناد وإصرار.

عند التفكير في حالات المادة، فستتذكر حتماً أن ما تعلمته عنها هو أن للمادة ثلاث حالات: الصلبة والسائلة والغازية. ويخبرونك أن المواد الصلبة تحتفظ بشكلها وحجمها، مثل الثلج؛ أما السوائل فتأخذ شكل الوعاء الموضوعة فيه، مثل ماء الصنبور؛ والغازات تملأ حيز الوعاء بالكامل، كما نرى مع البخار. لكن هناك حالة رابعة تسمى البلازما، وهي حالة معظم المواد المعروفة في كوننا (باستثناء المادة المظلمة، كما سنرى في الفصل الخامس). ظلت البلازما لفترة طويلة غير قابلة للرصد بسهولة على الأرض؛ لأن وجودها يتطلب درجات حرارة عالية للغاية أو مجالات كهرومغناطيسية قوية. ويُعدُّ البرق أحد الاستثناءات الشائعة، حيث يمثل عمود بلازما يمتد من السحاب إلى الأرض.

في الشمس، تكون درجات الحرارة مرتفعة جداً لدرجة أن الإلكترونات السالبة الشحنة داخل الذرات تنفصل عن النواة الموجبة الشحنة، مما ينتج غازاً من الجسيمات

المشحونة، يُعرف باسم البلازما. سيأخذ هذا الغاز المشحون كهربائياً شكل الحاوية التي يشغلها، إلا أن الجزيئات لا تكون حرة الحركة تمامًا بحيث تتجول مثلما هو الحال مع الغاز المتعادل؛ وعوضاً عن ذلك، تنجذب الجسيمات المختلفة الشحنة بعضها إلى بعض. ويكون الأمر أشبه بغاز يتكوّن من مغناطيساتٍ صغيرة، في حالة تجاذب وتنافر إلى الأبد. وهذا يعني أن كثافة البلازما أعلى من كثافة الغاز العادي وتكون بطريقة أو أخرى ذات تدفق أو شكل مرن (كلمة «بلازما» مشتقة من كلمة يونانية قديمة تعني مادة قابلة للتشكّل). تتوافق حالة البلازما مع كل من درجات الحرارة والكثافة المرصودة على الشمس، حيث لا يزال بإمكان البلازما أن تتصرف مثل الغازات عند معدلات كثافة عادةً ما تكون كبيرة بما يكفي للإشارة إلى وجود سائل.

أحد التحديات الرئيسية التي تواجه الاندماج النووي على الأرض هو الوصول إلى درجات حرارة تصل إلى ١٥٠ مليون درجة مئوية من أجل تسخين البلازما بدرجة تكفي لحدوث الاندماج. لكننا لا نملك طاقة وضع الجاذبية الخاصة بالشمس، ومن ثمّ تستخدم حالياً الطرق المستخدمة لتسخين البلازما كمياتٍ أكبر من الطاقة مقارنةً بالطاقة الناتجة عن الاندماج. ومع ذلك، يبدو مستقبل الاندماج مشرقاً بالنظر إلى أساليب التسخين المتزايدة الكفاءة الموجودة حالياً وتأسيس أول منشأة اندماج نووي على نطاق تجاري، وهو المفاعل التجريبي النووي الحراري الدولي (المعروف اختصاراً بمفاعل إيتير)¹⁶ في جنوب فرنسا.

ولادة نجم

هكذا أصبح لدينا أخيراً نجم، يتناغم ضغطه مع قوى جاذبيته. ولكن لم يكن من السهل الوصول إلى هذه النقطة. فالعديد من السحب الغازية لم تصل مطلقاً إلى درجة الحرارة أو الكتلة المناسبة لموازنة قوى الجاذبية والضغط. يحدد هذا التوازن بدقة أي نوع من السحب هو النوع المحظوظ الذي سيسطع لمليارات السنين. يصل الحد الأدنى للكتلة إلى حوالي ٨٪ من كتلة الشمس، وهذه النسبة محددة جيداً لأننا نعرف الكثير عن الطاقات اللازمة لإحداث اندماج نووي. قد تبدأ سحب الغاز الأصغر من حد الكتلة هذا في الانهيار، ولكن ببساطة لا يوجد ضغط كافٍ في مركز النجم لدمج ذرات الهيدروجين معاً. وبقدر ما يبدو الأمر واعداً، فإن هذا النجم الأولي يخفق في إتمام مهمته ليصبح نجماً فاشلاً، أو ما نسميه بالقزم البني. والأقزام البنية أكبر من أن تُسمى كواكب، وأصغر من أن تُسمى

نجومًا، وتشير الأبحاث الحديثة إلى أنه قد يكون هناك ما يصل إلى قزم بُني واحد لكل نجمين «حقيقيين» في درب التبانة.¹⁷ وهذا يعني وجود الكثير من السحب غير المحظوظة. فهي تتوهج في البداية بسبب الطاقة الصادرة بفعل الانكماش الناتج عن الجاذبية، ثم تُترك لتبرد ويخفت سطوعها، وتستقر على هذه الحالة إلى الأبد.

لا يزال الحد الأقصى لكتلة النجوم موضوعًا مفتوحًا لمزيد من النقاش، لا سيَّما فيما يتعلق بالنجوم الأولى. فمن الناحية النظرية، كلما كان حجم النجم أكبر، ازداد تفاوت الضغط الإشعاعي في مركز النجم. والنجوم تحتوي على كميات كبيرة من الطاقة لدرجة تجعلها غير مستقرة، ويمكن أن يتسبب تغيُّر بسيط في الطاقة، ناجم على سبيل المثال عن تراكم سحابة غاز مجاورة، في حدوث تغييرات كبيرة في التوازن بين ضغط الجاذبية وضغط الإشعاع. ومن الناحية العملية، كلما زاد حجم النجم، زادت احتمالية ظهور ميول اضطراب عليه عند تعرضه لضغط، مثل أن يتمدد ويتلاشى فجأة أو ينهار فجأة. ولأن هذا السلوك لا يمكن التنبؤ به، فلا توجد قاعدة سريعة لتحديد الحد الأقصى لكتلة النجم، ولكن عندما ندرس النجوم من حولنا، نجد أنه من النادر العثور على نجوم تزيد كتلتها عن كتلة الشمس بمقدار ٥٠ مرة. لكن فيما يخص النجوم الأولى، فهناك سبب يدعونا إلى الاعتقاد بأن الحد الأقصى للكتلة كان من الممكن أن يصبح أكثر استقرارًا عما نجده في تكوين النجوم الحالية. فالبيئة النقية التي تكوَّنت فيها النجوم الأولى أدت بطبيعة الحال إلى ظهور نجوم أكبر بكثير، ربما أكبر مئات المرات من كتلة الشمس، كما سنرى في الفصل السادس.

تنشأ النجوم نتيجة تفاعل شديد التوازن بين القوى المختلفة من جاذبية وضغط ودرجة حرارة، وهناك العديد من سحب الغاز التي أخفقت في توفير الظروف المناسبة لتكوُّن النجوم. في المراحل الأولى، تؤدي قوة الجاذبية المشتركة لسحابة من الذرات إلى تكثيفها. إذا لم تكن السحابة بدرجة الحرارة أو الحجم المناسبين، فإن الطاقة الحركية للذرات سوف تتغلب بسهولة على قوة الجاذبية الأولية، مما يؤدي إلى تشتت الذرات. ولكن، إذا كانت الطاقة الحركية منخفضة بما فيه الكفاية، فسوف تستمر السحابة في التكتُّف، وتطلق الطاقة الحرارية والإشعاعية مع استمرار تناقص طاقة وضع الجاذبية. وإذا كانت السحابة ضخمة بما فيه الكفاية، فإن الضغط الداخلي سوف يحفز حدوث الاندماج النووي. وستندمج ذرتان من الهيدروجين معًا لتكوين ذرة أقل كتلة، مما يؤدي إلى إطلاق

كمية هائلة من الطاقة. وتصبح هذه الطاقة أكثر من كافية لتفسير إنتاج الحرارة والضوء في النجوم، لكن الوقود لا يمكن أن يستمر إلى الأبد. يحول ضغطُ التفاعلات النووية دون الزوال الحتمي للنجم، مما يؤخر موعد انهياره. وتستمر هذه المهلة لفترة طويلة. فهناك كمية هائلة من الهيدروجين الذي يمكن أن يشتعل في النجم، وبما أن درجة الحرارة ترتفع في المركز، يمكن حدوث تفاعلات نووية أكثر تعقيدًا واحدًا تلو الآخر عند الوصول إلى الطاقة المطلوبة. يواصل النجم تحويل الهيدروجين إلى هيليوم بوتيرة منتظمة من خلال الاندماج، مما يحول دون انهياره ويساعد على إنتاج الضوء والحرارة التي نراها عندما ننظر إلى شمسنا. ولمئات الملايين من السنين أو ربما مليارات السنين، يمكن أن تسود النجم حالة من التوازن، حيث يكون كلا فريقَي شد الحبل في تناغم وانسجام. لكن لا يمكن لهذا الوضع أن يستمر؛ لأن الجاذبية لا تكل ولا تمل أبدًا. وتواصل عملها باستمرار، وتكثّف مجهودها الموجه إلى انهيار النجم. وعلى الرغم من وجود كميات كبيرة من الهيدروجين تكفي لإمداد ضغط الاندماج النووي المضاد بالوقود، فهي كميات محدودة. ويومًا ما ستنفد وستنتصر الجاذبية. في لعبة شد الحبل بين النجوم، لا يوجد سوى فريق واحد جدير بالثقة من بداية المسابقة وحتى نهايتها.

هوامش

* يتعين على رواد الفضاء أن يخضعوا لسنوات من التدريب، فضلًا عن شغلهم مناصب مرموقة غالبًا ما تكون في مجال القوات العسكرية. ومع ذلك، لا يزال بعضهم يحتفظ بروح الدعابة ويفاجئ الناس على كوكب الأرض. كان آلان شيبيرد أول أمريكي يسافر إلى الفضاء، وفي عام ١٩٧١ أصبح الوحيد الذي لعب الجولف على سطح القمر. وباستخدام رأس مضرب متصل بإحدى أدوات جمع العينات العلمية، ضرب كرّتي جولف لمسافة قصيرة. ومع أن جاذبية القمر منخفضة بما يكفي لجعل لعبة الجولف على القمر رياضة واسعة النطاق، كان نطاق الحركة الذي تسمح به بدلتة الفضائية صغيرًا، مما أدى إلى قصر الضربات التي يوجهها. في البعثة نفسها، أبولو ١٤، أجرى طيار مركبة الهبوط على القمر إدجار ميتشل تجربته الخاصة، في سرية بعيدًا عن قائده شيبيرد ووحدة مراقبة البعثة. أرسل ميتشل صورًا ذهنية لأشكال عشوائية إلى أربعة زملاء على الأرض شاركوه تنفيذ التجربة، لإثبات وجود قوى ذهنية خارقة. لكن الأمر لم يفلح لأسباب عدة، أهمها

أن أولئك الموجودين على الأرض نسوا ضبط الأوقات المحددة مسبقًا نظرًا إلى تأخر موعد الانطلاق.

[†] في تجربتي الذهنية مع الحوت، أطلقتُ لفكري العِنان؛ حيث جعلت الحوت يبدو ببساطة مشبعًا بطاقة وضع الجاذبية.

[‡] كلمة «هيدروجين» مشتقة من كلمة يونانية تعني «مكوّن الماء»، وقد أطلق عليه أنطوان لافوازييه هذا الاسم عام ١٧٨٣ نظرًا إلى الطريقة التي يكوّن بها الهيدروجين جزيء الماء (H_2O) عند اتحاده مع الأكسجين.

الفصل الخامس

العصور المظلمة

عندما كنت أعمل على رسالة الدكتوراه، انضمت رَسامة إلى فريق الفيزياء الفلكية. كانت تجلس بالخلف تدوّن الملاحظات في ندوات يوم الإثنين، بينما كان معظم الحضور يغالبه النعاس. لم يكن شعورنا بالنعاس والخمول تعبيراً عن استيائنا من المتحدث، بل كان يعكس ميل الباحثين إلى البقاء ضمن مجال اختصاصهم. إذ طُرحت أسئلة من قبيل: هل تريدون دراسة الكواكب في الأنظمة النجمية الأخرى؟ مَنْ لديه اهتمام بمعرفة كيفية نشأة الكون؟ هل تريدون دراسة علم الكُونيات؟ هل يعنيها حقاً أن نسمع عن كوكب غريب آخر؟ لكن يبدو أن كاتي باترسون كانت تهتم بكل شيء. وحسبما هو متوقَّع، فبصفتي طالبة دكتوراه شعرتُ أنه لم يكن لديّ الوقت الكافي للاهتمام بالفنون. ومن ثَم، لم يحالفني الحظ في متابعة أعمال باترسون. وبعد عقد من الزمن تقريباً، رأيتُ عملاً فنياً يصور تطوُّر الكون، وبعد بعض البحث اكتشفتُ أن هذا العمل الفني كان للفنانة كاتي باترسون.¹ يا له من عالم صغير! ما فعلته باترسون هو أنها صممت عجلة دوارة ذات ألوان تدرجية متصلة، تصوِّر اللون العام للكون في أزمنة مختلفة من تاريخه. يمكنك إلقاء نظرة على هذا العمل الفني، الذي يحمل اسم «الطيف الكوني»،² في صورة ١١ في ملحق الصور بنهاية الكتاب.

في البداية كانت حرارة الكون مرتفعة للغاية حتى إن لونه كان أبيض بسبب طاقة الانفجار العظيم (كما هو موضح في الصورة الملونة). مع تمدُّد الكون، انخفضت درجة حرارته، وتغيَّر لونه إلى الأزرق ثم الأصفر والبرتقالي، حتى وصل إلى أطول الأطوال الموجية للضوء المرئي، وهي أعمق درجة من اللون الأحمر. وبذلك أُعلِنَت بداية العصور المظلمة. لقد تمدَّد الكون وبرَدَ الغاز، بحيث أصبح بالكاد ينبعث ضوء بأطوال موجية ضمن الجزء المرئي من الطيف؛ هذا إن كان هناك ضوء ينبعث على الإطلاق. كان ذلك قبل أن تتشكَّل

النجوم، عندما كان الغاز لا يزال يتجمّع لإحداث الاندماج. ثم انبثق فجأة وميضٌ أزرق معلناً عن ميلاد النجوم الأولى الزرقاء الساخنة الضخمة ومجيئها إلى الوجود، مما أدى إلى ارتفاع درجة حرارة الغاز بشدة مع بزوغ الفجر الكوني. لم يَدُم وجود هذه النجوم لفترة طويلة، وسرعان ما ظهر الجيل الثاني والجيل الثالث من النجوم، وكانت أكثر برودة واصفراراً، حتى وصلنا إلى لون الكون الحالي. توصّل العلماء إلى لون الكون من خلال حساب متوسط ألوان المجرات المرصودة، وتعديله وفقاً لتأثير انزياح الضوء نحو الأحمر، وكذلك وفقاً لمدى حساسية أعيننا تجاه بعض الألوان أكثر من غيرها. كان أكثر لون من المرجح أن يراه الإنسان إذا خلط كل الألوان معاً هو اللون البيج، الذي أطلقوا عليه اسم «اللاتيه الكوني»³، على افتراض أن يكون لهذه التسمية وقعٌ مثير للاهتمام فيما يخص اللون البيج في البيانات الصحفية. لكن هذا اللون مخيبٌ للآمال إلى حد ما، مع الأخذ في الاعتبار عمق الألوان الغني والتنوع الموجود في الكون. والأكثر من ذلك أن القرص الدوار (أو العجلة) يكشف لنا ما سيؤول إليه الكون في النهاية، حيث تكمل جميع النجوم حياتها كعمالقة حمراء. وعندما يتلاشى النجم الأخير، ويتمدد الكون كثيراً بحيث لا يمكن أن تتشكّل نجوم جديدة من الغاز المنتشر والممتد، سيسود اللون الأسود إلى الأبد. توقعٌ كئيب، أليس كذلك؟ دعونا ندير العجلة إلى الوراء ونركّز على البدايات بدلاً من النهايات، فيما يُعرّف باسم الفجر الكوني.

قياس درجة حرارة الكون

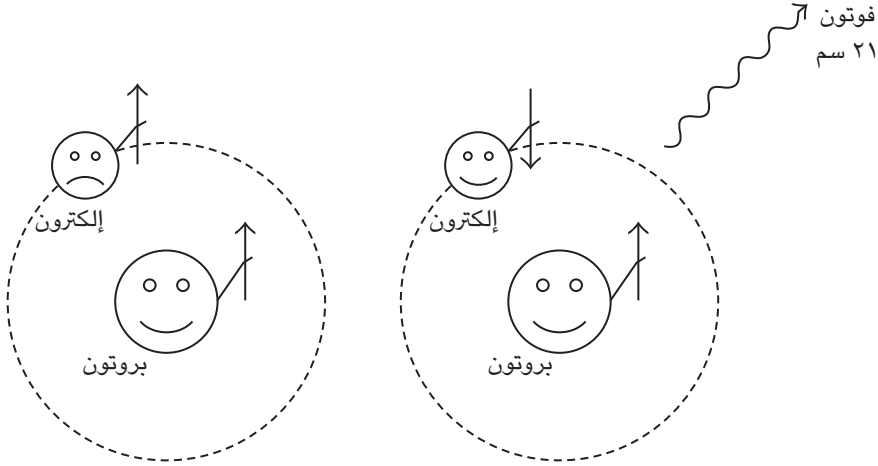
تخيّل حين كان الظلام يسود كلّ شيء. ظلام حقيقي حالك. ظلام حيث لا يزال عقلك يجبرك على النظر حولك، على الرغم من عدم الجدوى. من المحتمل أنك لم تصادف ظلاماً حقيقياً ما لم تكن قد سعت إلى عيش تلك التجربة. ففي العالم الحديث يحيط بنا الضوء الاصطناعي من كل اتجاه. يعيش ٩٩٪ من سكان أوروبا وأمريكا الشمالية تحت سماءٍ غارقة في التلوث الضوئي⁴. وقد أصبح الظلام شيئاً نادراً، بل وحتى صار سلعة للبيع. في كثير من المدن حول العالم، يمكنك الاسترخاء في خزانات عزل أو تناول العشاء أو حتى قضاء موعد سريع في الظلام الدامس، نظير دفع السعر المناسب. أما أولئك الذين يرغبون في الحصول على تجارب أقل تطرفاً، فبإمكانهم الانضمام إلى علماء الفلك الهواة والمخيمين المهتمين بهذا المجال، والتوجه إلى ما يقرب من مائة مكان تابع للجمعية الدولية للسماء المظلمة. فهناك تكون السماء بمنأى عن وهج المكاتب المضاءة وضباب أعمدة الإنارة

المكشوفة، مما يتيح لنا النظر إلى ما يوجد فوق رؤوسنا طوال الوقت: الكواكب التي تجوب السماء، والنجوم التي تتشكّل لتحكي لنا حكايات، وإذا حالفنا الحظ، فسنرى المجرة تمتد عبر السماء. تذكّرنا هذه اللوحة السماوية بأننا لا نمثل إلا جزءاً صغيراً جداً من كون كبير، مهما حاولنا أن نمحو الأدلة التي تبرهن على ذلك. والنظر إلى ظلام العصور المظلمة يذكّرنا الآن بأن أعمارنا صغيرة للغاية.

لتخمين ألوان الكون المبكر، عملت باترسون مع العلماء لحساب درجة حرارة الكون عند مرحلة ما وافترضت أن الكون كان يشع بوصفه جسمًا أسود، وهو ما رأيناه افتراضًا معقولاً نظرًا إلى طبيعة طيف الجسم الأسود المتوقع من إشعاع الخلفية الكونية الميكروية. الشيء الوحيد الذي يميّز طيف الجسم الأسود هو درجة الحرارة؛ ولذا بالنظر إلى درجة الحرارة، يمكنك معرفة شدة الضوء المنبعث عبر جميع الأطوال الموجية، وحساب متوسطها للحصول على اللون الإجمالي.

يمنحنا الضوء، بمحض المصادفة، طريقة للعودة بالزمن. وبسبب سرعة الضوء المحدودة، كلما ابتعد الجسم الذي ننظر إليه، تأخّر الزمن الذي نراه فيه؛ فالشمس تظهر كما كانت قبل ثمانين دقائق، ويظهر المريخ كما كان قبل أربع دقائق، ومجرة أندروميда تظهر كما كانت قبل ٢٥٠ مليون سنة. وفي أفضل الأحوال، يمكننا أن ننظر بعيدًا بما يكفي لمعاينة النجوم الأولى التي تشكّلت قبل حوالي ١٣ مليار سنة من خلال رصد ضوئها المرئي. إن تقنية بناء تلسكوب بصري قادر على العمل بهذه الحساسية أمرٌ يفوق قدراتنا، ولذا يتعين علينا التوصل إلى طريقة أخرى، والإجابة موجودة في عجلة الطيف الكوني لكاتي باترسون. ما تخبرنا به العجلة هو أنه يمكننا تتبع ما حدث فيما يتعلق بتكوين النجوم من خلال النظر إلى لون الغاز المتناثر في الكون أو درجة حرارته. فبينما تندمج تلك السحب الغازية المحظوظة، تتبدد السحب غير المحظوظة لتشكل ما نسميه الوسط بين النجمي؛ وهو مجموعة منتشرة من الذرات معظمها من ذرات الهيدروجين والهيليوم تنجرف في الفضاء بين نجومنا الأولى. إذا كان الغاز دافئًا، فمن المرجّح أن تكون النجوم قد تشكلت. وإذا كان الغاز باردًا، فهذا يعني عدم وجود أي نجوم حوله؛ إما لأنها لم تتشكّل بعد، أو لأنها ماتت جميعًا. ماذا لو تمكنا من العثور على النجوم الأولى ليس من خلال رؤيتها، ولكن من خلال تحديد الوقت الذي استغرقته في تسخين الغاز بدرجة كافية للكشف عن مواقعها؟

لقد حاولت عدة تجارب القيام بذلك على مدى العقد الماضي. وسُميت هذه التجارب بالتجارب «العالمية» بمعنى أنها تشمل كل شيء، أو قابلة للتطبيق في كل مكان؛ لأنها



شكل ٥-١: انعكاس اتجاه الدوران المغزلي. إذا انعكس اتجاه الدوران المغزلي للإلكترون ما (e)، فإن دورانه يتغير من دوران متوازٍ إلى دوران متعاكس، وتطلق الذرة فوتوناً (٧) يبلغ طولها الموجي ٢١ سم.

تسعى إلى تحديد عصر النجوم الأولى من خلال حساب متوسط درجة حرارة السماء المرصودة. كان رصد بنزياس وويلسون لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي أيضاً قياساً عالمياً؛ فقد اكتشفا درجة حرارة واحدة عوضاً عن توضيح التغيرات التي تطرأ على درجات الحرارة عبر السماء كما فعلت بعثات لاحقة مثل مسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي وتلسكوب بلانك. ولقياس إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، سار العلماء المعاصرون على خطى بنزياس وويلسون وضبطوا تلسكوباتهم على التردد الذي عرفوا أنه يميز إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. ونحن نطبق المبدأ نفسه عند محاولة اكتشاف درجة حرارة الغاز الأولي. فالغاز الساخن يصدر إشعاعاً؛ وغاز الهيدروجين على وجه الخصوص يصدر إشعاعاً بطول موجي مقداره ٢١ سم.

درجة حرارة الدوران المغزلي

نطلق على هذا الإشعاع اسم إشعاع الـ ٢١ سم؛ لأن الطول الموجي للفوتون (٧) يبلغ ٢١ سم، ويبلغ تردده ١٤٢٠ ميغاهرتز. تبعث ذرة الهيدروجين فوتوناً يبلغ طولها الموجي ٢١ سم عندما يغير الإلكترون الخاص بها حالة الدوران المغزلي. والدوران المغزلي سمة

من سمات الذرات، كما هو الحال مع الكتلة والشحنة الكهربائية، لكنه أقل شهرة بالنسبة لدينا لأنه لا يوجد لدينا نظير له. فعندما يدور البروتون والإلكترون دوراً متوازياً، يكونان في حالة إثارة أكبر؛ وتزيد الطاقة في النظام. أما إذا كانت الإلكترونات والبروتونات تدور باتجاه متعاكس، فإن حالة إثارة ذرة الهيدروجين تقل. وإذا تغير دوران الإلكترون من الدوران المتوازي إلى الدوران المتعاكس، كما يمكن أن يحدث تلقائياً أو بفعل مؤثر خارجي، فإنه يطلق حزمة من الطاقة على شكل فوتون يبلغ طوله الموجي ٢١ سم. وحينها تصبح الذرة في الحالة الأرضية. يشبه هذا وجود مغناطيسين جنباً إلى جنب. فالأمر يتطلب مزيداً من الطاقة لإبقاء القطبين المتشابهين متلامسين $S-S$ و $N-N$ ؛ فهما بطبيعة الحال يريدان أن يكونا متعاكسين $S-N$ و $N-S$. وذرة الهيدروجين تريد أن تكون في أقل حالاتها نشاطاً، ولذا إذا كان الإلكترون يدور دوراً متوازياً، فلن يمر وقتٌ طويل قبل أن تقل حالة الإثارة حيث ينعكس اتجاه الدوران المغزلي وينبعث فوتون بطول موجي ٢١ سم. تخبرنا درجة حرارة الدوران المغزلي للغاز بدرجة الحرارة التي يحتاج إليها الغاز لتصل نسبة معينة من ذراته إلى حالة الإثارة وتظل النسبة المتبقية في حالة الطاقة المنخفضة. وتشير درجة حرارة الدوران المغزلي المرتفعة إلى استثارة نسبة أكبر من الغاز إلى مستويات أعلى من الطاقة، وبالتالي تزيد شدة الإشعاع الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم والذي من المتوقع أن يشع من الغاز.

تتمتع درجة حرارة الدوران المغزلي لغاز الهيدروجين بتاريخ مثير للاهتمام عبر الزمن الكوني، حيث ارتفعت وانخفضت وفقاً للعوامل الأكثر تأثيراً عليها. في بداية الكون، خضعت ذرات الهيدروجين لتغير في اتجاه الدوران عند اصطدامها بذرات هيدروجين أو إلكترونات ذات دوران معاكس، مما ساعد في تحديد درجة حرارة الدوران المغزلي. ومع تمدد الكون، قلَّ عدد هذه الاصطدامات ووتيرة حدوثها، وبدلاً من ذلك أصبح امتصاص فوتونات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي هو القوة المهيمنة وراء تحديد عدد ذرات الهيدروجين الموجودة في الحالة المثارة، وبالتالي تحديد درجة حرارة الدوران المغزلي. ومع تشكُّل النجوم الأولى، ظهرت آلية ثالثة لتحديد درجة حرارة الدوران المغزلي. فقد أصدرت النجوم الأولى فوتونات أشعة فوق بنفسجية عالية الطاقة أدت إلى تسخين الغاز واضطراب درجة حرارة الدوران المغزلي. وامتصت ذرات الهيدروجين فوتونات الأشعة فوق البنفسجية، مما أدى إلى إثارة الإلكترونات بما يفوق مستوى الطاقة الذي كان يشير إليه انعكاس اتجاه الدوران المغزلي. لا تفضل الإلكترونات مستويات الطاقة العالية، ولذلك عندما تنخفض إلى مستوى طاقة أقل، تطلق الذرة فوتونات. ستجد بعض

الإلكترونات الموجودة في بعض ذرات الهيدروجين نفسها تسقط في حالة عكس اتجاه الدوران المثيرة، حينها ستطلق فوتوناً بطول موجي ٢١ سم في الخطوة الأخيرة لتصل إلى الحالة الأرضية. يُسمى هذا التغيير في الحالة بسبب فوتونات الأشعة فوق البنفسجية بتأثير فوتهايسين-فيلد. وهو يفصل درجة حرارة الدوران المغزلي عن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي ويربطها بدرجة حرارة الغاز عوضاً عن ذلك. وتعمل فوتونات الأشعة فوق البنفسجية على تسخين الغاز وتحديد درجة حرارة الدوران المغزلي، مما يؤدي إلى ارتباط الاثنين معاً وافتراق أحدهما بالآخر.

أول اكتشاف للضوء الأول

تهدف التجارب العالمية على الفوتون الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم إلى قياس شدة إشعاع هذا الفوتون في أوقات مختلفة من تاريخ الكون، وملاحظة تغيراته مع تمدد الكون وتكون النجوم الأولى. إنها تجربة بسيطة وصعبة في الوقت نفسه: فهي بسيطة من حيث المفهوم، ولكنها تتطلب الكثير والكثير من حيث التنفيذ. لقد قدمت عدداً لا يحصى من العروض التقديمية حول التلسكوبات الرائدة في تحقيق أول اكتشاف للنجوم الأولى، لكنني لم أناقش أي تجارب عالمية مطلقاً. ومع ذلك، تلقيتُ في فبراير ٢٠١٨ مكالمات هاتفية من أحد الصحفيين،^٥ يطلب تعليقاً على أول اكتشاف للنجوم الأولى من خلال تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي.^٦ وعصر إعادة التأين هو الفترة التي عملت فيها النجوم الأولى على تسخين الغاز المحيط بها وتأينه.

حُظرت الدراسة ولم تصدر على الفور، وهو ما كان يعني أنني سأحظى بشرف قراءتها قبل معظم زملائي، وهنا تحول صمتي من هول الصدمة إلى شعور عارم بالإثارة. لم أستطع احتواء حماسي، وقفزتُ في جميع أرجاء المنزل. لقد كانت تجربة منافسة لتلك التي عكفتُ على العمل فيها طوال العقد الماضي. ولكن شعور الإثارة الذي حفزته فكرة التوصل أخيراً إلى بعض البيانات من هذا العصر، وإزاحة الستار قليلاً عن تلك الحقبة، كان فيما يبدو شعوراً جماعياً وليس حكرًا عليّ وحدي. لقد نجحت تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي في قياس درجة حرارة الغاز بعد ١٨٠ مليون سنة من الانفجار العظيم. وقد عثرتُ على ذلك الموضع على عجلة الطيف الكوني الذي بدأ عنده اللون الأحمر الداكن للغاز البارد يتحول إلى اللون الأزرق الساطع للكون الساخن، معلناً

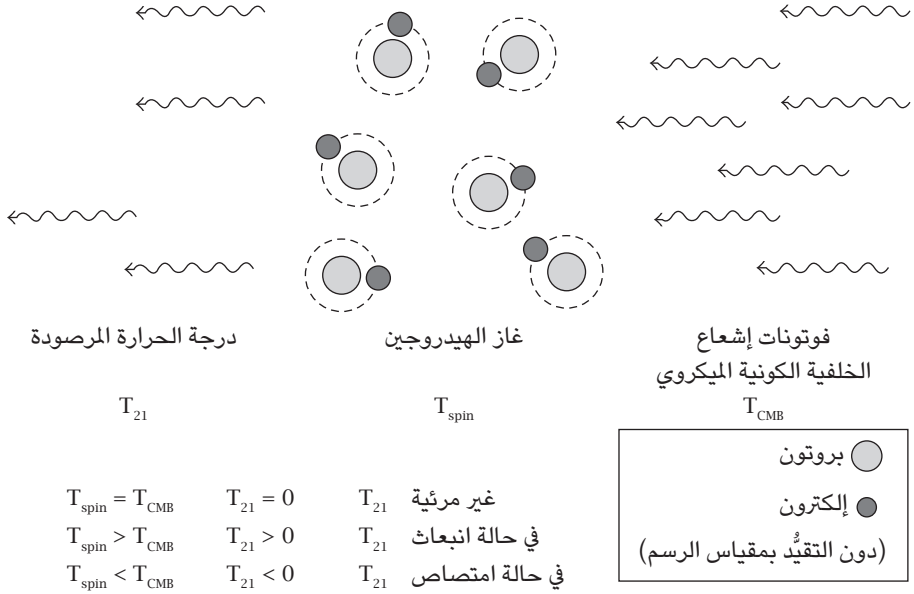
عن تكوُّن النجوم الأولى. وهكذا توصلوا إلى نهاية العصور المظلمة، وسطوع أول أشعة الفجر الكوني.

تشبه تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي آلة السفر عبر الزمن «تارديس» (ظهرت هذه الآلة في المسلسل التلفزيوني الممتع «دكتور هو»). فهي تتكوَّن من هوائيين متماثلين في التكوين مختلفين في النطاق: أحدهما مضبوط على الترددات العالية لعصر إعادة التأين، والهوائي الآخر المنخفض النطاق مضبوط على فوتونات العصور المظلمة المنخفضة التردد. ويشبه كل منهما في جوهره طاولة معدنية. فهناك هوائيَان أفقيان يستندان على هيكل داعم، بالإضافة إلى لوح أرضي من المعدن يهدف إلى تقليل التداخل الناتج عن البيئة الشديدة الهدوء في صحراء أستراليا الغربية. يتملكني شعور بالصدمة في كل مرة أنظر فيها إلى صورة أحدهما. مجرد طاولة! في الصحراء! ويمكنها الرجوع إلى بدايات كوننا!

عندما تقارن هذه التجربة بمسبار هابل المتطور الموجود في الفضاء، فستجد أنها تجربة متواضعة من حيث الحجم والتكلفة والإبهار، ولكنها ليست كذلك من حيث النتائج. فقد قاست تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي درجة حرارة الهيدروجين على مدى حوالي ١٠٠ مليون سنة، مقارنةً بدرجة حرارة الخلفية (عادة ما يُفترض أنها مجرد إشعاع الخلفية الكونية الميكروي). فإذا تجاوزت درجة حرارة الدوران المغزلي درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، فإننا نلاحظ أن درجة الحرارة موجبة؛ أي إن الهيدروجين في حالة «انبعاث». ومع ذلك، إذا كانت درجة حرارة الدوران المغزلي أقل من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، فإننا نلاحظ أن درجة الحرارة سالبة؛ أي إن الهيدروجين في حالة «امتصاص». ولكن لا يمكننا أحياناً رؤية درجة حرارة الدوران المغزلي على الإطلاق في الجدول الزمني، حيث تكون مساوية لدرجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي ... وتكون درجة الحرارة الإجمالية المقيسة صفراً.

أثناء تشكُّل النجوم الأولى، كانت درجة حرارة الغاز منخفضة إلى أدنى مستوى. كان الكون يتمدد، مما سمح للغاز بشغل مساحة أكبر وانخفاض درجة حرارته. يُنتج الغاز الموجود بين النجوم، أي ما تبقى من السحب الغازية غير المحظوظة، إشارةً أقل من إشارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، مما يدل على أنه في حالة امتصاص. وسجلت تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي درجة الحرارة باستخدام مجموعة متنوعة من الترددات خلال عملية الرصد. عندما تتحرك نحونا هذه الفوتونات ذات الطول الموجي

الضوء الأول



شكل ٥-٢: درجة حرارة الإشعاع ذي الطول الموجي ٢١ سم (T_{21}). نرصد درجة حرارة غاز الهيدروجين (T_{spin}) مقارنةً بإشعاع الخلفية الكونية الميكروني (T_{CMB}). في بداية الكون، رُصدت درجة حرارة الهيدروجين وهو في حالة امتصاص، ولكن بمجرد أن بدأت النجوم الأولى في تسخين الغاز حتى أصبحت درجة حرارته أعلى من درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروني، انتقلت الإشارة إلى حالة انبعاث.

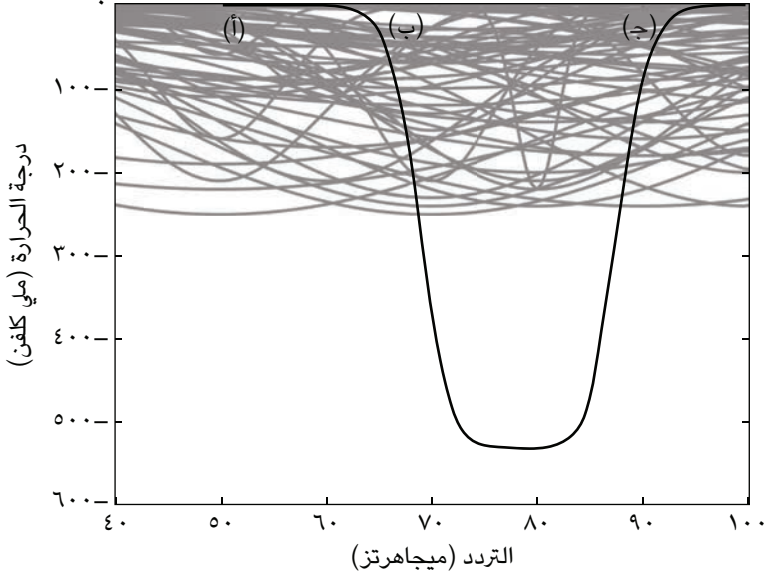
٢١ سم، أو التردد ١٤٢٠ ميجاهرتز، عليها أن تقاوم تمدد الكون: وكأنها تصعد سلمًا متحركًا يتجه إلى الأسفل. وهذا يُفقد طاقتها، مما يعني اكتساب المزيد من الطول الموجي. نطلق على هذه الزيادة في الطول الموجي اسم «الانزياح نحو الأحمر»، وهو تأثير شهادناه لأول مرة في تراجع المجرات وانحسارها. يمكننا الاستفادة بهذا الانزياح نحو الأحمر عن طريق ضبط التلسكوب على الأطوال الموجية أو الترددات المختلفة للفوتونات لاستكشاف أزمنة مختلفة. فالفوتون المنبعث بعد ١٨٠ مليون سنة من الانفجار العظيم سيصل إلينا الآن بطول موجي ٤,٥ أمتار، أو تردد ٦٨ ميجاهرتز. والفوتون المنبعث بعد ١٠٠ مليون سنة ستكون فترة مقاومته للتمدد أقل، ومن ثَمَّ سيفقد طاقة أقل ويصل إلينا بطول موجي ٣,٣ أمتار، أو تردد ٩٢ ميجاهرتز. اكتشفت تجربة رصد تأثير عصر إعادة

التأين العالمي إشعاعاً ضمن هذه الترددات، وسجلت أدنى درجة حرارة، مما يعني أنه كان في حالة امتصاص. تدل درجة الحرارة الدنيا هذه أنه قبل تشكّل النجوم الأولى، أي عند النقطة (أ) في شكل ٥-٣، كانت درجة حرارة الدوران المغزلي مساوية لدرجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروني، ولذا كانت درجة الحرارة المقيسة صفراً. وبعد ١٨٠ مليون سنة من الانفجار العظيم، وهو ما تمثله النقطة (ب)، اكتشفت تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي امتصاصاً حاداً؛ حيث انفصلت درجة حرارة الدوران المغزلي عن درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروني. واقتربت بدرجة حرارة الغاز بسبب فوتونات الأشعة فوق البنفسجية للنجوم الأولى التي عملت على تسخين الغاز وتغيير حالات الدوران المغزلي من خلال تأثير فوتهايسين-فيلد. كان هذا الامتصاص الحاد هو الإشارة التي كنا نبحث عنها، النقطة التي أصبحت عندها فوتونات الأشعة فوق البنفسجية هي الآلية السائدة لتحديد درجة حرارة الغاز. لقد ظهرت النجوم الأولى بعد ١٨٠ مليون سنة من الانفجار العظيم، وسرعان ما جعلت درجة حرارة الغاز تضاهي درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروني، ثم تجاوزتها، النقطة (ج). يمكننا الآن إضافة علامة مميزة في طيف باترسون تحدّد نهاية العصور المظلمة بمزيد من الثقة. ويعدّ هذا أول تأثير مباشر لظهور النجوم الأولى. فالانخفاض الحاد في درجة الحرارة يميّط اللثام عن عصر خفي ويمدّنا بمعلومة أساسية، وهي تاريخ نشأتها.

الإشارة غير المبررة

لو انتهت قصة تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي عند هذا الحد، لظلت متصدرة الأخبار ولظلّت أفقر من فرط حماسي في جميع أرجاء المنزل، ولكنها لم تكن لتصبح سبباً لإحداث ثورة في المجال. أثناء قراءتي لبقية الدراسة، تحوّل حماسي إلى صمت مربك. فقد أسفرت هذه التجربة عن شيء غريب.

عندما تدخل الإشارة في حالة امتصاص (أي عندما تكون درجة حرارة الدوران المغزلي أقل من درجة حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروني)، لا يستغرق الانخفاض وقتاً طويلاً؛ حيث إن فوتونات الأشعة فوق البنفسجية نفسها التي تربط درجة حرارة الدوران المغزلي بدرجة حرارة الغاز وتخفف درجة الحرارة تتسبب أيضاً في تسخين الغاز وترفع درجة حرارة كل منهما. لم يتمكن أي نموذج معروف من الإشارة العالمية ذات الطول الموجي ٢١ سم من إعادة إنتاج شكل وشدة الإشارة المكتشفة في هذه التجربة.



شكل ٣-٥: الاكتشاف الخاص بتجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي (الخط الأسود).
لم يتمكّن أيّ من النماذج النظرية التي أُعدت ما قبل فبراير ٢٠١٨ (الخطوط الرمادية) من إنتاج مُنخفض طيفي بهذا العمق مجدداً، ولم يتكرّر في أي نموذج حتى الآن شكل هذا القاع المسطح.

ويعد هذا من أكثر الأشياء التي يمكن أن تحدث في العلم إثارةً وتحدياً، وإن كان الأمر يعتمد على مدى احتكاكك وتعاملك المباشر مع البيانات. ففي حالة مَنْ يراقبون الأمر عن بُعد، فإنهم يشعرون بمتعة اكتشاف شيءٍ لم يكن متوقعاً. أما في حالة المسؤولين عن البيانات، فهناك عبء مزعج، يتمثل في الدليل الاستثنائي المطلوب لإثبات النتائج المذهلة. عندما تقرأ الدراسة التجريبية عن تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي،⁷ يتضح لك هذا العبء. فالشك يطوّق الدراسة من كل جانب والرسالة الرئيسية واضحة: «ما زلنا نسعى إلى التأكد مما توصلنا إليه». عُرِضَت النتائج بموضوعية، على غرار ما كان من بنزياس وويلسون في بحثهما عن إشعاع الخلفية الكونية الميكروي قبل ٥٣ عاماً. لم يفسّر القائمون بهذه الدراسة السبب المحتمل لهذه الإشارة غير المتوقعة، وقدموا بدلاً من ذلك قائمة شاملة بالأسباب المحتملة. وتتبعوا الإشارة استناداً إلى معلوماتٍ جُمِعَت

على مدى عامين، واكتشفوها على تردداتٍ مختلفة، باستخدام جهازين مختلفين وهوائياتٍ على محاذاة مختلفة. وغيرُوا بعض المعدات للتأكد من أنها ليست مصدرًا للضوضاء، واستخدموا طرق تحليل مختلفة، ورصدوها في أوقات مختلفة من اليوم والسنة. وعلى ما يبدو أنهم تحققوا من وجود حمام. ومع ذلك، بقيت الإشارة.

احتفظ المشاركون في تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي بسرية اكتشافهم أثناء فحص التقنيات والعلوم التي تدعمها وإعادة فحصها. في كرواتيا عام ٢٠١٧، اجتمع علماء الفيزياء الفلكية لمناقشة التقدم المحرز في اكتشاف النجوم الأولى. جلستُ واستمعتُ إلى المستجبات الواردة من جميع التلسكوبات الرئيسية، وأتذكر الاستماع إلى العرض الذي قدّمه عالم الكونيات جود بومان حول تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. أو بالأحرى حول غيابها. حينها لاحظت أنه ركّز على تلسكوبات الجيل التالي، مع ذكر القليل جدًا عن تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. لقد اعتبرتُ موقفه رفضًا لتجربة متوقفة، وليس صمتًا عن تجربة ناجحة في مرحلة التأكيد. واستطعتُ أن أفهم في وقت لاحق المغزى من الصمت. فقد كان عليهم أن يتأكدوا لأن النتائج كانت استثنائية للغاية. كانت إشارة تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي أكثر برودة بمقدار الضعف عن توقعات أي شخص. وعلى غرار إعلان بنزياس وويلسون الخاص بإشعاع الخلفية الكونية الميكروي، رافق إصدار دراسة تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي التجريبية دراسةً نظريةً أخرى. وفي هذه الدراسة النظرية،^٨ يفسح الشك التجريبي المجال لحماسة واضعي النظريات. فالقائمة الطويلة لما لا تمثله هذه الإشارة تمهّد الطريق أمام فكرة غير تقليدية عما يمكن أن تكونه. ولجعل الغاز أكثر برودة، لا بد أن يتفاعل مع شيء أكثر برودة، و«المكون الكوني الوحيد المعروف الذي يمكن أن يكون أبرد من الغاز الكوني المبكر هو المادة المظلمة».

المادة المظلمة

هل أغفلتُ ذكر المادة المظلمة حتى هذه اللحظة؟ يا إلهي. أرجو التماس العذر لي في هذا السهو الفادح، ولكن هذا يعكس الحال الذي عليه مجال النجوم الأولى قبل عام ٢٠١٥، تمامًا كما يعكس حال قاعة المحاضرات التي كنت أجلس فيها بصفتي طالبة دكتوراه في عام ٢٠١١ بجوار كاتي باترسون. ما المادة المظلمة؟ وما علاقتها بالنجوم الأولى؟ لا بد أن أطلب من كاتي ملاحظاتها.

لقد تحدثتُ في الفصول السابقة عن الكون الذي كان الهيدروجين هو المكون الرئيسي فيه، لكنني كنت حذرة في صياغتي. فقد وصفتُ الكون العادي، الكون الذي يمكننا «رؤيته»، حتى لو كانت هذه الرؤية تتطلب أشعة سينية أو تلسكوباً راديويًا. والمادة «العادية» تتكوّن من الباريونات، التي تتفاعل مع الضوء حتى نتمكن من ملاحظة وجودها، باستخدام ولو جزءًا على الأقل من الطيف الكهرومغناطيسي. أما المادة المظلمة فهي لا تتفاعل مع الضوء، ومن ثَمَّ لا يمكن رصدها باستخدام جميع التلسكوبات التقليدية وحتى أحدث التلسكوبات لدينا. فنحن لم نكتشف قط المادة المظلمة على نحو مباشر، وهذا ليس بالأمر الهين لأننا نعتقد أن المادة المظلمة تشكّل ما يصل إلى ٨٥٪ من إجمالي كتلة الكون.

لا يعني ذلك أن علماء النجوم الأولى تجاهلوا المادة المظلمة تمامًا، بل كانت الفكرة السائدة أن المادة المظلمة لا يمكنها التفاعل بشكل ملحوظ إلا من خلال الجاذبية. فالمادة المظلمة تمثل حجر الأساس في عملية تشكيل النجوم الأولى. في بداية الكون، بعد مرحلة إعادة الاندماج التي حدثت بعد الانفجار العظيم بـ ٣٨٠ ألف سنة، كان الغاز ساخناً للغاية مما حال دون انهياره مكوناً أي شيء قريباً من النجوم؛ لم تكن هناك سحب غازية محظوظة على الإطلاق. ولكن على حد علمنا، وبالرغم من وجود بعض الجدل حول هذا الأمر، كانت المادة المظلمة باردة. والمواد الباردة يمكن أن تنهار، وهذا ما حدث بالفعل. وتُظهر نماذجنا أن المادة المظلمة قد تكثفت في شكل خيوط سميكة، مكونة شبكة كونية تغطي الكون بأكمله. لكن الانهيار توقف عند هذا الحد دون أن تشكل المادة المظلمة نجومًا أو مجرات؛ لأنه على الرغم من أنها كانت باردة بما يكفي لأن تتكثف قليلاً، فلم يكن بإمكانها التفاعل كهرومغناطيسيًا (أي مع الفوتونات) لتفقد الحرارة مثل الباريونات. وبسبب عدم قدرة المادة المظلمة على فقدان هذه الحرارة، كان الضغط الداخلي أعلى بكثير. وأدى ذلك إلى منع المادة المظلمة من تشكيل أي شيء أصغر بكثير من المناطق التي تتجمع فيها المادة المظلمة بفعل الجاذبية عند أماكن تقاطع الخيوط، مُشكلة ما يسمى بالهالات التي تبلغ حوالي مليون كتلة شمسية.

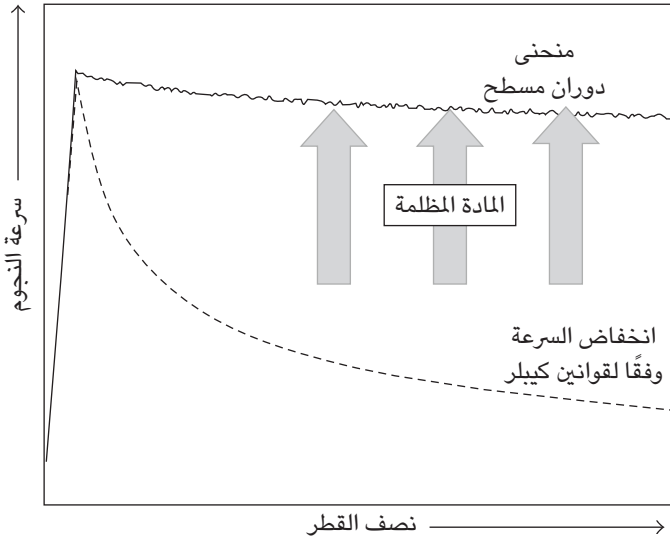
بمجرد أن تشكّلت شبكة المادة المظلمة الكونية، أصبح لدى الغاز البارد ركيزة يتمسك بها بفعل الجاذبية. وعلى المنوال نفسه، تؤدي قوة جاذبية هذه التجمعات من المادة المظلمة إلى تكثيف هذا الغاز. وتُعدُّ محاكاة إليوسترز،⁹ التي يمكن رؤية جزء صغير منها في صورة ١٦ في ملحقات الصور بنهاية الكتاب، واحدة من أفضل عمليات المحاكاة لتشكيل الشبكة الكونية. وهذه صورة لأكبر تجمع للمادة المظلمة في المحاكاة،

عند تقاطع الخيوط. وتحتوي على أكثر من ٥٠٠٠ هالة فرعية؛ الهالات التي يمكن أن تشكل المجرات داخلها. على يمين الصورة يظهر توزيع الغاز؛ ويظهر على اليسار توزيع المادة المظلمة. إن رؤية امتزاج الاثنين بسلاسة أمر مثير للدهشة. وتمثل هذه الصورة إحدى صور الفيزياء الفلكية المفضلة لديّ. ولذلك استخدمتها خلفية لسطح المكتب في جهاز الكمبيوتر الخاص بي. فبدلاً من الصور العائلية، وضعتُ صورة بالموجات فوق الصوتية للنجوم الصغيرة؛ لأن هذا ما تمثله بالفعل. فالمادة المظلمة تجمع جزيئات الغاز معاً، لتشكل سحباً من الغاز تتولد منها النجوم. وعلى نطاقات كبيرة نرى أن الغاز يتبع المادة المظلمة على نحو مثالي، ولكن على نطاقات أصغر، وعند تدقيق النظر نجد أن الغاز يستمر في الانهيار حيث لا تستطيع المادة المظلمة ذلك. وبينما تتوقف المادة المظلمة عن الانهيار بسبب عدم وجود آلية تبريد، يواصل الغاز انهياره كما ذُكر في الفصل الرابع. وهكذا تشكّلت النجوم الأولى والمجرات الأولى في هذه الهالات من المادة المظلمة، في صورة ضوء ساطع وسط سحابة من المادة المظلمة.

منحنيات الدوران المسطحة

تقع مجرة درب التبانة وسط هالة من المادة المظلمة، كما هو الحال مع جميع المجرات تقريباً. في الواقع، إن بنية الهالة غير المرئية هي التي أدت إلى ظهور بعض الأدلة الأكثر إقناعاً عن وجود المادة المظلمة. في سبعينيات القرن العشرين، تمكّن العلماء من النظر إلى إحدى المجرات بدقة كافية لقياس سرعات النجوم باستخدام تأثير دوبلر، وصولاً إلى حواف تلك المجرة. وتأثير دوبلر هو تحوّل الضوء المنبعث إلى طول موجي أطول أو أقصر، وفقاً لما إذا كان المصدر يتحرك بعيداً عنا أو نحونا، كما هو مبين في شكل ٣-١، في الفصل الثالث. وقد أدرجت عالمة الفلك الأمريكية فيرا روبين رسماً بيانياً يوضح كيف تتغير سرعات النجوم وفقاً لبُعدها عن مركز المجرة. وفي مجرة مكوّنة من مادة عادية فحسب، نتوقع انخفاضاً في السرعة يتوافق مع قوانين كيبلر، حيث تنخفض سرعة النجوم كلما زادت المسافة. وبعيداً عن مركز المجرة، تضعف قوة جاذبية الكتلة المضيئة، ونتيجة لذلك تقل السرعة المدارية للنجوم. وهذا ما نلاحظه في المجموعة الشمسية. فهناك ثمانية كواكب تدور حول الشمس، كلٌّ في مداره الخاص، ولكن كلما ابتعدت عن المركز، لا يطول المسار فحسب، بل تقل السرعة أيضاً. فالأرض تدور حول الشمس كل ٣٦٥ يوماً. وتستغرق الدورة الواحدة لكوكب عطارد ٨٨ يوماً، بينما تستغرق دورة كوكب نبتون ١٦٥ عاماً.

بدلاً من انخفاض السرعة المتوقع وفقاً لقوانين كيبلر، قاست روبين ومنحنيات الدوران المسطحة لكل مجرة رصدتها تقريباً. في البداية، زادت السرعة مع زيادة نصف القطر. وكان هذا يتماشى مع التوقعات حيث كان الجزء الأكبر من الكتلة المضيئة متضمناً داخل نصف القطر المتزايد وبالتالي زادت قوة الجاذبية. ولكن بمجرد أن تجاوزت عمليات الرصد المناطق الخارجية للمجرات المضيئة، أصبحت المنحنيات مسطحة على الفور. والأهم من ذلك أن معدل السرعة ظل ثابتاً بدلاً من أن ينخفض. وكانت هناك منحنيات دوران مسطحة في معظم المجرات التي رصدها. وتشير المنحنيات المسطحة إلى أنه عند إجراء عملية رصد بعيداً عن مركز المجرة، تواصل النجوم التحرك بالسرعة نفسها. ولا يمكن حدوث ذلك إلا إذا كانت كمية الكتلة تزداد طردياً مع زيادة المسافة، حتى تستمر قوة الجاذبية التي تؤثر على النجوم. وهذا يتنافى مع شكل المجرات التي رصدها؛ فالمجرات لها مراكز مشرقة وهالات خارجية باهتة، وليس العكس. والاستنتاج الوحيد هو أن هناك كمية هائلة من مادة ما في المجرة لا يمكننا رؤيتها؛ وهي المادة المظلمة.



شكل ٥-٤: منحنيات الدوران المسطحة. أشارت فيرا روبين وهنري فورد في الملاحظات التي قدمها عام ١٩٧٨ أن المجرات التي رصدها اتخذت منحنى دوران مسطحاً، حيث ظلت سرعة دوران النجوم كما هي على الرغم من زيادة المسافة بينها وبين مركز المجرة.

المادة المظلمة موجودة في كل مكان. نحن نعيش على كرة كبيرة منها الآن. لكننا لا نعرف شيئاً عنها لأنه لا يبدو أنها تتفاعل مع أي شيء باستثناء قوة الجاذبية، وكثافتها منخفضة جداً لدرجة أننا لا نستطيع أن نشعر بها على الإطلاق وفقاً للمقاييس البشرية. على مدى حياتنا، سيمر عبر أجسامنا حوالي مليجرام واحد فقط من المادة المظلمة.¹⁰ وهذه الكثافة المنخفضة هي السبب وراء انخفاض سرعة الكواكب في المجموعة الشمسية وفقاً لقوانين كيبلر وليس منحنى الدوران المسطح. فالمادة المظلمة موجودة، لكن كثافتها منخفضة جداً بحيث لا تحدث فرقاً كبيراً. وبينما يشعر نبتون بقوة الجاذبية التي تمارسها جميع الكواكب التي تسبقه وكل المادة المظلمة المحيطة به، فلا تعدو كتلة تلك المادة المظلمة كونها مجرد كتلة صخرة كبيرة. ولكن كل هذه المادة تلعب دوراً مهماً على نطاق المجرة. ففي المناطق الخارجية، كلما زاد نصف القطر، يزداد الحجم زيادة هائلة، ويتضمن ذلك القليل فقط من النجوم المرئية ولكنه يتضمن كمية هائلة من المادة المظلمة. وعلى هذا النطاق، نلاحظ دور المادة المظلمة أخيراً، حيث تجذب تلك النجوم الخارجية وتجعلها تسير بسرعاتٍ تفوق ما كنا نعتقد.

جسيمات المادة المظلمة

ولكن ممّ تتكوّن تلك المادة؟ نحن نعلم أن هناك شيئاً ما يولّد قوة جاذبية وأن كثافته منخفضة. تدعونا النظريات المؤيدة للمنهج الواقعي إلى عدم الانجراف كثيراً وراء استكشاف الأمور الغريبة. ولكن علينا ألا ننظر إلى المادة المظلمة باعتبارها مادة جديدة غريبة وغامضة مجرد عدم قدرتنا على رؤيتها. بل من الممكن ببساطة أن تكون «مظلمة». تحدثنا من قبل عن عدد السحب الغازية غير المحظوظة، وعلى وجه الخصوص الأقزام البنية المتعددة، التي كانت نجومًا ولكنها أخفقت في إتمام مهمتها. ربما عندما نقيس كتلة المجرة، نجد أنها أيضاً مليئة بالأقزام البنية التي تضيف الكثير من الكتلة. إنه أمر منطقي، لكنه ليس نظرية مقنعة. أشارت باترسون إلى النجوم الميتة التي لا يمكن رؤيتها في كونها في كتابها «كل النجوم الميتة».¹¹ وحددت على خريطة المجرة موقع ٢٧ ألف نجم ميت معروف ومُسجّل في تاريخ البشرية. وعلى الرغم من موت النجوم أو ذوبلها أو فشلها في إتمام مهمتها، فإننا نعثر على الكثير منها الآن. فلدينا تلسكوبات جيدة جداً، وعلى الرغم من أن الأقزام البنية باهتة، يمكننا اكتشاف ما يكفي منها في مجرتنا لحساب كتلتها. ولا يؤثر ذلك في كمية الكتلة المفقودة التي يُزعم أنها تُعزى إلى المادة المظلمة.

تنص إحدى النظريات على أن المادة المظلمة هي عضو جديد في مجموعة الجسيمات المعروفة التي تضم البروتونات والنيوترونات والإلكترونات والكواركات والنيوترينوات وغيرها. نحن نعلم أنها لا تتفاعل بشكل كبير، وإلا كنا لاحظنا ذلك، ولهذا السبب يُطلق على الجسيم الافتراضي اسم «الجسيم الضخم الضعيف التفاعل». تمثل الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل الأمل في أن عدم تفاعل المادة المظلمة مع الجسيمات الأخرى كثيرًا لا يعني أنها لا تتفاعل على الإطلاق. وقد حصرت ورقة بحثية حول المادة المظلمة هذه التفاعلات في انفجار البشر، وذلك في دراسة بعنوان: «الموت والإصابات الخطيرة الناجمة عن المادة المظلمة».¹² اقترح الباحثون أنه إذا كانت المادة المظلمة مكونة من جسيمات ذات كتلة كبيرة، فإن اصطدام الجسيم بجسم الإنسان من شأنه أن يسبب ... تداعيات كارثية. فحقيقة أن البشر عادة لا ينفجرون إلا في ظروف لها تفسيرات واضحة تخبرنا أن جسيم المادة المظلمة يجب أن تكون كتلته أقل من كتلة معينة، وأن تكون احتمالية الاصطدام به ضعيفة. ولو كان أضخم أو قوة تفاعله أكبر، لزادت وتيرة حدوث الاصطدامات وأصبحت أكثر تدميرًا، ولكننا قد لاحظنا هذه الظاهرة الآن. نظرية رائعة، أليس كذلك؟! كان البروفيسور أبراهام لوب، ولا يزال، من أوائل المهتمين بعلم النجوم الأولى. فهو عالم متحمس يحظى باحترام كبير ويرأس قسم علم الفلك في جامعة هارفارد. عندما تحدثنا عام ٢٠١٩، أعرب عن أسفه لميل العلماء إلى التخلي عن فضولهم الفطري الذي كانوا يتمتعون به في مرحلة الطفولة. وأوضح قائلاً: «يجب أن نتأسى بالأطفال في تصرفاتنا أكثر من ذلك. كنت أحاول تشجيع زملائي هنا في جامعة هارفارد على التصرف مثل الأطفال ... فالأخطاء جزء لا يتجزأ من عملية التعلم». أحببت وجهة النظر هذه بشأن العلم؛ فعملية التعلم يجب أن تنطوي على المتعة وحب الاستطلاع، ويتعين علينا البحث عن إجابات لتساؤلاتنا وعدم الخوف من الوصول إلى طرق مسدودة أو نتائج مفاجئة. يعد بحث «الموت جراء المادة المظلمة» مثالاً على هذا المنهج، وكانت تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي طريقاً لم يسلكه سوى القليل، لكنه انتهى بمفاجأة مذهلة. تحاول العديد من التجارب حول العالم زيادة حدة أضعف تفاعلات المادة المظلمة، في حالة حدوث أي منها، وذلك للوصول بهذه التفاعلات إلى مستوى يمكننا تسجيله، وتحقيق أول اكتشاف مباشر للجسيم الضخم الضعيف التفاعل. تجرى هذه التجارب في مختبرات على أعماق كبيرة تحت سطح الأرض في جميع أنحاء العالم: بريطانيا وكندا والولايات المتحدة وأستراليا وإسبانيا وإيطاليا. وتحتوي هذه التجارب، التي لا تتعرض

للجسيمات المحتشدة فوق الأرض، على مواد من المتوقع أن ترتد أنويتها عندما يصطدم بها جسيم ضخم ضعيف التفاعل. وتنتج عن الارتداد الطفيف كميات ضئيلة من الضوء والحرارة، ولكن باستخدام أجهزة كشف حساسة وفي درجات حرارة شديدة الانخفاض ومع التحلي بالكثير من الصبر، يعتقد العلماء أنه إذا حدث يوماً ما أن تعرض جسيم من المادة المظلمة لاصطدام نادر، فسوف يكتشفونه. ولكنهم لم يتمكنوا من ذلك حتى الآن. وعلى الرغم من استمرار هذه التجارب لما يزيد على عقدين من الزمن، لم تكن هناك سوى نتيجة إيجابية واحدة محل خلاف كبير.¹³ لكن أغلب التجارب لم تكتشف شيئاً على الإطلاق، مما أدى إلى استمرار ندرة البيانات حول المادة المظلمة. وفي الوقت الذي لم نكن نتوقع فيه العثور على معلومات حول المادة المظلمة، أُجريت تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي.

المادة المظلمة والضوء الأول

لدينا الآن القليل من المعلومات الأساسية عن المادة المظلمة، ويمكننا أن ندرس سبل ربطها بالملاحظات الخاصة بتجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. ولكن قبل أن نفعل ذلك، لا بد ألا يفوتني التنويه إلى ضرورة توخي الحذر. إذا طالعت الأبحاث العلمية حول تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، فستجد أن هناك بعض المفاهيم التي يمكن أن تفسر الإشارة التي اكتشفتها تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، وأكثرها إثارة هو تفاعل المادة المظلمة، وذلك بسبب النتائج غير المتوقعة والواسعة النطاق التي قد يستفيد بها مجال علمي آخر في أمس الحاجة إلى تلك البيانات. ولذا ففي خضم التحمس لاحتمالية تحقق هذا الأمر، علينا قراءة ما يلي بعقل عالمٍ لديه شكوك بناءة. فهذه واحدة من بين بضع أفكار، ونحن بحاجة إلى المزيد من البيانات قبل أن نتمكن من تقديمها كنظرية قوية. لقد أدركننا العلاقة بين المادة المظلمة والغاز والمجرات والنجوم منذ وقت طويل، وأدرجنا هذه العلاقة في عمليات المحاكاة، ولذا فلا سبيل لأن يبدو الأمر كما لو أننا لا نعلم شيئاً على الإطلاق عن المادة المظلمة. ومع ذلك، بمجرد أن يتحد الغاز ليشكل نجماً داخل شبكة المادة المظلمة، فلن تكون لدينا حاجة كبيرة للنظر في المادة المظلمة. فالمادة المظلمة لا تتمتع بأهمية كبيرة، تماماً كما هو الحال فيما يخص تأثيرها الضئيل في مجموعتنا الشمسية. أو هكذا كنا نظن. ما تشير إليه نتيجة تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي هو أن شيئاً ما يتفاعل مع الغاز ليجعله أكثر برودة، والشيء الوحيد الموجود في الكون ويتمتع بدرجة حرارة أقل من الغاز هو المادة المظلمة.

في حال وجود سحابة ساخنة من الغاز وسحابة باردة من المادة المظلمة، تنتقل الطاقة من السحابة الأولى إلى السحابة الثانية حتى تصبح الاثنتان في حالة توازن حراري؛ حيث يبرد الغاز وتسخن المادة المظلمة قليلاً. لكن مهلاً، تشتهر المادة المظلمة بعدم تفاعلها مع المواد الأخرى؛ كما يتضح من اسمها، الجسم الضخم الضعيف التفاعل. وقد أشارت الدراسة البحثية الخاصة بنظرية تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي إلى أن الكون الحالي مختلف تمامًا عما كان في الماضي. فما يُظهره اللون الأزرق على يمين عجلة باترسون هو أنه بعد الانفجار العظيم بمئات الملايين من السنين، وصل الغاز في الكون إلى أدنى درجة حرارة له على الإطلاق، وكان من المفترض أن تستمر درجة حرارته في الانخفاض حتى يومنا هذا. ولكن، بعد فترة وجيزة، ساهمت النجوم الأولى وجميع الأجيال اللاحقة من النجوم في ارتفاع درجة حرارة الغاز وإبقائه ساخناً. في الوقت الحاضر، لا تتفاعل المادة المظلمة كثيرًا، وقد لا تتفاعل على الإطلاق، مع الجسيمات المحيطة بنا، وإلا لكنا قد رأينا ما يدل على حدوث ذلك، سواءً في تجربة تُجرى تحت سطح الأرض أو في تواتر انفجارات البشر. ولكن ماذا لو كانت المادة المظلمة لا تتفاعل إلا عند سرعات منخفضة جدًا، أو عند درجات حرارة منخفضة؟ يحدث الكثير من التفاعلات أو التصادمات المختلفة بين الجسيمات، ولن يحدث بعضها إلا في تصادمات عالية الطاقة، بينما يتطلب البعض الآخر بيئة أهدأ. حاول معانقة شخص يركض نحوك وستدرك لماذا يكون التباطؤ في بعض الأحيان أفضل عندما يتعلق الأمر بالتفاعلات. توفر العصور المظلمة أهدأ بيئات على الإطلاق، حيث كانت جزيئات الغاز تتحرك بأبطأ سرعاتها. لذلك، إذا كانت تصادمات المادة المظلمة تحدث على الأرجح في البيئات الباردة، فغالبًا هذا هو أنسب وقت لتحدث فيه. وهذا ما يفسر بدقة سبب عدم تفاعل المادة المظلمة كثيرًا الآن، وأنها كانت أكثر قابلية للتفاعل في الماضي.

هناك قيود أخرى تعيق المادة المظلمة، كإشعاع الخلفية الكونية الميكروي على سبيل المثال، ومن ثمَّ يجب على أي نظرية أن تعالج هذه القيود مع توفير تأثير التبريد المذكور في بيانات تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. وقد تبين أن تحقيق كلا الأمرين صعب، ولا يمكن تطبيق سوى مجموعة صغيرة من نماذج المادة المظلمة الباردة. أحد النماذج البارزة هو نموذج المادة المظلمة المشحونة بشحنة صغيرة.¹⁴ فإذا كانت المادة المظلمة تحمل شحنة كهربائية صغيرة، فيمكنها التفاعل مع البروتونات والإلكترونات الموجودة في الغاز لخفض درجة حرارته. يبدو هذا رائعًا، ولكن عندما يُشحن شيء ما،

فإن المجالات المغناطيسية تؤثر عليه بالإضافة إلى مجالات الجاذبية. ويمكننا التحكم في النماذج من خلال النظر فيما يمكن أن يحدث لهذا النوع من المادة المظلمة في الكون ومقارنة ذلك بملاحظاتنا. ومن شأن المجالات المغناطيسية المرتبطة بالمستعرات العظمى (الانفجارات النجمية) أن تطرد أي مادة مظلمة مشحونة شحنة صغيرة وتدفعها من قرص المجرة، وبالإضافة إلى ذلك، فإن المجال المغناطيسي للمجرة سيمنع تلك المادة المظلمة الضئيلة الشحنة من العودة مجدداً إلى قرص المجرة. تشير قياساتنا لكتلة المادة المظلمة في قرص المجرة إلى أن معظم المادة المظلمة، في الواقع أكثر من ٩٩٪ منها، يجب أن تكون غير مشحونة؛ لأنها عالقة بوضوح في مواجهة المجالات المغناطيسية التي تنتجها المستعرات العظمى. ولو طُردت بالكامل، لما رأينا تلك النجوم تتحرك بالسرعة التي تتحرك بها في المناطق الواقعة خارج المجرة. ربما لا يتطلب الأمر تغيير طريقة فهمنا للمادة المظلمة كثيراً؛ ربما هناك جزء صغير جداً يتمتع بمزيد من الغموض وربما يحمل شحنة أكبر مما كنا نعتقد. ربما خضعت المادة المظلمة لنسختها الخاصة من إعادة الاندماج (الحدث الذي اتحدت فيه البروتونات والإلكترونات لتكوين الذرات في بدايات الكون)، لتشكّل ذرات مظلمة متعادلة (٩٩٪ من المادة المظلمة التي نرصدها الآن)، ولكنها تركت عدداً من عناصر جسيمات المادة المظلمة المشحونة «الحرّة» (المادة المظلمة المشحونة بشحنة صغيرة). يتميز هذا المجال بأنه سريع التطور لدرجة أن هذه الفقرات سيتعين تنقيحها وإعادة النظر فيها خلال السنوات القليلة المقبلة. ومهما كان ما تخبرنا به تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي عن المادة المظلمة، فأكثر ما يثير الدهشة هو كونها تخبرنا بأي شيء من الأساس. فقد كان من المفترض أن تمدنا تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي بمعلومات عن النجوم الأولى، وقد نجحت في تحقيق ذلك، لكننا كدنا نغفل هذا النجاح بسبب المكافأة غير المتوقعة المتمثلة في احتمالية استكشاف المادة المظلمة.

مشكلة درجات الحرارة الدنيا

عندما نُشرت نتائج تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، تصدرت عناوين الصحف تفسيرات المادة المظلمة، وهذا أمر مفهوم بالنظر إلى محور الدراسة النظرية الوحيدة التي رافقت الدراسة التجريبية. لكن على مدى الأشهر التالية، ظهرت أبحاث أخرى تحمل تكهنات عديدة. وكان من بين هذه التكهنات، على سبيل المثال، وجود إشعاع خلفية إضافي أو خطأ في معايرة الإشارة. يتطلب فهم الأمر الأول تغيير منظورنا تجاه

المادة المظلمة. ماذا لو افترضنا بدلاً من أن يكون الغاز أبعد من المتوقع، أن يكون إشعاع الخلفية أكثر دفئاً: والمقصود هنا إشعاع خلفية إضافي إلى جانب إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وللحصول على قياسات مضبوطة، فإن أي إشعاع خلفية إضافي يجب أن تكون شدته مساوية لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي أو أكبر منها، لإحداث تغيير كبير. كان من بين الأبحاث الأولى التي اقترحت نظرية إشعاع الخلفية الإضافي كان على القدر نفسه من الإثارة التي تمتعت بها الدراسة النظرية الأولى حول المادة المظلمة.¹⁵ ومن اللافت للنظر أن النص كان يحتوي على علامة تعجب، وهو أمر لم أره من قبل في بحث علمي. فهذا لا يحدث عادة. لا أمانع في وجود هذه اللمسة الحماسية والإنسانية في الأبحاث العلمية، لكن هناك مَنْ قد يعارضني في ذلك. فهناك مَنْ يقول إن العلم يجب أن يكون مجرداً من المشاعر الإنسانية، وأن يستند إلى الموضوعية والمنطق البحت. لكنني لا أنفق مع هذا الرأي. عند قراءة الأبحاث العلمية القديمة التي كُتبت في الفترة بين القرن الثامن عشر والقرن العشرين، ستجد هذه الإثارة حاضرة، بالإضافة إلى الإقرار بالأخطاء أو الاعتراف بعدم معرفة الخطوة التالية. من الصعب تحديد متى فقدنا هذا الشعور بالإثارة في القرن العشرين. وقد أدى غياب هذه النزعة الإنسانية إلى المبالغة في أهمية النتائج، والشعور بالعظمة مما أدى إلى الإشادة بأصغر النتائج باعتبارها إنجازات رائدة. وقد تسبب ذلك أيضاً في التقليل من أهمية الفكر التعاوني واختزال العلم إلى علامة تجارية. لكنني لا أؤيد هذا التوجه. ما يعجبني حقاً هو عندما أتمكن من الوصول إلى أبحاث تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي الجديدة هذه، وأشعر بحماس زملائي وأقرأ أنهم بذلوا قصارى جهدهم، لكنهم ما زالوا غير متأكدين من النتائج. ولذا عليهم استخدام مصطلحات مثل «افتراضات متفائلة» ليجعلوا النظرية تتناسب مع البيانات المرصودة، مما يضطربهم إلى تقديم «طلب استثنائي يستدعي أدلة استثنائية». فهناك «مسائل مهمة» يتعين على النظريات الجديدة «التغلب عليها». ويجب على الجميع أن يتخلوا عن افتراضاتهم القديمة وأن يفسحوا المجال لمجموعة جديدة من النظريات.

إن فكرة وجود إشعاع خلفية إضافي ليست بالجديدة. فقد كشفت تجربتان — مقياس الإشعاع المطلق لعلم الكونيات والفيزياء الفلكية والانبعاث المنتشر¹⁶ ومصفوفة الأطوال الموجية الطويلة¹⁷ — عن إشعاعات خلفية لا تفسر لها، وإن كان ذلك بترددات مختلفة. إذا كانت إشعاعات الخلفية هذه حقيقية وكانت موجودة عند ترددات الفجر الكوني، لكان بإمكانها حينئذ أن تفسر هذا الانخفاض الشديد في درجة الحرارة. تنص

إحدى النظريات التي تتميز بتناغم جميل أن موت النجوم الأولى يؤثر في صفات النجوم الأولى وتأثيراتها. ويُعتقد أن نجوم الجبهة الثالثة تنهي حياتها بالتحول إلى ثقوب سوداء أو بإحداث انفجارات عملاقة تسمى المستعرات العظمى. ينتج عن كلا الأمرين جسيمات عالية السرعة تولد أثناء تسارعها إشعاعاً، يسمى الإشعاع السنكروتروني. وينتج عن هذا الأمر إشعاع خلفية آخر يتكوّن من فوتونات، ولكنه ينتج أيضاً تأثيراً معاكساً لما نريده. وتنتج الثقوب السوداء أشعة سينية تعمل على تسخين الغاز، مما يقلل من امتصاصه. وبناءً عليه، لكي تتحول تلك الأشعة الصادرة عن النجوم الميتة إلى إشعاع خلفية، لا بد أن تكون لدينا أيضاً بيئة يحيط فيها غاز كثيف بالنجوم. وبهذه الطريقة، لا تستطيع الأشعة السينية المنبعثة من المستعرات العظمى والثقوب السوداء الهروب وتسخين الغاز المحيط. هناك طرق لإعادة إنتاج الإشارة باستخدام إشعاع خلفية إضافي، ولكن كما هو الحال مع نظريات المادة المظلمة، يتطلب تحقيق ذلك العديد من عمليات الضبط الدقيق. يُعدّ المجال البحثي المتعلق بالثقوب السوداء من المجالات التي تحتاج دائماً إلى المزيد من البيانات، ولذا يتحمس الجميع بشأن درجات الحرارة المتدنية التي اكتشفها تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي؛ لأنها قد تشير إلى وجود ثقوب سوداء في الكون المبكر. في مركز مجرتنا، ومعظم المجرات الحلزونية، يوجد ثقب أسود هائل، تعادل كتلته حوالي ٥ ملايين كتلة شمسية. إن مثل هذه الثقوب السوداء كبيرة جداً لدرجة أننا لا نستطيع معرفة كيف نمت إلى هذا الحد خلال ١٣ مليار سنة «فقط». إذا كانت نجوم الجبهة الثالثة قد شكّلت ثقوباً سوداء في وقت مبكر جداً عما كنا نعتقد، كأن يكون هذا قد حدث في العصور المظلمة مثلاً، فلربما منح ذلك الثقوب السوداء وقتاً كافياً لتنمو إلى النسب التي نلاحظها اليوم. وهذا لغز كوني آخر من المحتمل أن تنجح تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي في حله.

لقد ناقشنا مسألة المادة المظلمة وإشعاع الخلفية الإضافي. وهكذا نصل إلى الاحتمال الثالث، وهو أن البيانات غير دقيقة. على الرغم من بساطة تصميم تجربة رصد تأثير عصر إعادة التآين العالمي، فإن تحليل البيانات مسألة معقدة. فعند تشغيل تلسكوب راديوي وضبطه على أحد الترددات، فأنت لا تلتقط الفوتونات الصادرة عند هذا التردد من النجوم الأولى فحسب. بل تلتقط جميع الفوتونات الصادرة عند هذا التردد، بما فيها تلك التي تنتجها الأرض من الهواتف المحمولة والطائرات ومحطات الراديو. وتعد المجرة

نفسها مصدرًا ممتازًا للفوتونات، والتي تفوق في عددها عدد الفوتونات المنبعثة من إشارة النجوم الأولى بمئات إلى آلاف المرات. يتمحور مجال اختصاصي المهني حول تحديد كيفية التقاط الإشارة من بين كل تلك الإشارات المتداخلة. ويتطلب هذا الأمر أساليب إحصائية ومعرفة ممتازة بمدى سطوع المجرة عند كل تردد. وقد تمرسنا على اكتشاف هذه الأشياء جيدًا، لكننا يساورنا القلق دائمًا حول احتمالية وجود شيء مجهول، ربما مصدر للفوتونات يساهم في وجود إشارة متداخلة لا نتوقعها ولا نعلم حتى بوجودها. فقد تكون الإشارات المكتشفة إشارات متداخلة وعالقة، تتظاهر بأنها إشارات حقيقية. وقد حظيت هذه النظرية باهتمام متزايد في الأدبيات العلمية. وفي أحد المؤتمرات بعد الإعلان عن نتائج تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، ذهبتُ إلى أحد العلماء المشاركين في تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي وأخبرته بأنني أريد التحدث معه بشأن الإشارات المتداخلة. نظر إليّ نظرة منهكة وتنهد قائلاً: «بالطبع تريد ذلك». أعتقد أن الكثيرين كانوا يطرحون عليه الأسئلة نفسها في ذلك الاجتماع. على سبيل المثال، هل تحققوا من خوارزمياتهم؟ هل جربوا طريقة مختلفة لإزالة الإشارات المتداخلة؟ وكانت الإجابة دائمًا هي نعم، كما تشير دقة البحث الأصلي. إن هذا ليس إعلانًا عن صحة ما اكتشفته التجربة، ولكنه قائمة من واقع معرفتي الذاتية بما لم تكتشفه تلك التجربة. لقد حاولوا كل ما في وسعهم لتفسير هذه الإشارة بحل بسيط. نحن الآن في مواجهة متأزمة مع النظريات التي لا يمكن حلها إلا بتوفر المزيد من البيانات.

متى كانت نهاية العصور المظلمة؟

نحن ندرك أننا نعيش في العصور المظلمة بأكثر من طريقة. تاريخيًا، تشير العصور المظلمة إلى الفترة بين عامي ٥٠٠ و ١٤٠٠ ميلاديًا تقريبًا. ويستحضر هذا المصطلح في الأذهان صورة البرابرة، والطاعون الأسود، وغياب التعليم، والرفاهية والثقافة. وقد صكَّ العالم الإيطالي بترارك هذا المصطلح في القرن الرابع عشر، واستخدمه للإشارة إلى قلة الإنتاج الفكري في القرون السابقة. وعلى الرغم من أن المصطلح ظهر نتيجة انزعاج شخص واحد لعدم تمكنه من العثور على كتاب جيد، فقد ظل المصطلح باقياً. ومع مرور الوقت، ظهر العديد من الأدلة على حدوث تقدُّم في المجالات العلمية والفنية والثقافية خلال العصور المظلمة. ونتيجة لذلك، فقد هذا المصطلح شعبيته، باستثناء عدد قليل من المؤرخين الذين احتفظوا به للإشارة إلى عدم وجود سجلات ومحفوظات خلال تلك الفترة.

وقد وسَّعوا نطاق هذا التفسير الأخير ليشمل عصرًا أكثر حداثة: العصور الرقمية المظلمة. ويُقصد بها العصور المظلمة المعاصرة التي ظهرت نتيجة عدم القدرة على معالجة أو تحليل تنسيقات ملفاتٍ قديمة لا يتوفر منها نسخة ورقية. ففي العصر الرقمي، كثيرًا ما تُحذف البيانات أو تُسجَّل بتنسيقاتٍ لا نعرف كيفية التعامل معها (على سبيل المثال، اطلب من أحد المراهقين تحميل بياناتٍ من قرص مرن). وفيما يخص العصور المظلمة للكون، فقد انتهت حقبة البيانات المفقودة. فلدينا القليل من البيانات ووجدنا سجلًا تاريخيًا واحدًا دفعنا بالفعل إلى إعادة كتابة التاريخ الذي اعتقدنا أننا نعرفه. وعلى غرار اكتشاف قرص مرن في موقع أثري من العصور الوسطى، فقد جعلتنا تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي نشك في كثير من الأشياء التي كنا نعتبرها حقائق مؤكَّدة.

هناك تلسكوبات أخرى حوَّلت تركيزها إلى ترددات درجات الحرارة المتدنية في حالة الامتصاص، من أجل الحصول على مزيد من البيانات للتحقق من صحة الإشارة التي اكتشفناها تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي واعتمادها. تستخدم هذه التلسكوبات الموجودة في نصفي الكرة الأرضية المنفصلين خوارزمياتٍ مختلفة لتحليل بياناتها. ومن ثمَّ، إذا كان الاكتشاف ناتجًا عن خوارزمية مغلوطة، فإنه يظل لدينا أمل في ألا يتكرر ذلك في البيانات الواردة من تلسكوب آخر، وحينها سنعرف أن هناك مشكلة. آخر إبداعات باترسون التي أوْدُ أن أقدمها إليكم هو «الأرض-القمر-الأرض».¹⁸ في هذا المشروع، حوَّلت باترسون «سيمفونية ضوء القمر» لبيتهوفن إلى شفرة مورس. عندما أطلقت الإشارة باتجاه القمر، ارتدت منه، بعدما أفسد سطح القمر نفسه والغلاف الجوي للأرض الإشارة. حينها حوَّلت الإشارة مرة أخرى إلى موسيقى، واستخدمت في عزفها بيانو آلي كبير، وبالفعل صدر لحن سيمفونية ضوء القمر لكنه كان نشازًا، غير مطرب للآذان. فقد تأثَّر وضوح الإشارة كثيرًا بسبب تلك الرحلة التي استغرقت ٢,٥ ثانية، ومن ثمَّ لك أن تتخيل كيف قد تبدو إشارة قطعت مسافة ١٣ مليار سنة. فما لدينا هو النسخة الحديثة من سيمفونية الفجر الكوني، ولكن مهمتنا الآن هي اكتشاف اللحن الأصلي.

يبدو أن تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي قد فتحت الباب أمام حقبة كانت مخفية سابقًا. وقد استخدمت درجة حرارة غاز الهيدروجين في الكون المبكر لتتبع الوجود الضمني لنجوم الجبهة الثالثة. عندما بدأ الاندماج في النجوم الأولى جديدًا، أدى ذلك إلى تسخين الغاز المحيط، ومن ثمَّ إلى ارتفاع درجة حرارته مقارنةً بدرجة حرارة إشعاع

الخلفية الكونية الميكروي. تشير بيانات تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي إلى أن النجوم الأولى قد تشكّلت بعد الانفجار العظيم بحوالي ١٨٠ مليون سنة، ولكنها تشير أيضًا إلى أن غاز الهيدروجين كان أبرد بكثير مما كان متوقعًا. قد يرجع السبب في ذلك إلى تفاعل المادة المظلمة على نحو غير معتاد مع غاز الهيدروجين، ولكنه قد يكون أيضًا بسبب وجود إشعاع خلفية إضافي إلى جانب إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. التجربة معقدة، ولذا نحتاج إلى المزيد من البيانات للتحقق من صحة ما اكتشفته واعتماده قبل استخلاص أي استنتاجات مهمة.

إن زيادة وضوح إشارة مشوشة تمامًا واكتشاف النظرية الصحيحة يتطلب بذل الكثير من الجهد. فالنظريات ليست متناقضة. ولكن ربما يمكننا اكتشاف إشارة الفجر الكوني الحقيقية باستخدام جزء بسيط من كل نظرية. وربما نتوصل حينها إلى شيء جديد لم يفكر فيه أحد من قبل. ففي نهاية المطاف، لا توجد حتى الآن نظرية بإمكانها تفسير شكل القاع المسطح للمنخفض الجوي الناتج. ولذا، ربما سنحتاج إلى تطوير نظريتنا إلى مستوى جديد تمامًا. فهناك أمور لا نستطيع فهمها. وهذا ما يثير اهتمام العلماء وحماستهم.

الفصل السادس

تشظي النجوم

هناك منطقة خلّابة في المملكة المتحدة، تسمى «ليك ديستريكت»؛ أي منطقة البحيرات. وهي أكبر حديقة عامة في إنجلترا، وأحد مواقع التراث العالمي التابعة لمنظمة اليونسكو، وتضم العديد من الجبال، وبالطبع البحيرات، حيث توجد بها ١٦ بحيرة. تتميز البحيرات بأنها كبيرة بما يتسع للاستمتاع بالرياضات المائية وقضاء أيام ممتعة في الإبحار، بافتراض أن يحالفك الحظ لتحظى بطقس جيد (وهو أمر غير مضمون في المملكة المتحدة، ناهيك عن منطقة البحيرات). لقد قضيتُ وقتًا لطيفًا هناك ولكنني لم يسعني سوى الشعور بشيءٍ من خيبة الأمل تجاه البحيرات نفسها. والسبب هو زيارتي إلى الولايات المتحدة. فالبحيرات العظمى في أمريكا الشمالية تحتوي على ما يقل قليلًا عن خمس المياه السطحية العذبة على الأرض.¹ تبلغ مساحة بحيرة ويندرمير، وهي واحدة من أكبر البحيرات في منطقة البحيرات، نحو ١٥ كيلومترًا مربعًا (٥,٧٩ أميال مربعة)، بينما تبلغ مساحة بحيرة إيري، رابع أكبر بحيرة في الولايات المتحدة من حيث المساحة، ٢٦ ألف كيلومتر مربع (١٠٠٣٨ ميل مربع)، أي أكبر من بحيرة ويندرمير بأكثر من ١٧٠٠ مرة. أو على غرار العبارة الشهيرة في فيلم «كروكو دايل دندي» (التمساح دندي): «أتسمي تلك بحيرة؟ هذه هي البحيرة.»

كانت بحيرة إيري واحدة من البحيرات التي لم أزرّها خلال جولتي في الولايات المتحدة، ولا أشعر بالندم حيال هذا الأمر بعد أن قرأت بعض التحذيرات الصحية بشأن البحيرة في السنوات الأخيرة. ففي عام ٢٠١٤، تلقى نصف مليون شخص في المنطقة المحيطة بالبحيرة تحذيرًا بتجنب شرب مياه الصنبور بسبب وجود مادة سامة تنتجها الطحالب المنتشرة على طول البحيرة،² وهي نوع من البكتيريا المجهرية لونها أزرق مخضر تسمى البكتيريا الزرقاء (سيانوبكتيريا).

قد لا يكون اسم البكتيريا الزرقاء مألوفاً لك، لكن لا شك في أنك ستصادفها في وقت ما، على الأرجح أثناء التجول حول مسطح من المياه الراكدة. وعلى الرغم من اسمها، فإنها يمكن أن تتخذ ألواناً مختلفة. عندما تكون الظروف ملائمة للنمو بكثرة فإنها «تزهى»، وغالباً ما تنتج على سطح الماء غطاءً أخضر (على الرغم من أنه في بعض الأحيان يكون أحمر أو أصفر أو بُنيًا أو أزرق). ولكنها ليست جميلة الشكل، والسباحة خلالها غير ممتعة، كما أنها يمكن أن تكون سامة. فهي تنتج طبقة لا يمكن لأشعة الشمس اختراقها بسهولة، مما يحول دون وصول الحرارة والضوء إلى الكائنات الحية الموجودة في الماء، ومن ثمَّ استنفاد مستويات الأكسجين. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تنتج موادَّ سامة ذات أثر قاتل على بعض الكائنات، ويمكن أن تسبب أمراضاً خطيرة للإنسان إذا شرب كوباً من هذا الماء. وعلى الرغم من مدى انزعاجنا منها الآن، فنحن ممتنون لها كثيرًا. ففي الواقع، لولا تدخلها لما كان للحياة كما نعرفها على كوكب الأرض وجود.

حدث الأكسدة العظيم

منذ أكثر من ٢,٥ مليار سنة، كانت الأرض دافئة وملئية بغازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان. احتجزت هذه الغازات ضوء الشمس القادم إليها، مما أدى إلى ارتفاع درجة حرارة الأرض. كانت درجة حرارة المحيطات تتراوح بين ٦٥ و ٨٠ درجة مئوية، أو بما يعادل ١٥٠ إلى ١٧٥ درجة فهرنهايت، وهي درجة حرارة مرتفعة جدًا حتى إنه كان من الصعب القيام بأي أنشطة مائية. وتقريبًا للفكرة، تبلغ درجة حرارة حمامك وجسمك عمومًا حوالي ٣٧ درجة مئوية، أو ٩٩ درجة فهرنهايت. لم يكن هناك أكسجين في الغلاف الجوي للتنفس، وبالتالي فإن أشكال الحياة المعقدة التي نراها اليوم لم تكن قد تطورت بعد ولم تكن الظروف ملائمة لتتمكن من البقاء على قيد الحياة. ثم حدث شيء ما: حدث الأكسدة العظيم، أو أزمة الأكسدة الكبرى، وهذا يعتمد على ما إذا كنت بكتيريا زرقاء أو أي شيء آخر. من المقترح أن البكتيريا الزرقاء قد لعبت دورين في واحدة من كبرى عمليات الانقراض الجماعي في تاريخ الأرض،³ دور المُحرِّضين ودور الناجين القلائل. ونعتقد أن البكتيريا الزرقاء طورت القدرة على التمثيل الضوئي خلال الفترة القصيرة التي وُجدت فيها.⁴ والتمثيل الضوئي هو تفاعل كيميائي بين الماء وثاني أكسيد الكربون وأشعة الشمس، ينتج طاقة للنبات في صورة جلوكوز، بالإضافة إلى الأكسجين الذي يعتبر منتجًا ثانويًا. عندما بدأت جميع البكتيريا الزرقاء في ضخ الأكسجين الناتج،

دخل في البداية في تفاعلات كيميائية أخرى. وقد استُخدم في تحليل الكائنات الميتة، كما أدى إلى تكوّن الصدأ على الحديد المذاب في محيطات العالم، مخلفًا طبقاتٍ من الرواسب الحمراء التي تعرف بالطبقات الحمراء أو الحجارة الحديدية. عندما كان لدينا أرض صدئة، لم يكن للأكسجين مكان آخر ينتقل إليه سوى الغلاف الجوي. وهناك، تفاعل مع الميثان مكونًا ثاني أكسيد الكربون والماء، مما أدى إلى انخفاض مستويات الميثان مع استمرار ارتفاع مستويات الأكسجين. لقد غيّرت البكتيريا الزرقاء تكوين الغلاف الجوي ومن ثمّ غيّرت العالم. وبمجرد توفّر الأكسجين، توفرت الإمكانية لتطور شكل جديد من أشكال الحياة، يستخدم الأكسجين كوقود وينتج تجمعاتٍ ضخمة ومعقدة من الخلايا التي نطلق عليها اسم الأجسام البشرية.

في السنوات الأولى من تاريخ الأرض، أدى إطلاق كميات كبيرة من الأكسجين في الغلاف الجوي إلى تغيير البيئة بشكل دائم وتغيير ما يمكن أن ينمو فيها. وقد لعبت النجوم الأولى دورًا مشابهًا في الكون المبكر. فقد وجدت نفسها مولودة في بيئة نقية، خالية من البنيات الكبيرة. فالتعقيد الذي نراه حولنا اليوم يتطلب وحدات بناء أكبر من مجرد الهيدروجين والهيليوم، وفي ذلك الوقت لم يكن هناك سوى النجوم الأولى التي يمكنها توفير وحدات البناء هذه. وإذا قارنا حجم البكتيريا الزرقاء الضئيلة مع حجم الأرض، فسنجد أن هذه المقارنة لا تختلف كثيرًا عن المقارنة بين حجم أحد النجوم الأولى وحجم الكون. وربما كانت النجوم الأولى عبارة عن بكتيريا بالنسبة إلى الكون؛ أي ضئيلة الحجم وغير مهمة.

كتلة جينز

في الفصل الرابع، تركنا سحابة الغاز المحظوظة عند نقطة الاندماج. فقد انهارت السحابة تحت ضغط الجاذبية الهائل، مما أدى إلى اتحاد ذرات الهيدروجين معًا وبدء عملية الاندماج، أي احتراق الهيدروجين، ونتج عن ذلك حرارة وضوء، وضغط اندفع إلى الخارج ووازن قوة الجاذبية التي لا هودة فيها. في الفصل الرابع، سلطنا الضوء على ولادة نجم واحد. نجم واحد من سحابة غاز واحدة. إنها فكرة متسقة ومتجانسة. وحتى سنوات قليلة مضت، كانت هذه هي الطريقة التي نحاكي بها تشكيلات النجوم الأولية الخالية من المعادن: بالتركيز على نجم رئيسي واحد في مركز السحابة. ذلك أنه لم تكن لدينا الإمكانيات الحوسبية للقيام بأكثر من ذلك. فالإمكانات اللازمة لحساب قوى الجاذبية

والتفاعلات الكيميائية والمجالات المغناطيسية لنجم واحد فقط تتعدى حدود قدراتنا الحسابية والإمكانات الحوسبية في ذلك الوقت. ونتيجة لذلك، كان من الممكن أن يُطلق على هذا الفصل قبل بضع سنوات اسم «حياة منعزلة»، وهو العنوان نفسه الذي اعتدت أن أعطيه لشرائح العروض التقديمية التي أعدتها حول هذا الموضوع. فقد اعتقدنا أن النجوم الأولى تشكلت على نحو فردي، وعاشت كل منها حياة منعزلة. لكننا نعتقد الآن أنها لم تكن وحيدة على الإطلاق، بل على العكس تمامًا، فقد تكونت في مجموعات، تمامًا مثل حاضنات النجوم التي نرصدها اليوم. وعندما نستخدم ضوء الأشعة تحت الحمراء للنظر من خلال الغاز المعتم الذي تتشكل منه النجوم، نرى سحابة واحدة من الغاز لم تشكل نجمًا ضخمًا واحدًا، ولكنها بدلًا من ذلك تفككت وتحولت إلى مجموعة من النجوم ذات كتلة أصغر.

والسؤال هنا: ما الذي يحدد إذن عدد النجوم التي يمكن أن تشكلها سحابة واحدة؟ تتحدد الكتلة التي يجب أن يصل إليها النظام حتى ينهار من خلال قيمة تسمى كتلة جينز، تيمناً باسم عالم الفلك البريطاني السير جيمس هوبوود جينز. ساهم جينز بفكرتين رئيسيتين ناقشتهما في هذا الكتاب. دارت إحداها حول مساهمته في فهمنا لطيف الجسم الأسود، والأخرى حول دوره الرائد بوصفه أول شخص يقترح نظرية الحالة الثابتة للكون.⁵ وقد أدرك جينز أن الكتلة التي يُقيدُ عندها النظام بفعل الجاذبية ستعتمد على حجم النظام ودرجة حرارته. فالسحابة الباردة تنهار بسهولة أكبر من السحابة الساخنة؛ لأن الذرات تكون أقل نشاطاً وحركة ولا يمكنها الهروب بسهولة. وتنهار السحابة الأكثر كثافة بسهولة أكبر من السحابة الأكثر تمددًا؛ لأنها تضغط الذرات في مساحة أصغر. وكلما تقاربت كتلتان، زادت قوة الجاذبية بينهما، ومن ثمَّ زادت القوة التي تسحب الذرات الهاربة إلى الداخل. تخبرنا كتلة جينز أن نجمًا بنفس كتلة الشمس من المحتمل أن يكون قد تشكَّل من تجمع غازي يفوق في حجمه حجم المجموعة الشمسية بنحو ٢٥٠ مرة، بافتراض أن متوسط درجة حرارة الغاز يبلغ ٢٠ كلفن.⁶ في نظام ساخن، تتحرك ذرات الغاز في كل مكان بطاقة حركية عالية، ولذلك تحتاج إلى قوة جاذبية أكبر لإبطائها ودفعها إلى الداخل ... ومن ثمَّ ستكون كتلة جينز أكبر. لو كانت مجموعتنا الشمسية قد تشكَّلت بالقرب من نجم آخر، لكانت درجة حرارة الغاز قد ارتفعت إلى ١٠٠ كلفن. حينها يتعين على نصف قطر التجمع الغازي أن يتجاوز حجم المجموعة الشمسية بما يقرب من ١٢٥٠ مرة حتى يتمكن من الانهيار.

ستنكمش السحابة بمجرد أن تصل إلى كتلة جينز. وبسبب هذا الانكماش ترتفع درجة حرارة السحب كثيراً لدرجة أنها لا تستطيع أن تتفكك وتتقلص إلى كتل صغيرة بحجم النجوم؛ حيث لا تزال كتلة جينز كبيرة للغاية، لا سيما في الكون الياقع الساخن. ولم يتغلب على الضغط الحراري والانهيال سوى السحب الضخمة حقاً التي ساعدها حجمها الهائل على ذلك. ولتفكيك تلك السحب، علينا خفض حرارتها بعض الشيء وتقليل كتلة جينز حتى تبدأ السحب في التفتت والانهيال في شكل كتل بحجم النجوم.

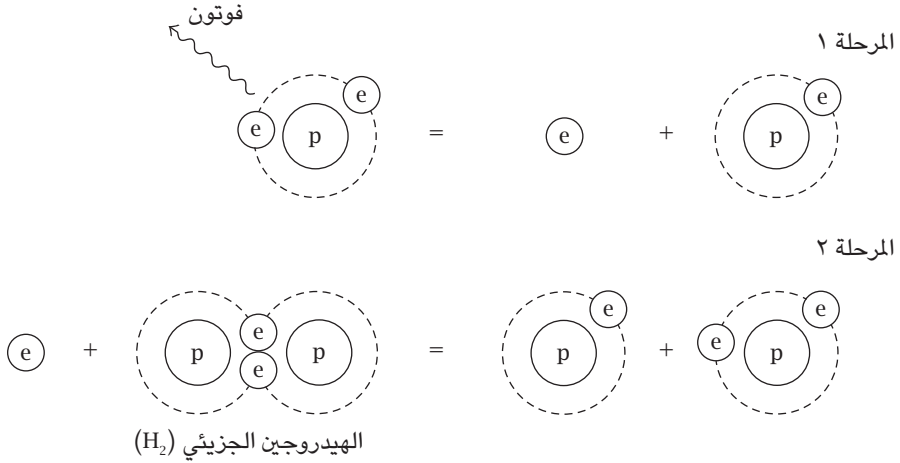
قد يبدو من الغريب أن نفكر في كيفية تبريد سحابة غازية لتكوين نجم شديد الحرارة. ولكن السر يكمن في ترتيب الأحداث. في البداية تظهر سحب الغاز ككيانات شديدة الانتشار وهشة أيضاً. وذلك على النقيض من النجم الذي يتميز بأنه جسم أكثر كثافة، ولذا علينا أن نتوصل إلى كيفية تكثيف سحابة الغاز بهذا القدر، دون أن تنفجر بسبب الطاقة الحرارية المتزايدة أثناء انهيارها. عندما تنهار السحابة، فإنها تفقد طاقة وضع الجاذبية، وكما تعلمنا من حوتنا البائس الذي كان يتسارع لأسفل نحو الأرض، فلا بد من خروج تلك الطاقة إلى مكان ما. عندما نجبر الغاز على شغل مساحة أصغر، أو ملء مكان بمزيد من جزيئات الغاز، فإننا نزيد الضغط. يمكننا عمل ذلك عن قصد لنفخ إطار سيارة أو دراجة، على سبيل المثال. وعند فعل ذلك، تقل إمكانية تحرك الجزيئات بحرية، ويزداد اصطدامها ببعضها وبجدران الوعاء الذي يحتويها، وبالتالي تزداد طاقتها الحرارية. وتتحول طاقة وضع الجاذبية إلى طاقة حرارية، مما يجعل الغاز أكثر سخونة وأكثر نشاطاً، ومن ثمَّ تزداد حركته كثيراً. أما القوة الناتجة عن هذه الزيادة في الطاقة الحرارية، التي نسميها الضغط، فإنها تعمل في الاتجاه المعاكس لقوة الجاذبية، مما يؤدي إلى إبطاء معدل الانكماش، وتنشأ لعبة شد الحبل بين القوتين. عندما تنتصر الجاذبية، تنكمش السحابة. وعندما ينتصر الضغط، تتمدد السحابة، الأمر الذي قد يمثل كارثة لنجمنا الأولي المنتظر. وإذا سمحت لي بالعودة إلى الموقع الذي سقط فيه حوتنا البائس من السماء، فيمكننا ملاحظة نتيجة الضغط الزائد. فخرج حوت إلى الشاطئ أمر محزن، ولكن التخلص منه عمل مهم يجب أن يؤخذ على محمل الجد. فالحيتان تتميز بحجم كبير نوعاً ما، ويمكن أن يؤدي تحللها إلى تراكم الغاز داخل الجثة. ومع تراكم المزيد والمزيد من الغاز، يزداد الضغط حتى ينفجر الحوت المسكين، مما قد يتسبب في حدوث «فوضى كريمة». فهذه الدماء وغيرها من الأشياء التي انفجرت على الطريق مثيرة للاشمئزاز، والرائحة كريهة حقاً»، كما أفاد أحد الأشخاص لقناة «بي بي سي» بعدما شهد حادثاً مؤسفاً لانفجار حوت.⁷

ولادة النجوم العملاقة

يكن السر وراء تبريد الغاز في التصادمات. فالإلكترونات الموجودة حول النواة تشغل مستويات طاقة محددة ويمكن للذرة المتصادمة أن تثير الإلكترون لينتقل إلى مستوى طاقة أعلى. لكن الإلكترونات تفضل الراحة والاستقرار عند أدنى مستوى طاقة، لذلك تهبط مرة أخرى إلى الأسفل عند أول فرصة، وينبعث فوتون تعادل طاقته الطاقة التي فقدتها الإلكترونات عند الانتقال من مستوى طاقة إلى آخر. وبهذه الطريقة، تتحول الطاقة الحركية لجزيء الغاز إلى طاقة إشعاعية على شكل فوتون يمكنه الهروب من السحابة بسهولة أكبر. في سحب الغاز الأولى الخالية من المعادن، لم يكن هناك تنوع كبير في أنواع التصادمات التي يمكن أن تحدث. ففي أغلب الأوقات كانت ذرات الهيدروجين يصطدم بعضها ببعض. وعندما تصطدم ذرتان من الهيدروجين، يمكن أن تتحدا لتكوين الهيدروجين الجزيئي. والهيدروجين الجزيئي هو الحالة التي نلاحظها في معظم الهيدروجين على الأرض وفي الكون الأوسع. ويمكن الحصول على هذا الجزيء بمساعدة إلكترون «محفّز»، تلتقطه ذرة الهيدروجين، وينتج عن هذه العملية فوتون. يمكن بعد ذلك أن يتحد «أنيون» الهيدروجين بذرة هيدروجين عادية لتكوين هيدروجين جزيئي، مما يؤدي إلى تحرير الإلكترون المحفّز، الذي يمكنه بعد ذلك الاستمرار في إثارة المزيد من التفاعلات.

يلعب انبعاث الفوتون وسط هذه التفاعلات دورًا حيويًا، حيث يصدر معه كمية من طاقة الغاز مما يؤدي إلى تبريده. يحدث هذا التفاعل بسهولة في سحب غاز الهيدروجين، وتؤدي كثرة الفوتونات المنبعثة إلى انخفاض الطاقة الحرارية للنظام، وبالتالي تنخفض درجة حرارته وضغطه الداخلي، ومن ثمّ تنهار السحابة. في سحب الغاز الأولى، أدى تبريد الهيدروجين الجزيئي إلى خفض درجة حرارة سحب الغاز إلى بضع مئات كلفن. هناك طرق تبريد أكثر كفاءة متاحة لسحب الغاز الحالية بسبب أنها تحتوي على نسبة أكبر من المعادن على سبيل المثال، مما يسمح لسحب الغاز الحالية بالوصول إلى درجات حرارة أقل بكثير تصل إلى بضع عشرات كلفن. وكان لارتفاع درجة حرارة سحب الغاز الأولى آثارًا مهمة على خصائص النجوم الأولى. في عملية تكوين النجوم الحالية، تعني درجات الحرارة المنخفضة للسحب الغازية أن كتلة جينز تبلغ نحو كتلة شمسية واحدة، ولذا فإن معظم عمليات تكوين النجوم تنتج نجومًا بحجم شمسنا تقريبًا. ولكن في حالة سحب الغاز الأولى الساخنة، كانت كتلة جينز أكبر بمئات المرات، وتفككت سحب الغاز إلى كتل

تشظي النجوم



شكل ٦-١: تبريد الهيدروجين الجزيئي. ينبعث فوتون (γ) أثناء عملية تكوّن الهيدروجين الجزيئي. يصدر جزء من الطاقة مع هذا الفوتون، مما يؤدي إلى تبريد الغاز.

أكبر بكثير، منتجة نجومًا أولى ضخمة. وعلى الرغم من وجود نجوم ذات أحجام مماثلة حولنا اليوم، فإنها نادرة. ومع ذلك، كانت هذه الكتل الهائلة أمرًا مألوفًا في حالة النجوم الأولى. فقد كانت المقاييس مختلفة تمامًا.

النجوم السامة

قبل ٢,٥ مليار سنة، كانت معظم أشكال الحياة لا هوائية، باستثناء البكتيريا الزرقاء، ولذا لم تكن تحتاج إلى الأكسجين كي تعيش ولم تتأثر سلبيًا بوجوده. وبناءً على ذلك، كان حدث الأكسدة العظيم في الواقع بمثابة إبادة جماعية للكائنات اللاهوائية. وكان تأثيره مزدوجًا. فهو لم يقتل كل شيء فحسب، بل جعل الحياة صعبة للغاية على كل من نجا. ومع انخفاض كمية غاز الميثان في الغلاف الجوي، انخفضت أيضًا قدرة الأرض على حبس ضوء الشمس. واستمرت درجة حرارة الأرض في الانخفاض، ودخلت في عصر جليدي استمر ما يقرب من ٥٠٠ مليون سنة. حتى إنه كان من المفترض أن الأرض ستصبح كرة ثلج،^٨ مغطاة بالجليد، أو على الأقل «كرة من الثلج المذاب»، حيث كانت المحيطات الواقعة عند خط الاستواء مغطاة بالثلج المذاب والمناطق القطبية مغطاة بالكتل الجليدية.

وفي النهاية، انتهى العصر الجليدي، ربما بسبب الانفجارات البركانية تحت الماء التي ضخّت الرماد وبعض غازات الدفيئة إلى الغلاف الجوي، مما أدى إلى زيادة احتباس ضوء الشمس.⁹ وحينها نجت البكتيريا الزرقاء. لقد أثبتت البكتيريا أنها تتمتع بقدرة استثنائية على التكيف. وفي أيامنا هذه، يمكنك أن تجدها تنمو عند الينابيع البركانية في متنزه يلوستون الوطني، وتحت جليد القارة القطبية الجنوبية، وفي وسط صحراء أتاكاما. وفي المقابل، لا يستطيع البريطانيون مغادرة منازلهم إلا عندما تتراوح درجات الحرارة بين ٥ و ٢٥ درجة مئوية، وعندما يكون المطر خفيفاً. وبسبب الضغط البيئي للكرة الأرضية الثلجية وحدث الأكسدة العظيم، لم ينج سوى أشكال الحياة التي تتمتع بقدرة كبيرة على التكيف؛ أشكال الحياة التي أصبحت فيما بعد متعددة الخلايا، وتطورت في اتجاهاتٍ شتى، إلى مخلوقات مثل الديناصورات وفئران الهامستر والمغني ميك جاجر. بالمقارنة مع البكتيريا الزرقاء، كان من غير المرجح نجاة النجوم الأولى من التدخل البيئي.

بلغت درجة حرارة سطح النجوم الأولى حوالي ١٠٠ ألف كلفن (تبلغ درجة حرارة سطح الشمس ٥٨٠٠ كلفن)، وهذا يعني أنها أنتجت الكثير من الفوتونات النشطة. المشكلة هي أن معظم الإشعاع كان على شكل فوتونات فوق بنفسجية فيما نطلق عليه اسم نطاق طاقات ليمان-فيرنر: هذه هي الطاقات نفسها القادرة على إثارة الإلكترونات كثيراً في الهيدروجين الجزيئي، H_2 . عندما يمتص الهيدروجين الجزيئي الموجود في الغاز المتبقي المحيط بالنجم هذه الفوتونات، يتفكك ويدمر الجزيء. ويلعب الهيدروجين الجزيئي دوراً حيوياً في تبريد الغاز بدرجة كافية حتى يتكثف ويتحول إلى نجم. ومن دونه، تظل درجة حرارة السحابة مرتفعة للغاية أثناء محاولتها الانهيار، وبدلاً من ذلك، تتمدد وتحافظ على شكلها كسحابة من الغاز. وبهذه الطريقة، كانت النجوم الأولى تضر بيئتها الخاصة، حيث كانت تدمر المادة التي كانت النجوم المستقبلية تشكّل منها الغاز الأولي اللازم للتبريد. وقد حال ذلك دون تكوّن المزيد من النجوم في المناطق المحيطة. فقد كان الهيدروجين الجزيئي هو العامل الرئيسي لولادة النجوم الأولى، لكنه دُمّر مقابل مجهوداته.

كانت مهمة النجوم هي تغيير الكون من أجل النجوم التي ستخلفها، والحث على الانتقال من البساطة إلى التعقيد. قبل تدخلها، كان الكون مظلماً: شبكة غير مرئية من المادة المظلمة تحدها سحب غازية غير مرئية. وبعد ذلك، امتلأ الكون بتراكيب وبنيّ مختلفة الألوان والأشكال والأحجام. إذ ظهرت العمالقة الحمراء، والعمالقة الزرقاء،

والأقزام البيضاء، والأقزام البنية، والمجرات الحلزونية، والثقوب السوداء، والبشر، ومناجذ الماء التي تتمتع بمنقار يشبه منقار البط. وكان هناك نجوم تحتوي على معادن قليلة (نجوم الجوهرة الثانية) ونجوم تحتوي على معادن أكثر (نجوم الجوهرة الأولى) ... لكن لم يكن هناك نجوم خالية تمامًا من المعادن (نجوم الجوهرة الثالثة). يبدو أن النجوم الأولى لم تكن موجودة للاستمتاع بالعرض الذي مهدت لحدوثه. فقد لعبت دور المهندسين المعماريين وضحايا انقراضها الجماعي. لم يولد الجيل التالي من النجوم إلا عندما ماتت النجوم الأولى وأطلقت معادنها، مما أتاح الفرصة لانخفاض درجة حرارة المعادن.

اعتقدنا لفترة طويلة أن هذا معناه أن النجوم الأولى كانت نجومًا وحيدة؛ بمعنى أنه بمجرد أن يتشكل نجم ما، تتدمر سريعًا منطقة تكوّن النجوم، بحيث لا يتمكن أي نجم شقيق من التشكل بعده. يا لها من فكرة غامضة — كون مظلم وفارغ تولد به نجوم وحيدة. لكن فكرة النجوم الوحيدة بدأت تفقد مصداقيتها.

النجوم الشقيقة

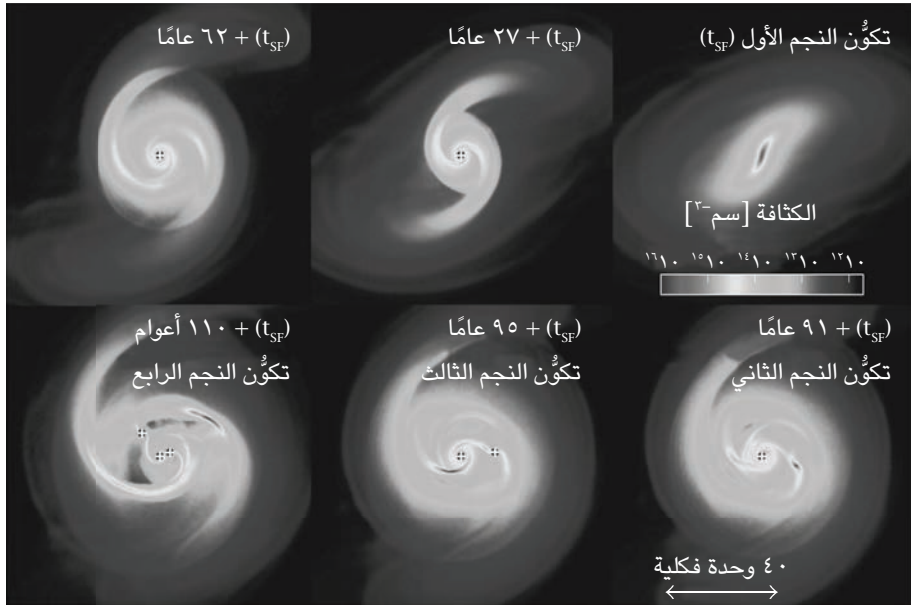
في عملية تشكّل النجوم الحالية، يمكننا مشاهدة نجوم تتشكل في حاضنات للنجوم. تنهار سحب الغاز الكبيرة وتنقسم إلى كتل بحجم النجوم، مما يؤدي إلى إنتاج مجموعات من النجوم بعضها على مقربة من بعض — أو ما يطلق عليه اسم حاضنة نجمية. ويرجع هذا إلى برودة الغاز، وانخفاض كتلة جينز، ولذلك فحتى الكتل الأقل ضخامة داخل السحابة، يمكن أن تصبح مقيّدة بالجاذبية وتنهار. ونظرًا إلى التركيبة الفريدة الخالية من المعادن التي كانت تميز الكون المبكر، لم يتمكن من الانهيار سوى سحب الغاز الكبيرة فقط. كانت السحب ساخنة جدًا بسبب نقص المعادن المتاحة لتبريدها بدرجة كافية، ومن ثمّ كانت هناك حاجة إلى كتل أكبر لمقاومة الضغط الإشعاعي. قبل بضعة سنوات كنا نظن أن نجوم الجوهرة الثالثة كانت وحيدة. فقد تشكلت بمفردها، وعاشت بمفردها، وماتت بمفردها. ولكن مع تطور أجهزة الكمبيوتر، أصبح بإمكاننا تطبيق المستوى نفسه من التفاعلات الكيميائية المفصلة وتفاعلات الجاذبية، ليس فقط على الكتلة الموجودة في المركز، ولكن أيضًا على سحابة الغاز بأكملها.¹⁰

بادئ ذي بدء، لا بد من فحص سحابة الغاز الكروية المتناظرة الخيالية فحوصًا واقعيًا. فعندما تتشكل هذه الهالات من المادة المظلمة، وهالات الغاز الموجودة داخلها،

فإنها تتفاعل بسبب الجاذبية مع أي هالات محيطة بها. ويُولد هذا التفاعل عزمًا؛ أي إن سرعة دوران السحابة قد تكون صغيرة في البداية، ولكن مع انكماش السحابة، يمكن أن يزداد هذا الدوران بسرعة، تمامًا كما يدور المتزلجون بسرعة أكبر عندما يضمون أذرعهم إلى أجسادهم. وتجبر سرعة الدوران المتزايدة هذه سحابة الغاز على اتخاذ شكل قرص مسطح يلف لولبيًا نحو المركز حيث يتشكل أول نجم أولي. ويطلق على هذا القرص اسم «قرص التراكم». ومع مرور الوقت، يتحرك الغاز عبر قرص التراكم، ويتراكم على النجم الأولي الرئيسي ويجعله أكبر وأكبر. في البداية، يكون النجم صغيرًا، حيث تبلغ كتلته حوالي ١٪ كتلة شمسية، ولكن مع مرور الوقت، يتراكم عليه الكثير من الهيدروجين لدرجة أنه يتضخم ويتجاوز نصف قطره نصف قطر الشمس بحوالي ١٠٠ مرة. ويكون معدل التراكم على النجم كبيرًا جدًا لدرجة أن التدفق يقلل الحجم بدلًا من زيادته. ويستمر هذا الانكماش حتى يصل حجم النجم إلى ١٠٠ كتلة شمسية أو أكثر، ولكن بنصف قطر لا يزيد عن نصف قطر الشمس إلا ببضع مرات فقط.¹¹ كانت هذه هي المعلومات البسيطة التي توصلنا إليها منذ فترة من الزمن، ولم نتمكن إلا في الآونة الأخيرة من إلقاء نظرة أشمل على المشهد بأكمله ومتابعة ما يحدث لبقية قرص التراكم. في شكل ٦-٢، يمكننا متابعة تكوّن أربعة نجوم أولية، وليس نجمًا واحدًا فقط، على مدى فترة زمنية تبلغ ١١٠ سنوات فقط وفقًا لمقاييس البشر. ما نراه هو تشظي قرص التراكم. ونرى أن هناك مجموعة متنوعة من العوامل تقف وراء ذلك، ومنها — على سبيل المثال — الاضطراب الذي يحدث في القرص والذي ينتج عنه ظهور بقع داخل القرص ذات كتلة جينز قليلة. إن السرعة التي تتراكم بها الكتلة فوق النجم تتناسب مع كتلته، ولا شك أن النجوم الأولية المركزية ضخمة الحجم. تتحرك الكتلة إلى الأسفل وتسقط على القرص بسرعة لدرجة أنها لا تتمكن من الانتقال إلى الداخل بسرعة كافية. ويُغطى القرص بالكتلة، مما يؤدي إلى تقليص حجمه وزيادة كثافته وانخفاض كتلة جينز، وقد تنهار بعض مناطق من القرص بعد وقت قصير من تشكّل النجم الأولي الرئيسي. هناك العديد من عمليات المحاكاة الآن، وجميعها تظهر الشيء نفسه: أن النجوم الأولى لم تكن وحيدة على الإطلاق.^{12,13,14} يتوقع البعض وجود نجوم شقيقة يتراوح عددها بين نجم واحد وبضعة نجوم، والبعض الآخر يتوقع وجود ما يزيد على مائة نجم شقيق. تتفاوت كتل هذه النجوم إلى حد كبير بدءًا من أقل من كتلة شمسية واحدة إلى ١٠٠٠ كتلة شمسية. كانت النجوم الأولى «الرئيسية» في عمليات المحاكاة هذه ضخمة، وقد أوقفت

تشظي النجوم

عملية تكوّن النجوم بسرعة، ولكن ليس بالسرعة الكافية لمنع تكوّن عائلة من النجوم حولها أولاً.



شكل ٦-٢: تكوّن نجوم الجبهة الثالثة. في لقطات المحاكاة الست هذه، نرى قرصاً من الغاز ينقسم إلى أربعة نجوم أولية، في فترة زمنية قصيرة تتجاوز المائة عام بقليل. وحدة فلكية واحدة هي المسافة بين الأرض والشمس. حقوق الطبع والنشر © مملوكة لساينس، كلارك وآخرون ٢٠١١.¹⁵

ربما لم تتشكل النجوم الأولى بمفردها، ولكن ربما لم تتشكل أيضاً وسط «عائلات سعيدة». فالنجوم الأولية الأصغر حجماً لا تبقى بالضرورة داخل قرص التراكم. ويبقى بعضها في صورة نجوم شقيقة منفصلة. ويندمج البعض الآخر مع النجم الأولي، حيث يضيف كل الهيدروجين المقيّد بالجاذبية إلى مصدر وقود النجم الأول. ويُطرد بعضُ منها،¹⁶ ربما ما يصل إلى النصف، حيث إن سرعاتها المدارية أكبر من أن تظل مقيدة في الهالة. يمكن لهذه النجوم الشقيقة المطرودة، ذات الكتلة المنخفضة، أن توفر لنا طريقة لإلقاء نظرة على هذه الفترة من خلال العمل كحفريات حية، في مأمن من الامحاء الذي يحدث في نهاية المطاف عند وجودها بجوار نجم عملاق.

حدث أكسدة الكون

بمجرد أن تشكلت هذه النجوم الأولى، لم تدم لفترة طويلة نظرًا إلى طبيعة كتلتها الكبيرة. وأثناء محاولتها لمقاومة ضغط الجاذبية الهائل، استنفدت وقودها بسرعة كبيرة، مما أدى إلى إنتاج معادن ثقيلة خلال هذه العملية. بدأ الهيدروجين في الاندماج في مركز النجم، وعلى مدى عُمر النجم كان يحرق المزيد والمزيد من الهيدروجين، في طبقات ذات نصف قطر متزايد. تحت طبقة الهيدروجين المحترق، يمكن أن يبدأ المستوى التالي من الاندماج: احتراق الهيليوم. وبمجرد أن يتوفر الهيليوم، يمكن أن يبدأ المزيد من التفاعلات، التي ينتج عنها الكربون والبريليوم والنيون والأكسجين. وتستمر هذه العملية مع بقية عناصر الجدول الدوري، حيث تنتج معادن أثقل وأثقل في طبقاتٍ تشبه طبقات قشرة البصل. ينتج عن كل هذا الاندماج الطاقة والضغط اللازمين لمقاومة النجم لقوة الجاذبية الساحقة التي لا هواده فيها. ولكن عندما ينفد الهيدروجين من النجم ويبدأ النجم في حرق العناصر الأثقل، تزداد صعوبة إنتاج المصادر اللازمة لمقاومة قوة الجاذبية. وتطلق العناصر الأثقل صافي طاقة أقل لكل وحدة كتلة من الوقود، ومن ثَمَّ فإنه للحفاظ على كمية الطاقة نفسها التي تساعد النجم على الصمود، يُستهلك الوقود بسرعة أكبر. وفي حالة نجم تبلغ كتلته ٢٠ مرة كتلة شمسنا، فإن احتراق الهيليوم سيستمر مليون سنة حيث إن احتراق الهيدروجين في المركز يستمر ١٠ ملايين سنة.¹⁷ أما عن احتراق الكربون، فإنه سيستمر لمدة ٣٠٠ عام، وسيحترق الأكسجين لمدة ٢٠٠ يوم. وسيستمر احتراق السيليكون لمدة يومين فقط، وبمجرد وصولنا إلى الحديد، ستتوقف عملية الاندماج. الطاقات التي تمكّن الحديد من الاندماج تمكّن الفوتونات من أن تكون نشطة للغاية بحيث تكون قادرة على تفكيك الحديد والنوى الثقيلة الأخرى. وتتفكك العناصر الثقيلة إلى البروتونات والنيوترونات المكونة لها، ومن ثَمَّ ينهار ضغط النجم. وبمجرد أن يبدأ النجم في دمج الحديد، لا يتمكن من إنتاج كمية الطاقة نفسها، وفي النهاية تتغلب عليه قوة الجاذبية الساحقة. ويتمزق هيكل النجم وتنبعث منه المعادن، وغيرها من عناصر أخرى، إلى البيئة المحيطة، وهي ظاهرة تشبه حدث أكسدة الكون إذا صحَّ التعبير.

تطلق النجوم معادنها داخل هالة تكوّنها، مما يؤدي إلى تعكير الغاز الأولي النقي بطريقة لا يمكن التراجع عنها. ويصبح الغاز النقي عرضة للتلوث على نحو ملحوظ. ومع موت الجيل الأول من النجوم وتلويث محيطه، تزداد نسبة المعادن في الغاز من صفر إلى ١ / ١٠٠٠ من نسبة المعادن في الشمس اليوم.¹⁸ وهذا يكفي لتحديد الانتقال

من تكوّن نجوم الجمهرة الثالثة إلى نجوم الجمهرة الثانية. لقد تكوّنت النجوم الأولى من مجموعة مكوناتٍ أولية للغاية؛ مثل الكعكة التي لا تحتوي على خلاصة الفانيليا أو مسحوق الكاكاو، ولا تُزيّن بطبقة من السكر أو يُوضَع فوقها كرز. فبنية النجوم هي التي تميز الفرق بين النجوم الأولى والنجوم الحالية. وبمجرد موتها، يصبح الغاز غنيًا بالمعادن بدرجة كافية بحيث لا يمكن أن يتشكل المزيد من نجوم الجمهرة الثالثة داخل تلك الهالة. الآن لا بد أن يبرد هذا الغاز الساخن المخضب، ويستقر مرة أخرى في شكل سحب غاز محظوظة وغير محظوظة حتى تشكل جيلًا جديدًا، هو نجوم الجمهرة الثانية. يحدث هذا بسرعة، بالمقاييس الكونية، بعد ١٠ إلى ١٠٠ مليون سنة فقط من انفجار نجوم الجمهرة الثالثة في هيئة مستعرات عظمى. فقد نُثرت المعادن في الكون في غمضة عين بالمقاييس الكونية، كما حدث مع حدث الأكسدة العظيم من الناحية الجيولوجية.

جزر في السماء

بعض انفجارات المستعرات العظمى تكون قوية بما يكفي لطرد المعادن خارج هالة التكوّن إلى وسط ما بين المجرات الأوسع، لكنها سرعان ما تعود مرة أخرى بسبب قوة جاذبية موطن نشأتها، تمامًا كما هو الحال مع جيل الألفية والغرف الاحتياطية في منزل نويهم. فانفجارات النجوم الأولى قوية، لكنها لا تنجح في تغيير أي شيء سوى بيئتها المحيطة. وبسبب انحصار قذف المعادن في مكان محدد، تكون عملية إثراء وسط ما بين المجرات بالمعادن عملية عشوائية؛¹⁹ فهي تتبع الشكل غير المنتظم الذي تنتشر به الهالات عبر السماء. فالهالات تتشكل عند نقاط التقاطع بين خيوط شبكة المادة المظلمة، وفي عروض المحاكاة يمكنك أن ترى كيف يتبع انتشارُ المعادن الشبكة. * ربما لو كانت المستعرات العظمى أكثر نشاطًا، لكان من المتوقع أن نرى انتشارًا متجانسًا للمعادن بسرعة كبيرة، بدلًا من الانتشار الحالي غير النظامي الذي يتبع الشبكة. بمرور الوقت يزداد نطاق الانتشار، بطريقة تذكرنا بالبكتيريا الموجودة في طبق بتري. يفتح هذا التلوث غير المكتمل الطريقَ أمام الاحتمالات. إذا كان انتشار المعادن في وسط ما بين المجرات غير منتظم، فإن الفراغات الأقل كثافة في الشبكة الكونية ستكون بمثابة جزر في السماء، في مأمن من نمو الغاز الملوّث بالمعادن حولها. يمكن الحفاظ على الغاز النقي في هذه الملاذات، مما يؤدي إلى تكوّن نجوم الجمهرة الثالثة في وقت لاحق بسبب الاندماج البطيء للغاز المنخفض الكثافة. نحن نتحدث عن فترة زمنية طويلة مضت، أكثر من ١٣ مليار سنة، وهي مسافة

طويلة للغاية لا يسعنا النظر إليها بالتلسكوب لرصد ضوء منذ ذلك الوقت. وأي عملية يمكنها تقريب هذه النجوم من حيث الزمن، وبالتالي من حيث المسافة، ستزيد من فرصة رؤية هذه النجوم الأولى. وإذا تمكّننا من تركيز تلسكوباتنا على المناطق المنخفضة الكثافة، والفراغات التي يكشف عنها افتقارها إلى الهياكل الكبيرة، فقد نجد دليلاً على وجود نجوم خالية من المعادن على مسافة أقرب بكثير مما قد نجد في المناطق العالية الكثافة.

كانت النجوم الأولى مختلفة عن النجوم الحالية، سواءً في طبيعتها أو في طريقة تشكّلها. وقد أدى انعدام وجود آليات تبريد تتعدى تبريد الهيدروجين الجزيئي إلى ارتفاع كتلة جينز في سحب الغاز الأولية الساخنة، ومن ثمّ لم تتمكن من الانهيار سوى كتل الغاز الكبيرة. كنا نعتقد أن هذا يعني أن النجوم الأولى قد تشكلت على نحو فردي، ولكن بفضل أساليب المحاكاة المحسّنة يمكننا الآن متابعة ما يحدث في قرص التراكم المحيط. ونعتقد حالياً أن السحب الأولى تنهار لتشكل نجماً مركزياً ضخماً، وتشكل حوله نجوم أولية أصغر منه. يُطرَد بعضها، ويندمج البعض الآخر مع الكتلة المركزية، وتظل البقية على قيد الحياة، منتجةً أول ثنائيات نجمية. وعلى الفور يحول هذا الانفجار الأول لتشكّل النجوم دون ظهور جيل ثانٍ من نجوم الجبهة الثالثة، حيث تدُمّر فوتونات النجوم الأولى نفسها الهيدروجين الجزيئي اللازم للتبريد. وتعيش حياتها القصيرة، حيث تدمج المعادن ثم تطلقها في النهاية إلى البيئة المحيطة بها مباشرة، وهي واثقة بأن أي نجوم تتشكل من هذا الغاز تنتمي بالفعل إلى نجوم الجبهة الثانية. وفي غمضة عين كونية، تختفي النجوم الأولى الضخمة، لكن إرثها يبقى، وهو نثر المعادن في الكون.

في خليج القرش،[†] في غرب أستراليا، داخل منطقة تسمى هاملين بول،[‡] شكلت البكتيريا الزرقاء حصائر بكتيرية؛ وهي طبقات من البكتيريا متشابكة معاً. منذ زمن طويل، قبل حدث الأكسدة العظيم ولفترة من الزمن بعده، كان يُعتقد أن هذه الحصائر موجودة في كل مكان. وبمجرد تطوّر حيوانات الرعي، أصبحت الحصائر مصدراً للغذاء، واليوم لا يمكن العثور عليها إلا في مواقع قليلة، محمية بطريقة أو بأخرى من حيوانات الرعي. عند مرور المياه فوق الحصائر، تهبط طبقة رقيقة من الرواسب إلى الأسفل، وتلتصق بالبكتيريا اللزجة على آلاف الطبقات التي جاءت من قبل. وعلى مدى مئات السنين، أصبحت هذه الصخور الحية أكبر فأكبر، حيث نمت بمعدل ٣,٠ ملم سنوياً، لتشكّل حفريات حية مثل تلك التي تبرز في خليج القرش. وتعد الأمثلة الأقدم من هذه

الستروماتوليت من أقدم الحفريات على الأرض. في متنزه جلاسير الوطني في ولاية مونتانا الأمريكية، يمكنك مشاهدة ستروماتوليت عمرها أكثر من مليار سنة، وهي صخور تشبه «شرائح الملفوف» توفر لنا تقريرًا عن بعض أشكال الحياة القديمة التي تتمتع بقدر كبير من المرونة والتكيف. ليس من السهل دائمًا العثور على هذه الحفريات، وقد اكتُشفت بسبب التدخل البشري أو الأحداث الجيولوجية. إذ كانت تخفيها عن الأنظار طبقات من رواسب أخرى. وينطبق الأمر كذلك على نجوم الجوهرة الثالثة المقذوفة أو المتأخرة التكوين؛ حيث إذا عُثر عليها داخل أنظمة نجمية أخرى أو تتجول حولها، فمن المرجح أنها مموهة بطبقات من المعادن التي صادفتها أثناء تنقلها. فاكشافها ليس بالمهمة السهلة ويتطلب الكثير من البحث.

هوامش

* يمكنك مشاهدة كل هذه العناصر المتفاعلة، من مادة مظلمة، وغاز، ودرجة حرارة، ونسب انتشار المعادن على الموقع الإلكتروني Illustris Project.

† لا يشتهر خليج القرش بأسماء القرش حسبما قد يظن البعض. ويحتوي الموقع الإلكتروني الموجه للسائحين على تحذير أسترالي نموذجي: «لم تعد أسماك القرش تشكّل تهديدًا في خليج القرش أكثر من أي مكان آخر في جميع أنحاء أستراليا. من بين ٢٨ نوعًا من أسماك القرش المسجلة في خليج القرش، هناك نوع واحد فقط أو نوعان يمكن اعتبارهما خطرين.» أعتقد أنه لا بأس في ذلك. فلن تواجه سوى سمكة قرش خطيرة واحدة أو اثنتين.

‡ أكبر من بحيرة ويندرمير بمقدار خمس وثمانين مرة.

مراجع مفيدة

- Greif, T. 2014. The Numerical Frontier of the High-Redshift Universe. *Computational Astrophysics and Cosmology*, vol. 2, article id. 3: 36 pp.
- Hallam, T. 2014. *Catastrophes and Lesser Climates, The Causes of Mass Extinctions*. Oxford University Press.
- Klessen, R. 2019. *Formation of the First Stars*, Formation of the First Black Holes. Ed Latif, M.; Schleicher, D. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore. pp. 67–97.

الفصل السابع

علم الآثار النجمي

لم أرغب أبداً في أن أصبح عالمة فيزياء فلكية. بينما كان الكثير من زملائي ينظرون عبر تلسكوبات الهواة، كنت أحلم بفك رموز اللغة الهيروغليفية وإمطة اللثام عن القطع الأثرية المخبأة في المقابر المصرية القديمة المكتشفة حديثاً. حاولتُ تعلم اللغة (لكنني فشلت) وقضيتُ فترة تدريبي في تغليف وتعبئة الأحذية المصرية التي يبلغ عمرها خمسة آلاف عام في متحف محلي بعد ظهر أيام الثلاثاء. عندما كنت في السادسة عشرة من عمري، حذّرتني أحد أمناء المتحف من أن فرص الحصول على وظيفة في علم المصريات ضئيلة للغاية، وأثناء تجولي في المكتبة، انصرفتُ عن التاريخ القديم وتوجّهتُ إلى كتاب عن السفر عبر الزمن على رف قريب. أتذكر أنني اعتقدتُ أن الكتاب قد وُضِعَ على سبيل الخطأ في قسم الكتب الواقعية، لكنني أخذتهُ معي إلى المنزل على أي حال. قرأتُ كل شيءٍ عن النسبية الخاصة لأينشتاين: كيف يتباطأ الزمن كلما ازدادت السرعة التي تتحرك بها، وكيف تبدو المسطرة أقصر إذا تحركت بسرعة تقترب من سرعة الضوء. صعقتُ لأنني لم أسمع بهذا من قبل، ولم أفهم كلمة واحدة منه. وكان ذلك كافياً لثنيي في جلسة واحدة فقط عن السعي وراء الماضي، والاهتمام بشيءٍ بدا وكأنه ضربٌ من الخيال العلمي. التحقّتُ بالجامعة لدراسة الفيزياء كي أتمكن من فهم هذا الكتاب. ووجدتُ أن الأمر يناسب اهتماماتي تماماً؛ لأنه حتى في دراستي للفيزياء انصبَّ اهتمامي على الماضي. كان بإمكانني صنع أجهزة كمبيوتر كمومية غير قابلة للاختراق، أو قطارات معلقة لجعلها تسير بشكل أسرع. كان بإمكانني إجراء بحث حول النقل الآني أو عباءات التخفي أو الذكاء الاصطناعي، ولكن في النهاية ظل شغفي متعلقاً بفتح قبر غير مُكتشف، ولكن هذه المرة على نطاق كوني.

كما هو الحال مع معظم محبي علم المصريات من الشباب، هناك قصة واحدة تجسد مدى الإثارة والتشويق اللذين يحيطان بالاكشافات المصرية القديمة أكثر من أي قصة أخرى، وهي اكتشاف مقبرة توت عنخ آمون. في نوفمبر ١٩٢٢، أمسك عالم الآثار البريطاني هوارد كارتر بشمعة ونظر من خلال ثقب صغير في باب المقبرة. سأل راعيه، لورد كارنارفون، إن كان يرى شيئاً، لكن كارتر أصابته حالة ذهول، ولم يسعه إلا أن أجابه قائلاً: «نعم، أشياء رائعة، أشياء مذهلة!»¹ روى لاحقاً أنه، على ضوء الشمعة الخافت، «كانت تفاصيل الغرفة تتبدى ببطء وسط الضباب ... حيوانات غريبة، تماثيل وذهب — كان بريق الذهب في كل مكان.» بريق الذهب في كل مكان. لا يزال قلبي يخفق بشدة عندما أقرأ تلك القصة. تخيل تلك اللحظة، وأنت تحفر عبر باب لم يفتح منذ أكثر من ثلاثة آلاف عام، وتتساءل عما ستجده. يملكني الشعور نفسه الآن، وأنا أبحث عن النجوم الأولى، وأقتفي أثرها في أي شيء ربما خلفته وراءها، حتى لو كان هذا الشيء بعض الأذى الملهمة؛ فلربما تفي بالغرض.*

كان اكتشاف المثلث الأخير لتوت عنخ آمون حدثاً استثنائياً لأنه نادراً ما يحدث. ففي أغلب الأحيان عند «اكتشاف» مقبرة ما، يكون لصوص القبور قد وصلوا إليها أولاً، وأحياناً قبل آلاف السنين، ونهبوا محتوياتها. وسرعان ما أدرك المصريون القدماء أن تمييز المكان الذي دفنت فيه الكنوز بهرم ضخم من شأنه أن يحول دون إبقاء هذه الكنوز مدفونة لفترة طويلة. ولذلك شرعوا في إخفاء ملوكهم وملكاتهم والكنوز الموجودة معهم تحت الأرض، لكن حتى ذلك لم يكن كافياً لتأمين كنوزهم، مما جعل توت عنخ آمون استثناءً نادراً. في الواقع، يعتمد جزء كبير من علم المصريات على تجميع المعلومات المتفرقة؛ حيث يُعثر على نصف تابوت في مكان ما، ومومياء في مكان آخر، وجرة كانوبية في عليّة. إنه لأمر مثير للدهشة كيف كان يُعثر على بقايا الحياة اليومية في أماكن غريبة، حيث يتراكم عليها الغبار لآلاف السنين قبل أن نراها على حقيقتها. يمكننا مقارنة هذا الأمر ببحثنا عن النجوم الأولى؛ لأن الكون تغير كثيراً منذ أن فقدت هذه النجوم الأولى بريقها. فقد دُوهمت البيئات النقية التي تشكّلت فيها، وتلوّثت بالنجوم الشابة المتداخلة ومستعراتها العظمية المضطربة، ومن ثمّ لم تبقَ إلا فرص قليلة لمقابر النجوم غير المكتشفة. ومع ذلك، قد يوجد في مكان ما بعض القطع الأثرية التي تعود إلى ١٣ مليار سنة مضت تحوم في كوننا، ولاكتشافها نحتاج إلى انتهاج بعض ممارسات علم الآثار النجمي.

دالة الكتلة الأولية

لا يفترض أن ينطوي الأمر على صعوبة كبيرة. ففي النهاية، من الصعب ألا نلاحظ بريقَ ضوء النجوم، وبالتأكيد هناك أماكن كثيرة للبحث فيها في درب التبانة. ولكن انتشار النجوم يمثل مشكلة، والبحث عن نجم خالٍ من المعادن بين مليارات النجوم في درب التبانة يشبه البحث عن قطع أصلية من آثار مصر القديمة في سوق لبيع البضائع المستعملة في تكساس. قد يحالفك الحظ، ولكن من الوارد أيضاً ألا يحالفك، فتعود بخفي حُنين، مرتدياً قبعة رعاة بقر مستعملة بالية. من أكثر العلاقات فائدةً في الدراسات الخاصة بالنجوم العلاقة بين كتلة النجم وعمره.[†] تختلف أعمار النجوم باختلاف كتلتها؛ حيث تحتوي النجوم الأصغر كتلة على وقود أقل ولكنها تستهلكه ببطء؛ إذ تقنن استخدامه على مليارات السنين. تحتوي النجوم الأضخم على كمية أكبر من الهيدروجين لاستخدامه كوقود للاندماج، لكنها تستهلكه بمعدل عالٍ، ولذلك ينفد الوقود في غضون بضعة ملايين من السنين. وقد أوضحت عمليات المحاكاة أن كتلة النجوم الأولى كانت تصل أحياناً إلى مائة مرة أو ربما ألف مرة من كتلة شمسنا. وبإلقاء نظرة سريعة على العلاقة بين كتلة النجم وعمره، نتوصل إلى أن النجوم الضخمة الأولى ستعيش أعماراً قصيرة لا تتجاوز بضعة ملايين من السنين، وهو أمر محبط لأولئك الذين يأملون في رصد نجم بعد ١٣ مليار سنة.

ولكن لا داعي للقلق، فما زال هناك بصيص من الأمل. عندما تحدثنا عن توقعاتنا لنجوم الجوهرة الثالثة، تطرقنا ضمناً إلى توقعاتنا فيما يخص «متوسط» نجوم الجوهرة الثالثة. نعتقد حالياً أن النجوم الأولى قد تشكلت في حاضناتٍ للنجوم، ربما مع نجوم أخرى أقل كتلة. وهذا صحيح بشكل عام، فنحن نتوقع أن يكون حجم النجوم الأولى أضخم من متوسط حجم النجوم الموجودة حالياً، ولكن كما هو الحال مع جميع القياسات، نتوقع أيضاً أن توجد نطاقات مختلفة من القيم قد تزيد أو تنقص عن هذا المتوسط. إذا سبق لك أن اشتريت ملابس أطفال، فمن المحتمل أنك لاحظت أنها تباع بمقاساتٍ مثل «٩ سنوات، ١٣٢ سم». وذلك ليس لأن كل طفل في العالم يبلغ من العمر تسع سنوات سيظل طوله ١٣٢ سم بالضبط لمدة ٣٦٥ يوماً، ولكن لأن هذا هو متوسط طول الطفل البالغ من العمر تسع سنوات. وإذا أخذنا في الاعتبار الأطوال الفعلية لألف طفل في التاسعة من عمره، فسنجد مجموعة مختلفة من القيم في نطاق هذا المتوسط؛ بعضها أقصر بكثير، وبعضها أطول منه بكثير.²

تختلف هذه الأطوال باختلاف البلدان والأعمار والعقود. على سبيل المثال، في أمريكا الشمالية، زاد متوسط طول الإنسان الذكر من ١,٦٨ متر (٥ أقدام و٧ بوصات) في عام ١٨٩٦ إلى ١,٧٦ متر (٥ أقدام و١٠ بوصات) في عام ١٩٩٦،^٣ ولهذا السبب عند زيارة المنازل التاريخية، عليك على الأرجح أن تنتبه إلى رأسك.^٤ يمكننا بسهولة معرفة تلك الأطوال المختلفة في الماضي، أو دالة توزيع الأطوال، ما دامت لدينا بيانات، ولكن في مرحلة ما انشغل فيها البشر كثيرًا بالبحث عن الطعام ومكافحة الطاعون أكثر من انشغالهم بأطوالهم، ناهيك عن تسجيلها. ومع ذلك، لا يزال بإمكاننا استنتاج أطوال البشر في العصور السابقة، عن طريق قياس طول عينة كبيرة بما فيه الكفاية من الرفات البشرية. فمن خلال قياس أطوال المومياوات في مصر القديمة، يمكننا أن نتوصل إلى ما يمكن أن نسماه دالة الطول الأولي، وهي دالة طول واحد من أقدم المجتمعات. على سبيل المثال، أشارت الأبحاث الحديثة إلى أن ذكور الأسرة المالكة في مصر القديمة كانوا في المتوسط أطول من العامة، وأن نساء الأسرة المالكة كن في المتوسط أقصر، مما يشير إلى وجود صفات وراثية مشتركة ويؤكد نظريات زواج الأقارب داخل الأسرة المالكة.^٤ مات توت عنخ آمون وهو في التاسعة عشرة من عمره وكان طوله حوالي ١,٨ متر (٥ أقدام و١١ بوصة)؛ أي إنه كان يعتبر طويلًا بالنسبة إلى عمره، حتى بالمعايير الحديثة، مما دفع الأبحاث نفسها إلى الإشارة إلى احتمالية أن يكون أبوه وأمه شقيقين. ومن ثم، يجب على علماء آثار النجوم اتباع نهج المؤرخين في النظر في الأدلة غير المباشرة حولهم لتحديد دالة الكتلة الأولية لنجوم الجوهرة الثالثة. وإذا تمكنا من معرفة عدد النجوم التي تكونت من كل كتلة، فإنه يمكننا تحديد ما إذا كان هناك أي أمل في العثور على نجم قديم منخفض الكتلة من نجوم الجوهرة الثالثة لا يزال موجودًا حتى يومنا هذا. وبمراعاة العلاقة بين كتلة النجوم وعمرها، يمكننا تقدير أن النجوم التي تبلغ كتلتها ٨٠٪ من كتلة شمسنا أو أقل هي الوحيدة التي يمكنها البقاء حتى يومنا هذا، وهنا يبدأ علماء آثار النجوم في التفكير في السؤال الذهبي التالي: هل انخفضت دالة الكتلة الأولية لنجوم الجوهرة الثالثة إلى هذا الحد؟

في حالة مجموعات النجوم القريبة، يمكننا إنشاء دوال كتلة النجوم بسهولة نسبية باستخدام التقنية المناسبة: فنحن ببساطة نحسب عدد النجوم التي نرصدها في كل كتلة. أما في حالة النجوم الأولى، تصبح المهمة أصعب لعدم وجود عينة يمكن الاعتماد عليها. لم نَرَ قط نجمًا من نجوم الجوهرة الثالثة، أو حتى بقايا إحداها، ومن ثم ليس لدينا حتى عظام حضارة قديمة يمكن أن نستخلص منها استنتاجاتنا. وبدلاً من ذلك، نستخدم

عمليات محاكاة مع أكبر قدر ممكن من قوانين الفيزياء وما نعرفه عن الكون المبكر للنظر في جميع السيناريوهات المحتملة. ما اكتشفناه هو أن دالة الكتلة الأولية لنجوم الجهمية الثالثة تتركز على النجوم المرتفعة الكتلة:⁵ تُعزى معظم الكتلة التي عُثِرَ عليها في عينة النجوم إلى النجوم المرتفعة الكتلة. وعلى النقيض، نجد أن دوال الكتلة المعتادة للنجوم التي نرصدها حولنا تتركز على النجوم المنخفضة الكتلة، حيث نرصد عددًا أكبر من النجوم المنخفضة الكتلة مقارنةً بالنجوم المرتفعة الكتلة. ويرجع ذلك جزئيًا إلى أن الكثير من النجوم القديمة المرتفعة الكتلة قد ماتت، ولأن ظروف الكون اليوم تفضل تكوّن نجوم ذات كتلة أقل في المقام الأول. في المقابل، فضّل الكون المبكر تكوين نجوم مرتفعة الكتلة، وذلك بسبب نقص معادن التبريد. كانت نجوم الجهمية الثالثة ضخمة مقارنةً بالنجوم التي نراها حولنا، وكأنها كانت في السماء أشبه بذكور الأسرة المالكة (أو ربما الهولنديين). والأهم من ذلك أنه عند إجراء محاكاة دوال الكتلة الأولية المحتملة لنجوم الجهمية الثالثة، على الرغم من وجود العديد من النجوم العالية الكتلة، يكون هناك ذيل في منحنى التوزيع حيث يتكون عدد قليل من النجوم بكتل منخفضة بما يكفي لرصدها حتى اليوم.⁶ هناك تساؤلات كثيرة حول دوال الكتلة الأولية لنجوم الجهمية الثالثة، ولكن لا تزال احتمالية وجود حفريات حية في كوننا قائمة، ونرى أن هذا يكفي لإجراء الأبحاث اللازمة.

حتى البحث والفشل يعتبران نتيجة بحد ذاتهما في العلم. تخيل صندوقًا مغلقًا، مملوءًا بـ ١٠٠ كرة ملونة باللون الأحمر والأصفر والأزرق؛ وإضافة مزيد من الإثارة، سنجعل قيمة كل كرة حمراء تخرج من الصندوق ١٠٠٠ جنيه إسترليني. ربما ستشغل الكرات الحمراء ٨٠٪ من إجمالي عدد الكرات، وربما ٢٥٪، أو ربما لا يوجد أي منها على الإطلاق. إذا أغمضنا أعيننا وأمسكنا بكرة ولم تكن حمراء، فهذا لا يخبرنا بالكثير حيث يوجد الكثير من الأماكن التي يمكن أن تختبئ فيها الكرات الحمراء ولا تزال معظم احتمالاتنا ممكنة (باستثناء أن تكون جميع الكرات حمراء اللون). ولكن إذا اخترنا كرة تلو الأخرى ولم يكن أي منها أحمر اللون، فسيصعبنا اكتشاف يتزايد مع استبعاد المزيد من الاحتمالات التي كان من الممكن أن تكون كرات حمراء، حيث تضيق نطاق احتمالاتنا. لا تُعد هذه التجربة الفكرية تشبيهًا مثاليًا، حيث إن إخراج كرة من صندوق يعد فعلًا بسيطًا، في حين أن البحث عن نجم خالٍ من المعادن ليس كذلك. بادئ ذي بدء، الصندوق (الكون) أكبر بكثير، ولذا فإن ذراعنا التلسكوبية لا يمكنها حتى الوصول إلى الكثير من الكرات، وكما سنكتشف، تقل احتمالية أن تكون الكرات التي يمكن الوصول إليها، وليس

الكرات البعيدة، حمراء. وكذلك تكلف كل محاولة رصد نقوم بها وقتًا ومالًا، وكلاهما قيمتان ثمينتان مقدرتان في الأوساط الأكاديمية؛ الأمر الذي يترتب عليه عدم إمكانية إجراء محاولات لا حصر لها. بالإضافة إلى ذلك، فإن تحديد ما إذا كان نجم الجبهة الثالثة خاليًا من المعادن وليس فقط لا يحتوي على نسبة كبيرة من المعادن هو أمر معقد في حد ذاته، فالكرات كانت موجودة هناك منذ وقت طويل، وكلها مختلطة، وقد بهت لونُها من الاستخدام، وأصبح غير واضح بسبب الأوساخ المتراكمة فوقها. وهنا علينا أن نتساءل: هل الكرة التي نحملها في أيدينا حمراء أم زرقاء؟ من الصعب معرفة ذلك، ولذا نحتاج إلى طريقة للتأكد.

وفرة من المعادن

يبدو للعين البشرية أن النجم الذي تبلغ كتلته ٨٠٪ من كتلة الشمس وُولد قبل ١٣ مليار سنة مشابه إلى حد كبير لنجم تبلغ كتلته ٨٠٪ وُولد قبل ٤ مليارات سنة. ومع ذلك، يختلف تمامًا الطيف النجمي لكل منهما. إن خطوط امتصاص الحديد المتعددة، الناجمة عن مستويات الطاقة الذرية العديدة في ذرة حديد، تكون أضعف بكثير في النجم الذي يحتوي على نسبة أقل من المعادن؛ لأن كمية الحديد أقل. ويجري تقييم ما يحتويه النجم من معادن من خلال قياس أي جزءٍ من النجم يحتوي على معدن معين بناءً على قوة خطوط امتصاص المعدن في الطيف ومقارنة هذا الجزء بالكمية نفسها الموجودة في الشمس. يحتوي النجم الذي يعاني من «فقر في الحديد» من نسبة حديد أقل من تلك الموجودة في الشمس، حتى لو كان النجم كبيرًا جدًا ويحتوي على كمية أكبر من الحديد من حيث الكتلة أو الذرات. هناك الكثير من المعادن للاختيار من بينها، لكن الحديد ينتج خطوط امتصاص قوية، يمكن قياسها بسهولة بالتلسكوبات البصرية، وتبين أن الحديد يعد مؤشرًا جيدًا لإجمالي نسبة المعادن أيضًا. في معظم النجوم — سنتحدث عن الاستثناءات لاحقًا — إذا أشار القياس إلى انخفاض نسبة الحديد، فيمكننا استخدام عبارة «فقير بالحديد» و«فقير بالمعادن» بالتبادل. وهكذا، بشكل عام، إذا كان النجم يحتوي على نسبة أقل، أو وفرة، من الحديد الذي تحتويه الشمس، فإنه يُصنّف بأنه «فقير بالمعادن»، ويُصنّف أي شيء يحتوي على نسبة أكبر من الحديد بأنه «غني بالمعادن». تتميز النجوم التي نراها من حولنا بأنها غنية بالمعادن؛ لأنها تشكلت من غاز يحتوي بالفعل على معادن ناجمة عن انفجارات سابقة لمستعرات عظمى. تبلغ النسبة الفعلية للحديد في الشمس

حوالي ١٤,٠٪ من كتلتها.⁷ ويبلغ عادةً إجمالي ما تحتويه النجوم الحالية التي تتشكل من معادن حوالي ٢٪ من كتلتها؛⁸ وعلى الرغم من هذه النسبة الضئيلة، فإننا نصنفها بأنها غنية بالمعادن! ومن الجدير بالذكر أن الهيدروجين سيكون دائماً العنصر الرئيسي في النجم. فالفرق بين نجم الجوهرة الثالثة ونجم حالياً هو مجرد شيء ثانوي، ولكنه يحدث فرقاً كبيراً (كما يفعل البقدونس على البطاطس، والريحان على الببتيذا). وبينما نبحث عن أجيال أقدم وأقدم من النجوم، يتناقص المحتوى المعدني المنخفض بالفعل حتى نصل إلى نسب منخفضة للغاية من المعادن تتطلب أن نسبقها بصيغ تفضيل لوصفها⁹ (شكل ٧-١). في الواقع، نادراً ما يولي علماء آثار النجوم أي اهتمام لأي نجم ما لم يكن يحتوي على أقل من ١ / ١٠٠٠٠ من نسبة الحديد الموجودة في الشمس؛ وتوصف هذه النجوم بأنها نجوم فائقة الفقر بالمعادن.

الاسم	التعريف
الشمس	وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن	١ / ١٠ من وفرة الحديد بالشمس
شديد الفقر بالمعادن	١ / ١٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير جداً بالمعادن	١ / ١٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فائق الفقر بالمعادن	١ / ١٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
مفرط الفقر بالمعادن	١ / ١٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة واحد على مليون	١ / ١٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة واحد على ١٠ ملايين	١ / ١٠٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة واحد على مائة مليون	١ / ١٠٠٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة واحد على مليار	١ / ١٠٠٠٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة واحد على عشرة مليارات	١ / ١٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس
فقير بالمعادن بنسبة تقل عن واحد على عشرة مليارات	أقل من ١ / ١٠٠٠٠٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد بالشمس

شكل ٧-١: التسميات الحالية لمعدنية النجوم، مأخوذة من فريبيل ٢٠١٨.¹⁰

اكتشاف النجوم الفقيرة بالمعادن

اكتُشفت أولى النجوم الفقيرة بالمعادن في عام ١٩٥١، على يد عالم الفلك الأمريكي جوزيف تشامبرلين والمشرّف على رسالة الدكتوراه الخاصة به لورانس ألير،^٥ اللذين قاسا وفرة

الحديد في نجمين ووجدا أنها تعادل حوالي ١ / ١٠ من نسبة الحديد في الشمس.¹¹ قد يبدو هذا فرقاً طفيفاً، لكنه كان اكتشافاً ثورياً في ذلك الوقت، وقد حقق تشامبرلين نجاحاً كبيراً على الصعيد الأكاديمي أيضاً، حيث كانت هذه أول ورقة بحثية له على الإطلاق، وتبين أنها أحد أهم الأبحاث الفلكية في القرن العشرين. حتى تلك اللحظة، كان من المفترض أن جميع النجوم لها تكوين من العناصر يشبه إلى حد كبير تكوين العناصر في الشمس. رُصدت نجوم ذات خطوط معدنية مختلفة القوة، ولكن فُسر ذلك بأن النجوم من نوع طيفي مختلف فقط، وأنه ليس مؤشراً على وجود جيل مختلف تماماً. وقبل كل شيء كانت الأطياف هي الأداة المستخدمة لتصنيف النجوم المختلفة وفقاً لنظام OBAFGKM في المقام الأول، حيث أصبحت قوة خطوط الهيدروجين تنوب عن درجة الحرارة. في بحث تشامبرلين وألير، يمكنك أن تستشعر عدم تصديقهما للنتائج التي اكتشفها، حيث استخدمتا عبارات مثل «تبدو وفرة [الحديد] المرصودة أقل مما هي عليه في الشمس، على الرغم من أنه يجب التعامل مع هذا الاستنتاج بحذر». فهما يشيران إلى نسب الحديد المقيسة على أنها «العامل الوحيد غير المرغوب فيه في تفسيرنا». وهذه حالة أخرى من الضوضاء غير المرغوب فيها التي تحولت إلى إشارة لم يسبق لأحد اكتشافها، على الرغم من عدم وجود فضلات حمّام هذه المرة.

من السهل النظر فيما مضى وانتقاء مثل هذه التصريحات من الأوراق البحثية المتواضعة التي غيّرت نظرتنا إلى العالم، ولكن ما ننظر إليه حقاً هو العلماء الأكفأ. فقد كانت لديهم عينة بحجم نجمين فقيرين بالمعادن، يتعارضان مع المعرفة السائدة بأن جميع النجوم متشابهة، وجميعها تشبه شمسنا، وبالرغم من ضرورة أن يكون العالم واثقاً من التحليل الذي سينشره، نادراً ما تأتي اللحظة التي يقول فيها «وجدتها» بهذا الوضوح. في كثير من الأحيان، تتحول كلمة «وجدتها!» إلى «يبدو هذا غريباً! انتظر، ما هذا؟ أعتقد أن هذا قد يكون ... يا إلهي. مرحباً، هل يمكنكم جميعاً التحقق من الأمر للتأكد من أنني لم أرتكب حماقة؟» وغالباً ما يتطلب الأمر لحظات من التأمل والاكتشاف حتى يشعر المرء بالاعتناء عند التخلي عن نظرياته الخاطئة التي اعتاد عليها. عند قراءة أعمال تشامبرلين وألير بشكل عكسي، يمكنك ملاحظة تلميحات تشكك في صحة نظرية النجوم المتجانسة، كما في إشارتهما على سبيل المثال إلى بحث عالمة الفلك الأمريكية نانسي رومان التي نشرته في العام السابق على ذلك. كان لنانسي رومان دور رئيسي في التخطيط لتلسكوب هابل الفضائي وكانت أول امرأة تتولى منصباً تنفيذياً في الإدارة

الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا)، ولكن قبل كل ذلك أشارت أعمالها إلى أن النجوم ليست كلها متشابهة. ما فعلته هو أنها أخذت عينة من النجوم وصنفتها أولاً حسب مدى ضعف خطوطها المعدنية، وثانياً حسب سرعتها.¹² وفي عام ١٩٢٦، لاحظ عالم الفلك الهولندي جان أورت أن مخططات هرتسبرونج-راسل للنجوم العالية السرعة كانت مختلفة على نحو ملحوظ عن تلك الخاصة بالنجوم المنخفضة السرعة. أكد هذا الاختلاف بادي الذي كان يراقب النجوم ذات السرعة العالية والمنخفضة في مجرة أندروميда من مرصد جبل ويلسون في عام ١٩٤٤، عندما سمحت بذلك فترات انقطاع التيار الكهربائي في زمن الحرب.¹³ ومع مواصلة استكشاف النجوم المختلفة السرعة، لاحظت رومان أنه عندما قسّمت العينة إلى خطوط معدنية ضعيفة وعادية، لم تُرصد السرعات العالية إلا في المجموعة الضعيفة. واكتشفت رومان أن النجوم التي تحتوي على نسب كبيرة من المعادن قد عُثر عليها في قرص مجرة درب التبانة. في المقابل، يميل مزيد من النجوم التي تحتوي على نسب قليلة من المعادن إلى الوجود في مسارات إهليلجية عالية السرعة، مما يشير إلى وجودها غالباً في الهالة. وقد تطلب الأمر من تشامبرلين وألير إثبات أن الخطوط الضعيفة تعني بالفعل نوعاً طيفياً فقيراً بالمعادن، وليس مجرد نوع طيفي مختلف.

البحث في المجرة

هناك الكثير من النجوم المشابهة لنجوم تشامبرلين وألير الأصلية، والتي تحتوي على ١٠ / ١ من نسبة الحديد في الشمس، لكن عملية الوصول إلى مستويات الحديد المنخفضة التي تقع في نطاق اهتمام علم الآثار النجمي كانت أصعب بكثير مما كان متوقعاً؛ لأن نطاق البحث كبير جداً. ولكن علينا ألا نفقد الأمل؛ هناك قول مأثور مفاده «لا شيء يستحق العناء يأتي بسهولة»، ولم يُذكر أبداً أن هوارد كارتر عثر على قبر توت عنخ آمون بمحض المصادفة. في عام ١٩١٤، حصل كارتر وكارنارفون على تصريح لحفر الموقع من عالم آثار كان مقتنعاً بأنه قد عثر على كل ما يمكن العثور عليه هناك، وبسبب اندلاع الحرب العالمية الأولى، لم يبدأ كارتر العمل إلا بعد ثلاث سنوات. وحينها، لم يكن منه إلا أن ذهب ومعه مجرفة فحسب، وأخذ يقسّم الموقع الأثري إلى مربعات صغيرة وأمضى خمس سنوات في استكشاف كل مربع على نحو منهجي ودقيق قبل أن يحالفه الحظ في النهاية. تخيل كيف كانت يومياته: اليوم الأول: لا شيء، اليوم الثاني: لا شيء، اليوم ١٨٢٤: لا شيء، اليوم ١٨٢٥: آلاف القطع الأثرية، مومياء الملك الصبي المفقود التي لم يمسه أحد.

العشاء: فول مع خبز محمص.^{١٤} إذا بحثت في الإنترنت عن عدد النجوم الموجودة في مجرة درب التبانة، فستجد أن هناك ٢٥٠ مليار نجم، بزيادة أو نقصان ١٥٠ ملياراً. وهذا هامش خطأ كبير بكل المقاييس. إن إحصاء عدد النجوم في مجرة درب التبانة أمر صعب؛ نظراً إلى مقدار النجوم الخافتة الهائل التي لا نستطيع رصدها. ونظراً إلى أنه حتى ألمع النجوم عبر المجرة تبدو لنا باهتة جداً، فإن الأمر يشبه محاولة التنبؤ بعدد سكان الأرض عندما لا يتوفر لديك سوى التعداد السكاني لمدينة ميلتون كينز فحسب. حتى لو افترضنا الحد الأدنى من هذا التقدير، ١٠٠ مليار نجم، فلا يزال هذا عدد هائل من النجوم التي يجب التدقيق فيها وتحديد نسبة ما تحتويه من معادن. وحتى لو كان لدينا تلسكوب متخصص (وهو أمر غير صحيح)، وكان بإمكاننا تحليل نجم واحد في الثانية (وهو أمر مستحيل)، فسيستغرق الأمر أكثر من ثلاثة آلاف عام لفحصها جميعاً، ومن ثمَّ علينا أن نضيق نطاق البحث.

هناك ثلاثة أجزاء مضيئة في مجرة درب التبانة: القرص، والانتفاخ، والهالة. القرص هو هيكل كبير يشبه الفطيرة المحلاة له ذراع حلزونية. ويعتبر القرص موضع تكوُّن النجوم النشطة، وبالتالي فهو موطن لمعظم نجوم الجبهة الأولى الشابة، ولذا فهذا ليس المكان المناسب للبحث؛ فمن الممكن أن تعثر على قطعة أثرية فريدة من نوعها في متجر سياحي ... لكن هذا احتمال ضعيف. نعتقد أنه من بين ٢٠٠ ألف نجم يوجد حوالي نجم واحد فقير بالمعادن في المنطقة المجاورة للشمس في القرص.^{١٤} يتكوَّن الانتفاخ من مجموعة من النجوم الكروية العالية الكثافة التي تتجه نحو مركز مجرتنا. تشير عمليات محاكاة تكوُّن المجرة إلى أن الانتفاخ هو أقدم مكوَّن في كوننا، حيث تشكَّل إما أثناء الانهيار الأولي أو بعده بفترة وجيزة، ومن ثمَّ فإنه يبدو نظرياً مكاناً رائعاً للبحث. وفي الواقع، يعتبر الانتفاخ موقعاً واعداً للبحث، لكن هناك ظروفًا صعبة للغاية: أصعب من حفر الثعابين التي كان يقفز من فوقها إنديانا جونز. فنظراً إلى كونه أقدم مكوَّن في الكون، فهو غني جداً بالمعادن الناجمة عن انفجارات المستعرات العظمى، وبالتالي فإنه يحتوي على العديد من النجوم ذات المعدنية العالية التي يمكن أن تصرف انتباهنا عن نجوم الجبهة الثالثة القليلة ذات الكتلة المنخفضة التي قد تكون موجودة. والأسوأ من ذلك أن كل هذه المستعرات العظمى تنتج كمية هائلة من الغبار، مما يربك تلسكوبنا الذي يحاول النظر عبر هذا الضباب. وبناءً على ذلك، قد يكون الانتفاخ منطقة بحث مناسبة من الناحية النظرية، لكنه محفوف بالصعاب التقنية، ومع ذلك يواصل العلماء جهودهم.^{١٥} وهكذا تتجه آمالنا نحو الهالة. تعتبر الهالة الهيكل المضيء الأكثر ضبابية الذي يحيط بالقرص

والانفتاح، ويحتوي على تجمعاتٍ من النجوم تعرف باسم العناقيد الكروية، بالإضافة إلى النجوم الميدانية التي لا ترتبط بأي عنقود فردي. من خلال بحث رومان، يمكنك استنتاج أن النجوم ذات المعدنية المنخفضة تتحرك بشكل أسرع، وهو ما قد يمثل سمة تعريفية مفيدة إلى حد ما. إذ يمكنك ببساطة قياس سرعة النجوم واستهداف أسرعها. ولكن للأسف، تفتقر هذه الصلة إلى السببية؛ فالنجوم ذات المعدنية المنخفضة ليس من طبيعتها أن تكون أسرع. وهنا يظهر السؤال التالي: لماذا من المرجح أن تحتوي النجوم ذات السرعة الأعلى على خطوط معدنية ضعيفة في أطيفها؟ تحدث عملية تكوّن النجوم في الغالب في الذراع الحلزونية، ولكن مع مرور الوقت، يمكن للنجوم الشابة أن تتحرك خارج مستوى القرص، وتتجه إلى الهالة. تتمتع الهالة بمعدل دوران منخفض جدًا مقارنةً بالقرص، ولذا فإننا في الواقع نتحرك من موقعنا في القرص بسرعة عالية للغاية. ومن وجهة نظرنا، تتحرك النجوم الموجودة في الهالة في الاتجاه المعاكس بسرعة عالية، على الرغم من أنه قد يكون لديها أيضًا مكون سرعة عمودي على مستوى المجرة. في الواقع، هذه النجوم التي يطلق عليها «عالية السرعة» هي مجرد نجوم تدور حول مركز المجرة في مستوى مختلف. ومن المرجح أن النجوم القديمة جدًا الفقيرة بالمعادن كان لديها الوقت الكافي للانجراف خارج القرص النجمي إلى حدود الهالة الهادئة، حيث تبدو بسبب سرعة الدوران العالية لمجموعتنا الشمسية وكأنها تتحرك بسرعاتٍ عالية، كما لاحظت نانسي رومان. ومن ثمّ، تبدو الهالة مكانًا ممتازًا للبحث عن نجوم الجوهرة الثالثة، وبالفعل هذا هو المكان الذي تركّزت فيه معظم الجهود في علم الآثار النجمي حتى الآن، بنجاح منقطع النظير.

علم الآثار النجمي

اعتبارًا من منتصف عام ٢٠١٩، لم يُرصد إلا عدد قليل من النجوم التي تحتوي على وفرة من الحديد أقل من ١/١٠٠٠٠. تتسبّب القيود التقنية التي يفرضها التلسكوب، أو التداخل الناجم عن النجوم الأخرى، في ظهور أدلة خاطئة مقنعة في خطوطنا الطيفية، ويُعدّ التحليل الذي أجراه علماء آثار النجوم لفهم هذا التلوث وإزالته عملاً حيويًا. صاحب الرقم القياسي الحالي لأشد النجوم فقرًا في الحديد هو SMSS J1605-1443.¹⁶ اكتُشف هذا النجم الفقير بالمعادن الموجود بالهالة في عام ٢٠١٨، وكان يحتوي على أقل من ١/١٠٠٠٠٠ من نسبة الحديد الموجودة في الشمس. والسؤال هنا: هل يمكن اعتبار هذا النجم أحد نجوم الجوهرة الثالثة نظرًا إلى هذه النسبة المنخفضة للغاية؟ لسوء الحظ،

لا؛ فمستويات المعادن الثقيلة الأخرى الموجودة في الطيف مرتفعة للغاية بحيث لا يمكن لهذا النجم أن يكونها بنفسه، لا بد أنه حصل على مساعدة من مستعر أعظم سابق هو المسئول عن وضع البذور الأولى لمجموعة أساسية من تلك المعادن في السحابة التي تكوّن منها هذا النجم. يعادل هذا الأمر إتقان تزييف مومياء مصرية، ووضع ساعة ذكية معها. ربما لم تسمع عن مومياء الأميرة الفارسية التي عُرضت للبيع في السوق السوداء مع مطلع الألفية الجديدة. أثارت هذه المومياء ضجة دولية على مدى ستة شهور، حيث ادعت باكستان وإيران، وحتى حركة طالبان الأفغانية، ملكيتها لهذه القطعة الأثرية التي قيل إنها تبلغ من العمر ٢٦٠٠ عام وتقدّر قيمتها بالملايين. عُرضت المومياء في المتحف الوطني الباكستاني، إلا أن هذه الشهرة لم تدُم طويلاً. اكتشفت أمور غريبة بشأن طريقة تحنيطها، وكان منها — على سبيل المثال — اكتشاف وجود قلبها، ووجود أخطاء نحوية في النصوص المكتوبة على التابوت، ولفت ذلك انتباه عالم آثار أمريكي وحته على إجراء مزيد من البحث. واكتشف أن هذه لم تكن مومياء أميرة عمرها ٢٦٠٠ عام، بل جثة امرأة تبلغ من العمر ٢٦ عاماً قُتلت بوحشية وحدثت الوفاة حوالي عام ١٩٩٦. حاولت أن أعرف من تكون تلك المرأة المسكينة، لكن حسب علمي لم يُتعرف عليها مطلقاً ولم توجه لأحد التهمة بقتلها، ولهذا السبب أقضي معظم وقتي في النظر إلى النجوم. فالأمور هنا على الأرض كلها مغلوطة. على أي حال، سواء كنا نتحدث عن النجوم أو عن القطع الأثرية، هناك الكثير من عمليات التزوير.

كانت مستويات الحديد المكتشفة في النجم SMSS J1605-1443 منخفضة، لكنه كان موجوداً بالتأكيد. هناك نجم واحد لم يُكتشف أي حديد فيه على الإطلاق ولم يُحدّد إلا الحد الأقصى فقط، وهو النجم SM0313-6708.¹⁷ وفي عام ٢٠١٣، لم يكشف التحليل الطيفي العالي الدقة للنجم SM0313-6708 الذي رُصد عام ٢٠١٢ عن شيء يُذكر على الإطلاق. وبدلاً من ظهور مجموعة من خطوط الامتصاص، كشف هذا النجم عن عدم وجود أي نشاط على الإطلاق ووجود أربعة معادن فقط (الليثيوم والكربون والمغنيسيوم والكالسيوم). وفي المواضع التي كنا نتوقع أن نرى فيها انخفاضاً يدل على وجود حديد، لم يكن هناك سوى خط مستوٍ، مما يشير إلى عدم وجود حديد. وباستخدام التقنيات المتوفرة لدينا، لا يمكننا الجزم تماماً بعدم وجود انخفاض طفيف مختبئ بين الضجيج العام للإشارة. لكننا على يقين من أننا نرصد نجماً يفتقر إلى الحديد بنسبة ١/١٠٠٠٠٠٠٠ على الأقل مقارنةً بالشمس، ومن الممكن أن يكون أقل بكثير. يبدو هذا اكتشافاً واعداً

للغاية. فقد عثرنا على نجم يعاني فيما يبدو من غياب تام للحديد؛ تُرى هل يعني هذا أنه بالتأكيد أحد نجوم الجمهرة الثالثة؟ حسنًا، لسوء الحظ، الإجابة لا. ربما اكتُشِفَ وجود أربعة عناصر معدنية فقط، لكن الكميات التي عُثِرَ عليها كانت كبيرة لدرجة تشير إلى أنه لا يمكن أن يكون المسئول الوحيد عن إنتاجها هو الاندماج النووي داخل أحد النجوم الأولى. ولك أن تتخيل مدى الغصة التي شعرنا بها؛ إذ كنا نعتقد أن النجاح بات وشيكًا. إن مستويات المعادن المكتشفة في النجم SM0313-6708 منخفضة جدًا لدرجة أن النماذج تظهر أنه ربما قد تشكّل من سحابة اكتسبت معادنها من مستعر أعظم واحد فقط. وعليه، فإن ما ننظر إليه هنا ليس نجمًا من الجمهرة الثالثة، ولكن من الممكن أن يكون من سلاسلها الأولى. ويمكننا أن نتعلم الكثير عن النجوم الأولى من نجم ينتمي إلى سلاسلها الأولى. ومن خلال مستويات المعادن المقيسة في هذا النجم، تمكّن الباحثون من تحديد أن السلف المحتمل كان نجمًا تبلغ كتلته ٦٠ كتلة شمسية، وانفجر في هيئة مستعر أعظم منخفض الطاقة قبل أن يستقر ويتحول إلى ثقب أسود. يتوافق هذا النموذج على نحو جيد جدًا بسبب وجود عناصر معدنية مثل الكربون، ولكن في الوقت نفسه لا يوجد حديد. عندما ينهي نجم حياته في هيئة مستعر أعظم منخفض الطاقة، وهو ما نسميه المستعر الأعظم المنهار النواة، تُطرد العناصر الأخف فقط مثل الكربون والماغنيسيوم في طبقات الانفجار الخارجية. ومن ثمّ تظل المعادن الأثقل، مثل الحديد، أقرب بكثير إلى الثقب الأسود المركزي، والاقتراب من الثقب الأسود ليس بالأمر الجيد على الإطلاق. ولذلك، نعتقد أنه على الرغم من إنتاج هذه النجوم الأولى للحديد، فقد تلاشى كل هذا العمل الشاق في ثقب أسود، وتشكّل الجيل الثاني من المعادن الأخف التي هربت من الثقب الأسود، ولكن ليس المعادن الأثقل مثل الحديد الذي كنا نستخدمه لتتبع نسبة المعادن بشكل عام. وكما ذكرنا سابقًا، يعتبر النجم SMSS J1605-1443، وهو أحدث نجم فقير بالمعادن والنجم الأقل معدنية عند قياس نسبة الحديد، مناسبًا أيضًا لنموذج انهيار النواة هذا، ويتكرر هذا النمط من وفرة الحديد المنخفضة ووفرة الكربون العالية في جميع النجوم المعروفة بفقرها المعدني الشديد مع وجود استثناء واحد. يمكن أن تكون هذه المستعرات العظمى المنخفضة الطاقة أكثر شيوعًا مما كان يُعتقد سابقًا، عندما بدا أن جميع النجوم الأولى أنهت حياتها في انفجارات مستعراتٍ عظمى نشطة للغاية. فلو كان هذا صحيحًا، فإنه ينطوي على تبعات مهمة حول المدة التي كان فيها هذا الجيل الأول قادرًا على البقاء بشكل عام. لا تؤدي المستعرات العظمى المنخفضة الطاقة إلى تلوث الكون بدرجة كبيرة، مما يحافظ

على وجود مناطق من البيئة خالية من المعادن، ومن ثمَّ ربما تكون نجوم الجمهرة الثالثة قد تشكلت على مدى فترة أطول مما كان يُعتقد سابقاً، مما يفرد لنا مجالاً أوسع للبحث. والسؤال هنا: هل وصلنا إذن إلى أقصى حدود علم الآثار النجمي؟ لقد تعمّقنا إلى حدٍّ لم يتوقع أحدُ أننا قادرون على الوصول إليه. وأصبح هناك قاعدة أساسية بشأن «حد التلوث» وضعها العالم إيكو إيبين الابن في عام ١٩٨٣.¹⁸ حسبَ إيبين مقدار تراكم المعادن (المعادن التي تسقط بفعل الجاذبية على النجم) الذي يمكن أن يحدث على مدى عمر النجم لمعرفة ما إذا كانت هذه النجوم الأولى يمكن أن تكون موجودة الآن، ولكنها مطموسة، مثل الكرات الحمراء المتسخة في تجربتنا الفكرية. إن أي قياس للخطوط المعدنية الأساسية سيكون دائماً محدوداً بكمية «التلوث» التي تراكمت على النجم، فحتى لو كان هناك نجم فقير بالمعادن تحت كل هذا التلوث، فلن نتمكن من رؤيته. وحدُّ التلوث هذا ليس قاطعاً وقد تم تجاوزه بالفعل. كانت حسابات إيبين مبسطة، وكان المقصود منها أن تكون دليلاً استرشادياً، لكن الفكرة الأساسية المتمثلة في أننا سنصل يوماً ما إلى أقصى ما يمكننا اكتشافه فيما يتعلق بالنجوم الفقيرة بالمعادن تكاد تكون مؤكّدة، ولا تبدو بعيدة جداً.

ثمة أمل حقيقي في أن نتمكن يوماً ما من العثور على أحد نجوم الجمهرة الثالثة الذي ما زال على قيد الحياة. وعلى الرغم من اعتقاد أن متوسط كتلة نجم الجمهرة الثالثة يتراوح بين عشرات ومئات المرات من كتلة الشمس، فإنه يتضح من عمليات المحاكاة أن هناك مجموعة من النجوم المنخفضة الكتلة قد تكوّنت في الوقت نفسه. كلما كان النجم أضخم، كان عمره أقصر، ولذا لن يظل موجوداً في كوننا الحالي سوى النجوم التي تبلغ كتلتها ٨٠٪ من كتلة الشمس أو أقل. إن اكتشاف هذه النجوم ليس بالأمر السهل، لكننا نعتقد أن هالة المجرة مكان جيد للبحث عنها؛ نظراً إلى وجود مستوى تلوث أقل ناجم عن النجوم الأصغر سناً، ومن المحتمل أن تكون نجوم الجمهرة الثالثة الأقدم قد خرجت من القرص وتجوّل في الهالة الآن. وبشكل عام، تعد خطوط امتصاص الحديد مؤشراً جيداً لإجمالي نسبة المعادن في أي نجم، وتسمى النجوم التي تحتوي على نسبة أقل من الحديد إلى الهيدروجين مقارنةً بالشمس بأنها «فقيرة في المعادن».

أحرز علم الآثار النجمي تقدُّماً ملحوظاً: فقد توصل العلماء إلى نسب معادن تبلغ ١ / ١٠٠٠٠٠٠ من وفرة الحديد في الشمس، ووصلوا إلى مرحلة عدم اكتشاف الحديد على الإطلاق. لقد كان البحث عن النجوم الفقيرة في المعادن أمراً صعباً، وزاد من تعقيده التلوث

المعدني واختلاط جماهر النجوم، ومن غير المرجح أن نحرز مزيداً من التقدم في اكتشاف نسب معادن أقل. ومع ذلك، لا تدع علم الآثار النجمي يخدعك، فهو ليس مجالاً ميتاً، بل مجال للموتى. فقد انتقل من البحث عن النجوم الأولى إلى التحدث مع نجوم الجيل الثاني وسماع حكايات أسلافها. ومع تطوير تقنيات أكثر لاختيار النجوم المرشحة الواعدة من بين مليارات الخيارات، نأمل في أن نزيد حجم عينتنا من النجوم الفقيرة في المعادن ونستخلص مزيداً من الاستنتاجات المهمة حول تنوع انفجارات المستعرات العظمى التي تسببت في حدوثها. وبهذه الطريقة، هناك أمل في أن نتمكن من عكس هندسة دوال الكتلة الأولية لنجوم الجوهرة الثالثة، أو على الأقل وضع قيود على دوال الكتلة الأولية الناتجة من عمليات المحاكاة. بغض النظر عن الجهود التي نبذلها في البحث عن القطع الأثرية المميزة، لا يمكننا أن نأمل في العثور على المزيد. فآلاف السنين من التعرية والتآكل كفيلة بأن تدمر معظم الأقمشة والمواد الغذائية والأدوات الخشبية. إذا كانت هناك مجموعة من النجوم المنخفضة الكتلة اليوم، فمن المحتمل أن تكون مغطاة بعوامل التلوث، ومخفية عن الأنظار، مما يثير تساؤلات حول ما إذا كان بإمكاننا تجاوز هذه العقبات وتحقيق مزيد من الاكتشافات.

ربما لم نتمكن من اكتشاف النجم الأول، ذلك النجم الخالي من المعادن، لكننا اكتشفنا ما نعتقد أنه من سلالاته الأولى، النجم الذي ربط بين مجموعات النجوم الخالية من المعادن والنجوم الفقيرة في المعادن. لا يعتبر ذلك إخفاقاً. فعلى الرغم من أننا جميعاً نود مقابلة الملك خوفو وسؤاله عن كيفية بناء الهرم الأكبر والمكان الذي دفنت فيه الكنوز، فأنا متأكدة من أننا سنكتفي بالردشة مع الملكة كليوباترا؛ وعلى الرغم من ذلك، فإن إحدى الحقائق المفضلة لدي عن مصر القديمة هي أننا أقرب زمنياً إلى كليوباترا مقارنةً بقرب كليوباترا الزمني إلى الأهرامات. إن مستقبل علم الآثار النجمي لم ينته بعد. لقد وجد للتو موطئ قدم له، ومع اكتشاف النجم SM0313-6708، ومع استمرار جهودنا الاستكشافية، لمنا بريقاً خافتاً من الذهب، أو دعونا نقول في هذه الحالة، من الحديد.

هوامش

* من المثير للاهتمام أن لهذه القصة صلة أيضاً بعلم الفلك. فقد عثر على شفرة حديدية موضوعة على فخذ توت عنخ آمون اليمنى. وقد أظهر التحليل الأخير أن الحديد مصدره أحد النيازك، على غرار عدد قليل من القطع الحديدية النادرة التي عُثر عليها في مصر القديمة.¹⁹

[†] في العلم، لا تعني العلاقة شخصًا مزعجًا تتعين عليك محادثته بأسلوب مهذب في كل عيد ميلاد، ولكنها ارتباط بين خاصيتين. على سبيل المثال، العلاقة بين الوقت الذي نقضيه مع الأقارب والضغط النفسي الذي نشعر به هي علاقة خطية ... أو ربما أسية. [‡] ربما تتساءل عما إذا كانت هذه العلاقة بين الزمن ومتوسط الطول علاقة خطية، أي هل سيكون البشر أطول خلال ١٠٠ عام أخرى؟ والجواب هو على الأرجح لا. فمتوسط الطول في الولايات المتحدة حاليًا مماثل إلى حد كبير لما كان عليه عام ١٩٩٦، وقد بدأنا نشهد ثباتًا في زيادة الطول في العقود الأخيرة، مما يشير إلى أننا وصلنا إلى حدودنا الجينية في الظروف البيئية التي نعيشها الآن. حتى الهولنديون تباطأ معدل زيادة أطوالهم، بعد أن زاد بسرعة مذهلة بمقدار ١٣ سم (٩ بوصات) خلال ١٠٠ عام ليصبحوا أطول البشر على وجه الأرض بمتوسط طول ١٨٣ سم (٦ أقدام!) ²⁰.

[§] من المثير للاهتمام أن أليز أصبح أستاذًا للفيزياء الفلكية على الرغم من أنه لم يكمل دراسته الثانوية مطلقًا. بدأ دراسته الثانوية بالفعل، لكن والده أخرجه من المدرسة وأرسله إلى معسكر للتنقيب عن الذهب. ²¹ لكنه تمكن من الفرار وذهب للتنقيب عن المعادن في النجوم بدلاً من ذلك.

^{||} كان كارنارفون قد ضاق ذرعًا من عدم الحصول على أي عائد من استثماراته مع كارتر وسحب تمويله قبل وقت قصير من الاكتشاف. لكن كارتر نجح في التماس الحصول على موسم آخر، وبعد أربعة أيام من الحفر عثر على أكبر اكتشاف أثري في التاريخ. وهذا يوضح أنه حتى المومياوات المفقودة يمكن العثور عليها في آخر مكان يمكن للمرء توقعه.

مراجع مفيدة

- Christlieb, N. et al. 2002. A Stellar Relic from the Early Milky Way. *Nature*, vol. 419, issue 6910: 904–906.
- Frebel, A. & Norris, J. 2015. Near-Field Cosmology with Extremely Metal-Poor Stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 53: 631–688.

الفصل الثامن

الالتهام المجري

على مسافة بعيدة جدًا، حوالي ٧٥ ألف سنة ضوئية على وجه الدقة، تقع مجموعة صغيرة من النجوم، تسمى «سيجواي ١». لم تُكتشف هذه المجموعة إلا في عام ٢٠٠٦. ومع ذلك، فقد أثارت الكثير من الجدل خلال العقد الماضي بسبب الادعاءات والدحوض المتكررة القائلة بأنها يمكن أن تكون المجرة الأقل تطورًا في كوننا. لم يكن الجدل في بداية الأمر حول مسألة عمرها على وجه الخصوص، بل في ادعاء أنها «مجرة». ومن ثمَّ، بدأت تساؤلات من قبيل: هل عثرنا على أحفورة قديمة، أم أنها في الحقيقة ليست مجرة على الإطلاق؟ أم تُراها مجرد مجموعة من النجوم الأصغر سنًا والأقل أهمية؟

أفضل مكان لمحاولة البحث عن إجابة هذا السؤال هو تعريف المجرة، لذلك دعونا نكشف عن معنى كلمة Galaxy (أي مجرة) في قاموس أوكسفورد للغة الإنجليزية الموثوق به، وإليك ترجمة التعريف باللغة العربية:

هيئة أو نظام أو خلافة يشبه درب التبانة؛ (في الاستخدامات اللاحقة) تشير هذه الكلمة تحديدًا إلى أيٍّ من الأنظمة العديدة، التي تتكون غالبًا من ملايين أو مليارات النجوم، والتي ترتبط معًا بقوى الجاذبية وتحتوي على مواد أخرى، مثل الغاز والغبار، تنتشر في جميع أنحاء الفضاء على هيئة أجرام منفصلة.

أزعم أن هذا التعريف ليس واضحًا بما فيه الكفاية، وعلى الرغم من أن عبارة «تحتوي على مواد أخرى» تشمل المادة المظلمة، فلا بد أن يُذكر ذلك صراحة؛ لأن المادة المظلمة هي سبب الحصول على لقب «مجرة». أدت هذه المشكلة بالعلماء إلى اقتراح تعريف جديد للمجرة في عام ٢٠١٢: «المجرة هي مجموعة من النجوم المقيدة بفعل الجاذبية، والتي لا يمكن تفسير خصائصها بمجموعة من الباريونات [المادة «العادية»] وقوانين نيوتن للجاذبية».¹

صدر البحث الذي يتضمن اكتشاف «سجواي ١» بعنوان «قطط وكلاب، شعر وبطل: خمسة رفاق جدد لمجرة درب التبانة»². وعلى الرغم من الإعلان عن وجود خمسة رفاق، لا يذكر العنوان إلا أربعة أجرام فقط، وهي: كوكبة السلوقيان الثانية (Canes Venatici II باللاتينية، وتعني «كلاب الصيد»)، وكوكبة الهلبة (Coma Berenices، وتعني «شعر برنيس»)، وكوكبة الأسد الرابعة (Leo IV، وتعني «أسد» أو «قط» في اللاتينية)، وكوكبة هرقل (البطل الشهير). ووفقًا لما هو متفق عليه، يُطلق على المجرات القزمة اسم الكوكبة التي نرصدها فيها، وبذلك تكون كوكبة الأسد الرابعة هي رابع مجرة قزمة مكتشفة في كوكبة الأسد. عند فحص «سجواي ١» لأول مرة، أدى حجمها الصغير للغاية إلى افتراض أنها عنقود كروي؛ أي مجموعة من النجوم المقيّدة بفعل الجاذبية داخل مجرة درب التبانة. تعدّ العناقيد الكروية أنظمة مقيّدة بفعل الجاذبية، ولكنها ليست كبيرة أو ضخمة بما يكفي لتسمى مجرات. سُميت العناقيد الكروية باسم المسح الذي عُثر عليها فيه، ومن ثَمَّ سُميت «سجواي ١»؛ لأنها كانت أول عنقود كروي يُعثر عليه في مسح سجواي. وبالمقارنة مع العثر على أربع مجرات جديدة قريبة من مجرة درب التبانة، لن يتصدر العثر على مجرد عنقود كروي عناوين الصحف. لكن «سجواي ١» لم تكن مجرد مجموعة من النجوم.

الكتلة المخفية

يمكنك قياس كتلة جسم مضيء مقيّد بفعل الجاذبية بطريقتين. تتعلق الطريقة الأولى بالكتلة المضيئة. ويتضمن ذلك حساب كمية الضوء الصادرة عن مجموعة من النجوم، ومعرفة مقدار الكتلة التي تحتاج إليها النجوم لإنتاج هذه الكمية من الضوء. أما الطريقة الثانية، وهي الأكثر شمولية، فهي تقيس الكتلة الإجمالية لأي شيء في هذه المجموعة النجمية قد تنتج عنه قوة جاذبية، ويشمل ذلك كل المواد، مضيئة أو مظلمة. ومن ثَمَّ، نستنتج هذه الكتلة الإجمالية من حركة النجوم داخل المجموعة. كان حجم «سجواي ١» الفعلي صغيرًا جدًا لدرجة أنها صُنفت بكل سهولة على أنها عنقود كروي. ولكن عندما فحص فريق ثانٍ من الباحثين الكتلة الإجمالية مقارنةً بكمية الضوء (كبدل عن الكتلة المضيئة)، وجدوا أن نسبة الكتلة إلى الضوء تبلغ ١٣٤٠³ وحُدث لاحقًا إلى ٣٤٠٠⁴. في حالة العناقيد الكروية، تكون نسبة الكتلة إلى الضوء صغيرة، حوالي اثنين أو ثلاثة، حيث تختلف بذلك عن النسبة واحد بسبب بقايا النجوم الميتة غير المضيئة. ولا تحتوي

العناقيد الكروية على مادة مظلمة. ومن هنا تحولت «سجواي ١» من مجرد مجموعة من النجوم غير المثيرة للاهتمام، إلى ما نعتبره الآن أشهر مجرة تحتوي على أعلى نسبة من المادة المظلمة. ويعد هذا اكتشافاً مثيراً للغاية لسببين. السبب الأول هو أن المادة المظلمة مشهورة بأنها كيان يصعب تعقبه أو تقييده. ونستدل على وجودها من خلال الأدلة الحركية التي توفرها منحنيات الدوران وقياسات الكتلة الخاصة بالمجرة. ومع ذلك، تعذر علينا تحديد خصائصها من خلال تفاعلات جسيماتها. وقد أثار العثور على ما يبدو أنه أعلى تركيز للمادة المظلمة اكتشافه على الإطلاق حماس علماء فيزياء الجسيمات، لا سيما أنه كان في محيطنا الكوني. السبب الثاني الذي يجعل تعريف «سجواي ١» على أنها مجرة مثيراً للغاية هو حجمها الصغير. الصغير جداً. وهذا أمر مثير للاهتمام لأن الطريقة الوحيدة التي تجعل حجم المجرة كبيراً هي التهام مجرة أخرى. تلتهم المجرات بعضها بعضاً، وبذلك ننتقل بمرور الزمن الكوني من كون مليء بالكثير من المجرات الصغيرة إلى كون به مجرات أكبر بكثير. وإذا عثرنا على مجرة صغيرة، فربما نكون قد وجدنا ناجياً، أو كسرة قديمة لفظتها مجرة درب التبانة الجائعة. هذا يعني أننا عثرنا على واحدة من المجرات الأولى، وداخل هذه المجرة الأولى القديمة قد نجد نجماً أول يتجول هنا أو هناك.

المجرات القزمة

إن «سجواي ١» ليست المجرة القزمة الوحيدة الموجودة بالقرب من مجرتنا. فمجرة درب التبانة جزء من مجموعة مجرات تسمى المجموعة المحلية، تمتد حوالي ١٠ ملايين سنة ضوئية. تتميز المجرات بأشكال وأحجام مختلفة، ولذا يمكننا تقسيمها إلى مجموعات مورفولوجية متعددة. على سبيل المثال، هناك مجرات حلزونية، وإهليلجية، وحلزونية ضلعية، ومجرات غير منتظمة الشكل. فالمجموعة المحلية أشبه بـ «حديقة من المجرات»، حيث تحتوي على عدد لا بأس به من الأنواع المختلفة. أكبر ثلاث مجرات هي بالترتيب: أندروميда، ودرب التبانة، ومجرة المثلث، وهي أيضاً المجرات الحلزونية الوحيدة في المجموعة المحلية. ربما تكون قد سمعت عن سحابة ماجلان الكبرى وسحابة ماجلان الصغرى، اللتين تحتلان المركز الرابع والسادس من حيث الحجم في المجموعة المحلية، ولكن بصرف النظر عنهما، من غير المحتمل أن تكون قد صادفت المجرات الأخرى. من الصعب تحديد متى تكون المجرة صغيرة بما يكفي لوصفها بأنها «قزمة»، تماماً كما هو الحال عند وصف شخص ما بأنه «قصير القامة» حيث لا يوجد تعريف دقيق لهذا الأمر. قد نذهب

على الفور إلى أنه يمكننا وصف أي شخص أقصر من متوسط الطول المتعارف عليه بأنه قصير القامة، وأي شخص أطول من ذلك بأنه طويل القامة. لا يمكننا بالتأكيد تطبيق ذلك على مجرتنا؛ لأن المجرات القزمة هي في الواقع أكثر المجرات عدداً في الكون، ومن ثم فإن التسمية غير عادلة بعض الشيء. حريٌّ بنا في واقع الأمر أن نطلق على المجرات القزمة اسم «المجرات»، بينما نطلق على المجرات الكبيرة مثل مجرة درب التبانة اسم «المجرات الضخمة» أو ما شابه ذلك، ولكن مَنْ أنا حتى أناقش أمراً كهذا. على أي حال، عادةً ما تحتوي المجرات القزمة على بضعة مليارات من النجوم كحد أقصى، مقارنةً بمئات المليارات من النجوم الموجودة في درب التبانة، ولذا فهي أصغر حجماً بكثير وأقل سطوعاً. تنقسم المجرات القزمة إلى عدة أشكال متنوعة، تماماً مثل المجرات. فكلٌّ من سحابة ماجلان الكبرى وسحابة ماجلان الصغرى مجرتان قزمتان غير منتظمَتين، حيث إنهما غير منتظمَتَي الشكل، ولا تندرجان ضمن أنواع المجرات الإهليلجية أو الكروية أو الحلزونية. وهما مجرتان يافعتان، وتحتويان على الكثير من الغاز الذي يغذي عملية تكوين النجوم المستمرة. وفي المقابل نجد أن المجرات الكروية القزمة فقيرة بالغاز وكبيرة في السن، في حين أن المجرات الإهليلجية حالة وسط بين الاثنتين حيث تتميز بشكل كروي مستطيل مع وجود بعض الغاز المتبقي لتكوين النجوم. بالإضافة إلى ذلك، رُصدت مجرات قزمة حلزونية الشكل، لكنها نادرة حسبما يُعتَقَد. فهي تضطرب بسهولة بسبب تفاعلات الدفع والجذب (قوة الجاذبية التي تتأثر بها عند الدوران حول جسم ضخم) مع المجرات الأخرى، حيث تضطرب الأذرع الحلزونية بسرعة أو تتبدد، مما يؤدي إلى تغيير شكل المجرة إلى مجرة غير منتظمة أو إهليلجية.* ويُعتَقَد أن سحابة ماجلان الكبرى مثال على ذلك، حيث تتكوّن من ذراع حلزونية واحدة فقط، بعد تفاعلات الدفع والجذب مع سحابة ماجلان الصغرى ودرب التبانة.

أهم المجرات القزمة المثيرة لاهتمامنا هي المجرات الكروية القزمة، والمجرات القزمة الفائقة الخفوت التي تُعد أقل المجرات القزمة سطوعاً على الإطلاق. على الرغم من أن المجرات الكروية القزمة فقيرة في الغاز، فإنها تتسم بدرجة كبيرة من السطوع؛ بحد أقصى حوالي ٢٠ مليون مرة من درجة سطوع الشمس وحد أدنى بضعة آلاف فقط. في المقابل تتسم أندروميديا بدرجة سطوع تُقدَّر بـ ١٠ مليارات مرة من درجة سطوع الشمس. تكشف عمليات رصد المجرات الكروية القزمة أن مخزونها من الغاز لم يستمر لفترة كافية لتكوين العديد من النجوم الغنية بالمعادن التي نراها تتشكل اليوم. يمكننا

إلقاء نظرة على هذه المجرات القزمة ودراسة النجوم بالطريقة نفسها التي ندرس بها النجوم في الهالة النجمية في علم الآثار النجمي. فكلما قلَّت درجة سطوع المجرة الكروية القزمة التي ندرسها، قلَّت معدنية النجوم بداخلها. ويعد البحث عن المجرات القزمة الأقل سطوعاً طريقة مركّزة للبحث عن النجوم الأقل معدنية، ويتميز مجال علم آثار المجرات القزمة بأجواء يخالطها قدر كبير من التفاؤل والإثارة. يمثل علم الآثار النجمي وعلم آثار المجرات القزمة نهجَيْن متكاملَيْن. فعلماء آثار النجوم ينقبون عن القطع الأثرية المهملة، ويبحثون في عليّة درب التبانة. في المقابل، يبحث علماء آثار المجرات القزمة عن بيئات غير مضطربة. ويقدم كلاهما أنواعاً مختلفة من المعلومات، ويعملان معاً لحل لغز النجوم الأولى. تتمتع المجرات القزمة بالمقومات التي يمكن أن تجعل منها أقدم مثال للمجرات في كوننا. ولذلك، إذا تمكّنا من العثور على مجرة قزمة تُركت وشأنها حتى نفذ غازها — ومن ثمّ لم تسنح الفرصة لتطور ما تحتويه من نجوم — يكون قد توفرت لدينا بيئة نقية لتكوّن نجوم الجوهرة الثالثة.

الالتهام المجرى

تشكّلت الهياكل في عالمنا في نسقٍ هرمي. في البداية، اندمجت الهياكل الأصغر، التي تحتوي على عدد قليل من النجوم، في مجموعات أكبر، أو مجرات صغيرة. واندمجت هذه المجرات الصغيرة لتشكّل مجرات أكبر، وهكذا حتى أصبح لدينا مجرات بحجم درب التبانة. يمكننا أن نستدل على هذا التكوين الهرمي للمجرات، أو التهام المجرات بعضها بعضاً، من خلال رصد اندماج المجرات الذي يحدث أمام أعيننا. هناك مثالان على عمليات اندماج المجرات المستمرة في صورتين ١٩ و ٢٠ في ملحق الصور بنهاية الكتاب. تعتبر مجرتا الفئران ومجرتا الهوائيات مثالَيْن على اصطدام مجرتين حلزونيّتين وتمزقهما بفعل قوى الجاذبية، مما أدى إلى ظهور ذيل طويل لمجرتي الفئران وقرون استشعار لمجرتي الهوائيات. عندما تصطدم مجرتان، تختلط النجوم كلها في الداخل. في بعض الأحيان، يسقط نجم جديد في المجرة المدمجة الجديدة، وفي أحيان أخرى يؤدي فقدان الغاز إلى حدوث حالة من الهدوء لفترة.

عندما تندمج مجرتان حلزونيّتان، تتعرضان إلى اضطراب كبير لدرجة أنهما تفقدان شكل الذراع الحلزوني وتتحولان إلى مجرة إهليلجية. ومن المرجح أن هذا ما سيحدث لمجرة درب التبانة عندما تصطدم بها مجرة أندروميدا في غضون ٤,٥ مليارات سنة

تقريبًا (وبالمناسبة، هذا أيضًا هو الوقت الذي ستنتهي فيه الشمس، ولذا سيكون وقتًا عصيبًا للبشرية جمعاء). إذن المجرات القزمة هي اللبنات الأساسية لموقع بناء المجرات، حيث تندمج وتتحطم ويتراكم بعضها فوق بعض حتى لا يكون الجسم الناتج قزمًا بل مجرة حقيقية. على الرغم من أهمية الالتهام المجري في تفسير الهياكل التي نراها اليوم، لم يتخلل ذلك اصطدام آلاف المجرات القزمة في كل اتجاه. في عمليات محاكاة تشكيل الهيكل الهرمي لمجرة من نوع درب التبانة، ساهمت ثلاث مجرات فقط من المجرات القزمة الكبيرة في تكوين المناطق الداخلية للمجرة. كانت مناطق الهالة الخارجية، حيث يُحتَمَل وجود تراكم أقلّ عنفًا للمجرات القزمة العابرة، تحتوي على ثمانية أسلاف من النجوم ذات كتلة أقل⁵. يمكننا أن نستدل على حدوث اندماج حقيقي مع مجرة درب التبانة بالهيكل المتعرج الذي يسمى «تيار الرامي». ينشأ تيار الرامي بسبب تعرض مجرة الرامي الكروية القزمة إلى اضطراب مطوّل، تاركًا النجوم التي كانت تشكلها يومًا ما ملفوفة حول درب التبانة في شكل شريط. فمجرة درب التبانة لا تتعامل بلطفٍ مع المجرة القزمة التي تتجول على مقربة منها.

تعريف المجرة القزمة

نظرًا إلى عملية الالتهام المجري، من المرجح أن تكون المجرات القزمة كبيرة في السن، ويمكن أن تكون بقايا اللبنات الأساسية الأولى لتكوين المجرات الهرمي، إذا تمكّنا من العثور عليها. لا يزال الكثير من المجرات القزمة مجراتٍ بالمعنى الصريح للكلمة مقارنةً بالعناقيد الكروية، وذلك على الرغم من صغر حجمها مقارنةً بمجراتٍ مثل مجرتنا. في البداية، كان من السهل التمييز بين العناقيد الكروية والمجرات. إذ كانت الأولى صغيرة ومعتمة، بينما كانت الأخيرة أكثر سطوعًا وأكبر حجمًا. وكان من الممكن التمييز بين المجموعتين عند تمثيلهما على رسم بياني يوضح درجة سطوع كل منهما مقابل حجميهما. ومع تطوّر تلسكوباتنا وتمكّنها من رصد المجرات القزمة الفائقة الخفوت، تداخلت المجموعتان، ومن ثمّ أصبح من الصعب معرفة ما إذا كان الهيكل عبارة عن عنقود كروي أو مجرة قزمة بناءً على الحجم والسطوع فقط.

لتحديد ما إذا كان الهيكل مجرة قزمة أم لا، علينا أن نبحث عن أمرين. أولاً، علينا أن نقيس سرعات النجوم. فعند الدوران حول كتلة مركزية، يتناسب نطاق السرعات التي تتحرك بها النجوم مع كمية الكتلة في المجرة، سواء للمادة الباريونية العادية أو

المادة المظلمة. ومن خلال تتبع سرعات النجوم، يمكننا تقدير كتلة المجرة. كما يمكننا تقدير كتلة المجرة عن طريق قياس كتلتها المضيئة. وبهذه الطريقة، نتوصل إلى تقديرين للكتلة: تقدير ديناميكي أو حركي، وتقدير باريوني. ولكي تكون المجرة مجرة قزمة، يجب أن تكون الكتلة الديناميكية أكبر بكثير من التقدير الباريوني، وهو ما نستدل منه على وجود مادة مظلمة. فالفارق في تقديرات الكتلة هو أول علامة مميزة للمجرة القزمة. ويعتبر فرق قيم نسبة المعادن في النجوم ثاني علامة مميزة. فعند انفجار نجم، يمكن أن تطرد المعادن خارج نظام صغير مثل العنقود الكروي إذا كانت جميع قوى جاذبية النظام صغيرة بما فيه الكفاية. وفي حالة المجرات القزمة، يضمن المكون الإضافي لهالة المادة المظلمة الحفاظ على بعض المواد المنبثقة من انفجار المستعر الأعظم أو جميعها لاستخدامها في الأجيال اللاحقة من النجوم. وهذا يجعل تلك الأجيال الجديدة أكثر تنوعاً من حيث نسبة المعادن مقارنةً بأسلافها، ويخلق نطاقاً من قيم المعادن أكبر من تلك الموجودة في العناقيد الكروية.

المجرات الأولى

قد تكون لدينا الآن طرق للتمييز بين مجرة صغيرة وعنقود كروي، لكن هل يعني هذا أننا وجدنا مجرة أولى وليس مجرد نسخة أحدث منها؟ يُعرّف النجم الأول ببساطة بأنه نجم تشكّل من غاز أولي، ومن ثَمَّ فهو خالٍ من المعادن. لكن لطالما كان من الصعب تحديد ماهية المجرة الأولى. ففي نهاية الأمر، يمكن لنظام ثنائي من نجوم الجوهرة الثالثة في هالة المادة المظلمة أن يشكّل مجرة إذا استخدمنا تعريفاً موسعاً للمجرة بوصفها نظاماً نجمياً مقيّداً بفعل الجاذبية داخل هالة من المادة المظلمة. لكن المشكلة في تسمية هذا السيناريو بالمجرة هي أنه سريع الزوال. فبمجرد أن تموت النجوم وتتحول إلى مستعر أعظم، تصغر «المجرة» وتصبح هالة المادة المظلمة لا قيمة لها، لدرجة أن رياح المستعر الأعظم تبدأ في طرد أي غاز كان موجوداً حولها، ويصبح تكوّن مزيد من النجوم أمراً مستبعداً. فمن أهم خصائص المجرة أن تكون قادرة على البقاء كمجرة لبعض الوقت. ولكي تُسمى المجرة «مجرة»، عليها الحفاظ على الأجيال اللاحقة من النجوم،⁶ ولا تكفي الهالات الصغيرة الأولى التي تحتوي على حفنة من النجوم لاستيفاء هذا الشرط.

يقودنا النموذج الكوني نحو تصوّر أن الهيكل الكبير يتكوّن نتيجة تراكم الهياكل الأصغر واندماجها، ومن ثَمَّ نعتقد أنه كان هناك انتشار سريع للهياكل الصغيرة في بداية

الكون. فهذه الهالات الصغيرة كانت تسمى هالات مصغرة، وكانت كتلتها تُقدَّر بحوالي مليون مرة كتلة الشمس. داخل الهالات المصغرة، انقسمت سحب الغاز الأولى المحظوظة مكوّنة النجوم الأولى، كما هو موضح في الفصل السادس. وفي بداية الكون، عندما كان معدل عمليات الاندماج مرتفعاً، كانت الهالات المصغرة يجذب بعضها إلى بعض بفعل الجاذبية، وتندمج لتكوّن هالاتٍ أكبر. وفي غضون ذلك، كانت النجوم الأولى تعيش حياتها القصيرة وتنثر المعادن في البيئة المحيطة عند موتها. عندما اندمج ما يقرب من ١٠ هالات مصغرة،⁷ نتجت لدينا مجموعة من الغازات الغنية بالمعادن وربما بعض من بقايا نجوم الجوهرة الثالثة، ذلك كله ضمن هالة أكبر بكثير من المادة المظلمة. وعندئذٍ، تحولت الهالات المصغرة إلى هيكل أكثر استقراراً يُسمى «هالة التبريد الذري».

كانت وسيلة التبريد الوحيدة المتاحة للغاز الأولي هي الهيدروجين الجزيئي. إذ تتحد نرتا هيدروجين لتكوين جزيء واحد، وفي هذه العملية تنطلق طاقة على شكل فوتون يمكن أن ينتقل بعيداً عن النظام، مما يؤدي إلى تبريد الغاز بشكل عام. ويؤدي ذلك إلى بدء عملية الانقسام أو التفكك وتكوّن النجوم الأولى. أما في حالة الغاز الغني بالمعادن، فهناك المزيد من وسائل التبريد المتاحة. فقد أدى اندماج كل هذه الهالات المصغرة إلى زيادة درجة حرارة البيئة المحيطة، مما أتاح لذرات الهيدروجين المفردة المساهمة في عملية التبريد؛ ومن هنا جاءت تسمية هذه الأنظمة النجمية المدمجة بهالات التبريد الذري. تعتبر هالات التبريد الذري هي المجرات الأولى في الكون؛ لأنها كانت كبيرة بما يكفي لتحمل التأثيرات البيئية العنيفة الناتجة عن موت النجوم. ومع وجود المعادن، يمكن للغاز أن يبرد ويتفكك إلى نطاقاتٍ أصغر بكثير، بحجم شمسنا. وفي غضون ١٠ ملايين إلى ١٠٠ مليون سنة من انفجار المستعر الأعظم من نجوم الجوهرة الثالثة،⁸ استقر الغاز المعدني الساخن مجدداً وتفكك مشكلاً الجيل الثاني من النجوم. أظهرت عمليات المحاكاة أن المجموعة الأولى من المستعرات العظمى قد نثرت بذور المعادن في محيطها بكفاءة عالية لدرجة أن الجيل الثاني قد صُنّف بالفعل ضمن الجوهرة الثانية.⁹ ويُعتقد أن نجوم الجوهرة الثالثة وحدها قد هيمنت على المجرات لمدة تتراوح بين ٢٠ و ٢٠٠ مليون سنة، قبل أن تصبح نجوم الجوهرة الثانية هي المهيمنة بعد الانفجار العظيم بحوالي ٤٠٠ مليون سنة فقط.¹⁰ وبناءً عليه، من غير المرجح أن تكون هناك مجرة أولى تتكون بأكملها من النجوم الأولى. بدلاً من ذلك، عاشت النجوم الأولى في هالات صغيرة، قبل أن تتجمع معاً لتشكّل المجرات القزمة الأولى. وسرعان ما أصبحت هذه المجرات غنية بالمعادن وتضمّنت عدداً كبيراً من نجوم الجوهرة الثانية. واستمرت في تكوين النجوم وتراكم المجرات القزمة

الأخرى، حتى زاد حجمها، وتحولت إلى المجرات العملاقة التي نراها حولنا اليوم. ومع ذلك، لم تتعرض جميع المجرات القزمة لمثل هذا المصير. فالتقديرات تشير إلى أن ما يقرب من ٥٪ إلى ١٥٪ من المجرات الصغيرة الأولى في محيط مجرتنا لا تزال سليمة وكأنها مجرات أحفورية تحيط بمجرة درب التبانة.¹¹

كيمياء المجرة القزمة

تصدر «سجواي ١» قائمة أفضل المجرات المرشحة لدينا لتكون مجرة أحفورية أولى. وعلى الرغم من أن حجمها أحد المؤشرات التي استندنا إليها في ذلك، فهو ليس بالمؤشر الحاسم. فالواقع أن الدليل القاطع حقًا يكمن في الكيمياء النجمية. يمكن لعلماء آثار النجوم الاستعانة بالتقنيات نفسها التي يستخدمونها في مجرتنا لدراسة النجوم في المجرات القزمة، من أجل البحث عن تلك النجوم الفقيرة في المعادن. ويمثل هذا تحديًا لأن المجرات القزمة بعيدة جدًا مقارنة بالنجوم التي ندرسها في مجرتنا. وهذا يعني أن علينا اختيار النجوم الأكثر سطوعًا فحسب من أجل التحليل الطيفي النجمي. في «سجواي ١»، على سبيل المثال، لا يمكننا إجراء تحليل طيفي عالي الدقة إلا لسبعة نجوم فقط، من بين نجومها المحددة البالغ عددها ٧١ نجمًا، وهذه النجوم السبعة هي النجوم العملاقة الحمراء الساطعة.¹² ومن بين هذه النجوم، يحتوي ثلاثة من أصل سبعة على نسبة حديد أقل من ١ / ١٠٠٠ من تلك الموجودة في الشمس، مما يجعلها نجومًا فقيرة للغاية في المعادن، ويجعل «سجواي ١» أقل مجرة معروفة من حيث التطور الكيميائي.¹³ وعلى الرغم من اكتشاف نجوم في مجرة درب التبانة تفتقر إلى الحديد بنسب أكبر، كان البحث عنها شاقًا نظرًا إلى ندرتها. أما في «سجواي ١»، يبدو أن نسبة كبيرة من النظام النجمي بأكمله فقيرة في المعادن.

إن نقص الحديد ليس المؤشر الوحيد للنظام الفقير في المعادن. فقد أظهرت جميع نجوم «سجواي ١» وفرة معززة في عملية ألفا. وعملية ألفا هي إحدى الطرق التي تحول النجوم من خلالها الهيليوم إلى عناصر أثقل، عن طريق دمج نوى الهيليوم على التوالي. يُطلق على نواة الهيليوم اسم جسيم ألفا، ويرجع أصل هذه التسمية إلى عالم الفيزياء النووية البريطاني إرنست رذرفورد، حين ميّز لأول مرة بين نوعين من الجسيمات المشعة: جسيم ألفا (نواة الهيليوم التي تتكون من بروتونين ونيوترونين) وجسيم بيتا (بوزيترون أو إلكترون). والأكسجين والنيون والمغنيسيوم والسيليكون كلها عناصر عملية

ألفا، أو عناصر ألفا، لأنها تكوَّنت جميعاً في عملية ألفا هذه ونظائرها الأكثر استقراراً هي مضاعفات نواة الهيليوم (يتكوَّن الأكسجين من أربعة ألفا، والنيون من خمسة ألفا). أنتجت النجوم الأولى الضخمة الكثير من عناصر ألفا، وعند موتها أعادت المعادن إلى الوسط بين النجمي لاستخدامها في الجيل التالي من تكوُّن النجوم. ومع مرور الوقت في المجرة، سيصبح الوسط بين النجمي غنياً بالمعادن المنتجة داخل النجوم والمستعرات العظمى. في البداية، كانت هذه المستعرات العظمى ذات نوع محدد: إما مستعر أعظم منهار النواة وإما مستعر أعظم غير مستقر الأزواج. ولكن في نهاية المطاف، بعد ١٠٠ مليون سنة أو نحو ذلك، تطوَّرت نجوم سليمة التكوين لإنتاج مستعر أعظم من النوع Ia (انفجار قزم أبيض مكوَّن من نوى الأكسجين والكربون). تنتج هذه المستعرات العظمى الحديد، ومن ثمَّ بعد أن تصبح نجومًا في حالتها النهائية الواضحة، ترتفع مستويات الحديد في المجرة على نحو ملحوظ. وكما هو الحال مع معظم الأشياء في علم الآثار النجمي، فإننا نجري مقارناتنا مع الحديد. كانت نسبة عناصر ألفا إلى الحديد عالية جدًا في حالة النجوم الأولى والجيل التالي من سلالتها ذات المعدنية المنخفضة، حيث تكون كمية عناصر ألفا كبيرة ولكن مستوى الحديد منخفض. وأظهرت النجوم اللاحقة، بعد أن ساهمت المستعرات العظمى من النوع Ia بالحديد، نسباً أقل بكثير من حديد ألفا. ومن ثمَّ، اعتدنا في معظم المجرات، سواء كانت قزمة أو غير قزمة، على ملاحظة ثبات في قيمة نسبة حديد ألفا في النجوم الأكبر سنًا، ذات المعدنية الأقل، ثم انخفاض في نسبة حديد ألفا في النجوم الأصغر سنًا، ذات المعدنية الأعلى. ولكننا لا نرى في «سجواي ١» هذا الانخفاض على الإطلاق. يشير هذا إلى أن النوع الأحدث من المستعرات العظمى، وهو المستعرات العظمى من النوع Ia، لم يسهم أبدًا بشكل كبير في المجرة ... حيث توقفت عملية تكوُّن النجوم فجأة.¹⁴ ويشير هذا النمط الكيميائي إلى أن «سجواي ١» هي في الحقيقة مجرة أحفورية. إنها مجرة أولى لم تشهد تطوراً أبداً فيما يتعلق بتكوُّن النجوم، بل شهدت تكوُّن بضعة أجيال من النجوم فقط. ومن المحتمل أن «سجواي ١» لم تنتج إلا نجومًا ذات ١٥٠٠ كتلة شمسية على مدى حياتها، وهو رقم ضئيل حتى على مقاييس المجرات القزمة.¹⁵ ثمة أداة تشخيصية أخرى يمكننا استخدامها، وهي عناصر التقاط النيوترونات. تتكون هذه العناصر الثقيلة نتيجة اندماج النيوترونات مع نوى معادن، مثل الحديد. ويُعتقد أن عناصر التقاط النيوترونات هذه قد تشكلت خلال عمليات حدثت بعد فترة طويلة من عصر النجوم الأولى. على سبيل المثال، تعد عمليات اندماج النجوم النيوترونية

أحد مواقع الإنتاج المقترحة لهذه العناصر، بينما في الأعمار القصيرة للنجوم الأولى، لم يكن هناك وقت لأن تتشكل نجوم نيوترونية. يوجد موقع إنتاج آخر في آخر ١٪ من عمر نجم متوسط الكتلة؛ إذ يتحول حينها إلى ما يسمى بنجم في مرحلة العملاق المقارب. تحتوي هذه النجوم على نوى خاملة من الأكسجين والكربون محاطة بالهيليوم والهيدروجين، ولن تنشأ إلا بعد نحو مليار سنة من ظهور النجوم الأولى؛ لأن النجوم المتوسطة الكتلة تستغرق كل هذا الوقت لاجتياز المراحل المختلفة لدورة حياتها واستنفاد وقودها وصولاً إلى مرحلة فناء النجم وموته. تشير وفرة عناصر التقاط النيوترونات في المجرة إلى كمّ العمليات التي حدثت في مرحلة متأخرة من عمر المجرة والتي ساهمت في إنتاج هذه العناصر وتوزيعها داخل المجرة.¹⁶ وتشير قلة عناصر التقاط النيوترونات في «سجواي ١» إلى حدوث عملية واحدة على الأكثر لإنتاج عناصر التقاط النيوترونات،¹⁷ مع ندرة النجوم المتوسطة الكتلة التي من شأنها أن تطلق هذه العناصر عند بلوغها مرحلة العملاق المقارب، وغياب عمليات اندماج النجوم النيوترونية المسؤولة عن إطلاق هذه العناصر الثقيلة في الغاز. في المقابل، يبدو أن النجوم الموجودة في «سجواي ١» قد تشكّلت من غاز لم يتعرض لأي من هذه العمليات ... مما يدل على أن تكوّن النجوم قد توقف بسرعة، كما هو الحال مع عناصر ألفا.

وعليه، فإن النجوم التي يمكننا رصدها في «سجواي ١» ستكون النجوم الأقل كتلة التي عاشت أعماراً طويلة. على الرغم من أن «سجواي ١» تشكلت على الأرجح من مجموعة نجوم متنوعة الكتلة، فقد عاشت النجوم الأعلى كتلة حياة قصيرة ولم تعد بقاياها مرئية لنا. ولا تمثل النجوم الحالية سوى الطرف الأدنى في نطاق الكتلة، أو دالة الكتلة الأولية. وبما أن لدينا فكرة عن مختلف دوال الكتلة الأولية المحتملة، يمكننا استنتاج وجود نجوم سابقة عالية الكتلة. عندما ماتت النجوم الأعلى كتلة، نثرت المعادن في الغاز — ما يتراوح بين ٤٥ و ٩٠٠ كتلة شمسية من المعادن، بناءً على نموذج دالة الكتلة الأولية الذي تستخدمه.¹⁸ في المقابل، لم تتجاوز الكمية المقاسة للمعادن الثقيلة في «سجواي ١» قيمة ٠,٠١ كتلة شمسية فقط، ومن ثمّ يمكننا استنتاج أن الغالبية العظمى من الغاز الغني بالمعادن قد طُردت خارج المجرة بفعل الرياح المنبعثة من انفجارات المستعرات العظمى التي تسببت في تكوّن هذا الغاز. ويشير عدم العثور على أي من هذه المعادن المطروحة خارج المجرة في نجوم «سجواي ١» الناجية إلى حقيقة أن عملية تكوّن النجوم قد توقفت بسرعة كبيرة، ربما حتى بعد ظهور أحد المستعرات العظمى الأولى. حيث تحوّل أحد النجوم الأولى إلى مستعر أعظم، مما أدى إلى طرد غاز المجرة، تاركاً «سجواي ١» من

دون المواد الخام اللازمة لتكوين أي نجوم جديدة. ومن ثَمَّ، تُركت النجوم ذات المعدنية المنخفضة التي كانت قد تشكلت بالفعل في مجرة صغيرة بمفردها، حيث لم يطرأ عليها أي تغيير للميَّارات السنين.

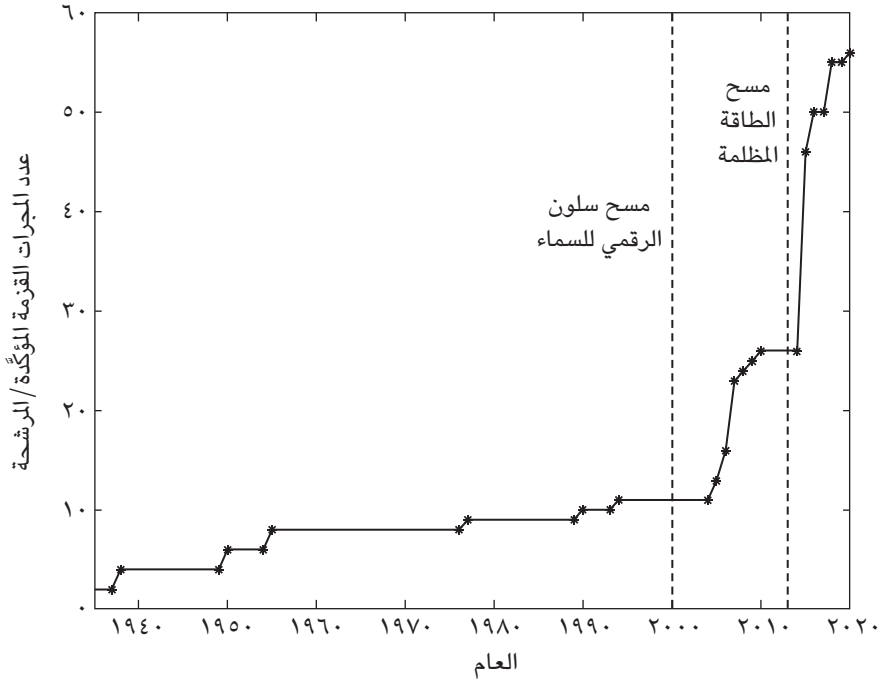
إنَّ المكونات الكيميائية الفريدة لنجوم المجرات القزمة، وتحديدًا نسبة عناصر ألفا العالية، وندرة عناصر التقاط النيوترونات، وانخفاض نسبة المعادن الإجمالية، توفر لنا أداة تشخيصية مثيرة للاهتمام. وإذا عثرنا على نجوم تتبع نمطًا كيميائيًا مشابهًا داخل هالة درب التبانة، فحينها قد نستنتج أن أصلها كان في مجرة أحفورية تشبه كثيرًا «سجواي ١». يتضح من مقارنة نجوم المجرات القزمة ونجوم هالة درب التبانة أن ما يصل إلى نصف النجوم المفتقرة إلى المعادن في هالة المجرة يمكن أن تكون قد تشكلت في مجرات مثل «سجواي ١» مع وجود نقص في عدد عناصر التقاط النيوترونات. وإذا افترضنا أن قلة عناصر التقاط النيوترونات من الممكن أن يكون مؤشرًا على كبر العمر، فيمكننا استخدام هذا المؤشر للبحث عن النجوم القديمة ضمن فهارسنا الفلكية. وفي الأوضاع المثلى، سيشير العثور على نجوم لا تحتوي إطلاقًا على عناصر التقاط النيوترونات إلى أحد النجوم الأولى. ومع ذلك، لم يعثر حتى الآن على نجم لا يحتوي إطلاقًا على عناصر التقاط النيوترونات.¹⁹ ولا يزال البحث مستمرًا.

علم آثار المجرات القزمة

هناك طريقة لتحديد أصغر المجرات الأحفورية، التي تشتهر بأنها من أقل المجرات تطورًا من الناحية الكيميائية. يبدو أنها الهدف المثالي للبحث عن نجم خالٍ من المعادن، وقد بدأ هذا البحث في مجرتنا باستخدام علم الآثار النجمي. ومع أن مجرة درب التبانة تبدو بشكل عام مكانًا آمنًا للعيش فيه، توجد أدلة على أنها قد مرت ببعض عمليات الاندماج العابرة، مما أدى إلى اضطراب هالتها واختلاط نجوم من مراحل سابقة لدرب التبانة مع تلك النجوم التي ساهمت بها المجرات القزمة العابرة. يعتبر هذا أحد الأسباب التي تجعل البحث عن نجوم خالية من المعادن في درب التبانة يمثل تحديًا؛ فنحن لا نبحث في بيئة نقية، ولكن فيما يشبه عليّة مرتبة مليئة بمختلف الأدوات التي عفى عليها الزمن. شرعت مجموعة من الباحثين في حساب احتمالات العثور على نجم من الجبهة الثالثة في عدة مواقع مختلفة.²⁰ وعملوا على محاكاة الكثير من المجرات المختلفة، من جميع أنواع الكتل، بدءًا من مجرة درب التبانة إلى أصغر المجرات مثل «سجواي ١». وبعد ذلك، أحصوا في

كل مجرة جرت محاكاتها عددٌ نجوم الجمهرة الثالثة التي تشكَّلت، ثم حسبوا النسبة المئوية التي يمثلها هذا العدد من إجمالي عدد النجوم (انظر صورة ٦ في ملحق الصور). كل دائرة في هذا الشكل هي محاكاة لإحدى المجرات، ويمثل لونها نسبة نجوم الجمهرة الثالثة المتبقية. أما الدوائر البيضاء الفارغة، فهي محاكاة لمجراتٍ لم يتشكل فيها أيُّ من نجوم الجمهرة الثالثة، أو لم يعد أي منها موجودًا في زمن المحاكاة الحالية. تشير الخطوط العمودية إلى كتلة كل مجرة، بما يتوافق مع المحور الأفقي العلوي، حيث تزداد الكتلة كلما اتجهنا يمينًا. نلاحظ أن نسبة النجوم المتبقية من الجمهرة الثالثة تزيد كلما قلَّت كتلة المجرة المعنية. ولا يتحقق ذلك إلا في موضع معين، عند تجاوزه لا يُعثر على أي نجوم ناجية على الإطلاق. يتضح من هذا الشكل أنه عند تجاوز الحد الأدنى لكتلة معينة، قد تكون المجرات القزمة هي المكان المثالي للبحث عن النجوم الخالية من المعادن، ولكن هناك عاملًا آخر يجب أخذه في الاعتبار، وهو: إمكانية الرصد. في الظروف المثالية، سنوجه أنظارنا نحو المجرة ونقيس طيف كل نجم على حدة، ونفصل الخالي من المعادن عن الغني بالمعادن. لكن هناك مشكلتين في هذا النهج. أولًا، لا يتوفر لدينا كل هذا الوقت لرصد النجوم بالتلسكوب. إذ يستغرق الأمر عدة ساعات للحصول على المعلومات الطيفية التي نحتاج إليها من كل نجم، وهذا ليس خيارًا في المجرات التي تحتوي على مليارات النجوم. ثانيًا، في المجرات القزمة، تكون النجوم بعيدة جدًا وباهتة بحيث لا يمكننا رصد سوى ألمع النجوم بأي مستوى من الدقة. والنجوم الموجودة في الطرف الأدنى من دوال الكتلة الأولية لنجوم الجمهرة الثالثة، والتي تبلغ كتلتها حوالي ٠,٨ كتلة شمسية، من المفترض أن تبدأ حاليًا المراحل الأخيرة من حياتها كنجوم عملاقة حمراء، وهذه العملاقة الحمراء مضيئة بما يكفي لكي نراها، ولذا فهي تمثل أهدافًا لنا. في الشكل، يمكننا رؤية مجرة درب التبانة ومجراتها القزمة، حيث تُظهر مواضع الدوائر الملونة احتمالية وجود عملاق أحمر واحد على الأقل من نجوم الجمهرة الثالثة في تلك المجرة (في المحور الأفقي السفلي، تعني القيمة ١ وجود احتمال بنسبة ١٠٠٪، والقيمة ٠,٥ تعني وجود احتمال بنسبة ٥٠٪). على سبيل المثال، هناك احتمال بنسبة ١٠٠٪ أن تحتوي مجرة درب التبانة على عملاق أحمر من نجوم الجمهرة الثالثة، وذلك بسبب حجمها، في حين أن هناك احتمالًا أقل من ٥٠٪ لوجود عملاق أحمر واحد في مجرة التنين القزمة. يمثل لون الدوائر نسبة نجوم الجمهرة الثالثة الناجية. كلما زادت هذه النسبة، أصبح العثور على أحد هذه النجوم أسهل، نظرًا إلى وجود عدد أقل من النجوم غير ذات الصلة التي

يجب البحث خلالها. قد تلاحظ أنه من غير المرجح أن يكون لدى «سجّواي ١» أي نجوم ناجية من الجهرة الثالثة على الإطلاق؛ فهي لا تحتوي إلا على عدد قليل جدًا من النجوم.



شكل ٨-١: زاد عدد المجرات القزمة المعروفة مؤخرًا زيادة كبيرة، حيث تضاعف مرتين بسبب مسح نفّذا مؤخرًا، مسح سلون الرقمي للسماء ومسح الطاقة المظلمة. يمكننا أن نتوقع تضاعفًا آخر قريبًا، عند بدء استخدام تلسكوب المسح الشامل الكبير. اعتمد هذا الشكل على بيانات من بحث سيمون وآخرين، ٢٠١٩.²¹

يشبه هذا الوضع الموازنة. فإذا استهدفنا المجرات القزمة الأصغر حجمًا، فسندج نسبة أكبر من النجوم الناجية من الجهرة الثالثة، ولكن ستقل فرص وجود عملاق أحمر يمكن رصده بينها نظرًا إلى قلة أعداد النجوم المعنية. وفي المقابل، إذا استهدفنا المجرات الأعلى كتلة، فبينما نتوقع أن يوجد مزيد من العملاقة الحمراء من نجوم الجهرة الثالثة،

فإن نسبة النجوم الناجية من الجمهرة الثالثة منخفضة، ولذا علينا البحث في نجوم كثيرة كي نتمكن من اكتشافها. ومن ثمّ، قد تكمن أفضل استراتيجية في الموازنة بين الأمرين.

مختبرات المادة المظلمة على مستوى المجرة

قد لا تكون «سجواي ١» المكان الأفضل للبحث عن النجوم الأولى، لكن هذا لا يعني أنه لا فائدة من دراستها. فقد كان حجمها أحد أسباب تسليط الضوء عليها؛ والسبب الآخر هو ما تحتويه من نسبة عالية من المادة المظلمة. المجرات القزمة الفائقة الخفوت مثل «سجواي ١» هي أقرب حالات للمادة المظلمة إلينا، مما يجعلها أهدافاً أسهل لتجارب الكشف غير المباشر عن المادة المظلمة. والمادة المظلمة، كما ذكرنا في الفصل الخامس، هي المكون الغامض في كوننا، والذي لا يتفاعل مع الضوء. ولم يُستدل حتى الآن على وجودها إلا من خلال تأثيرات الجاذبية على المناطق المحيطة بها. على سبيل المثال، يؤدي وجود المادة المظلمة في إحدى المجرات إلى تحرك النجوم حول النواة المركزية بمعدل سرعة أعلى من المتوقع. وفي الوضع المثالي، يمكننا اكتشاف المادة المظلمة مباشرةً، وإنتاج أو احتجاز ذرة أو جزيء من المادة لإجراء مزيد من الدراسات عليها. ولكن نظراً إلى ضعف تفاعل المادة المظلمة مع المادة العادية أو انعدامه، اضطررنا إلى انتهاج أسلوب غير مباشر لاكتشاف أكبر قدر منها، كالاستدلال على وجودها من خلال الجاذبية، على سبيل المثال. وللقيام بذلك، نحتاج إلى مختبرات في السماء حيث يمكننا تجربة فرضياتنا وتضييق نطاق الاحتمالات حول ماهية المادة المظلمة وسلوكها. ونظراً إلى تساؤل وتيرة تكوّن النجوم، فإن تأثيراتها على حالات المادة المظلمة في المجرات القزمة الفائقة الخفوت كانت ضعيفة، مما ساعد في الحفاظ على حالات المادة المظلمة سليمةً بمنأى عن أي اضطرابات. وبهذا، توفر المجرات القزمة الفائقة الخفوت بيئة اختبار مثالية.

في السنوات القليلة الماضية، استُخدم تلسكوبان لرصد «سجواي ١» بعناية، وهما: تلسكوب فيرمي للمساحات الكبيرة وتلسكوب شيرينكوف الرئيسي لتصوير أشعة جاما بالغلاف الجوي بقيادة فلوريان جوبيل. يُستخدم التلسكوب الأول في الفضاء، بينما يُستخدم التلسكوب الثاني على الأرض. وكلاهما يبحث عن الجسيمات الناتجة عن فناء جسيمات المادة المظلمة الضخمة الضعيفة التفاعل، وهي العملية المقترحة التي يتفاعل من خلالها جسيमान من المادة المظلمة ويفنيان في النهاية، تاركين وراءهما مجموعة من الجسيمات الأخرى. لا نعرف على وجه اليقين ماهية هذه الجسيمات الناتجة، لكننا نعلم

أنها قد تنتج أشعة جاما أثناء هذه العملية. وتمثل أشعة جاما أعلى أنواع الضوء طاقةً، أو أقصرها طولاً موجياً. حيث يمكنها السفر في الفضاء دون أن تنحرف متأثرةً بالمجالات المغناطيسية. لذلك، على عكس معظم العناصر المحتملة الناتجة عن فناء المادة المظلمة، فإن أشعة جاما هذه لديها فرصة جيدة لتصل إلينا بعد انبعاثها من المادة المظلمة عقب فنائها. وإذا تمكّننا من اكتشاف أشعة جاما هذه، فيمكننا حينئذٍ استنتاج الكثير عن المادة المظلمة وكيفية فنائها استناداً إلى طاقة أشعة جاما وعددها. لقد بحث كلٌّ من التلسكوبين السالف ذكرهما عن أشعة جاما المنبعثة من «سجواي ١» على أمل اكتشاف شيءٍ ما.^{22, 23}

ولم يعثرا على أي شيء حتى الآن، لكن كما ناقشنا من قبل، فإن عدم اكتشاف شيءٍ في حد ذاته يمكن أن يسفر عن شيءٍ ما. نطلق على الطرق المختلفة التي يمكن أن تفنى بها جسيمات المادة المظلمة اسم «القنوات». على سبيل المثال، هناك قناة لجسيمات تاو وجسيمات تاو المضادة، وقناة لجسيمات نيوتري노 وجسيمات نيوترينو المضادة. وقد حسب علماء فيزياء الجسيمات مقدار إشعاع أشعة جاما الذي ينبغي رصده من كل قناة للوصول إلى كمية المادة المظلمة المتوقعة في «سجواي ١». وحقيقة أننا لم نكتشف أي شيء يمكن أن تضيق نطاق الاحتمالات وتستبعد قنوات محددة. وما نريده حقاً هو اكتشاف فائض من أشعة جاما يفوق مستويات أشعة جاما في الخلفية العامة للكون، مما يكشف عن حدوث عملية فناء للمادة المظلمة. لقد اكتشفنا فائضاً من هذا النوع في مكان واحد مميز، وهو: مركز مجرة درب التبانة.²⁴ اكتشف تلسكوب فيرمي للمساحات الكبيرة فائضاً من أشعة جاما في المنطقة المحيطة بمركز المجرة، وقد فُسر ذلك على نطاق واسع بأنه دليل على وجود مجموعة غير محددة من المصادر التي تنبعث منها أشعة جاما، أو مادة مظلمة في حالة فناء. تستمر عملية رصد أنظمة المجرات القزمة المتعددة؛ لأن العثور على أي دليل على وجود فائض من أشعة جاما ينبعث من أي من المجرات القزمة من شأنه أن يعزز الرأي القائل بأن تلسكوب فيرمي للمساحات الكبيرة قد اكتشف عملية فناء المادة المظلمة في مركز مجرتنا. هناك أيضاً احتمال أن تصدر العناصر الناتجة عن فناء المادة المظلمة، مثل الإلكترونات والبوزيترونات، إشعاعاتٍ راديوية وأشعة سينية. من الصعب اكتشاف ذلك لأن الإلكترونات والبوزيترونات جسيماتٌ مشحونة، ومن ثَمَّ فإنها تنحرف في كل اتجاه أثناء رحلاتها نحونا. ومع ذلك، يحاول العلماء اكتشاف هذه العناصر الثانوية الناتجة، وقد وضعوا قيوداً على الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل تشبه تلك الخاصة بتلسكوب فيرمي للمساحات الكبيرة ولكن عند مستويات طاقة تكميلية منخفضة.^{25, 26}

تُعد المجرات القزمة مكاناً رائعاً لاختبار جميع نظريات المادة المظلمة، وليس فقط الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل. ومن المقترح أن تكون الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة نوعاً آخر من المادة المظلمة التي تشتمل على ثقوب سوداء تشكلت في بداية الكون. تتسم الثقوب السوداء بأنها مظلمة جداً، وهي تعلن عن وجودها عن طريق قوة جاذبيتها، مما يؤكد على صحة فكرة الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة وأهميتها. تتسم هذه الأجرام بخاصية ضخ الطاقة في أي نظام عبر تفاعلات جاذبيتها. وإذا أضفت بعض الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة إلى نظام نجمي يحاكي العنقود الكروي، أي يضم نجومًا ترتبط جميعها معاً بفعل الجاذبية، فإن تفاعلات الجاذبية المتزايدة تؤدي إلى اتساع مدارات النجوم. ويتضخم النظام، أحياناً لدرجة أنه يذوب في التوزيع النجمي الأوسع في المجرة. ونظراً إلى أن المادة المظلمة تهيم بشدة على المجرات القزمة الفائقة الخفوت، فمن المتوقع أن ترى هذا التأثير بوضوح. إذا كانت الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة تمثل المادة المظلمة، فإننا نتوقع أن نرى مدارات أكبر لأنظمة النجوم في المجرات القزمة، وعلى العكس من ذلك، فإن وجود مجرات قزمة لطيفة ذات هيكل محكم، أو عناقيد كروية داخل المجرات القزمة، قد يدحض فكرة الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة. إن وجود عنقود كروي في المجرة القزمة إيردنوس ٢ (كلمة لاتينية تعني «النهر»، ويشار إليها اختصاراً بـ «إيري»)، ووجود بعض المجرات القزمة الأصغر حجماً، قد استبعد فكرة أن تكون المادة المظلمة مكونة بالكامل من جسيمات الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة التي تفوق في كتلتها كتلة ثلاثة أقمار تقريباً.²⁷ فهذا حجم صغير حقاً بالنسبة إلى ثقب أسود، وبهذا تتراجع احتمالات تكون المادة المظلمة من الأجرام الهالية المضغوطة الثقيلة أمام احتمالات تكونها من الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل.

المجرات القزمة المفقودة

حتى مع تزايد عدد المجرات القزمة المكتشفة على مدى العقود الماضية، ظل القلق يساور العلماء بشأن أعدادها ككل. وفي كون تهيم عليه المادة المظلمة الباردة، تتوافر حالات المادة المظلمة بشكل خاص عند الطرف الأدنى من مقياس الكتلة، حيث من المتوقع أن تدور المئات، وربما الآلاف،²⁸ من حالات المادة المظلمة الصغيرة حول درب التبانة. ومع توفر أجهزة أكثر حساسية، نتوقع الاستمرار في رصد المزيد من المجرات القزمة، ولكن

من الصعب تخيل أن هناك ما يزيد على ١٠٠٠ مجرة قزمة غير مُكتشفة داخل هالة درب التبانة.

على مر التاريخ، أُطلق على هذا الأمر اسم «مشكلة المجرات الصغيرة المفقودة». وفي حين أننا نتنبأ بحكم فهمنا للكون بوجود مئات إلى آلاف المجرات القزمة، فقد اكتشفنا أقل من ١٠٠ منها. ومع ذلك، فقد اقترح مؤخرًا أن المجرات ليست مفقودة على الإطلاق. فمجرد وجود هالة من المادة المظلمة لا يعني بالضرورة أن هناك مجرة. فتأين الغاز في النجوم الأولى، ورياح المستعرات العظمى الناتجة عن انفجار النجوم الأولى، ينجم عنها تأثيرات يمكن أن تمنع اندماج الغاز بما يتيح تكوّن النجوم والمجرات الأولى. تعتبر هذه التأثيرات كارثية في حالة المجرات الأصغر كتلة، ويبدو أن هناك حدًا أدنى لكتلة الهالة يبلغ حوالي مليار كتلة شمسية، حيث لن تتشكل دونه أي مجرة. صَحّ الباحثون عمليات المحاكاة المعنية بعدد الهالات التي ستبقى فارغة وغير مرئية في ظل التقنيات الحالية. وتعد «سيجواي ١» واحدة من المجرات القزمة الفائقة الخفوت بشدة، حيث تبلغ درجة سطوعها ٣٤٠ مرة فقط درجة سطوع الشمس، وعندما نفترض أن جميع المجرات التي جرت لها عمليات محاكاة وتتمتع بدرجة سطوع أقل من هذا الحد غير مرئية، تختفي مشكلة المجرات الصغيرة المفقودة. تحوم حول رؤوسنا مئات إن لم يكن آلاف من هالات المادة المظلمة، ولكن لا يمثل الكثير منها سوى كتل داكنة فارغة من المادة لم تكن كبيرة بما يكفي للتغلب على تلك التأثيرات الأولية من النجوم الأولى. وقد تحتوي نسبة كبيرة منها على نجوم، لكن الانخفاض الشديد في درجة سطوع مثل هذه الأنظمة الخافتة يتجاوز قدرتنا على الرصد. في إحدى عمليات الرصد الحديثة، أظهرت البيانات وجود ست مجرات قزمة، مع أن النظرية البديلة المعدلة بما يتناسب مع الأخطاء الناجمة عن عدم اكتمال بيانات عمليات الرصد قد تنبأت بوجود رصد مجرتين قزمتين، مما يشير إلى أن النظرية لا تزال بحاجة إلى مزيد من التعديلات، وأن مشكلة المجرات الصغيرة المفقودة ربما تكون قد تحوّلت الآن إلى مشكلة في احتمالية وجود مجراتٍ صغيرة زائدة.²⁹

المجرات الصغيرة والمسائل الكونية

يُعدُّ علم آثار المجرات القزمة مجالًا جديدًا، حيث لم يُكتشف إلا عدد قليل من المجرات القزمة حتى وقتٍ قريب. وقد سمح المسح التلسكوبي الجديد الذي أُجري في أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، مسح سلون الرقمي للسماء، بظهور مزيد من

الاكتشافات وتضاعف عدد المجرات القزمة المعروفة. ومع البدء في تنفيذ مسح الطاقة المظلمة في عام ٢٠١٣، تضاعفت الأرقام مجددًا. هناك تلسكوب كبير آخر ذو صلة بالمجرات القزمة هو تلسكوب المسح الشامل الكبير، والذي بدأ تشغيله في أواخر عام ٢٠٢٢، أو أوائل عام ٢٠٢٣. ويتولى هذا التلسكوب الذي يبلغ قطره ٨ أمتار والموجود على جبال تشيلي مهمة مسح السماء بأكملها في ثلاثة أيام فقط، وسيكرر هذا الأمر على مدى ١٠ سنوات، للحصول على صور أعمق لمجرات أبعد. نتوقع أن يتضاعف عدد المجرات القزمة مرة أخرى، لأكثر من ضعف العدد الحالي المعروف. أجرت مجموعة متخصصة في عمليات المحاكاة في دورهام، بالمملكة المتحدة، محاكاة كونية لمناطق تشبه المناطق المحيطة بمجرتي درب التبانة وأندروميديا، وتوقعت وجود عدد كبير من المجرات القزمة التي لم تُكتشف حتى الآن والتي تتجمع حول المجرتين في المجموعة المحلية.³⁰ سيكون هناك الكثير من المجرات القزمة، وستتطلب جميعها إثباتًا طيفيًا عن طريق قياس سرعة النجوم ونسبة المعادن بها. وسيطلب ذلك قياسات طيفية عالية الدقة، تستغرق وقتًا طويلًا، وأعتقد أنه لكي تصبح عالم آثار متخصص في المجرات القزمة، فإن الأمر يتطلب قدرًا كبيرًا من المثابرة في السعي وراء الكنوز المكتشفة حديثًا.

أحبُّ دورهام حبًّا جمًّا، مثل شعور معظم الطلاب تجاه مدنها الجامعية، وأستشهد على ذلك بما قاله كاتب أدب الرحلات بيل برايسون في كتابه «ملاحظات من جزيرة صغيرة»: «دعني أقولها صراحةً الآن: إذا لم يسبق لك زيارة دورهام من قبل، فإذهب فورًا. خذ سيارتي. إنها رائعة.» ومن أجمل معالم دورهام كاتدرائيتها التي تقع على تلة مرتفعة تشرف على المدينة الصغيرة. وبينما كنت جالسة في حفل تخرجي في تلك الكاتدرائية، أخبرنا رئيس الجامعة آنذاك بيل برايسون كيف أن كل حجر في الكاتدرائية قد استُبدل في مرحلة ما من عمرها الذي دام ألف عام. لقد خضعت الكاتدرائية لأعمال تجديد وتطوير. ويدهشني أحيانًا أن المجرات الكبيرة التي نراها حولنا تفعل الشيء نفسه. فقد تبدو وكأنها كيانات ضخمة صلبة لا تتغير، تجمعت في الماضي السحيق، لكنها في الواقع تتطور حتى يومنا هذا. فالنجوم التي نراها في هذه المجرات ليست هي النجوم التي كانت موجودة عندما تشكلت المجرة. ربما يوجد نجم قديم وحيد مختبئ بين النجوم البديلة الجديدة، لكن العثور على هذا النجم ليس بالمهمة السهلة. وعلى مدى مليارات السنين، ربما يكون هيكل المجرة قد تغير كليًا لدرجة أنه أصبح من الصعب التعرف عليها. عندما ننظر إلى المجرات من حولنا، فإن التنوع المذهل الذي نراه يشير إلى عدد من

السيناريوهات التاريخية المحتملة؛ إذ يبدو الأمر كما لو أن شخصاً ما قد استبدل أحجار الكاتدرائية بلون ونمط وحجم عشوائي. هل من الممكن أن تظل إحدى المجرات الأولى في مكان ما في هذه المجموعة، بعد أن تجنب جميع عمليات الاندماج، ومنعت بطريقة ما التطور المستمر الذي فرضه تكوّن النجوم، وتحايلت على جميع الأحداث الكارثية التي قد تجبرها على التبدّد؟ يبدو أن «سيجواي ١» هي الدليل على أنه على الرغم من الاضطرابات التي تعرض لها الكون المبكر، فما زال هناك بعض الناجين بين الأنقاض. ومع تطور درجة حساسية التلسكوبات، سنكتشف مزيداً من المجرات الأحفورية وربما نعرّث بداخلها على أحد النجوم الأولى.

يُقال إن أفضل الأشياء وأقيمها لا تأتي في عبوات كبيرة. وفيما يبدو، ينطبق هذا حقاً في حالة المجرات القزمة. لقد عرفنا منذ زمن طويل بوجود المجرات القزمة، تلك التي تحتوي على هالة من المادة المظلمة وبضعة ملياراتٍ من النجوم على الأكثر، لكنها كانت ساطعة وقليلة العدد. في العقدَيْن الأخيرين، ازدادت أعداد المجرات القزمة المعروفة، وتضاعفت مع كل مسح جديد. تحيط بمجرة درب التبانة مجراتٌ قزمة، وهي بقايا عملية تكوّن الهياكل الهرمية، حيث تشكّلت المجرات الأكبر من اندماج الهياكل الأصغر. وقد تكون أصغر المجرات القزمة من المجرات الأقل تطوراً في الكون، والتي تحتوي على نجوم الجبهة الثالثة. فنحن نعتقد أن المجرات الأولى كانت تحتوي بالفعل على نجوم الجبهة الثانية، التي تشكلت من هالات متعددة من نجوم الجبهة الثالثة السريعة التطور. وعليه، من غير الواضح السبب وراء اختيار استهداف أصغر المجرات في البحث عن نجم خالٍ من المعادن، حيث تقل فرص وجود أي من تلك النجوم القليلة في حالة يمكن رصدها. وبصرف النظر عن قيمتها في الفيزياء الفلكية، فقد تبَيّن أن المجرات القزمة الفائقة الخفوت هي أكثر الأنظمة المعروفة التي تهيمن عليها المادة المظلمة، وقد حوّلت تجارب فيزياء الجسيمات أنظارها إلى محاولة اكتشاف جسيم المادة المظلمة الحَيّر. من المقرر أن تنطلق تجارب أكثر حساسية قريباً، وبهذا سيحصل علماء آثار المجرات القزمة على كم هائل من البيانات. وسيتعين عليهم اختيار أهدافهم بعناية للمتابعة الطيفية والتحلي بالصبر أمام العديد من الخرائط التي تحتوي جميعها على علامات تشير إلى اكتشافات جديدة.

في يوليو ٢٠١٩، حظيتُ بشرف العودة إلى دورهام لحضور مؤتمر حول المجرات القزمة بعنوان «المجرات الصغيرة، والمسائل الكونية». في الواقع إنني أحضر الكثير من

المؤتمرات، ولكن نظرًا إلى أننا نميل إلى البقاء ضمن تخصصاتنا الصغيرة، فمن النادر أن نحضر مؤتمرًا لا نعرف فيه أحدًا. فعادةً ما ترى الخمسين شخصًا عينهم لبقية حياتك المهنية. في هذا المؤتمر، كنت دخيلة عليهم من مجال الكون المبكر، أحاول أن أستكشف موضوعًا كنت قد انخرطت فيه تَوًّا، ومن ثَمَّ لم أكن أعرف سوى شخصين هناك. كان من الرائع حقًا الاطلاع على مجال مختلف والالتقاء بمجموعة مختلفة من الباحثين. لقد بدأ هذا المجال للتو، ومن ثَمَّ يوجد العديد من فروع البحث التي يمكن استكشافها. وفي إحدى الجلسات أذهلني أن نبرة الخطاب كانت خالية من أي إلحاح. في مجال تخصصي المتعلق باكتشاف خط الانزياح الأحمر العالي الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم (الذي سنناقشه لاحقًا)، نوشك على التوصل إلى اكتشاف طال انتظاره، ورغم أننا نتنافس على الوصول، فنحن على استعداد للتحلي بالصراحة والعمل معًا من أجل تذليل العقبات العديدة التي تعترض طريقنا. نشعر دائمًا بأننا في عجلة من أمرنا، وأننا لا نملك ما يكفي من الوقت أو الأشخاص للإجابة عن جميع الأسئلة. على النقيض، لم أشعر بالقدر نفسه من الإلحاح أو التوتر في هذا المؤتمر. بل عوضًا عن ذلك، ساد جو من الاسترخاء، وحماسة مفعمة بالاطمئنان، مثل طفل لديه كومة من الهدايا المفتوحة لا يعرف بأي منها سيلعب أولًا. لقد أذهلتني أيضًا الطريقة التي عُرضت بها المشكلات بوصفها فرصًا للتعلم (على سبيل المزاح). اقترح أحد الحضور أن وظيفة العقل لا يفترض أن تكون حل هذه المشاكل، بل خلق المزيد منها، لاكتشاف المزيد من الأشياء التي لسنا على دراية بها عن المجرات القزمة. حتى لحظة زهابي إلى هذا المؤتمر، لم أكن أستوعب علاقة ذلك بعلم آثار المجرات القزمة. واكتشفتُ أنني لم أكن بالدخيلة على نادٍ مترابط الأعضاء. بل بدلاً من ذلك، كنت أواجه مجتمعًا جديدًا يتكوّن من عائلاتٍ متعددة. كان بين الحضور علماء فيزياء الجسيمات الذين تحدوهم الرغبة في استكشاف المجرات القزمة بحثًا عن المادة المظلمة. وكان هناك أيضًا علماء آثار النجوم المتحمسين لإيجاد العديد من المواقع التي تقدم مزيدًا من الفرص للبحث عن نجمهم الثمين الخالي من المعادن. وكان هناك علماء فلك مختصون بمجال تكوّن المجرات لاستخدام هذه اللبنات الصغيرة وتوظيفها في فهم كيفية تشكّل المجرات الضخمة التي نراها اليوم. وكان هناك علماء فلك آخرون مختصون بمجال الكون المبكر مثلي، وقد اقترحوا أن المجرات القزمة الأصغر سنًا التي تتشكل بها النجوم يمكن استخدامها كنظائر للمجرات الأولى التي تتشكل بها النجوم في كوننا. ومع ذلك، في ظل كل هذه المناقشات، لم يُذكر إلا القليل عن «سجواي ١»، التي كنت أعتقد أنها ستكون

الموضوع الرئيسي للنقاش. لقد تلاشت حماسة العثور على أول مجرة أحفورية، وكان علماء الفلك يبحثون بالفعل عن مجرات مرشحة أخرى، ويخططون لمزيد من عمليات الرصد بسعادة. هذا لا يعني أن دراسة «سيجواي ١» غير ذات صلة. بل على العكس تمامًا. ذلك أن «سيجواي ١» هي أول مجرة أحفورية ولكنها ليست الأخيرة بأي حال من الأحوال، والتقنيات التي استخدمناها لتحديد طبيعتها قابلة للتطبيق على نطاق واسع. إن علم آثار المجرات القزمة مجال بدأ للتو في ترسيخ مكانته. وهو يتألف من مجموعات صغيرة من الموضوعات، تدور جميعها حول هدف واحد: الكشف عن هذه الحفريات الصغيرة واستخدامها كمختبرات لفهم الكيفية التي تشكّل بها كوننا.

هوامش

* يُطلق على هذه التفاعلات القصيرة والعابرة مصطلح «التحرش المجرّي». وباعتباري ناشطة مناهضة للتحرش الجنسي في الأوساط الأكاديمية، فإن هذا المصطلح يصيبني بالقشعريرة، إلا أنني لا أجد بُدًّا من الإشارة باختيار هذه التسمية. ويمكنني أن أتخيل العذر الذي تقدمه سحابة ماجلان الصغرى كما يلي: «لم أكن أنوي التسبب في حدوث اضطراب لكل جزء من كيائها وتغييرها إلى الأبد، وتدمير كل ما هو جميل وفريد من نوعه، ولكن المشكلة هي أن لديّ مجال جاذبية كبيرًا حقًا. ومن ثمّ، انجذبت نحوي!»

الفصل التاسع

الغسق الكوني

في غضون أسابيع قليلة، سيكون عليّ إعداد عشاء عيد الميلاد لثلاثة عشر شخصًا. سيكون الأمر بمثابة مزيج متنوع من أفراد العائلة المقربين، والأصهار، والأعمار، والمتطلبات الغذائية، والمعتقدات السياسية. وسرعان ما أصبحت طريقة طهي فوط الطعام ولون مفرش المائدة مسائل ملحة، وبدأتُ أضع مخططًا لإعداد الطعام أشبه بمخطط إدارة المشروعات. يضم هذا المخطط وصفاتي المفضلة، ويخبرني بموعد تقشير البطاطس، وموعد طهي براعم الفاصوليا على البخار، والوقت المستغرق في طهي القرنبيط بالجبن لوالد زوجي، وموعد إعداد الجزر المُحَلَّى بالعسل (للابنة الكبرى)، والجزر المسلوق (للرضيع)، والجزر النيئ المقطع إلى شرائح (للابنة الوسطى) والجزر المشوي (لَمَن عدا ذلك من الحضور). يعتمد النجاح على التنفيذ المتقن لكل مرحلة. وحتى مع كل هذه التوقعات، لم يكن هناك الكثير من الضغط، فما أسوأ السيناريوهات المحتملة على أي حال؟ ربما أحرق طعامًا تبلغ قيمته ٥٠ جنيهًا إسترلينيًا وأضطر إلى تحضير فطائر اللحم المفروم المخصصة لحالات الطوارئ. ومع ذلك، كنت أشعر بالتوتر حيال تقطيع الجزر الأبيض؛ لأنها مسئولية مباشرة تقع على عاتقي. ولذا، أتعجب كثيرًا كيف يتحمل الناس مسئولية البعثات الفضائية الحديثة. ولنأخذ مثالًا على ذلك تلسكوب جيمس ويب الفضائي.¹ وُضِعَ تصوُّر لهذه المهمة في عام ١٩٩٦، وبالفعل انطلقت في ديسمبر عام ٢٠٢١ على أقرب تقدير، بتكلفة ٩ مليارات دولار. جدير بالذكر أن هذا كان اعتبارًا من أغسطس ٢٠٢٠، ومن ثَمَ فإن جميع التواريخ والميزانيات عرضة للتغيير.

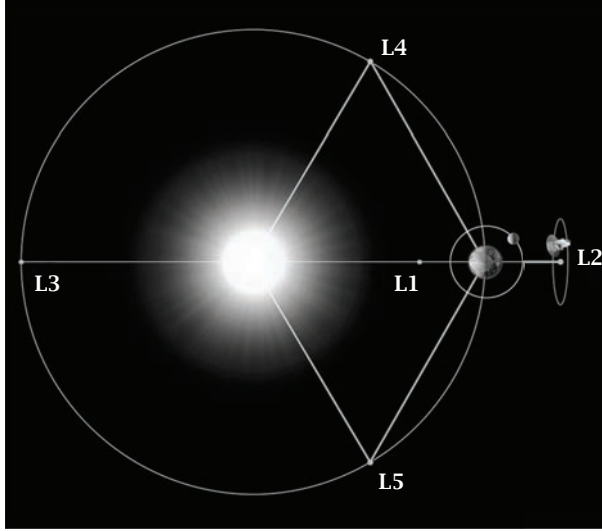
ظل التلسكوب قيد التخطيط لفترة طويلة لدرجة أن العديد من التقنيات التي أستخدمها لم تكن موجودة أثناء مراحل التصنيع، واخترعت للاستخدام لأول مرة في تلسكوب جيمس ويب الفضائي. وعلى عكس طريقتي المنهجية في المطبخ التي تعتمد كليًا

على وصفات كتاب الطبخ لماري بيري، يشبه أولئك الذين يقفون وراء تلسكوب جيمس ويب الفضائي الطُّبَّاحين المبدعين، الذين يبتكرون أصنافاً لذيذة من الطعام.

تلسكوب جيمس ويب الفضائي

يذكّرني هذا التلسكوب بالعثور على إحدى ألعاب المتحولين «ترانسفورمرز» القديمة تحت شجرة الكريسماس صبيحة عيد الميلاد، أو ربما فوطه مطوية على شكل بجعة على مائدة العشاء. فهو يحتوي على سطح رصد (يُسمى مرآة) يبلغ عرضه ٦,٥ أمتار (٢١ قدماً)، وهو ما يعادل تقريباً ثلاث مرات حجم تلسكوب هابل، مما يجعله أقوى بـ ١٠٠ مرة. ولتركيب المرآة على الصاروخ، كان عليهم أن يبتكروا آلية طي لا تختلف عن تلك الموجودة في مائدة الطعام التي يُبسّط جانبها في المناسبات الاحتفالية، حيث يمكن طي جانبي المرآة براءة. وفي الفضاء، يُبسّط جانباً المرآة للتأكد من أن كل أجزاء المرآة تشكّل معاً سطحاً مستويًا. وهناك أيضاً الدرع الواقية من الشمس، المصنوعة من خمس طبقات رقيقة من البولييميد في سُمْك شعرة الإنسان ولكنها تغطي مساحة كبيرة تعادل مساحة ملعب تنس، وقد صُمّمت هذه الدرع لتعكس أكبر قدر ممكن من حرارة الشمس والأرض. تُطوى الدرع الواقية من الشمس ١٢ مرة لتتناسب مع حجم الصاروخ، أو بالأحرى، تنبسط الدرع الواقية من الشمس المطوية ١٢ مرة في الفضاء السحيق، تمامًا كما هو مخطّط لها، لمنع غمر التجربة بالإشعاع الشمسي. إذا شاهدت مقطعاً لخروج التلسكوب من الصاروخ،² فيمكنك أن ترى كيف ينفتح كل جزء من التلسكوب، ويمتد، ويدور، وينبسط، ويميل خلال شهر كامل من العمل الشاق بعد الإطلاق.

سوف يستقر تلسكوب جيمس ويب الفضائي عند نقطة مميزة في مجال جاذبية الأرض والشمس تسمى نقطة لاجرانج L2. هناك خمس مناطق مميزة في مجال جاذبية الأرض والشمس حيث تعمل قوى الجذب الخاصة بالأرض والشمس على موازنة الحركة المدارية للقمر الصناعي بدقة، بحيث يظل في نفس الوضع النسبي للجرمين الأكبر منه حجمًا. عند نقطة لاجرانج L2، توازن بدقة قوة جاذبية كل من الشمس والأرض قوة الطرد المركزي الدافعة إلى الخارج والتي تشعر بها الحركة المدارية للقمر الصناعي. كانت النقطة L2 موطناً لكل من تلسكوب بلانك ومسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي، وهما التجربتان اللتان أنتجتا مخططات رائعة لتغيرات درجات حرارة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي عبر السماء. تتسم هذه النقطة بأنها نقطة مثالية لرصد الفضاء؛ لأنها



شكل ٩-١: نقاط لاجرانج. تشبه نقاط لاجرانج أماكن الانتظار في مجال جاذبية الأرض والشمس. تمثل نقطة لاجرانج L2 أهمية خاصة في علم الفلك؛ لأنها تسمح برؤية الفضاء دون أي عوائق، في حين تظل قريبة بما يكفي لإرسال واستقبال الإشارات من وإلى الأرض.

تسمح للتلسكوب بحماية نفسه من الشمس والأرض معاً، مع البقاء قريباً بدرجة كافية للتواصل مع الأرض. ومع وجود الشمس والأرض خلفها، ينكشف ظلام الفضاء السحيق. ولكن التلسكوب بعيد جداً. فعندما اتضح العطل الذي أصاب مرآة تلسكوب هابل بعد إطلاقه، استطاع رواد الفضاء إصلاحه من خلال سلسلة معقدة جداً من الإصلاحات. وذلك لأن هابل كان قريباً في مدار أرضي منخفض. فهو يقع على ارتفاع ٥٤٧ كيلومتراً (٣٤٠ ميلاً) فقط فوق الأرض، ولذا لم يكن من الصعب على رواد الفضاء التوجه إلى إصلاحه. وبالمقارنة، نجد أن تلسكوب جيمس ويب الفضائي يقع على مسافة تزيد على ١,٥ مليون كيلومتر، بما يعادل أربع مرات المسافة بين القمر والأرض، وبعيداً جداً عن أي مكان يمكن أن توفر فيه ناسا أي بعثات لإصلاح الأعطال. ونظراً إلى ضرورة التحقق التام من كل شيء، كان لا بد من اختبار كل جزء من تلسكوب جيمس ويب الفضائي وإعادة اختباره وفحصه مرة أخرى للتأكد من أن كل شيء سوف يسير كما هو مخطط له في يوم الإطلاق المرتقب. وقد أدت هذه الضرورة إلى زيادة الميزانية عن أي وقت مضى، حيث زادت من

مليار دولار عند البدء إلى ٩ مليارات دولار اعتباراً من عام ٢٠٢٠. وكما أشار أحد علماء الفيزياء الفلكية، فإن هذا هو فقط ما ينفقه الأمريكيون على رقائق البطاطس سنوياً.³ أليس هذا ثمناً زهيداً نظير مشاهدة أقدم الأجرام في الكون؟ يعتبر تلسكوب جيمس ويب الفضائي استثماراً هائلاً ذا عائد كبير. فهو أشبه بحدث إعداد عشاء عيد الميلاد للملكة، في بث مباشر على شاشة التلفزيون، دون الاستعانة بأي كتاب طبخ.

رأينا في الفصل السابع كيف يمكننا استخدام علم الآثار النجمي لوضع تصوّر عن عدد نجوم الجبهة الثالثة ذات الكتلة المنخفضة، وتحديدًا دالة الكتلة الأولية النجمية. من المفترض أن تظل النجوم ذات الكتلة المنخفضة، التي تبلغ حوالي ٨٠٪ من كتلة الشمس، على قيد الحياة لفترة طويلة تمتد حتى يومنا الحالي، وكل ما علينا هو البحث عنها حتى إيجادها. لكن الوضع معقد في حالة النجوم ذات الكتلة العالية، حيث تعيش تلك النجوم حياة قصيرة لا تتجاوز بضعة ملايين من السنين. وهذا أقل بكثير من المدة التي يجب أن تعيشها — وهي ١٣ مليار سنة — حتى نتمكن من رؤيتها في محيط مجرتنا. ولجمع مزيد من المعلومات حول النجوم ذات الكتلة الأكبر في دالة الكتلة الأولية النجمية، لا خيار أمامنا سوى العودة بالزمن إلى الوراء، من خلال إلقاء نظرة بعيدة بما فيه الكفاية بحيث يكون الضوء الذي نراه هو ضوء تلك النجوم الأولى، سواء كانت حية أو تُحتَضَر.

من أشهر الصور التي نقلها هابل هي صورة الحقل الفائق العمق، التي يمكن الاطلاع عليها في صورة ١٧ في ملحق الصور بنهاية الكتاب. التقطت هذه الصورة المذهلة في عام ٢٠٠٤، وهي تستعرض تنوع أشكال ١٠ آلاف مجرة في رقعة صغيرة من السماء. توجد جميع هذه المجرات التي يبلغ عددها ١٠ آلاف في المنطقة نفسها من السماء، والتي يمكن حجبها إذا حملت عملة معدنية بريطانية فئة خمسة بنسات، أو عملة معدنية أمريكية فئة عشرة سنتات، على بُعد ٢٣ مترًا (٧٥ قدمًا). تقع جميع هذه المجرات على مسافات مختلفة، مما يعني أنها كانت موجودة كما هو موضح في الصورة في أوقات مختلفة من تاريخ الكون. ومن المحتمل أن يعود الضوء الصادر من المجرات الحمراء الأصغر حجمًا إلى بضع مئات من السنين فقط بعد الانفجار العظيم، في حين أن الضوء الصادر من المجرات الحلزونية، التي تتميز بالتكوين الجيد والإشراق، ربما يعود إلى ما يقرب من مليار سنة بعد الانفجار العظيم.

لديّ لوحة كبيرة من القماش للحقل الفائق العمق معلقة على جدار غرفة المعيشة، ولذا فإنني كثيرًا ما أنظر إليها. وفي كل مرة أفعل ذلك، يحاول عقلي جاهدًا استيعاب

أن كل هذه النقاط والدوامات الصغيرة هي مجرات، متجمّدة في رقصة لا يمكن تصوّر نطاقها. يصيبني الذهول في كل مرة أنظر إليها. فهي تجعلني أشعر بمدى ضآلتي. وذلك كله في مجرد جزء صغير من السماء. أعتقد أن تلسكوب جيمس ويب الفضائي أحدث ثورة في عُمر الكون تضاهي الثورة التي أحدثها تلسكوب هابل في نطاق الكون. فقد التقط تلسكوب جيمس ويب أضعف إشارات الضوء الصادرة من المجرات الموجودة خلال فترة الفجر الكوني، مما أتاح لنا إلقاء نظرة مباشرة على كيفية تشكّل تلك المجرات وتطوّرها. ومن ثمّ استطعنا أن نفهم، من خلال النظر إلى أسلاف مجرة درب التبانة، وندرك مدى صغر عمرنا، وعمر الأفراد، والفصائل، والكوكب، بل وحتى المجرة. أعتقد أننا بصدد دراسة جدول زمني لتطور المجرات، ولنا أن نستشعر كم الوقت الهائل الذي مرّ خلال عملية التطور هذه.

على الرغم من أن تلسكوب جيمس ويب الفضائي هو خليفة تلسكوب هابل من حيث كونه التلسكوب الفضائي الكبير التالي، فإنه لم يكن بديلاً صريحاً له. ففي حين أن هابل أداة بصرية ترصد الضوء المرئي، يرصد تلسكوب جيمس ويب الفضائي الأشعة تحت الحمراء. وتتميز الأشعة تحت الحمراء بطول موجي يصعب رؤيته بالعين المجردة. فالغلاف الجوي للأرض يحجب الكثير من الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء، مما يجعل تلسكوب جيمس ويب عديم الفائدة في حال وضعه على الأرض. ومن ثمّ، كان لا بد من الابتعاد عن الأرض على أي حال، أو بالأحرى الابتعاد عن جميع الأشعة تحت الحمراء الموجودة على الأرض، والتي من شأنها أن تحجب الإشارات التي نبحث عنها. وبالتالي، تقرّر إطلاق التلسكوب إلى الفضاء وبسط الدرع العملاقة الواقية من الشمس لحجب إشارات الأشعة تحت الحمراء القادمة من الأرض والشمس. ومع حجب الأشعة القادمة من الأرض والشمس، تمتع تلسكوب جيمس ويب الفضائي برؤية واضحة ومظلمة للسماء، مما أتاح له رصد الأشعة تحت الحمراء. كانت لدى تلسكوب جيمس ويب الفضائي قائمة رائعة من الأهداف العلمية. إذ كان من المقرر له أن يستكشف الغلاف الجوي للكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية، والبحث عن المؤشرات الكيميائية للحياة، والتقاط صور للمجرات على مر العصور، وإنشاء جدول زمني يتتبع تكوّن الهياكل. كما كان من المخطط له إلقاء نظرة على حاضنات النجوم التي تقع في الكون القريب، متجاوزاً كلّ الغبار الذي يحجب الرؤية عن التلسكوبات البصرية. وكان من المنتظر أيضاً أن يدرس تكوين النجوم كما يحدث الآن (حسناً، أعني كما يحدث على مدى آلاف السنين القليلة الماضية — أو

ما يقرب من ذلك — بالنظر إلى الوقت الذي يستغرقه الضوء للانتقال عبر الفضاء). إن الضوء الصادر من المجرات الأولى ينزاح نحو الأحمر لدرجة أنه يظهر لنا مع الأشعة تحت الحمراء، وبصورة مثالية، يمكننا التقاط إشعاع النجوم الأولى بالطريقة نفسها. لكن للأسف، لا يتمتع تلسكوب جيمس ويب الفضائي بدرجة الحساسية اللازمة لرؤية النجوم الفردية التي تشكلت خلال فترة الفجر الكوني، حتى في ظل وجود مرآته العملاقة القابلة للطي. وفي حين أن هناك أملاً في احتمالية وجود بعض الاستثناءات إذا تشكلت نجوم فائقة الكتلة على وجه التحديد،⁴ أو إذا تشكلت نجوم في مجموعات متقاربة،⁵ لإصدار لمعان مشترك أكثر سطوعاً، فمن غير المرجح أن يحدث استكشاف مباشر للنجوم الأولى. ومن المحتمل أننا في أول نظرة نلقيها على النجوم الأولى سنشهد موتها.

مصير نجومنا

تحدد كتلة النجم مدى سرعة احتراق وقوده، ومن ثمَّ مدة بقائه على قيد الحياة. والكتلة مهمة أيضاً لتحديد كيفية موت النجم.

أقل من ٨ كتل شمسية: قزم أبيض

في حالة النجوم الصغيرة، عندما ينتهي احتراق الهيدروجين والهيليوم في قلب النجم، يجد النجم نفسه عند درجة حرارة منخفضة جداً بحيث لا يتمكن من حرق الكربون. ويتعرض القلب للانهييار وتُطرد الطبقات الخارجية بلطف إلى ما نطلق عليه اسم السديم الكوكبي. لا ينهار القلب تماماً، بل يثبت بفعل ضغط جميع الإلكترونات التي تدور حوله. وبهذا يتكوّن قزم أبيض: وهو عبارة عن قلب نجم بارد، متماسك بفعل ضغط إلكتروناته. تتميز الأقزام البيضاء بكثافة عالية، حيث ينهار النجم بشكل كبير قبل أن يعادل ضغط الإلكترون قوة الجاذبية. تضاهي كتلة القزم الأبيض كتلة الشمس، ولكنه بحجم الأرض. وتبلغ كثافة القزم الأبيض في المعتاد نحو مليار كجم/م^٣، وهو ما يعادل تقريباً القول بأن ديك عيد الميلاد يزن ٣٠٠٠ فيل.

ما بين ٨ كتل شمسية و ٢٠ كتلة شمسية: نجم نيوتروني

في حالة النجم الأضخم حجماً، يمكن أن يصل قلب النجم إلى درجات حرارة أعلى بسبب زيادة الضغط الداخلي، مما يؤدي إلى بدء جميع مراحل الاحتراق النووي، مثل الكربون

والأكسجين والسيليكون. وبمجرد أن يؤدي احتراق السيليكون إلى تحول النواة إلى حديد، ينهار القلب؛ لأنه لا يستطيع دمج الحديد لإنتاج الطاقة، وتستهلك العملية طاقة أكثر مما تنتجها. ومع وجود كتلة أكبر من كتلة القزم الأبيض، يستمر القلب في الانهيار حتى أمام الضغط الناتج عن الإلكترونات. وفي القلب، يُضغَط بحر البروتونات والإلكترونات لتكوين النيوترونات، وفي النهاية يتوقف الانهيار بسبب الضغط الذي تمارسه هذه النيوترونات. ويؤدي الارتداد المفاجئ عند تكوّن النيوترونات إلى انبعاث موجة صدمية إلى الخارج، مما يؤدي إلى طرد الطبقات الخارجية للنجم في شكل انفجار يسمى المستعر الأعظم. وبهذا يتكوّن النجم النيوتروني، وهو عبارة عن بقايا نجمية من المقدّر لها أن تبرد وتتلاشى. وتتسم هذه البقايا بكثافة تفوق كثافة الأتزام البيضاء، حيث تصل إلى ١٠٠ مليار كجم/م^٣. وكأننا نقول بذلك إن وزن ديك عيد الميلاد الآن يعادل وزن كويكب صغير.

ما بين ٢٠ و ١٠٠ كتلة شمسية: ثقب أسود

تتشكّل الثقوب السوداء عندما لا يتمكن ضغط النيوترون داخل قلب النجم من الحفاظ على الطبقات الخارجية للنجم. ويستمر الانهيار، مما يؤدي إلى ضغط المادة كثيرًا، ومن ثم يتولّد مجال جاذبية قوي للغاية. وفي نطاق مسافة قريبة، تُسمى «أفق الحدث»، لا يمكن لأي شيء الهروب، لا الغبار، ولا المعادن، ولا الغاز، ولا حتى الضوء. ونظرًا إلى أن مجال الجاذبية قوي جدًا لدرجة أنه سيؤثر تأثيرًا ملحوظًا على قدميك أكثر من رأسك، فإنك ستتمدد لتصبح مثل السباحيتي في عملية تسمى «التأثيرات المعكرونية» أو «التمدد السباحيتي». يشوه مجال الجاذبية القوي هذا الزمن، مما يجعله يبدو متجمّدًا للراصد الخارجي. ولذلك ستبدو مثل عود سباحيتي متجمّد في أفق الحدث، يسقط ليلقى حتفه. في أفق الحدث، ستشعر بالزمن كالمعتاد وسيكون الموت فورًا. وسيحتل جسمك إلى الجزيئات والذرات والإلكترونات والبروتونات والكواركات المكوّنة له. ولذا يفضل ألا تقع في ثقب أسود.

الثقوب السوداء ليست من الأشياء التي يمكنك الاقتراب منها أو إخضاعها للفحص داخل مختبر، وحتى أبريل ٢٠١٩، لم يكن علماء الفيزياء الفلكية أنفسهم متأكدين من شكل الثقب الأسود. وحتى ذلك التاريخ، كانت كل صورة يُحتمَل أن تكون قد رأيتها على الإطلاق لثقب أسود هي محاكاة أو تصوّر فني لا أكثر، وأزعم أن الفارق بينهما لا يُذكر؛

فالأمر يعتمد فقط على ما إذا كنت تستخدم في محاسباتك عقلك أم أحد برامج الكمبيوتر. أثار فيلم «بين النجوم» (إنترستيلر) ضجة في المجتمع العلمي بسبب أسلوبه الواقعي في تصوير الثقب الأسود، حيث استُعين بفيزيائيين لضمان التزام المؤثرات الخاصة بنظريات علم الفيزياء.⁶ وقد أصبح مصطلح «الثقب الأسود» شائعاً في اللغة، على الرغم من أنه يصف ما يبدو وكأنه كيان غير شائع على الإطلاق: فهو نقطة في الفضاء كثيفة جداً لدرجة أنه — في نطاق معين — لا يمكن لأي شيء الإفلات من جاذبيتها، ولا حتى الضوء. يشيع كثيراً التنويه بأن لا شيء يمكنه الإفلات من جاذبية الثقب الأسود، «ولا حتى الضوء»، لدرجة أن هذا المفهوم فقد رونقه. فالضوء، بعد كل شيء، يمكنه أن يتحمل الكثير. كانت الفوتونات تتجول بحرية منذ الانفجار العظيم، وتتفاعل أحياناً مع الذرات، وتعرض لبعض الاضطرابات عندما تسافر عبر أغلفة الكواكب الجوية، ورغم ذلك كانت تكمل رحلتها. يذكرني ذلك بواحدة من فرق العروض الجوية التي تتميز بالتزامن الرائع، حيث تبدأ بتشكيل المجموعات في السماء، والتحليق بسرعات عالية، ومواجهة الاضطرابات والطقس لتحافظ على تشكيلها الدقيق على مدى عدة أميال. لا يعيق الكون الضوء كثيراً، ويسمح له بمواصلة رحلته. ففي نهاية المطاف، الضوء هو بطل هذه القصة؛ لأننا نبحث عن الضوء الأول، فضلاً عن كونه الطريقة الرئيسية التي نتبعها في رصد الكون، وكل بطل لا بد أن يكون أمامه خصم. ومن وجهة نظرنا أن الثقب الأسود يلعب هذا الدور. ربما تبلغ السرعة الهائلة التي يسافر بها الضوء ٣٠٠ مليون متر في الثانية لمدة ١٣ مليار سنة، ولكن إذا لم يحالفه الحظ واقترب كثيراً من ثقب أسود، فإنه يختفي فجأة إلى الأبد. تمثل الثقوب السوداء أجزاءً من كوننا استسلمت فيها الفيزياء القياسية التي نعرفها ونحبها لأخذ قيلولة، تاركة إيانا على الأريكة مع عمّة غريبة الأطوار لا يمكن التنبؤ بأفعالها، من النوع الذي «لا يلتزم بأي قواعد».

في يوم الأربعاء الموافق ١٠ أبريل ٢٠١٩، حضرتُ مؤتمراً لعلم الفلك الراديوي بالقرب من مرصد جودريل بانك، وهو واحد من أوائل هوائيات علم الفلك الراديوي في العالم المصممة لهذا الغرض، مع ٣٥٠ عالم فلكٍ آخر. كنا نجلس جميعاً في قاعة المحاضرات نشاهد عرضاً حياً للمؤتمر الصحفي الخاص بتلسكوب أفق الحدث⁷ الذي أعلن عن أول صورة على الإطلاق لثقب أسود.⁸ وشاهدنا المفوض الأوروبي للبحث وهو يصرح بأن هذا يعتبر «إنجازاً عظيماً للبشرية، نحن على وشك التقاط صورة ...» وبعد ذلك، بلا مزاح، أصبحت الشاشة سوداء. هل كان هذا ثقب أسود؟ بعد كل شيء، الثقوب السوداء ... كلا،

لقد انقطع الاتصال ثم عادَ، وفجأة ظهر الثقب الأسود. بقعة قهوة يمتزج فيها اللون الأصفر مع البرتقالي، عين ساورون، أو «بوابات الجحيم» كما وصفها مسئول صحفي مفرط الحماس نوعاً ما. رحنا نصفق من فرط حماسنا وانفعالنا، وذلك لسبيين: أولهما الإعجاز العلمي الذي ينطوي عليه هذا الأمر، والثاني أن الأشخاص الذين نقلوا لنا هذه الصورة هم أصدقاؤنا وزملاؤنا. كنا نعرف مدى الجهد الذي بذلوه على مدى سنوات عديدة لضمان حدوث ذلك، وكَمّ العوامل التي كان عليهم مواءمتها لإنجاح هذه التجربة الواسعة النطاق. كانت الصورة نتاج تضافر جهود ثمانية تلسكوبات موزعة حول الأرض. قبل عامين، كانت جميع تلك التلسكوبات تنظر في الاتجاه نفسه في آن واحد، نحو كوكبة العذراء، نحو الثقب الأسود الفائق الضخامة داخل مجرة «إم ٨٧». وكان مجرد الانتظار حتى تتمتع المواقع الثمانية بطقس جيد يمثل تحدياً كبيراً. فهذه التلسكوبات لا تحوم في الفضاء في انتظار أن يستخدمها شخص ما، فالطلب عليها مرتفع للغاية، وإذا لم يكن الطقس جيداً للتقاط الصورة، فحظ أوفر في المرة القادمة. تُعد صورة أفق الحدث للثقب الأسود الفائق الضخامة في مجرة «إم ٨٧» إنجازاً مشتركاً مذهلاً، ومن المقرر أن توفر التجربة قريباً صوراً للثقب الأسود الموجود في مركز مجرتنا.

لا بد أنك تتساءل الآن كيف نجحوا في تصوير الثقوب السوداء بعد أن علمت أنها نقاط لا يمكن لأي شيء الهروب منها. لقد «رصدنا» حتى الآن ثقوباً سوداء بمساعدة الجاذبية، أي من خلال تأثير جاذبيتها على الكون المحيط. الأمر أقرب إلى اكتشاف وجود شخص مشهور في أحد مراكز التسوق، فمن غير المرجح أن ترى ذلك الشخص، لكنك ستعلم أن هناك خطباً ما عندما ترى حشداً من الناس يخرجون من جميع الاتجاهات نحو نقطة واحدة. نحن نعلم أن هناك ثقباً أسود في مركز مجرتنا؛ لأن النجوم الموجودة في مركز مجرتنا تتحرك كلها نحوه كما لو كانت تدور حول كتلة هائلة، على الرغم من أننا لا نستطيع رؤية أي شيء (أو على الأقل حتى الآن، فمن المحتمل أن يتمكن تلسكوب أفق الحدث من تغيير ذلك الأمر). وبسبب قوة جاذبية الثقب الأسود، فإن أي شيء يقع ضمن نطاق معين منه سوف ينجذب نحوه، وعندما يتمزق بفعل قوى الجاذبية، تشكّل المادة قرص تراكم، يشبه ذلك الذي رأيناه أثناء تكوّن النجوم. يؤدي الاحتكاك داخل القرص إلى تسخين الغاز، ومن ثمّ ينبعث إشعاع يمكّننا من رؤيته؛ ولذا فما نراه هو ذلك القرص الذي يحيط بظل الثقب الأسود نفسه. على الرغم من أن الثقوب السوداء من أكثر الأجسام سطوعاً في الكون بسبب أقراص التراكم التي تحيط بها، فإن بعدها عنا يجعل التقاط صورة لظل أحدها إنجازاً كبيراً.

اتسم هذا الجزء من الفصل بأنه طويل بعض الشيء؛ وذلك لأن الثقوب السوداء مذهلة بصراحة. إنها تتخطى روعة أي حكاية تاريخية أو استعارة بسيطة. تبلغ كتلة الثقوب السوداء الفائقة الضخامة، مثل تلك التي رصدها تلسكوب أفق الحدث، ملايين أو حتى مليارات الكتل الشمسية. أما الثقوب السوداء المتكوّنة من نجوم منفردة فهي أصغر بكثير، إلا أن حجمها الشديد الصغر لا يقلل من روعتها. فهي بمثابة مصدر الاضطراب المطلق للزمكان الذي نشغله، ولن نعاني نقصاً فيها لأنها تتشكّل من معظم النجوم التي تقع في نطاق يتراوح بين ٢٠ و ١٠٠ كتلة شمسية.

ما بين ١٠٠ و ٢٦٠ كتلة شمسية: مستعر أعظم غير مستقر الأزواج

في هذا النطاق من الكتلة، تصل درجة حرارة قلب النجم إلى مستويات عالية بعد احتراق الهيليوم لدرجة أنها تحوّل بعض الفوتونات إلى أزواج من الإلكترونات والبوزيترونات في عملية تسمى إنتاج الأزواج. البوزيترونات هي الجسيمات المضادة المكافئة للإلكترونات، مما يعني أن الإلكترون والبوزيترون يمكن أن يفنيا في شكل طاقة، أو على نحو مكافئ، يمكن أن تتشكل أزواج الإلكترون والبوزيترون من الطاقة. عند إنتاج الأزواج، يفقد الفوتون جزءاً من ضغطه أثناء اندفاعه إلى الخارج. ويؤدي فقدان الضغط المفاجئ إلى انهيار سريع للقلب، حيث تندفع الطبقات الخارجية إلى الأسفل متأثرة بقوة الجاذبية. في حالة النجوم التي تقل كتلتها عن ١٤٠ كتلة شمسية، ينتج سلوك نبضي، حيث تنفجر مجموعة من الطبقات وتندفع إلى الخارج. أما في حالة النجوم التي تزيد كتلتها على ١٤٠ كتلة شمسية (والأقل من ٢٦٠ كتلة شمسية)، فإن سحق المواد الناجم عن قوة الجاذبية يكون كافياً لينتج الاحتراق النووي السريع للأكسجين والسيليكون أثناء انهيار القلب انفجاراً يعطّل كيان النجم بأكمله. ينفجر النجم بأكمله، ولا يتبقى منه شيء، لا أثر على الإطلاق يدل على أنه كان موجوداً. وينفجر كل شيء في البيئة المحيطة به، بما في ذلك المعادن، مما يجعل هذه المستعرات العظمى غير مستقرة الأزواج موزعاً ممتازاً للمعادن التي تندفع نحو نجوم الجبهة الثانية. تعد هذه المستعرات العظمى غير مستقرة الأزواج من أكبر الانفجارات النووية الحرارية الموجودة في الكون. فهي تطلق ما يعادل ١٠ مليارات ضعف الطاقة التي تنتجها شمسنا على مدى دورة حياتها. وعلى الرغم من سطوعها، نعتقد أننا لن نرصد الكثير منها بسبب خفوت لمعانها عبر المسافات الشاسعة: ربما لا نكتشف إلا عدداً قليلاً منها خلال مسح مدته خمس سنوات.^{10,9}

أكثر من ٢٦٠ كتلة شمسية: الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر

تنتج هذه الكيانات، النظرية حاليًا، عن وجود سحابة غاز في المكان المناسب في الوقت المناسب. ففي حين أن معظم السحب تبرد عن طريق الهيدروجين الجزيئي وتشكّل نجومًا أولية، سيظل هناك بعض السحب التي لم تصل بعد إلى تلك المرحلة. في حال وجود مثل هذه السحابة بجوار موقع آخر لتشكّل النجوم، يمكن للإشعاع الصادر عن النجوم الجديدة أن يغمر السحابة، مما يؤدي إلى تفتت الهيدروجين الجزيئي. يفنى الهيدروجين الجزيئي داخل هذه الهالات المظلمة المجاورة، تاركًا السحابة غير قادرة على التبريد، مما يحافظ على قيمة كتلة جينز عالية ويوقف التشظي. ثم تنهار السحابة بأكملها في صورة نجم أولي ضخم. وبما أن التراكم يتناسب مع الكتلة، فإن السحابة تتراكم حتى تبلغ كتلتها كتلة شمسية واحدة سنويًا من الغاز المحيط بها وتنهار بسرعة لتشكل ثقبًا أسود تتراوح كتلته بين ١٠ آلاف و ١٠٠ ألف كتلة شمسية. عندما يتشكل الثقب الأسود، فإنه يحتفظ بحوالي ٩٠٪ من كتلة جينز التي انهارت، مما يعني أن كل السحابة تقريبًا تتحول إلى ثقب أسود. أجد هذه الفكرة مثيرة للاهتمام للغاية؛ لأننا كنا نعتقد دائمًا أنه للحصول على ثقب أسود فلا بد من وجود نجم أولًا، ولكن في هذا السيناريو تشكلت الثقوب السوداء الأولى والنجوم الأولى جنبًا إلى جنب. كما يُعتقد أنه تفاعل متسلسل، حيث تُنتج الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر إشعاعًا يفصل الهيدروجين الجزيئي في الهالات المجاورة، مما يتسبب في تكوّن المزيد من الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر. ويستمر هذا حوالي ١٥٠ مليون سنة إجمالاً،¹¹ حتى تطلق النجوم والثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر الكثير من الإشعاع لدرجة أن الغاز الذي يشكّل النجوم يفنى، ولا يعود بإمكانه تكوين نجوم أو ثقوب سوداء، حتى ينتج عن موت النجوم الأولى معادن للتبريد. وتماّمًا كما حدث في عملية رصد تلسكوب أفق الحدث، فإن أقراص التراكم حول الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر ستشير إلى وجودها، ولذا رأينا أنها أمرٌ يمكن أن يرصده تلسكوب جيمس ويب الفضائي.¹²

الثقوب السوداء ذات الوزن الزائد

نظرًا إلى كتلة النجوم الأولى الهائلة، من المرجح أن تنهي حياتها كمستعرات عظمى غير مستقرة الأزواج أو كثقوب سوداء ذات انهيار مباشر. تُعد هاتان الظاهرتان من أكثر

الظواهر سطوياً في السماء، ولذا كان من المقرر أن تكون لدى تلسكوب جيمس ويب الفضائي على الأقل فرصة لرصدهما. كما أنه يعمل على نحو متكامل مع علم الآثار النجمي: فمن خلال مراقبة موت النجوم الأولى وتصنيف عدد النجوم التي تقع في كل نطاق كتلة، يمكننا معرفة أعلى قيمة للكتلة في دالة الكتلة النجمية، التي لا يمكن وصول علم الآثار النجمي إليها بسبب الأعمار القصيرة.

تعد الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر موضوعاً يستحق الدراسة على وجه الخصوص؛ وذلك لأنها لا تمنحنا طريقة لاكتشاف أعلى قيمة للكتلة في دالة الكتلة النجمية فحسب، بل لأنها قد تساعدنا أيضاً في تفسير لغز أقرب إلى الأرض. توجد من حولنا أدلة على وجود ثقوب سوداء فائقة الضخامة في الكثير من المجرات، وبالعودة بالزمن إلى الوراء — كما تفعل أنت — سنجد أننا قد رأينا ثقوباً سوداء فائقة الضخامة تعود إلى ٦٩٠ مليون سنة فقط بعد الانفجار العظيم.¹³ لكننا لا نعرف كيف وصلت إلى هذا الحجم الفائق؟ الأمر أقرب إلى رؤية أحد أبناء إخوتك المراهقين أو بناتهم في مناسبات الأعياد والتعليق بقولك: «يا إلهي، لقد كبرت (كبرت) كثيراً!» تخيل لو أنهم ظهروا في عيد ميلادهم وكأنهم في الخمسين من العمر. في هذا العالم الغريب، عليك أن تعرف كيف نموا بسرعة كبيرة ليبدووا في منتصف العمر خلال ١٤ عاماً فقط. فليس هناك ما يكفي من الوقت لتراكم هذا العدد من التجاعيد.

فيما يتعلق بالثقوب السوداء، هناك حد لمقدار الكتلة التي يمكن أن تكتسبها. ومع اكتساب الثقب الأسود مزيداً من الكتلة، ينبعث مزيد من الإشعاع من قرص التراكم، مما يدفع المواد المتساقطة فيه بعيداً. وفي مرحلة ما، توازن قوة الطرد الإشعاعي قوة الجاذبية ويصل الثقب الأسود إلى الحد الأقصى للتراكم. يمكننا، على سبيل المثال، أخذ كتلة ثقب أسود من بقايا نجوم الجبهة الثالثة (تتراوح كتلته بين ١٠ كتل شمسية و ١٠٠ كتلة شمسية)، ونفترض أنه كان يتراكم عند الحد الأقصى طوال الوقت (على الرغم من أن هذا غير وارد إلى حد كبير؛ لأنه يتطلب إمدادات ثابتة من الغاز المستخدم في تكوين النجوم). وحتى في هذه الحالة، أيّاً كانت الطريقة التي تستخدمها لحساب الكتلة، فلن تتمكن من إيصال الثقب الأسود إلى الكتل التي نرصدها.¹⁴ ومن طرق الخروج من هذه المشكلة العويصة اقتراح أن الثقوب السوداء الفائقة الضخامة تنشأ عن الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر. فالثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر تتحائل على النظام، وتبدأ بكتلة أعلى بكثير: تتراوح بين ١٠ آلاف و ١٠٠ ألف كتلة شمسية. ويكون لدى هذه الثقوب السوداء وقت كافٍ لتجميع الغاز لتكوين الثقوب السوداء الفائقة الضخامة التي نرصدها،

مما يوفر حلًّا ممتازًا.¹⁵ يسلّط تلسكوب جيمس ويب الفضائي الضوء على هذا اللغز ويحسمه بشكل قاطع، من خلال السماح لنا بتحديد مدى انتشار الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر وحجمها. وعلى غرار النجوم الأولى، تعتبر الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر نوعًا بحد ذاتها. فهي لا يمكن أن تتشكّل إلا بعد أكثر من ١٥٠ مليون سنة أو ما يقرب من ذلك، ولذا فإنها نوع آخر مفقود قد يُعاد اكتشافه قريبًا، مثلها في ذلك مثل النجوم الأولى.

موجات الجاذبية

إن تلسكوب جيمس ويب الفضائي ليس التلسكوب الوحيد الذي يهدف إلى تسجيل موت النجوم الأولى. فهناك وجه آخر من أوجه التعاون الضخم بين العلماء، نتج عنه مرصد الموجات الثقالية بمقياس التداخل الليزري (يشار إليه اختصارًا بمرصد ليجو).¹⁶ ويشتمل المرصد على تجربتين: في ليفينجستون بولاية لويزيانا، وهانفورد بولاية واشنطن. تهدف كل تجربة إلى الكشف عن الموجات الثقالية (أي موجات الجاذبية)، والتموجات في الزمكان، الناجمة عن تصادم الأجسام الضخمة الثقيلة مثل النجوم النيوترونية والثقوب السوداء. في النسبية العامة لأينشتاين، تصدر الكتل موجات ثقالية عندما تتسارع. يصعب رصد هذه التموجات لأنها ضئيلة للغاية، ولا يصبح حجمها كبيرًا بما يكفي ليلتقطها مرصد مثل مرصد الموجات الثقالية بمقياس التداخل الليزري إلا عندما يدور جسمان ضخمان جدًّا، أحدهما حول الآخر، في اللحظات الأخيرة قبل الاصطدام. عندما تمر موجة ثقالية عبر جسم ما، فإنها تشوّهه. فهي تشوّه الزمكان، ولذا يمكنك أن تتخيل موجة تمدد الكرة في اتجاه واحد، ثم تمددها في الاتجاه الآخر أثناء مرورها عبرها. صُمّمت تجربتا مرصد الموجات الثقالية بمقياس التداخل الليزري لقياس هذا التشوه على طول ذراعين متعامدتين ومتماثلتين في الطول. يُرسل ضوء الليزر على طول الذراعين وينعكس على المرايا الموجودة في نهاية الذراعين. في حالة مرور موجة ثقالية، يختلف طول الذراعين، ويحدث تغيّر طفيف في نمط الضوء الناتج المنعكس. إن التقنية المطلوبة لفعل ذلك هي تقنية استثنائية؛ حيث تُعلق المرايا على أسلاك رفيعة في سُمك شعر الإنسان، وحتى الحركات البعيدة للقمر والشمس تتسبّب في تأرجح المرايا، ولذا لا بد من وجود مغناطيسات لإبقاء المرايا في مكانها.¹⁷

في ١٤ سبتمبر ٢٠١٥، رصدَ مرصد الأمواج الثقالية بمقياس التداخل الليزري إشارة من نظام ثنائي الثقب الأسود، وهو نظام يتكوّن من ثقبين أسودين يدور أحدهما حول الآخر، في اللحظات الأخيرة قبل اندماجهما.¹⁸ وأثناء دوران كلٍّ منهما حول الآخر مئات المرات في الثانية، بسرعة تقترب من سرعة الضوء، كانا يرسلان نمطًا مميزًا من موجات الجاذبية يسمى إشارة التغريد (لأنه يشبه تغريد العصافير). يصعب اكتشاف الموجات الثقالية؛ وذلك لأن الموجات لا تصل إلى الحجم الذي يكفي لقياسها إلا في آخر بضعة أجزاءٍ من الثانية من دوامة الثقب الأسود: يمثلّ تغير طول الذراع عرض البروتون. ولتكون متأكدًا من اكتشاف بهذا الصغر، عليك التحقق من صحة الاكتشاف. سجّلت تجربتنا هانفورد وليفينجستون الإشارة نفسها في أوقاتٍ مختلفة، لكن لم يكن ذلك إلا بسبب اختلاف موقعيهما على الأرض. ومع أخذ ذلك في الاعتبار، نجد أن الإشارتين قد وردتا في الوقت نفسه تمامًا؛ وبهذا تكون كلٌّ منهما قد أثبتت صحة الأخرى. كان الاندماج الذي اكتشفه مرصد الموجات الثقالية بمقياس التداخل الليزري لأول مرة اندماجًا نجميًا-نجميًا: فقد نشأ الثقبان الأسودان بالطريقة «المعتادة» لانهايار نجم تتراوح كتلته بين ٢٠ و ١٠٠ كتلة شمسية. ولأكتشاف الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر التي تعود إلى زمن الفجر الكوني، سنحتاج إلى ليزر أكبر. من المقرر إطلاق هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي في عام ٢٠٣٤، وهو عبارة عن مقياس تداخل فضائي من المنتظر أن يضم ثلاث مركبات فضائية منفصلة في شكل مثلث يبلغ عرضه ملايين الأميال.¹⁹ تكمن الفكرة في أن تردد بعض الموجات الثقالية منخفض جدًا لدرجة أن الأطوال الموجية أكبر من الأرض نفسها، ولذا علينا إجراء عمليات الرصد من مسافاتٍ أكبر. ومع مرور موجة ثقالية، ستتغير المسافات بين المركبات الفضائية تغيرًا طفيفًا. لكن نجاح هذه التجربة غير مضمون في حقيقة الأمر، لا أدري كيف ينال أي من علماء الفلك وهم في الفضاء، فعن نفسي سأكون في حالة من الذعر والترقب المستمرين.

من المرجح أن تكون النجوم الأولى قد أنهت حياتها كمستعراتٍ عظمى غير مستقرة الأزواج، أو ربما انهارت مباشرة في ثقب أسود في وقت مبكر من تكوين النجوم الأولية. هناك طريقتان واعدتان لإلقاء نظرة على الفجر الكوني، أو بالأحرى الغسق الكوني، حيث ظهرت النجوم الأولى للمرة الأخيرة. تعتمد الطريقة الأولى على تلسكوب قابل للطي يعمل بالأشعة تحت الحمراء على أمل رؤية المستعرات العظمى، في حين تنطوي الطريقة الثانية

على مثلث فضائي قد يرتعش عند مرور موجات ثقالية ناتجة عن تصادم الثقوب السوداء ذات الانهيار المباشر. وكلتاها تتطلبان دقة في التخطيط والاختبار، علاوة على التمويل اللازم لتنفيذ ذلك. كما أنهما من التجارب التي ستصيب علماء الفيزياء الفلكية بتوتر شديد عند انطلاقهما في الفضاء للشروع في رحلتهما الطويلة. لكن النجاحات الكبرى لا تأتي إلا بخوض المخاطر. فلو لم يكن هناك غلاف جوي للأرض، لكان بإمكانهم إلقاء نظرة أعمق على أركان الكون الصغيرة، وإمطة اللثام عن حالات الموت الأولى للنجوم، إن لم تكن النجوم الأولى نفسها. وحينها، كان الأمر سيبدو كما لو أن جميع أعياد الميلاد قد جاءت دفعة واحدة.

مراجع مفيدة

Bartusiak, M. 2015. *Black Hole*, Yale University Press, New Haven and London.

الفصل العاشر

عصر إعادة التّأين

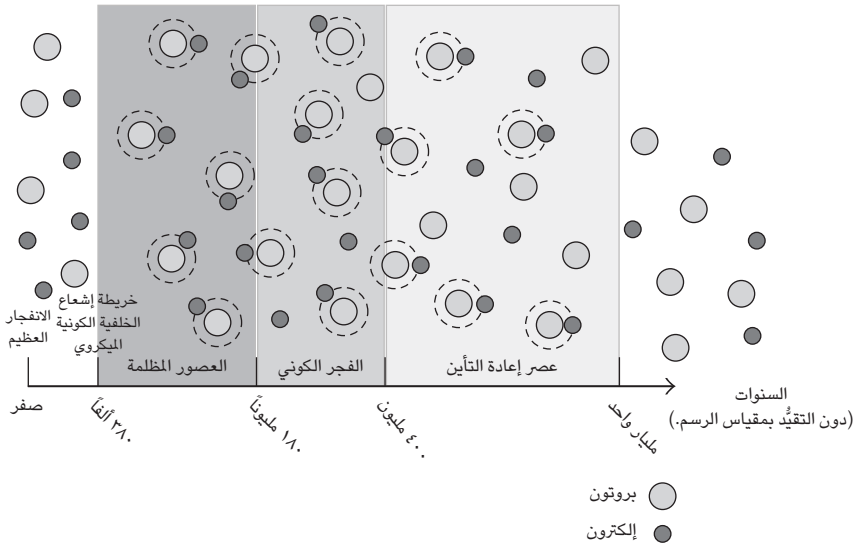
«ماذا عليك لو انتحلت اسمًا سواه؟ ما قيمة الأسماء؟ هل يتغير الزهر الذي ندعوه وردًا إذا دعوناه بأسماءٍ أُخر؟» (ترجمة أحمد باكثير). يعتبر هذا الاقتباس واحدًا من أشهر مقاطع مسرحية «روميو وجولييت» لويليام شكسبير، والتي ربما تعتبر من أشهر مسرحياته على الإطلاق. تتحسر جولييت على حقيقة أنها وقعت في حب شاب من عائلة مونتاجيو التي تحتقرها عائلتها آل كابوليت. وبينما كانت تقاوم مشاعرها، صاحت أن اسمه لا يعني شيئًا لها، ولو أنه كان يحمل أيّ اسم آخر غير مونتاجيو، لما كان حبهما ممنوعًا، أو «سيئ الطالع».

أتفهّم وجهة نظر جولييت. فهذا ما أشعر به تجاه عصر إعادة التّأين، وهو الموضوع البحثي الذي كرّست له حياتي. النجوم الأولى. والثقوب السوداء المخفية. والعودة بالزمن إلى الوراء. كل هذه الاحتمالات تبدو رائعة. ولذا، فإن حقيقة أنها جميعًا تقع تحت موضوع أشمل يسمى «عصر إعادة التّأين» يعد أمرًا مخيبًا للآمال. يا له من اسم رهيب حقًا. لقد استغرق الأمر مني عدة أشهر حتى أعتاد عليه، وثق بي عندما أقول إن أحدًا لن يحضر محاضراتك العامة إذا اتخذت هذا الاسم عنوانًا لموضوع المحاضرة. يمكنك تغيير العنوان إلى «العصور المظلمة في حياة الكون والنجوم الأولى»، ولن تخسر شيئًا. والجملة هنا مجازية. ففي بداية مسيرتي المهنية، كان أقصى ما كنت أنقاضاه مقابل محاضرة عامة واحدة هو كعكة محلّة، وكنت أشعر بالامتنان لذلك.

إعادة التّأين

لقد قطعنا شوطًا طويلًا في بحثنا عن النجوم الأولى. وقد ألقينا نظرة قريبة باستخدام علم الآثار النجمي، ونظرة بعيدة، عند الاستفادة من إمكانات تلسكوب جيمس ويب

الفضائي واختبارها إلى أقصى درجة. وبينما ننتظر تحقيق المزيد من النجاحات في هذه المجالات، يمكننا مواصلة البحث عن أدلة مشابهة لنتيجة تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. ففي هذه التجربة أشار ارتفاع درجة حرارة غاز الهيدروجين الأولي المنتشر في الكون إلى تكوّن النجوم الأولى: الفجر الكوني. ونطبق هذه الفكرة حاليًا على حقبة لاحقة ونستخدم نفس آلية النجوم الأولى في تسخين الهيدروجين، ومن ثَمَّ تأيُّنه، للاستدلال على وجودها وخصائصها. هناك ثلاث حقبة تحدد تكوّن النجوم الأولى وعمرها: العصور المظلمة، والفجر الكوني، وعصر إعادة التأين. تبدأ العصور المظلمة عندما يندمج الغاز لتشكيل النجوم الأولى؛ أما الفجر الكوني فيبدأ عندما تستحث بعض تلك السحب الاندماج، وتحوّل من تلقاء نفسها إلى نجوم أولى؛ وأخيرًا يحدث عصر إعادة التأين عندما تسخّن النجوم الأولى (والثقوب السوداء والمجرات) الكون وتؤيِّنه.



شكل ١٠-١: على مر الزمن، تغيّر الهيدروجين المنتشر في الكون من متأين إلى متعادل، وبفضل المجرات والنجوم الأولى، عاد إلى متأين مرة أخرى.

بعد الانفجار العظيم، أصبح الكون ساخنًا. وصار مليئًا بالبروتونات والفوتونات والإلكترونات المنفردة المتصادمة، ومن ثَمَّ لم يكن أي شيءٍ مستقرًا. ومع توسّع الكون

وانخفاض درجة حرارته، انضمت الإلكترونات إلى البروتونات المنجرفة، لتكوّن ذرات الهيدروجين. وأصبحت الفوتونات قادرة على التنقل دون عوائق. ومن ثمّ أصبح الكون شفافاً أمام الفوتونات، وأنتج ما يمكننا رصده بأدوات القياس الحالية على أنه إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وإمعاناً في التوضيح، أتخيل صالة ركاب في محطة قطار أو ساحة مليئة بالبالغين (البروتونات) وأطفالهم المفرطي النشاط (الإلكترونات) وهم يركضون في كل الاتجاهات. كمتفرج، يكاد يكون من المستحيل لك (باعتبارك فوتوناً) أن تشق طريقك في خط مستقيم وصولاً إلى الجانب الآخر، دون تفادي الآخرين أو تحويل مسارك. ولكن، عندما يتولى الكبار زمام الأمور ويمسكون بيد كل طفل، يصبح من الأسهل بكثير المرور دون انحراف. كان الكون مليئاً بالغاز الأولي، الذي يتكوّن في الغالب من ذرات الهيدروجين، بعد ٣٨٠ ألف سنة من الانفجار العظيم. عندما تكون الذرات في حالة تتوازن فيها الشحنات الكهربائية للجسيمات (سالبة للإلكترونات، موجبة للبروتونات)، حينها تكون الذرات متعادلة. الشحنة الكهربائية لذرة الهيدروجين متوازنة، وتتكون من بروتون واحد موجب الشحنة وإلكترون واحد سالب الشحنة. كان الكون المبكر مليئاً بالهيدروجين المتعادل. وعلى مدى بضع مئات الملايين من السنين فقط، كان هذا الهيدروجين يندمج لتشكيل النجوم الأولى أو يتأين، أي يعود إلى مكوناته الأساسية من إلكترونات وبروتونات منفصلة. ونطلق على هذا التغيّر في حالة الهيدروجين الكوني، من متعادل إلى متأين، اسم عصر إعادة التأين، حيث يعود إلى الشكل الذي كان عليه في البداية وقت الانفجار العظيم. تشير كلمة «إعادة» في مصطلح إعادة التأين إلى حالة التأين السحيقة في أقدم العصور، عقب الانفجار العظيم مباشرة.

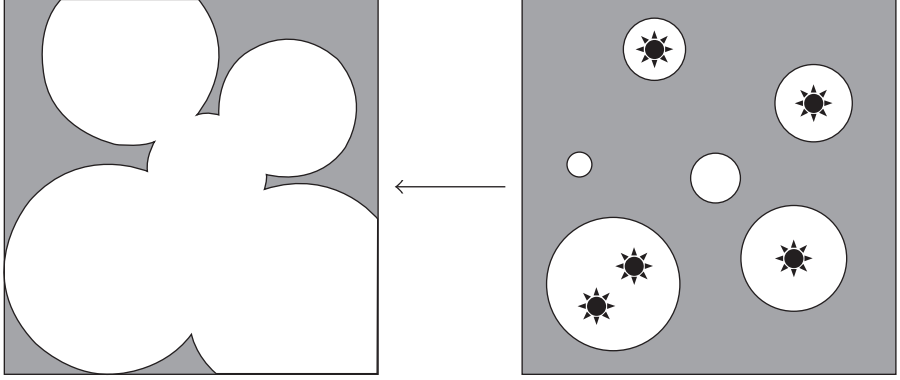
بدأ عصر إعادة التأين أيضاً عندما بدأ الكون في تكوين النجوم والمجرات. لقد كانت المجرات والثقوب السوداء والنجوم الأولى التي وجدت في كوننا هي المسؤولة عن تغيير ذلك الغاز المحيط. يمكننا قلب ذلك رأساً على عقب، والتساؤل عما إذا كان بإمكاننا استخدام الغاز لتقديم نظرة ثاقبة حول تلك الأجرام الأولى. كان عصر إعادة التأين حقبة مليئة بالأحداث. وبحلول نهاية هذه الحقبة، كانت النجوم الأولى قد ماتت، وتشكّلت المجرات الأولى، وكانت الثقوب السوداء الأولى تزداد ضخامة. ومن خلال اكتشاف تسخين النجوم الأولى للهيدروجين، مثلت عملية رصد الفجر الكوني من خلال تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي مرحلة إحماء (بكل ما تحمله الكلمة من معنى) لحدث رئيسي أكثر تعقيداً. حان الوقت لأن أكف عن الاختباء وراء العناوين الأخرى خشية نفور الجمهور،

وأن أقدم بكل فخر ما يمكن أن يسهم به هذا العصر في تطوير فهمنا للضوء الأول. ولذا، مرحباً بكم جميعاً في عصر إعادة التأين.

تزايد الفقاعات واندماجها

على الرغم من أن الذرات تتكوّن من أجزاءٍ منفصلة، وهي الإلكترونات والبروتونات وربما النيوترونات، فهي ليست بالأجزاء التي تميل إلى أن تتفكك بمجرد تكوينها. ويتطلب ذلك توفير طاقة، تشبه تلك الطاقة اللازمة لفصل مغناطيسين قويين أحدهما عن الآخر. فالمغناطيسان لن يتحركا إذا استخدمت قدرًا ضئيلاً من الطاقة. لكن، عند توفير مزيد من الطاقة، سينفصل المغناطيسان. يتطلب ذلك توفير كمياتٍ مختلفة من الطاقة لإزالة إلكترونات مختلفة في ذرات مختلفة، وإن كانت متطلبات الطاقة هذه لا تختلف في حالة وجود ذرات من نوع واحد، مثل الهيدروجين. في حالة الهيدروجين، يستلزم الأمر طاقة قدرها ١٣,٦ إلكترون فولت، أو ٢,٠٠٠,٠٠٠,٠٠٠ جول، لفصل هذا الإلكترون المنفرد عن البروتون شريكه الوحيد، مما يؤدي إلى تأينه. إذا رجعنا مرة أخرى إلى الطيف الكهرومغناطيسي، فإن الفوتونات ذات الأطوال الموجية الخاصة بالأشعة فوق البنفسجية والأطوال الموجية الأقصر هي الوحيدة التي تتمتع بطاقاتٍ مكافئة لتأين ذرة هيدروجين. إنها طاقة صغيرة للغاية. يمكنني تأييد مائة مليار تريليون ذرة هيدروجين باستخدام الطاقة الموجودة في لوح واحد من شوكولاتة «مارس» الشهيرة. لكن الكون ضخم، وهناك الكثير من ذرات الهيدروجين اللازم تأيينها. ولا بد أن تأتي هذه الفوتونات من مكان ما، وكانت النجوم الأولى مراكز فعالة لإنتاج الفوتونات.

في البداية، يوجد الكثير من الهيدروجين المتعادل المحيط بالنجم لدرجة أن جميع فوتونات الأشعة فوق البنفسجية تُستخدم في تأين الهيدروجين المتعادل الموجود في المنطقة المجاورة مباشرة، في فقاعة صغيرة. عندما يتأين هذا الهيدروجين، يمكن لفوتونات الأشعة فوق البنفسجية أن تنتقل لمسافة أبعد قبل أن تصطدم بذرة هيدروجين متعادلة، وبهذه الطريقة تتأين تدريجياً أغلفة كروية أكبر فأكبر. وبمرور الوقت، تتشكل فقاعات من الهيدروجين المتأين حول كل مصدر تأين. ويُستدل بهذه الفقاعات على وجود النجوم الأولى؛ لكونها أكبر من النجوم نفسها وأكثر قابلية للرصد. تميل الفوتونات المنبعثة من النجوم الأولى إلى البقاء بالقرب منها، مما يؤدي إلى تأين ذرات الهيدروجين الموجودة بالجوار. وهذا يخلق فقاعاتٍ كروية مدمجة لطيفة. ونظرًا إلى ظهورها في مجموعة كبيرة من ذرات الهيدروجين المتعادل، نطلق على هذه الظاهرة اسم «نموذج الجبن السويسري».



شكل ١٠-٢: نموذج الجبن السويسري. حول كل نجم أول، تتأين فقاعة من الهيدروجين المتعادل. وبمرور الوقت، تصبح هذه الفقاعات أكبر فأكبر، وتتداخل بعضها مع بعض في النهاية.

مصادر الفوتونات: النجوم الأولى

يمثل عصر إعادة التأين ساحة معركة بين تفتيت ذرات الهيدروجين بواسطة الفوتونات، فيما يُعرف بعملية التأين، وإعادة تكوين ذرات الهيدروجين، أي إعادة تركيبها. تخيل أنك في غرفة الأطفال الصغار مجدداً، حيث نصفهم عازمون على بناء الأبراج والنصف الآخر عازمون على تحطيمها. تشع النجوم الأولى الكثير من الأشعة فوق البنفسجية ... حوالي 10^{10} (أي ١ متبوعاً بـ ٥٠ صفراً) فوتوناً في الثانية،¹ مما يؤدي إلى تأين عدد هائل من ذرات الهيدروجين، بافتراض أنك يلزمك فوتون واحد لكل ذرة هيدروجين لتأيينها. ولكن بمجرد تأين الذرة، يمكن للإلكترون والبروتون، وليس بالضرورة أن يكونا نفس الإلكترون والبروتون، أن يجد أحدهما الآخر ويعيدا تشكيل ذرة هيدروجين متعادلة. يتطلب الحفاظ على حالة إعادة التأين إمداداً مستمراً من فوتونات التأين الجديدة. لم يكن ذلك الأمر يمثل مشكلة في المائة مليون سنة الأولى، أو نحو ذلك، من عصر إعادة التأين، ولكن مع موت النجوم الأولى، أغلقت مصانع الفوتونات أبوابها. لم تشكل نجوم الجمهرة الثالثة في هالاتها الصغيرة التي تتكون من المادة المظلمة مجرات بسبب ميلها إلى تفجير نفسها مع كل مستعر أعظم. وعند حساب عدد الفوتونات المؤينة التي أطلقتها هذه النجوم الأولى خلال دورة حياتها، ستجد أن هذا العدد ببساطة لا يكفي لتأين كل الهيدروجين الموجود. أشارت بعض عمليات المحاكاة إلى أن مساهمة نجوم الجمهرة الثالثة

في إعادة التأين كانت ضئيلة، في حين وجدت عمليات محاكاة أخرى أنها ربما أعادت تأين ما يصل إلى ٢٠٪ من الهيدروجين، مما يوفر أساساً قوياً يمكن البناء عليه.² بغض النظر عما إذا كنت متفائلاً أو متشائماً، من الواضح بناءً على دراسة عمليات المحاكاة أنه يتعين علينا البحث عن مصادر تأين أخرى وليس نجوم الجبهة الثالثة وحدها.

مصادر الفوتونات: الكوازارات (النجوم الزائفة)

ماذا أيضاً كان يحدث في الكون المبكر؟ شكّلت بعض نجوم الجبهة الثالثة ثقوباً سوداء عند وفاتها. تزداد كتلة الثقوب السوداء عن طريق تراكم الغاز والمادة العادية الأخرى، وعندما تجذب هذه المادة نحوها، تتكوّن المادة قرص تراكم من مواد متحركة تظل تقترب من الثقب الأسود حتى تنجذب داخله. يشبه هذا إلى حد كبير الطريقة التي تسير بها إبرة مشغل الأسطوانات فوق الأسطوانة، حيث تتبع حركة لولبية خفيفة تتجه إلى الداخل. عندما تقترب المواد من الثقب الأسود، ترتفع درجة حرارتها بسبب المجالات المغناطيسية القوية والاحتكاك داخل قرص التراكم، وتنبعث منها إشعاعات، كما يحدث مع أي شيء حال تسخينه. نطلق على نظام الثقب الأسود وقرص التراكم المتوهج اسم «كوازار». تنبعث بقوة من أقراص التراكم أشعة سينية، وهي تحتوي على نوع من الفوتونات يتمتع بقدر من الطاقة يفوق الأشعة فوق البنفسجية. تتسم هذه الفوتونات بأن لديها طاقة كافية لتأين ذرات الهيدروجين أيضاً، ولكن على عكس فوتونات الأشعة فوق البنفسجية، لديها أيضاً طاقة كافية للانطلاق في اتجاهات عشوائية والتحرك لمسافة طويلة قبل أن تصطدم بذرة هيدروجين. ومع إعادة تأين الأشعة السينية، نفقد بنية الجبن السويسري. وبدلاً من وجود فقاعات كروية متأينة بالكامل في بحر من الهيدروجين المتعادل، نحصل على فقاعات كبيرة متأينة جزئياً وإعادة تأين أكثر انتظاماً وسرعة. في عمليات المحاكاة، إذا زاد مقدار الأشعة السينية المنبعثة في الكون المبكر، ينتج عن ذلك فقاعات غير واضحة المعالم وإعادة تأين أسرع بشكل عام.³ حتى وقت قريب، كان يُعتقد أن عدد الكوازارات في المراحل الأولى من الكون يتناقص كلما رجعنا بالزمن إلى الوراء لمسافة أبعد.⁴ ومن ثمّ، كان يُعتقد أن مساهمتها في إعادة التأين صغيرة نسبياً. تشير عمليات الرصد الحديثة للكوازارات الخافتة في نهاية عصر إعادة التأين إلى أنه ربما كان هناك العديد من الكوازارات في الكون المبكر أكثر مما كان يعتقد في الأصل.⁵ ومع تزايد الأعداد الموجودة، تمكّنت هذه الكوازارات من تولي مسئولية الحفاظ على الهيدروجين في حالة متأينة في المراحل النهائية،

عندما كانت جُزر الهيدروجين المتعادل النادرة تقف صامدة في وجه هجمات الفوتونات المؤينة. حتى إن البعض ذهب إلى أن هذه الكوازارات كانت كافية وحدها لإعادة تأين الهيدروجين، حيث كانت مساهمة النجوم تشكّل نسبة ضئيلة.⁶ علاوة على ذلك، لا تُنتج الأشعة السينية عن طريق الكوازارات فقط. فقد تطوّر فهمنا للنجوم الأولى من اعتبارها نجومًا منفردة معزولة، إلى اكتشاف أن قدرًا كبيرًا من النجوم ربما يكون قد تشكّل في صورة ثنائيات،⁷ أو حتى كمجموعات. في نظام الثنائيات، يمكن لقوى الجاذبية المؤثرة أن تتسبب في تراكم المادة على أحد النجمين من النجم الآخر. عند حدوث ذلك الأمر، يشكّلان ما نسميه ثنائي الأشعة السينية، وقد سُمي بهذا الاسم لأن النجمين يصدران أشعة سينية أثناء العملية. وقد أظهرت إحدى عمليات المحاكاة على الأقل أن الأشعة السينية ربما كان لها في الواقع دور يضاھي أو يتجاوز دور انبعاثات الأشعة فوق البنفسجية من نجوم الجوهرة الثالثة،⁸ في المراحل المبكرة جدًّا من عصر إعادة التأين. بشكل عام، تظل مساهمة مصادر الأشعة السينية في إعادة التأين غير مؤكّدة. وعلى الرغم من تجدد الاهتمام بمصادر الأشعة السينية أثناء عصر إعادة التأين في الفترة الأخيرة، فإن معظم عمليات المحاكاة تشير إلى وجود مصدر تأين ثالث يلعب الدور الرئيسي.

مصادر الفوتونات: المجرات

مع تشكّل نجوم الجوهرة الثالثة وموتها، واستقرار الغاز، تشكّل الجيل الثاني من النجوم، في هالات أكبر من المادة المظلمة المدمجة. هالات التبريد الذرية هذه هي المجرات الأولى، التي كانت تتميز بصغر الحجم وتحتوي تكويناتٍ من نجوم الجوهرة الثانية أبرد وأكثر تفتتًا. وكانت نجوم الجوهرة الثانية تحتوي على نسبة معادن أعلى، وتتسم بأنها ذات عمر أطول، وكتلة أصغر، وكانت تنبعث منها فوتونات الأشعة فوق البنفسجية، وإن كان بمعدل أقل من أسلافها. في الغالبية العظمى من عمليات المحاكاة، يبدو أن الفوتونات المنبعثة من نجوم الجيل الثاني، ومن المجرة ككل، لعبت دورًا فعالًا في تحفيز عملية إعادة التأين، مما أدى إلى تجاوز معدل إعادة التركيب وتوسيع نطاق الفقاعات المتأينة وتداخلها، الأمر الذي نتج عنه كون مُعاد تأيينه بالكامل. يمكننا الحصول على بعض الأفكار حول عملية إعادة التأين هذه التي تقودها المجرات من خلال اكتشاف المجرات التي كانت موجودة أثناء عصر إعادة التأين. رصد حقل هابل الفائق العمق (انظر الصورة ١٧ في ملحق الصور) ضوءًا صادرًا من مجرات كانت موجودة منذ ٨٠٠ مليون سنة بعد الانفجار العظيم،

وهو نفسه الوقت الذي نعتقد أن عصر إعادة التأين قد حدث فيه. ومن خلال تقييد الوفرة واللمعان والخصائص الطيفية لهذه المجرات المبكرة، تمكّن باحثو تلسكوب هابل من اكتشاف أن هذه المجموعة التي يمكن رصدها لا يمكنها إعادة تأين الكون بمفردها. فهاابل، مثل أي تلسكوب آخر، لديه قيود على ما يمكنه رصده. ولذا، من المفترض وجود مجموعة من المجرات الخافتة، مثل المجرات القزمة، غير مرئية لهاابل، وهي التي قادت الجزء الأكبر من عملية إعادة التأين.⁹

من المحتمل أن تكون المجرات القزمة هي المحرك الأساسي لإعادة التأين، وإن كانت لا تزال هناك شكوك بشأن هذا الأمر. حتى إن دور المادة المظلمة عاود الظهور مجدداً. إن فناء المادة المظلمة (العملية التي يتفاعل من خلالها جسيمان ويفنيان، تاركين وراءهما مجموعة من الجسيمات الأخرى) بإمكانه نظرياً تسخين الغاز وتأيينه داخل الهالات الصغيرة للمادة المظلمة قبل فترة طويلة من تكوّن النجوم الأولى.¹⁰ ومع أننا نرى أن إجمالي إنتاج الفوتونات المؤينة منخفض نسبياً،¹¹ يمكن أن يحول تأثير التسخين دون تفتت الغاز إلى نجوم، مما يؤخر تكوين النجوم والمجرات، ويزيد من الحد الأدنى للكتلة التي يمكن أن تتشكل عندها النجوم.¹² وقد يكون للمادة المظلمة تأثير بسيط على الكيفية التي ستسير بها عملية إعادة التأين، بصرف النظر عن التفاعلات المذهلة التي اقترحتها تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي.

يوجد الكثير من النماذج المختلفة فيما يخص عدد النجوم الأولى والثقوب السوداء، ومقدار الإشعاع الذي تنتجه، ومدة بقائها. والحقيقة هي أن كل هذه الظواهر بالطبع قدمت مساهمات مختلفة في أوقات مختلفة. أحد النماذج الأكثر استحساناً من وجهة نظري ما ساهمت به نجوم الجبهة الثالثة بدرجة بسيطة في التأين المسبق للكون قبل أن تسرع المجرات الأولى العملية، حيث كانت تلك النجوم الأولى قد ماتت. وعلى الرغم من محاولات الكون لمقاومة ذلك من خلال عمليات إعادة التركيب وجُز الهيدروجين المتعادل، كانت تلك الكوازارات التي تشكّلت حديثاً وإشعاع الأشعة السينية البعيد المدى الخاص بها كافيين لإتمام المهمة بأكملها. لكن هذه مجرد نظرية واحدة.

تضييق نطاق الاحتمالات المتعلقة بعصر إعادة التأين

اكتشفتُ الآن وجود فأر في منزلي. لم أره بعيني، لكنني أعلم بوجوده. في عيد الميلاد، قدّمتُ لزوجي شوكولاتة على شكل سانتا كلوز، إلا أنني اكتشفتُ أن آثار تمزق صغيرة

على الغلاف، والشوكولاتة التي بداخله مقروضة. كانت علامات الأسنان الصغيرة دليلاً في حد ذاتها، ولكنه لم يكن دليلاً قاطعاً نظراً إلى وجود ثلاثة أطفال صغار في المنزل. لكن، كان هناك مزيد من الأدلة في الجزء السفلي من الكيس: فضلات فأر. وهكذا حُسم الأمر. إن التوصل إلى استنتاجاتٍ أو إطلاق أحكام استناداً إلى أدلة هو أمرٌ بديهي للغاية لدرجة أن أي احتمال آخر يبدو سخيّاً في الوقت الحاضر. هناك الكثير من الاحتمالات المميزة لشكل هذه الفقاعات المتأينة وكيفية تطورها واتساع نطاقها، ونحن بحاجة إلى تضيق نطاق الاحتمالات في ضوء الأدلة المتوفرة. إن الأمر أشبه بحل طلسم قضية قتل كلاسيكية، ولكن بدلاً من أن يكون السؤال المطروح هو «مَن الجاني؟» فإنه هنا «ما السبب؟». هناك شيء ما أدى إلى تأين الهيدروجين في الكون، ولكن ما هو؟ نحن بحاجة إلى مزيد من البيانات لتضييق نطاق نماذجنا العديدة.

العامل الأول: إشعاع الخلفية الكونية الميكروي

يمكننا تضيق نطاق المدة التي استغرقها عصر إعادة التأين باستخدام إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. يتألف إشعاع الخلفية الكونية الميكروي من الفوتونات المتبقية من الانفجار العظيم. بعد حوالي ٣٨٠ ألف سنة من الانفجار العظيم، أصبح بإمكانها فجأة التحرك بحرية عبر الكون حيث انخفضت درجة الحرارة بدرجة كافية، وأصبح تكوين الهيدروجين المتعادل ممكناً، وأصبحت التصادمات نادرة. في مسيرة انتقال الفوتونات نحونا، تغيّرت طاقة الفوتونات أثناء مقاومتها تمدد الكون، مما أدى إلى حدوث اختلافاتٍ متوقعة في درجات الحرارة، أكدتها عمليات رصد بنزياس وويلسون، وبعثاتٌ لاحقة مثل بعثة مستكشف الخلفية الكونية، ومِسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي وتلسكوب بلانك. بإمكان مِسبار ويلكنسون لقياس التباين الميكروي، وخليفته بلانك، رسم خرائط لإشعاعات الخلفية الكونية الميكروية في السماء بأكملها، وتوضح هذه الخرائط الانحرافات الصغيرة في درجة الحرارة الإجمالية. يعتمد شكل هذه الانحرافات وحجمها على عدد من العوامل الكونية مثل كمية المادة المظلمة الموجودة، ومدى تناثر الفوتونات بفعل الإلكترونات الحرة في مسار رحلاتها نحونا. يحظى هذا العامل الأخير بأهمية قصوى لدينا، حيث إن عصر إعادة التأين ليس إلا مصنّعاً ضخماً للإلكترونات الحرة. يمكننا الحصول على قياس لمدى تناثر الفوتونات من خلال النظر إلى الأشكال والأنماط التي تظهر بها في الخريطة.

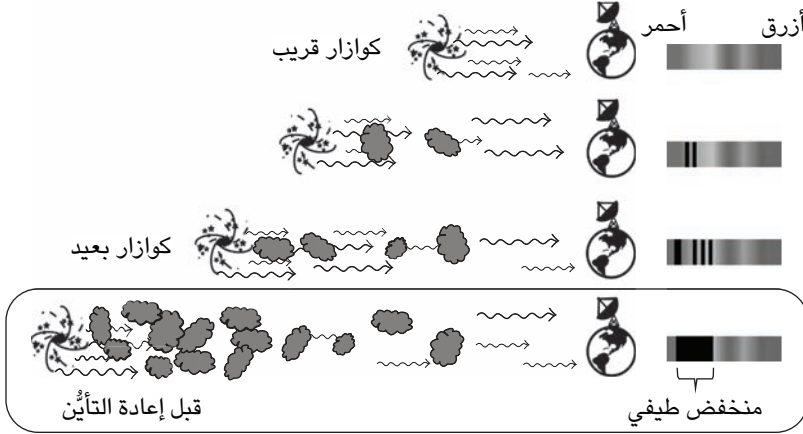
تخيّل فوتوناً يشق طريقه نحونا. إذا كان الكون مليئاً بالهيدروجين المتعادل لفترة طويلة، فلن تكون هناك إلكترونات حرة يمكن الاصطدام بها حتى أوقات لاحقة. ومن ثمّ، يتأخّر حدوث إعادة التأيّن في مثل هذا الكون. ولكن على النقيض من ذلك، في الكون الذي يحدث فيه عصر إعادة التأيّن سريعاً، أو في مراحل مبكرة جدّاً من نشأة الكون، هناك متسع من الوقت للاصطدام مع الإلكترونات الحرة، مما يؤدي إلى حدوث تغيير ملحوظ في خريطة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. يمكننا محاكاة شكل خريطة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي في حالة وجود سيناريوهات مختلفة لإعادة التأيّن، ثم مقارنتها بعمليات الرصد. ووفقاً لعمليات الرصد باستخدام تلسكوب بلانك، يتطابق إشعاع الخلفية الكونية الميكروي مع النماذج التي استغرق فيها الهيدروجين المتعادل ٥٠٠ مليون سنة فقط ليتأين تأيّنًا كاملاً. فقد كانت عملية إعادة التأيّن سريعة.

العامل الثاني: أطيف الكوازارات

يمكننا تحديد موعد انتهاء عصر إعادة التأيّن من خلال النظر إلى الإشعاع المنبعث من الكوازارات. تصدر الكوازارات إشعاعاً يغطي نطاقاً كبيراً من الأطوال الموجية ضمن الطيف الكهرومغناطيسي. تخيّل أن الكوازار أصبح الآن على مسافة قريبة من كوننا الشديد التأيّن. يمكن للإشعاع الصادر من الكوازار أن يصل إلينا دون عوائق، حيث لا توجد ذرات هيدروجين تمتص الفوتونات. وبهذا يمكننا رصد الطيف الكامل المنبعث. تخيّل الآن أن الكوازار على مسافة بعيدة جدّاً، وأن الضوء الذي نراه كان أقدم بكثير وكان عليه أن يسافر عبر كون مختلف تماماً، كون مليءً بالهيدروجين المتعادل أثناء عصر إعادة التأيّن أو قبله. يعتبر الهيدروجين المتعادل ماصّاً ممتازاً للفوتونات؛ ينتج عن ذلك خط امتصاص، أو انخفاض طفيف في الطيف، حيث يمتص الهيدروجين الفوتونات عند طول موجي معين. كلما ابتعد الكوازار، طالت مدة مقاومة فوتوناته للهيدروجين المتعادل. تفقد هذه الفوتونات الطاقة أثناء انتقالها، وبالتالي فإن ما كان في الأصل فوتونات عالية الطاقة أصبح الآن يتمتع بطاقة/طول موجي يتوافق مع مستويات الطاقة لذرة هيدروجين. وتمتص ذرات الهيدروجين كل الفوتونات التي تمتلك ذلك المستوى من الطاقة، وينتج عن ذلك خط امتصاص آخر. كلما زادت نسبة تعادل الهيدروجين التي تواجه الفوتونات في طريقها إلينا، ظهرت خطوط امتصاص أكثر على طول الطيف، وينتج عن ذلك ظهور

عصر إعادة التأين

منطقة منخفضة الكثافة الطيفية عند اندماج خطوط الامتصاص، ويمكننا الإشارة إليها باسم المنخفض الطيفي.



شكل ١٠-٣: يُصدر الكوازار إشعاعًا عبر مجموعة كبيرة من الأطوال الموجية. عندما يواجه الضوء سحابة هيدروجين متعادل، يمتص الهيدروجين المتعادل الفوتونات، وينتج عن ذلك خط امتصاص. يمكن للمنخفض الطيفي الناتج عن الاندماج التام لخطوط الامتصاص أن يمدنا بمعلوماتٍ عن حالة تأين الكون.

عند رصد أطياف الكوازارات، نجد عمومًا أن المنخفضات الطيفية المتكوّنة عن الاندماج التام لخطوط الامتصاص تكون أكبر في الكوازارات قبل إعادة التأين أو خلالها؛ وذلك لأن الفوتونات تصادف هنا المزيد من سحب الهيدروجين المتعادل، مما يعني وجود المزيد من خطوط الامتصاص. هناك تغير سريع في تكوّن المنخفضات الطيفية، مما يشير إلى حدوث تغير مفاجئ في محتوى الهيدروجين المتعادل في الكون. ويشير ذلك إلى أن الكون قد تأين بسرعة بعد حوالي مليار سنة من الانفجار العظيم. ومن الواضح أيضًا أن بيئة الكوازارات ليست واحدة. فبعضها لديه منخفضات طيفية محددة المعالم ومنظمة، في حين أن البعض الآخر لديه منخفضات طيفية غير محددة المعالم وغير منتظمة رغم أنها رُصدت على مسافاتٍ متساوية أو في أوقات متماثلة، مما يشير إلى وجود نسبة أقل من الهيدروجين المتعادل في ذلك الوقت في مكان بعينه. وهذا معناه أن عملية إعادة التأين لم تحدث بقدر متساوٍ. ومن المتوقع ألا تنصرف النجوم الأولى والثقوب السوداء بطريقة

متزامنة عبر الكون العملاق. ففي بعض أجزاء الكون كانت إعادة التأين سريعة، بينما كانت أبطأ في أجزاء أخرى. يوضح لنا نمط الشبكة الأساسي الذي نسجته المادة المظلمة أن هناك مناطق عالية الكثافة تشكل فيها الكثير من المجرات، وهناك أيضاً مناطق فارغة منخفضة الكثافة. ولا عجب أن عملية إعادة التأين تسير وفق هذا المبدأ، حيث تتأين المناطق العالية الكثافة أولاً، تليها بعد ذلك المناطق المنخفضة الكثافة.

نحن نعلم من بيانات إشعاع الخلفية الكونية الميكروني أن إعادة التأين كانت سريعة، حيث استغرقت حوالي ٥٠٠ مليون سنة فقط. ونعلم من بيانات الكوازارات أن عصر إعادة التأين قد انتهى بعد مليار سنة من الانفجار العظيم. ونعلم من بيانات هابل أن المجرات الكبيرة لا يمكن أن تكون وحدها المسؤولة عن تأين الكون. توفر هذه البيانات عوامل قيمة لتضييق نطاق الاحتمالات في نماذج المحاكاة العديدة المتوفرة لدينا، التي تحتوي جميعها على عناصر مختلفة: نجوم الجوهرة الثالثة، وثنائيات الأشعة السينية، والمادة المظلمة الفانية، والكوازارات. إن رصد الفقاعات نفسها سيوفر العامل الأكثر قيمة في تضييق نطاق الاحتمالات، ويكشف لنا خصائص جميع مصادر التأين هذه.

تمثل فقاعات الهيدروجين المتأين دليلاً على وجود النجوم الأولى. كان شيرلوك هولمز معتاداً على استخدام عدسته المكبرة الموثوق بها لفحص الأدلة عن كذب، والكشف عن أدق التفاصيل التي قد تميظ اللثام عن هوية الجاني. لا توجد لدينا عدسة مكبرة، أعني تلسكوباً بصرياً كبيراً بما يكفي للنظر بعيداً بما فيه الكفاية. وحتى لو كان لدينا تلسكوب بهذه المواصفات، فلن يكون ذا فائدة كبيرة عندما يكون الهيدروجين هو ما نحاول رصده وتتبعه. لقد ذكرنا الهيدروجين كثيراً حتى الآن: فهو العنصر الأكثر شيوعاً في الكون (إذا نحينا المادة المظلمة جانباً)، وهو المكوّن الرئيسي للنجوم، الذي يغذي الاندماج ويوفر الحرارة والضوء. ومن المنطقي جداً أن يكون مفتاح اكتشاف النجوم الأولى هو الهيدروجين أيضاً، فالهيدروجين المتبقي المحيط بالنجوم الأولى يمنحنا نظرة ثاقبة حول هذا العصر بفضل التكنولوجيا المتوفرة لدينا الآن. ربما نكون قد تمكّننا من معرفة تأثير النجوم الأولى على الهيدروجين المحيط، لكن كيف يساعدنا ذلك في اكتشافها؟ ففي نهاية المطاف، يمكنني التقاط صورة للهيدروجين على الأرض ولكن لن يظهر فيها أي شيء؛ لأن الهيدروجين غير مرئي. أو بمعنى أصح أطواله الموجية الضوئية غير مرئية. فالضوء عبارة عن طيف، وفي الأطوال الموجية الراديوية، يضيء الهيدروجين مثل شجرة عيد الميلاد.

علم الفلك الراديوي

يُعرف عن هذا الموضوع أنه يمثل تحديًا أكبر مقارنةً بمجالات علم الفلك الأخرى. لنأخذ مثالًا على ذلك تلسكوب هابل الفضائي، وهو على الأرجح أشهر تجربة معاصرة في مجال الفيزياء الفلكية. فهو تلسكوب براق ولامع، علاوةً على وجوده في الفضاء. إنه يشبه الطفل النشيط في المدرسة، الذي يجذب انتباه الآخرين واهتمامهم بكل سهولة. وهذا صحيح تمامًا، فهو إنجاز رائع في مجال الهندسة البشرية. لقد سمع معظم الناس عن تلسكوب هابل الفضائي، وكانت الصحف تقدم تحديثات دورية عن مساعيه. وعندما تعطل لفترة وجيزة في أكتوبر ٢٠١٨، تصدر الخبر جميع الصحف وأدلى علماء الفلك في كل مكان بتصريحاتٍ عبر الإذاعة والتلفزيون لطمأنة جمهور المستمعين والمشاهدين بأن علم الفلك لم ينته جراء ذلك. وعلى النقيض، يشبه علم الفلك الراديوي الطفل الهادئ الذي يستمتع بقضاء فترات راحته في غرفة السمعيات والبصريات، يعبث بوسائل التكنولوجيا القديمة. يُعدُّ علم الفلك الراديوي (في الوقت الحالي) مجالًا أكثر واقعية من علم الفلك البصري؛ إذ يعتمد إلى حد كبير على العصي المعدنية في الحقول والصحاري، بدلاً من الغرف النظيفة اللامعة ومنصات إطلاق الصواريخ. ولكن ينبغي ألا ننحي علم الفلك الراديوي جانبًا باعتباره رقيقًا دون المستوى أو عتيق الطراز مقارنةً بعلم الفلك البصري. فعلم الفلك الراديوي، في رأيي، يمثل ذروة الهندسة البشرية والبحث العلمي. لقد روعي في تصميم البنية التحتية والحوسبة أن نتمكن باستخدام بعض العصي المعدنية في الحقول والصحاري من العودة بالزمن إلى الوراء ورصد النجوم الأولى. إذا قلنا إن علم الفلك هو سفر عبر الزمن، فإن علم الفلك البصري هو آلة «ديلوريان» للسفر عبر الزمن من فيلم «باك تو ذا فيوتشر» (العودة إلى المستقبل)، في حين أن علم الفلك الراديوي هو «تارديس» بالمسلسل التلفزيوني «دكتور هو»؛ حيث يأخذاننا إلى أزمنة سحيقة وأماكن بعيدة في كوننا لا يمكن الوصول إليها بأي وسيلة أخرى.

خرج علم الفلك الراديوي إلى النور بعد فترة طويلة من ظهور علم الفلك البصري. يمكن القول بأن علم الفلك البصري كان موجودًا منذ أن استخدم البشر النجوم في الملاحة، والقمر بأطواره المختلفة في تقديم القرايين. نشأ علم الفلك الراديوي بطريقة أوضح، نتيجة للحرب العالمية الثانية واستخدام الرادار؛ وهي تقنية تنبعت فيها موجات الراديو عبر منطقة شاسعة بحيث ترتد مجددًا حال اصطدامها بأي جسم في نطاق تلك المنطقة. ويمكن لجهاز الاستقبال تحديد المسافة التي يبعدها الجسم عن طريق حساب الوقت

الذي تستغرقه موجات الراديو في الارتداد. ومن خلال إنتاج هذه الحزمة العريضة من موجات الراديو، يمكن لمحطة الرادار اكتشاف الأجسام وتتبعها ضمن نطاق معين، على مسافة أبعد كثيراً مما يمكن رؤيته بالعين المجردة. كان اختراع الرادار خلال الحرب العالمية الثانية نقطة تحوّل رئيسية لصالح قوات الحلفاء. تمكّنت محطات الرادار من تقديم تحذيراتٍ من الغارات الجوية على لندن، مما سمح لسكان لندن بالاحتماء في الملاجئ بمجرد ظهور تلك الإشارات على شاشة في محطة رادار ساحلية في كينت. كما استُخدم الرادار كوسيلة لتسهيل شن الهجمات. في البداية، أراد الجيش تصميم «صندوق أسود»، وهو جهاز يطلق حزمة مركّزة من موجات الراديو على طائرة معادية ويفجّرها ببساطة في السماء. وقد ثبت عدم جدوى هذا الأمر، ووُجّه الاهتمام إلى تصميم نظام رادار صغير بما يكفي لتركيبه في طائرة مقاتلة. يمكن لوحدة الرادار هذه أن تساعد الطيارين على التنقل بين التضاريس الوعرة، ومساعدتهم في شن هجماتٍ على أهدافهم بدقة. كما يمكنها مساعدتهم في البحث عن طائرات العدو ضمن نطاق معين، حتى تتمكن طائرات الاستطلاع من إصدار إنذار مبكر، وفي القتال الجوي، يمكن لشاشات الرادار التحذيرية تحذير الطيارين من وجود عدو أسفل منهم أو وراءهم. في عام ١٩٤٣، قضت الطائرات المجهزة بوحدة الرادار على التهديد الناجم عن الغواصات الألمانية في غضون ستة شهور فقط. وأصبح بإمكان طائرات الحلفاء تحديد موقع أي غواصة تطفو على سطح الماء في الظلام الدامس، دون الاضطرار إلى تشغيل الأضواء إلا في الثواني الأخيرة لتيسير عملية الاستهداف.

لم يكن تطوير وحدات الرادار المحمولة ليرى النور لولا عالم فيزياء شاب يُدعى برنارد لوفيل. جُنّد لوفيل في المجهود الحربي بين عشية وضحاها، وأُرسل بعيداً عن مختبره في مانشستر عام ١٩٣٩، وخدم في مواقع مختلفة داخل المملكة المتحدة حيث كُلف بمهمة تطوير وحدات رادار سهلة الحمل. باشر لوفيل العمل مع زملائه لسنوات في هذه الوحدات، لدرجة أنه بحلول فبراير ١٩٤٥، شُخصت إصابته بالإرهاق العصبي ومُنح أربعة أسابيع راحة، وهي أول فترة راحة حقيقية يحصل عليها خلال الحرب. وقد تجلّى تفانيه ومهارته المذهلة في الرد على طلبه بالعودة إلى الخدمة؛ حيث أخبره عالم الفيزياء البريطاني ألبرت بيرسيفال رو، وهو أحد كبار المسؤولين في مجال الرادار في وقت الحرب: «لا داعي للشعور بأي تأنيب ضمير؛ وحتى لو لم تعمل أي شيء لبقيّة حياتك، فقد حققت هدفك في الحياة»¹³ وهو تصريح اعتبره مؤثراً وغريباً بعض الشيء.

هناك قول مأثور كثيراً ما يُستشهد به في العلم، وهو أن «ما يعتبره أحدهم ضجيجاً، يعتبره آخرون كنزاً». أمضى لوفيل فترة الحرب في تحسين معدل انضغاط وحدات الرادار وقدرتها على اكتشاف مقاتلات العدو. لم يكن النظام مثاليًا وكانت هناك إشارة مزعجة تتداخل مع أنظمة الرادار، وهو ضجيج كان يُعتقد أنه يأتي من موجات الراديو التي تتفاعل مع الجزء المتأين من الغلاف الجوي العلوي، الأيونوسفير، الأمر الذي ينتج عنه زخات من الجسيمات. أمضى لوفيل حياته المهنية قبل الحرب محاولاً دراسة خصائص فيزياء الجسيمات من خلال فحص زخات الجسيمات هذه في المختبر، باستخدام جهاز يُسمى الغرفة السحابية. اعتبر لوفيل العمل في وحدات الرادار فرصة لاستخدام السماء كغرفة سحب عملاقة، واستخدام أنظمة الرادار للكشف عن زخات الجسيمات في السماء. عندما انتهت الحرب بدأ العمل. ولحسن حظه، كان هناك العديد من التقنيات التي تستخدم موجات الراديو في زمن الحرب، ومن ثَمَّ تمكَّن بسرعة من بناء هوائي بسيط في فناء الجامعة. وبالسَّعة نفسها، أدرك أن حدود المدينة المكتظة بالسكان كانت مكاناً صائباً للغاية بحيث لا يمكن استقبال الإشارات القادمة من الكون الهادئ بوضوح. ولذا، توجَّه إلى أرض مهجورة جنوب مانشستر، وأظهرت الاختبارات الراديوية الأولى أن هذه الأرض وفَّرت بيئة مثالية خالية من الإشارات الراديوية، ومن ثَمَّ فهي مثالية لتقصي الأشعة الكونية. ومرة أخرى، ضبطَ معداته الراديوية وبدأ يستقبل الإشارة. سمع لوفيل نشاراً، لكنه لم يكن من مصدر أرضي هذه المرة، بل من الفضاء. في الواقع، سمع الكثير من الضجيج الذي لا يتناسب مع المعدل النظري لزخات الجسيمات؛ فقد سمع ١٠ أو ١٢ أزيزاً في الساعة على عكس العدد القليل المتوقع في الليلة الواحدة. اتضح أن لوفيل كان يرصد النيازك. وشهد بذلك مولد مجال جديد تماماً. في السابق، كان الرادار يُستخدم لإرسال الإشارات واستقبال صداها المرتد. أما في هذه اللحظة، ولأول مرة، أصبح في مقدورنا الاستماع إلى ما يقوله بقية الكون.

على الرغم من تشتت انتباهه بدراسة النيازك، لم ينسَ لوفيل مهمته الأصلية المتمثلة في اكتشاف مسارات تأين الجسيمات التي تسقط على الغلاف الأيوني للأرض (الأيونوسفير). من الواضح أنه كان في حاجة إلى تلسكوب أكثر حساسية، ليس مجرد هوائي في حقل، بل سطح مكافئ ضخم من شأنه أن يركِّز نطاقاً أكبر من موجات الراديو على جهاز الاستقبال، مما يسمح لنا بالاستماع إلى إشارات أوضح وأقل ضجيجاً، أقل بكثير من ضجيج الشهب. وبالفعل بنى ذلك التلسكوب، الذي يُسمى الآن تلسكوب لوفيل، في مرصد

جودريل بانك، ولا يزال يمثل إحدى أيقونات علم الفلك الراديوي فضلًا عن كونه إحدى أدوات الفعالة المستخدمة حتى الآن. وهو يضم مركزًا علميًا رائعًا، بل مهرجانًا سنويًا أيضًا للموسيقى والعلوم يسمى «بلو دوت» (النقطة الزرقاء) (تيمناً بوصف كارل ساجان للأرض بأنها النقطة الزرقاء الشاحبة).

نحن بحاجة إلى طبق أكبر

يتمتع علم الفلك الراديوي بمكانة خاصة لدى المملكة المتحدة، ليس فقط لأننا، نحن البريطانيين، جزء من قصة نشوئه، ولكن لسبب آخر محمود الدافع، وهو الطقس. يعرف أي شخص حالفه الحظ لينعم بزيارة جزرنا الجميلة أن الطقس لدينا غير مشجع بالمرّة، حيث يشيع تكوّن السحب وهطول الأمطار. يجد معظم الزملاء الدوليين العاملين في المملكة المتحدة أنفسهم في حيرة من أمرهم ووحيددين في مكاتبهم عندما تتعدى درجة الحرارة ٢٥ درجة مئوية، حيث يعلم البريطانيون الذين ولدوا في بريطانيا وترعرعوا فيها أن هذا اليوم مخصّص بشكل غير رسمي لارتياح الشواطئ. يتركز أكبر التلسكوبات البصرية في العالم في هاواي وتينيريفي وتشيلي؛ حيث تشتهر جميعها بالطقس المشمس ومن غير المرجح أن تحول السحب دون نجاح عمليات الرصد الباهظة الثمن التي تُجرى بها. وعليه، فإن المملكة المتحدة ليست مكانًا مثاليًا لعلم الفلك البصري بوجه عام. لكن التلسكوبات الراديوية يمكنها الرصد في نطاق أكبر من الظروف الجوية المختلفة، مما يجعلها أداة مثالية للمملكة المتحدة.

يمثل تلسكوب لوفيل المرحلة الأولى في علم الفلك الراديوي المصمّم لهذا الغرض ويؤكد على مبدأ عام وجيه يتمحور حول حقيقة أن الفضاء صاخب، وسماع الأصوات الهادئة يتطلب تلسكوبًا كبيرًا. للاستماع إلى إشارة من ١٣ مليار سنة مضت، إشارة صغيرة دفينة ضمن سيمفونية من الأصوات قادمة من كل المجرات الأخرى في الكون، سنحتاج إلى طبق كبير جدًا. ألقي نظرة سريعة على صور التلسكوب الذي يبلغ طوله ٩٠ مترًا (٣٠٠ قدم) في جرين بانك في ١٥ نوفمبر ١٩٨٨ (يمينًا) و١٦ نوفمبر ١٩٨٨ (يسارًا) في نهاية ملحق الصور. هل لاحظت المشكلة؟ توجد حدود هندسية معينة لأحجام هذه الهياكل الرائعة. لقد عمل تلسكوب جرين بانك لسنوات عديدة، وساهم في التوصل إلى اكتشافات علمية مؤثرة. ولكن في نهاية المطاف، انهار التلسكوب بسبب مشكلة هيكلية؛ فكلما زاد حجم التلسكوب، زادت إمكانية تعرضه لمشاكل هيكلية. هل هذا يعني أن هناك

حدًا أساسيًا لدى صغر الإشارة التي يمكننا استقبالها، يتحدّد في ضوء قدرتنا على بناء طبق كبير بما يكفي؟ لحسن حظنا ولصالح عمليات البحث عن النجوم الأولى، الجواب هو «لا».

قياس التداخل

عند تشغيل أغنية على هاتفك، يمكنك القيام بأحد أمرين. إما الاستماع من خلال مكبر الصوت أو الاستماع من خلال سماعات الأذن.

تمامًا مثلما يمكن ارتداء سماعتَي أذن والاستماع من خلالهما معًا، يمكن الاستماع إلى هوائيين في آنٍ واحد. يُطلق على مزيج الإشارات الصادرة عن هوائيات متعددة اسم «قياس التداخل». يقدّم قياس التداخل حلًّا لمشاكلنا فيما يتعلق الأمر بالنظر في أعماق الزمن السحيقة. ومن خلال وضع هوائيين يبعد كل منهما عن الآخر مسافة ١٠ أمتار (٣٣ قدمًا)، ودمج الإشارات، فإننا نبني ما يعادل تقريبًا طبقًا يبلغ قطره ١٠ أمتار. لا يوجد حدٌ للمسافة التي تفصل بينهما، ما دامت لديك البنية التحتية لدعم اتصال الهوائيين. هناك مجموعة من مقاييس التداخل تبحث حاليًا في السماء عن الفقاعات التي تعتبر دليلًا على وجود النجوم الأولى. إن مصفوفة الترددات المنخفضة¹⁴ هي الأقرب إلى قلبي؛ حيث إنها كانت أول تلسكوب شاركت في تصميمه. تقع مصفوفة الترددات المنخفضة بالأساس في هولندا، حيث تحتوي جزيرة مركزية على عدد كبير من الهوائيات، وينتشر عدد أقل من الهوائيات في أنحاء أوروبا الغربية، وتحديدًا في ألمانيا والمملكة المتحدة والسويد وأيرلندا وفرنسا. أبعد مسافة فاصلة بين محطتي مصفوفة ترددات منخفضة حتى الآن هي ١٥٠٠ كيلومتر (٩٣٢ ميلًا). تخيل بناء طبق واحد بهذا الحجم.

لقد زرتُ محطة مصفوفة الترددات المنخفضة لأول مرة في صيف عام ٢٠١٩، بعد تسع سنواتٍ من بدء العمل هناك، وهو ما يلخص الطبيعة النائية لعلم الفلك الراديوي هذه الأيام. لقد ولّت أيام الجلوس في الكبائن والأكشاك، لمراقبة التلسكوب بحالة من العصبية والتوتر، وهو يصدر صريرًا أثناء تحركه. والآن أصبحنا أقرب إلى التلسكوبات البصرية الفضائية، المُصمّمة للعمل عن بُعد بحكم الضرورة. لقد مرَّ بعض الوقت على رحلتي إلى محطة مصفوفة الترددات المنخفضة التي كنت أتنقل فيها بين سبع نقاط مختلفة من المواصلات العامة (بريطانيا - إسبانيا - بروكسل - أمستردام - ألير - كامبن زويد - ميل - دوينجيلو - إكسلو) حتى توصلتُ إلى استنتاج مفاده أنه ربما

كان من الأسهل السفر إلى الفضاء. الوحدات الجدارية التي تراها خلفي في صورة ٢٣ في ملحق الصور بنهاية الكتاب مخيَّبة للآمال، أليس كذلك؟ على النطاق الأشمل، يبدو هوائي مصفوفة الترددات المنخفضة الصغير غير ذي أهمية، إلا أن أهمية مقياس التداخل لا تكمن في الأجزاء الفردية، بل في الكيفية التي تشكّل بها تلك الأجزاء الفردية مجتمعةً شيئاً أهم بكثير.

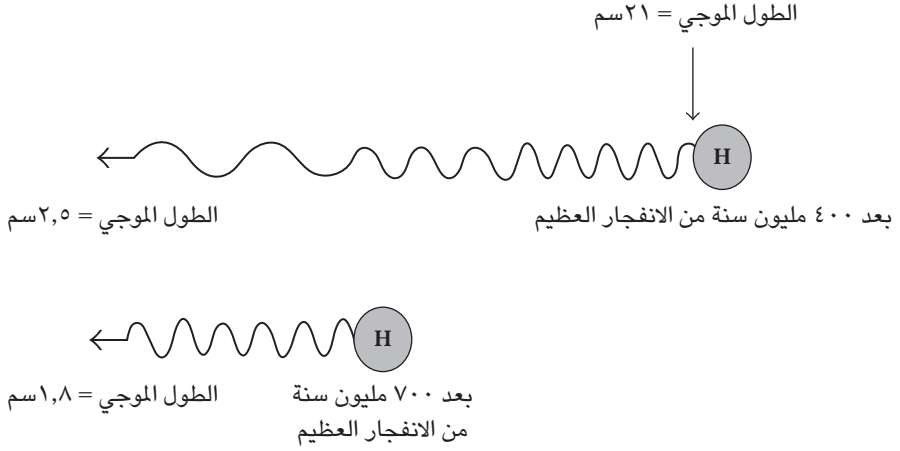
تتكوّن مصفوفة الترددات المنخفضة من حوالي ٢٥٠٠ هوائي. ومن خلال الجمع ببراعة بين كل تلك الآلاف من الإشارات، يمكننا الاستماع إلى إشارة صغيرة قادمة من عصر إعادة التأين. على أي حال، تلك كانت الخطة. لقد بدأ العمل في مصفوفة الترددات المنخفضة منذ عام ٢٠١١، ولكن حتى الآن لا تزال هذه الإشارة القادمة من النجوم الأولى تراوغنا. ترى أين هي؟

الإشارة الإحصائية القادمة من النجوم

دعونا نفكر فيما نحاول اكتشافه. في الوضع المثالي، من المفترض أن نتمكّن من إلقاء نظرة على رقعة من السماء بدرجة كافية من الحساسية تمكننا من الحصول على خرائط للفقاعات، أي صور للجبن السويسري. وبهذا يمكننا دراسة بنيتها وتحديد أي من عمليات المحاكاة العديدة لدينا بمكوناتها المتعددة تمثل «الحقيقة». لا يمكن تحقيق ذلك في ظل التكنولوجيا الحالية؛ لأننا لا نملك درجة الدقة الكافية (إلا أنه يمكنك مراجعة الفصل التالي لمعرفة الخطوات المستقبلية)، فنحن نبحث عمّا نسميه إشارة إحصائية، بدلاً من الصورة.

يصدر الهيدروجين المتعادل فوتوناتٍ يبلغ طولها الموجي ٢١ سم، إلا أن هذا الطول الموجي يزداد عندما تكافح الفوتونات تمُدُّ الكون وتفقد الطاقة. ويصل الطول الموجي للفوتون المنبعث بعد ٤٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم إلى ٢,٥ متر. أما الفوتون الذي انبعث بعد ذلك بقليل، أي بعد ٧٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم، فإن طوله الموجي يصل إلى، أو ينزاح نحو الأحمر بمقدار ١,٨ متر. يمكننا ضبط تلسكوبنا الراديوي لالتقاط طول موجي واحد فقط في كل مرة، مع أخذ عيناتٍ من الضوء المنبعث في أوقاتٍ مختلفة. وإذا أخذنا عينة بعد ٤٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم، فسنجد أن المجرات الأولى قد تشكّلت للتو وتضخ ما يكفي من الفوتونات لتحفيز إعادة التأين. وهذا يعني أن هناك الكثير من الهيدروجين المتعادل حولنا، وبالتالي يمكننا قياس الكثير من الإشعاع

عصر إعادة التأين



شكل ١٠-٤: تنزاح الفوتونات التي يبلغ طولها الموجي ٢١ سم نحو الأحمر إلى أطوال موجية مختلفة وفقًا لوقت انبعاثها. يمكننا ضبط تلسكوباتنا الراديوية لدراسة طول موجي معين، ومن ثمَّ إلقاء نظرة على وقت محدد في تاريخ الكون.

المنزاح نحو الأحمر الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم. لكن بعد ذلك، عندما يتأين الكون، تصبح الفوتونات التي تصل إلينا بطول موجي ١,٨ متر أكثر ندرة، حيث يقل الهيدروجين المتعاد، ويقل بالتالي الإشعاع الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم. وهذا ما نسعى إلى كشفه بالتلسكوبات الحالية مثل مصفوفة الترددات المنخفضة؛ حيث نرصد إشارة تحمل الكثير من الإشعاع الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم، ثم لا شيء.ذبذبة يليها خط ثابت. ومع أنها مسألة بسيطة، فلم نتمكن من تحقيقها، سواء باستخدام مصفوفة الترددات المنخفضة، أو مصفوفة مورشيسون الواسعة المجال في أستراليا، أو المصفوفة الدقيقة لاستكشاف عصر إعادة التأين في جنوب أفريقيا، أو التلسكوب الراديوي العملاق لرصد الموجات المترية في الهند.

الكون الصاحب

تكمُن المشكلة في أن الكون صاحب للغاية. فالإشعاع الكهرومغناطيسي لا ينبعث من الهيدروجين المحيط بالنجوم الأولى فحسب. وهناك عمليات تجري في كل مجرة في الكون تنتج إشعاعًا كهرومغناطيسيًا. عندما نضبط التلسكوب الراديوي لدينا على الأرض، فنحن

لا نستهدف الإشارات المنبعثة من النجوم الأولى فقط. بل نضبط التلسكوب على طول موجي محدد، ونلتقط أي إشعاع يصل إلينا بالطول الموجي نفسه، مما يؤدي إلى التشويش على الإشارة. ويوجد الكثير من هذه الضوضاء. يشبه الأمر إجراء محادثة هاتفية أثناء المشي بجوار مثقاب هوائي. تستمر الإلكترونات التي تتجول داخل مجرتنا في التسارع والتباطؤ بسبب تأثير المجالات المغناطيسية عليها. عندما تتباطأ، تنتج موجات راديوية، وهي عبارة عن إشعاع محدد يسمى «الإشعاع السنكروتروني». وهذا الإشعاع وحده يغمر إشارات النجوم الأولى بعدة آلاف من الإشارات. وهناك أيضًا إشارات راديوية من كل مجرة أخرى. إن الاستماع إلى إشاراتنا الصغيرة من بين كل هذه الضوضاء مهمة شاقة. نطلق على هذه المصادر الفلكية للضوضاء اسم «الإشارات المتداخلة». ومما يزيد الأمر سوءًا أن التلسكوب نفسه يصدر ضجيجًا. فالمعدات الكهربائية تنتج إشعاعًا كهرومغناطيسيًا، وبقدر ما يمكننا التخفيف من تأثيره، فإنه لا يمكننا منعه تمامًا. والضجيج الصادر عن المعدات نفسها يغمر إشاراتنا بإشارات أقوى منها عشر مرات. لتوضيح الأمر، يمكنك التفكير كيف أن سكان مدينة جوثام يطلبون المساعدة من حاميمهم الرجل الوطواط عن طريق تسليط ضوء على شكل وطواط في السماء. لحسن حظ مدينة جوثام، تحدث معظم الجرائم المروعة ليلاً، ولذا يستطيع بروس واين رؤية إشارته بسهولة وإيقاف أي مخطط كان من المقرر تنفيذه. ولكن إذا بدأ الجوكر مخططاً في منتصف النهار عندما تكون الشمس في كبد السماء، حينها لن تكون إشارة الوطواط واضحة، وبالتالي ستكون نسبة الإشارة إلى الضوضاء ضئيلة، وسينجح الجوكر. هذا يجعلك تتساءل: لماذا لا يملك بروس واين هاتفًا؟!

الحُدُّ من الإشارات المتداخلة

مع أن إشارة النجوم الأولى قد تكون أصغر بكثير من الإشارة القادمة من بقية الكون، فإنها تكون ذات شكل مختلف، مما يمنحنا فرصة لتمييزها. هَبْ أنك ضبطت جهاز الراديو لديك على محطة للموسيقى الكلاسيكية الهادئة، ولكنك تستاء عندما يتداخل تردد محطة راديو منافسة غير مرخصة مع تردد محطة الموسيقى الكلاسيكية. إذا كانت المحطة غير المرخصة تبث أيضًا موسيقى باخ وبيتهوفن، فسيكون من الصعب معرفة أي الإشارات هي الإشارة الأصلية وأيها الإشارة الدخيلة. ولكن إذا كان لدى المحطة غير المرخصة ولع بموسيقى الديت ميتال، فحينها حتى لو كانت إشارتها أعلى بكثير من

إشارة المحطة الأصلية، فلا يزال بإمكانك التمييز بين المحطتين بسهولة إلى حد ما. نحن نستخدم الفكرة نفسها لفصل إشارة النجوم الأولى عن بقية أصوات الكون، وذلك من خلال النظر في كيفية تغَيُّر تلك الإشارات عند تغيير الطول الموجي لعمليات الرصد. إذا كنت معتادًا على ضبط راديو «إف إم»، فستعرف أن كل محطة بعينها تبث على نطاق من الترددات. على سبيل المثال، تُبث محطة «بي بي سي راديو ٢» على الترددات ٨٨-٩١ إف إم. بالمثل، يُبث الضجيج الصادر من مجرتنا وجميع المجرات الأخرى على نطاق أو طيف من الترددات (أو ما يعادل ذلك من حيث الطول الموجي). إذا استمعنا إلى الإشعاع السنكروتروني وغيرنا الطول الموجي ببطء، فسنسمع الأصوات نفسها ولكن بمستوى صوت مختلف؛ حيث يكون التغيير سلسًا عبر الطيف. ولكن إذا استمعنا إلى إشارة النجوم الأولى بالطريقة نفسها، فإننا نسمع أصواتًا مختلفة مع تغيير الطول الموجي. إذ تنمو فقاعات الهيدروجين المتأين وتندمج وتتحد من جديد، ومن ثَمَّ يكون الانبعاث الراديوي مختلفًا في كل مرة نلتقط فيها لقطة، ويكون التغيير عبر الطيف غير سلس ومتناثرًا. الأمر أشبه بالاستماع إلى الموسيقى الكلاسيكية وموسيقى الديت ميتال في آنٍ واحد. لقد شكَّل فصل هذه الإشارات معظم مسيرتي البحثية حتى الآن. هناك العديد من الطرق المستخدمة لفصلها بنجاح بناءً على أطيافها المتباينة الأشكال، ويتفوق بعضها على بعض في ظروف مختلفة، ولكن الحقيقة أنها جميعها ذات تأثير فعال. على الرغم من طبيعة المشكلة المعقدة، والكَمِّ الهائل من الإشارات المتداخلة مقارنة بإشارتنا الصغيرة، يمكننا إزالة الإشارات المتداخلة، ولكن مع وجود المزيد من العمل الذي يتعين القيام به.

عند تطبيق هذه التقنيات، علينا توخي الحذر حتى لا نعلن عن اكتشاف إشارة ما وهي في الواقع مجرد ضوضاء أو مقدار ضئيل متبقٍ من الإشارات المتداخلة. ومن ثَمَّ، علينا الالتزام بالمنهجية القائمة على الأدلة، ثم نأخذ كل دليل في الاعتبار وندرسه بدقة. وهذا هو جوهر عملي اليومي المتمثل في تصميم وتطبيق اختبارات تحليلية من شأنها أن تزيل الإشارات المتداخلة وتتيح لنا يومًا ما أن نكون واثقين بما اكتشفناه. لدينا الآن الكثير من البيانات، المقدرة بوحدات البيتابايت محفوظة على قرص صلب في انتظار إخضاعها للبحث والدراسة من أجل العثور على تلك الإشارة الأولى. لكنها لا تزال محفوظة هناك؛ لأن منهجيتنا ليست مضمونة بعد. وما يحدث أننا نأخذ عينة صغيرة من البيانات ونحاول مرارًا وتكرارًا تقليل تلك الإشارات المتداخلة، وتفادي هذا الضجيج، بأفضل ما في وسعنا. ونُدوِّن ملاحظات بنقاط الضعف الموجودة في الأساليب والطرق التي طبقناها ثم نجري عليها تحسينات، ونبدأ العملية برمتها من جديد.

الكون يفاجئنا دائماً

عندما التقيتُ البروفيسور ليون كوبمانز، أحد الباحثين الرئيسيين في المشروع العلمي «عصر إعادة التأين بعدسة مصفوفة الترددات المنخفضة»، في مكتبه في جرونينجن بهولندا، كان يعاني إرهاقاً شديداً بسبب رحلته الجوية إلى أستراليا. كان علماء الفلك في مجال عصر إعادة التأين قد نزلوا في جزيرة صغيرة قبالة ساحل كوينزلاند بأستراليا لمشاركة آخر الأخبار حول أبحاثهم ومستجدات أخرى بشأن تجارب مثل مصفوفة مورشيون الواسعة المجال، وتجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، وبالطبع مصفوفة الترددات المنخفضة. تشتهر بعض المجالات العلمية (لن أحدد مجالاً بعينه) باحتدام التنافس بينها، حيث تشوبها أجواء متوترة ومؤتمرات صدامية، لكن في مجالي الأمر مختلف تماماً. وعلى الرغم من أن معظمنا عضو في فريق تلسكوب أو آخر، فالمنافسة صحية تماماً، ولا يعني ذلك خلو الأجواء من الانتقادات والأسئلة، ولكن غالباً ما يتبع ذلك عرض بالمساعدة أو اقتراح حل عملي. مجالنا صغير وتربطنا علاقات وطيدة، وهو أمر جيد بالنظر إلى أننا ربما نتقابل مرتين في السنة على أدنى تقدير لبقية حياتنا العملية. التقينا في مكتب كوبمانز، وهو من أواخر المكاتب المتبقية في المبنى التي تحتوي على سبورة. كانت السبورة مغطاة بالمعادلات، كما هو معتاد مع أي فيزيائي متفانٍ في عمله طوال الوقت. كانت لديه أيضاً ساعة لاحظتُ على الفور أنها تحتوي على ١١ رقماً فقط، و٥٥ دقيقة. ضحك وقال إن السبب في ذلك «أنك تشعرين دائماً أن الوقت ينفد منك» لكونك أكاديمية، وبحسّ طريف أخبرني أنه لم يلحظ أنها لم تكن مجرد ساعة عادية إلا بعد أسبوعين من التدقيق فيها. إن الوسط الأكاديمي مجال مزدحم، وكوبمانز أكثر انشغالاً من معظم الأشخاص، فهو باحث رئيسي مساعد في مشروع «عصر إعادة التأين بعدسة مصفوفة الترددات المنخفضة»، ضمن فريق إدارة الجيل القادم من التلسكوبات الراديوية، ومصفوفة الكيلومتر المربع، كما أنه شارك في المسبار القمري المتمثل في المستكشف الهولندي-الصيني المنخفض التردد (سنشير إلى آخر مثالين في الفصل القادم). لقد عمل كوبمانز في مجال عصر إعادة التأين منذ أن كانت مصفوفة الترددات المنخفضة مجرد فكرة، ويتذكر المحادثة التي دارت حينما قرروا رصد تلك الإشارة التي يبلغ طولها الموجي ٢١ سم باستخدام التلسكوبات الراديوية. بلغ الحماس مَبْلَغَهُ من جير دي بروين، الذي أشرف على رسالته للدكتوراه ثم أصبح بعد ذلك زميلاً له، وأراد أن يبدأ على الفور باستخدام تلسكوبات ويستربورك التي صُمِّمت في سبعينيات

القرن العشرين، لكن كوبمانز كان دائماً أكثر حذرًا، على حدّ تعبيره هو شخصيًا. كان هذا المزيج من الحماس والحذر هو المحرك المثالي لمشروع «عصر إعادة التأين بعدسة مصفوفة الترددات المنخفضة» الذي أوصله إلى الاكتشاف الأول. حسنًا، كنت أمزح؛ فنحن لم نصل إلى هذه المرحلة بعد، لكنني كنت أمل أن نكون قد وصلنا بحلول الوقت الذي يُنشر فيه هذا الكتاب، وهذا مبرر كافٍ لاستخدامي تلك الجملة مؤقتًا حتى يتحقق الأمر فعليًا. كان كوبمانز مختصًا بدراسة التأثير القوي لعذسة الجاذبية، وعندما سألتُه عن سبب تغيير مجال اختصاصه إلى شيء مغاير تمامًا، قال: «حسنًا، هذا تحدٍّ، وأنا أحب التحدي!» كانت التحديات التي واجهتها مصفوفة الترددات المنخفضة، وأي مقياس تداخل لعصر إعادة التأين، هائلة وغير متوقعة إلى حدٍّ ما. وسادَ شعور بالتفاؤل عند اكتمال مشروع مصفوفة الترددات المنخفضة عام ٢٠١٢. حتى إنني نشرت في عام ٢٠١٣ أول بيانات عن عصر إعادة التأين في أطروحتي البحثية، وكانت في الغالب عبارة عن ضوضاء وإشارات متداخلة وغير مترابطة، ولكنها بيانات على أي حال. ومع ذلك، وبعد مرور أكثر من سبع سنوات، لم يتحقق أي اكتشاف. تعد هذه التجربة من أغرب التجارب؛ فنحن نقول إننا نبحث عن إشارة قد حصلنا عليها بالفعل. الإشارة موجودة، مدفونة في آلاف الساعات من البيانات التي رصدناها، وكل ما علينا هو إزالة الغبار عن تلك البيانات، طبقة تلو الأخرى، مع تبين كل ذرة غبار نزيلها جيدًا خشية أن نزيل جزءًا من إشارتنا الحساسة دون قصد. سألتُ كوبمانز عمّا إذا كان واثقًا من أننا سنحقق اكتشافًا باستخدام تلسكوبات الجيل الحالي. صمّت قليلًا ثم قال: «عامل الإثارة موجود بكل تأكيد، ما زالت الإثارة موجودة، ولكنني أعتقد أننا نستند جميعًا الآن إلى أساس متين أكثر من أي وقت مضى ... أعتقد أن ما نتعلمه هو كيفية القيام بذلك ... هدي الأول هو مجرد تحقيق اكتشاف، هذا هو هدي الأول، والهدف الثاني هو ... استيعاب أن الكون يفاجئنا دائمًا. ستكشف لنا البيانات ما يفعله الكون، ولن أتعجب إذا كان مختلفًا عن النماذج العديدة التي اقترحناها.»

على ذكر المفاجآت، سألتُه عن الأمر الذي يشغل بال كل الباحثين في عصر إعادة التأين، وهو تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي. هل يثق بصحة نتائجها؟ وهنا أجبني: «أقول دائماً إنني متشكك بنسبة ٩٠٪ ومتفائل بنسبة ١٠٪ ... ولكن نسبة ١٠٪ هذه كانت كافية لبدء المتابعة والنظر في أحدث النتائج [المستقاة من تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي] ... يبدو أن فيها شيئاً ما.» إن ضخامة المهمة التي تنتظرنا، وهي الكشف عن تلك الإشارة الصغيرة، تجعل من تبني مبدأ الشك منظورًا صحيًا في هذا

المجال، سواء فيما يتعلق بالعصور المظلمة أو بعصر إعادة التأين. وكما هو الحال تمامًا مع تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، فإن أي اكتشاف لعصر إعادة التأين سيستلزم التحقق من صحته قبل أن ننق به ثقة عمياء، وربما يكون ذلك من خلال تجربة مختلفة تمامًا.

عصر إعادة التأين هو الفترة التي تأين فيها الهيدروجين المتعادل المنتشر في الكون بواسطة النجوم الأولى والمجرات والثقوب السوداء. ومن شأن قياس درجة التأين في الكون في أوقات مختلفة أن يمنحنا فكرة عن الأشياء التي كانت موجودة في ذلك الوقت، وكيف كانت تتصرف. ربما كانت المجرات الخافتة (القزمة) تهيمن على إنتاج الفوتونات المؤينة، مع مساهمات ضئيلة من الكوازارات ونجوم الجوهرة الثالثة. إن الهدف هو الرصد هذه المرة، والهيدروجين المتعادل هو الذي يمنحنا نافذة على ذلك. ينتج الهيدروجين المتعادل فوتونات طولها الموجي ٢١ سم، ولكن هذا الطول الموجي يزداد إلى أطوال موجية راديوية أثناء رحلة الفوتون إلينا، ولذا علينا استخدام التلسكوبات الراديوية لرصدها. ولكي نرجع ١٣ مليار سنة إلى الوراء، نحتاج إلى تلسكوبات ضخمة، صممناها من خلال ضم الكثير من الهوائيات معًا عبر القارات بطريقة تسمى «قياس التداخل». هناك العديد من التلسكوبات التي تعمل الآن، لكن الكون صاخب للغاية وسيستغرق الأمر بعض الوقت لاستبيان إشارات النجوم الأولى الصغيرة ورصدها من بين كل هذا الصخب والضجيج. والسؤال هنا: متى سننتهي من التحقق من صحة بيانات مصفوفة الترددات المنخفضة؟ إنه سؤال جيد. في عام ٢٠١٠ اعتقدت أننا سنتمكن من التأكد من صحة الاكتشاف بحلول عام ٢٠١٣. والآن، أراهن على أن هذا سيحدث خلال الأعوام القليلة المقبلة. ولذا، من الأفضل أن أعود لإكمال عملي حتى تحين هذه اللحظة.

مراجع مفيدة

- Furlanetto, S. et al. 2006. Cosmology at Low Frequencies: The 21 cm Transition and the High-Redshift Universe. *Physics Reports*, Volume 433, Issue 4–6, p. 181–301.
- Loeb, A. 2010. *How Did the First Stars and Galaxies Form?* Princeton University Press, New Jersey, US.

- Wise, J. 2019. An Introductory Review on Cosmic Reionization. *Contemporary Physics* 60, 2: 145–163.
- Zaroubi, S. 2013. The Epoch of Reionization, the First Galaxies. *Astrophysics and Space Science Library*, vol. 3: 45.

الفصل الحادي عشر

المجهولات المجهولة

في العلم هناك بديهيات معروفة (وهي الأمور التي تَعْلَمُها بالفعل)، ومجهولات معروفة (وهي المجهولات التي تدري بأنها موجودة ولكنها ما زالت مجهولة)، ومجهولات مجهولة (وهي المجهولات التي لا تدري بوجودها من الأساس). إن معدلات بيانات التلسكوبات الحديثة هائلة، والتحقق الآني من تلك البيانات بحثًا عن وجود أي مفارقات يكاد يكون مستحيلًا. ولكن إذا تمكّنّا من تخزين البيانات ومراجعتها لاحقًا، فقد تنبثق المفاجآت في بعض الأحيان. تحتوي سجلات التخزين الخاصة بهذه التلسكوبات الكبيرة على العديد من الاكتشافات التي حققناها، على سبيل المثال التدفقات الراديوية السريعة التي رصدها تلسكوب باركس.¹ والتدفقات الراديوية السريعة عبارة عن نبضات راديوية ذات سطوع هائل، يُعتَقَد أنها قادمة في الأصل من خارج المجرة. يتطوّر هذا المجال بسرعة كبيرة لدرجة أن النموذج المُستَحْسَن لأصل التدفقات الراديوية السريعة قد تغيّر في كل مسودة لهذا الكتاب. ولا توجد إجابة واضحة حتى الآن. لقد زاد معدل اكتشاف التدفقات الراديوية السريعة عامًا بعد عام منذ اكتشافها في عام ٢٠٠٧، حيث مُشّطت سجلات التخزين الأرضية حول العالم بنجاح بحثًا عن أي تدفقات، ووُجِّهَت التلسكوبات للبحث عن تدفقات جديدة. هناك معدل متوقع لأكثر من ١٠٠٠ تدفق راديوي سريع يوميًا عبر السماء بأكملها.² وهنا يُطرح السؤال التالي: أني لنا أن نغفلها رغم عددها الكبير؟ ببساطة ... لأننا لم نكن نبحث عنها. لقد كانت من المجهولات المجهولة التي لم نكن نعلم بوجودها من الأساس. وبينما كانت سجلات التلسكوبات الراديوية العالمية تُمشط بحثًا عن التدفقات الراديوية السريعة، عُثِر على ظاهرة أخرى قصيرة مقتضبة. وهذه الظاهرة أُطلق عليها اسم البريتونات، وأشارت البيانات إلى أنها نشأت داخل المجرة. وقد أدى ذلك إلى إثارة حالة من الفوضى والارتباك في مجتمع الباحثين المهتمين بالتدفقات الراديوية

السريعة، حيث كان نوعا الإشارة متشابهين بما يكفي للتشكيك في فرضية أن يكون مصدر التدفقات الراديوية السريعة من خارج المجرة. إلا أن البريتونات لم تكن موجودة. وفي بحث جميل وطريف، أوضح فريق من العلماء أنه بعد النظر إلى البريتونات عن كثب، «كشفت الاختبارات اللاحقة عن إمكانية توليد البريتون عند تردد ١,٤ جيجا هرتز عندما يُفْتَح باب فرن الميكروويف قبل انتهاء زمن الطهي مع وجود التلسكوب في زاوية مناسبة بالنسبة إلى الإشارة. إن الانبعاثات الراديوية التي تخرج من أفران الميكروويف أثناء مرحلة إيقاف تشغيل الصمام المغناطيسي الإلكتروني (الماجنترون) تفسّر بدقة جميع الخصائص المرصودة لإشارات البريتون»³ يا إلهي. لم يكن هذا اكتشافاً لكيان جديد في الفيزياء الفلكية. بل كان الأمر أشبه بشخص في المنزل المجاور شعر بالجوع بينما كان التلسكوب في مرحلة جمع البيانات. وما يدرينا، فأَيُّ شيء يمكن أن يحدث مع المجهولات المجهولة!

المجهولات المعروفة

لقد تمكّننا من تغطية الكثير من البديهيّات والمجهولات المعروفة لنا. واتبعنا المسارات العديدة للضوء الأول، سواء كان قادمًا من النجوم أو من الثقوب السوداء أو المجرات. وأصبحت عمليات المحاكاة متقدمة للغاية لدرجة أنه يمكننا الآن متابعة ولادة النجوم الفردية في سحابة غازية متشظية، ومتابعة عائلات بأكملها أثناء تشكّلها أو اندماجها أو تفرقها أو انفجارها. لم يكن أحد يتصور بلوغ هذا المستوى من التركيز قبل عقد من الزمن، وقد أدى هذا المستوى المتقدم من التفاصيل إلى الابتعاد عن اعتقاد أن النجوم الأولى قد وُلدت فرادى، وأنها محكوم عليها بأن تبقى وحيدة طوال حياتها القصيرة. فنحن نعلم الآن أنها على الأرجح قد تشكّلت في مجموعات، أو ثنائيات. وقد قادتنا عمليات المحاكاة نفسها إلى إدراك أن نجوم الجبهة الثالثة المنخفضة الكتلة ربما تكونت إلى جانب شقيقاتها ذات الكتلة الكبرى، وربما لا تزال على قيد الحياة حتى يومنا هذا في انتظار أن يكتشفها مَنْ يقتفي أثرها ويبحث عنها. تصدّى باحثو علم الآثار النجمي لهذا التحدي وظلوا يسجلون أرقامًا قياسية جديدة لاكتشاف نجوم تحتوي على نسب أقل من المعادن. ربما لم يتوصّل المجال إلى أي من النجوم الأولى بعد، لكنه توصّل إلى ثاني أفضل شيء، وهو نجم من الجيل الثاني. ومن هذا النجم وحده يمكننا البدء في استنتاج تكوين أسلافه الأصليين، ولا شك في أننا سوف نكتشف المزيد بين مليارات النجوم في مجرتنا. وعند النظر بعيدًا خارج مجرتنا، اكتشفنا أن العديد من المجرات القزمة في المجموعة المحلية يمكن أن

تكون مواقع مثالية لممارسة علم الآثار النجمي خارج المجرة في المستقبل بمجرد أن يتوفر لدينا تلسكوب قادر على مسح أكثر النجوم خفوتاً في السماء بكفاءة.

بالإضافة إلى البحث عن النجوم الأولى بطريقة مباشرة، استخدمنا طرقاً غير مباشرة، تشمل إجراء عمليات تحليل تشريحية للجيل الأول من النجوم. قد تعتقد أن موت النجم الأول يعني انعدام إمكانية الرصد، لكن الأمر على خلاف ذلك تماماً. فقد ماتت النجوم الأولى بطرق دراماتيكية، إما عن طريق المستعرات العظمى غير المستقرة الأزواج ذات السطوح الفائق أو عن طريق انهيارها المباشر في الثقوب السوداء، ومن ثمّ أمكن اكتشافها باستخدام تلسكوباتٍ مثل تلسكوب جيمس ويب الفضائي أو هوائي مقياس التداخل الليزرّي الفضائي. إن حياة النجوم الأولى والثقوب السوداء وموتها لهما تأثير دائم على البيئات المحيطة بها، وهو تأثير يمكننا قياسه وتحليله للتعرف عليها.

هناك ثلاثة فصول رئيسية في عصر النجوم الأولى: العصور المظلمة، والفجر الكوني، وعصر إعادة التأين. العصور المظلمة هي الفترة التي كان فيها الكون مظلماً وخالياً من أي هيكل مرئي. كانت سحب الغاز تندمج، ولكن بمجرد أن وصلت إلى درجة الانهيار الكافية لبدء تفاعلات الاندماج، سطع الفجر الكوني، مما جعل السماء ساطعة لأول مرة منذ مئات الملايين من السنين. قاست تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، التي تتكوّن من طاولة معدنية في صحراء أستراليا الغربية، درجة حرارة الهيدروجين بعد ١٨٠ مليون سنة من الانفجار العظيم وحددت نهاية العصور المظلمة وبداية الفجر الكوني. ليس هذا فحسب، بل إنها قلبت فهمنا لتطوّر الغاز في الكون المبكر رأساً على عقب. وجعلتنا نتساءل: هل المادة المظلمة المشهورة بعدم التفاعل مع غيرها تصطدم بطريقة أو بأخرى بالغاز وتبرده؟ أم أن هناك تفسيراً أكثر واقعية، مثل وجود إشارة غير مرغوب فيها ناجمة عن تداخل مجهول المصدر؟ وفي كلتا الحالتين، فقد أزيح الستار أخيراً عن عصر لم يُكتشف من قبل.

إن عصر إعادة التأين هو العصر الذي تكون فيه تلك النجوم الأولى والثقوب السوداء والمجرات عديدة وقوية بما يكفي لتأين الهيدروجين المحيط بها، وتكوين فقاعات من الهيدروجين المتأين. وينتج عن هذا نمط الجبن السويسري في بحر الهيدروجين المتعادل، الذي يمكننا رصده بسبب الإشعاع الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم والذي ينبعث من الهيدروجين المتعادل. كانت التلسكوبات الراديوية حول العالم ترصد موجات الراديو وتراقبها منذ ذلك الوقت، لكن الضجيج الذي تنتجه مجرتنا والمجرات الأخرى كان كفيلاً

بأن يحجب الإشارات. وبعد ما يقرب من عقد من الزمن من تنظيف البيانات، أصبحنا الآن قاب قوسين أو أدنى من الاكتشاف الأول. ومن خلال رصد كيفية تزايد هذه الفقاعات واندماجها، يمكننا رسم صورة للنجوم غير المرئية بداخلها؛ أي النجوم التي ماتت منذ مليارات السنين. وباستخدام التلسكوبات الحالية، سنجري ما يسمى بالكشف الإحصائي، وهو يتمحور حول تحديد الوقت بدقة كما في تجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، ولكن ليس تصوير الفقاعات الذي نطمح إلى تحقيقه يومًا.

«ماذا بعد؟» هذا هو السؤال الذي طالما تردّد على ألسنة علماء الفلك. تطلّب هذا الكُمّ الهائل من تجارب علم الفلك في العصر الحديث تخطيطًا وتفانيًا على مدى عقود مضت، فبمجرد انطلاق إحدى البعثات، يبدأ وضع الأساس للتجربة التالية والإعداد لها. وبوصفنا علماء في الفيزياء الفلكية، دائمًا ما نُضطر إلى التفكير في الخطوة التالية. ومع تلسكوبات الجيل الحالي مثل مصفوفة الترددات المنخفضة وتجربة رصد تأثير عصر إعادة التأين العالمي، لا يمكننا التعمق كثيرًا إلا في عصر إعادة التأين والفجر الكوني ... أما العصور المظلمة، فإنها تكاد تكون بعيدة المنال تمامًا. ويمكننا باستخدام التكنولوجيا الأرضية المتقدمة وحدها إحراز مزيد من التقدم في المراحل التي تلي عصر النجوم الأولى — الفجر الكوني وعصر إعادة التأين — لكننا سنحتاج إلى الاسترشاد بالقمر فيما يخص العصور المظلمة.

مصفوفة الكيلومتر المربع

الخطوة التالية في هذا المجال هي بناء مصفوفة الكيلومتر المربع.⁴ لقد كنت محظوظة بما فيه الكفاية للمشاركة في مصفوفة الكيلومتر المربع خلال مراحل التصميم اللاحقة وشاهدتُ بنفسني ما استلزمه الأمر من تنظيم وتعاون هائل استمر لسنواتٍ في جميع أنحاء العالم لضمان استمرار حصولنا على بيانات جديدة ونتائج جديدة وفهم جديد على مدى ٣٠ عامًا. سُميت مصفوفة الكيلومتر المربع بهذا الاسم لأنها عبارة عن تلسكوب راديوي (مصفوفة من الهوائيات) يغطي منطقة رصد أو تجميع في السماء، تزيد مساحتها على كيلومتر مربع. وهي تتألف من مجموعتين من المعدات، تتكوّن الأولى من مصفوفة من الأطباق (مصفوفة الكيلومتر المربع المتوسطة الترددات)، في حين تتكوّن الثانية من مجموعة من الهوائيات الثابتة مثل مصفوفة الترددات المنخفضة (مصفوفة الكيلومتر المربع المنخفضة الترددات). وبالإضافة إلى تقسيم التجربة إلى مجموعتين من الناحية

التقنية، فقد قُسمت جغرافياً بعد اتخاذ قرار في عام ٢٠١٢ بأن تشترك كل من جنوب أفريقيا وأستراليا في استضافتها، على أن يكون المقر الرئيسي في مانشستر بإنجلترا، أسفل تلسكوب لوفيل.

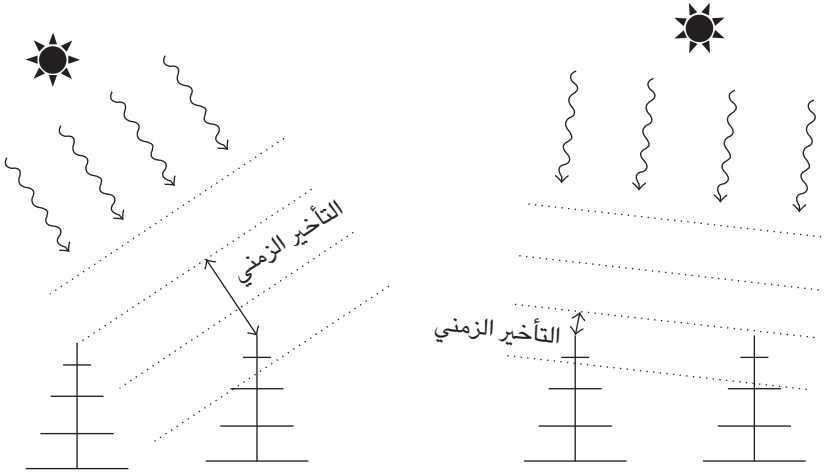
ستقام مصفوفة الكيلومتر المربع المتوسطة الترددات في جنوب أفريقيا، وتحديداً داخل منطقة صحراء كارو. وستتألف مما يقرب من ٢٠٠ طبق موزعة على مسافة تصل إلى ١٥٠ كيلومتراً (٩٣ ميلاً)، وستُستخدم في البحث عن موجات الجاذبية، وتحسين فهمنا للنسبية العامة من خلال البحث عن النجوم النابضة، بل ستمسح السماء بحثاً عن علامات على وجود حياة خارج كوكب الأرض. وعن نفسي، يستهويني الهدف العلمي الأخير بوجه خاص. سيتحقق علماء الكيمياء الفلكية من المناطق المحيطة بالكواكب في مراحل تكونها بحثاً عن البصمة الطيفية للنباتات الحية الأساسية؛ أي الأحماض الأمينية.⁵ ففي هذه المناطق الخارجية التي تحيط بالكواكب أثناء تكونها، يمكن أن تندمج هذه اللبنة الأساسية في شكل مذنب، ومن ثَمَّ تنتقل مكونات الحياة إلى كوكب صخري داخلي. هناك أيضاً مقترح بالبحث عن مزيد من المؤشرات المباشرة للحياة الذكية خارج كوكب الأرض من خلال البحث عن إشارات الراديو التي قد تصدرها المجتمعات الذكية غير الأرضية. وفي غضون ١٠٠٠ ساعة فقط من الرصد، تستطيع مصفوفة الكيلومتر المربع مسح أقرب ١٠٠٠ نظام نجمي بحثاً عن إشارات خافتة تشبه تلك الصادرة من رادار المطار على كواكب تبعد عشرات السنين الضوئية. وفي حال وجود إشارات تنبعث بالترددات الصحيحة، ستمكن مصفوفة الكيلومتر المربع من التقاط هذه الإشارات بسهولة.

فيما يخص الفجر الكوني، ينصب تركيزنا على مصفوفة الكيلومتر المربع المنخفضة الترددات في منطقة مورشيوسون بصحراء أستراليا الغربية. إن مصفوفة الكيلومتر المربع المنخفضة الترددات عبارة عن مصفوفة هوائيات شبكية، مما يعني أنها تتكوّن من مجموعة كبيرة من الهوائيات الثابتة المتصلة، التي لا يمكنها الدوران للتوجيه نحو السماء. وتعد حالياً مصفوفة الترددات المنخفضة أكبر تلسكوب راديوي متصل، حيث تتكوّن التجربة الكاملة من عدة آلاف من الهوائيات. في المقابل، تضم مصفوفة الكيلومتر المربع ١٣١ ألف هوائي، يبعد كلٌّ منها عن الآخر مسافة ٦٥ كيلومتراً (٤٠ ميلاً) كحد أقصى، وفي مرحلة ثانية من التطوير سيصل هذا العدد إلى ما يقرب من مليون هوائي. من المبادئ الأساسية لتصميم مصفوفة الكيلومتر المربع تقليل عدد الأجزاء المتحركة في التلسكوب لتقليل تكلفة النشر والصيانة. يمكنني أن أشهد شخصياً على مدى سهولة نشر

هذه الهوائيات، حيث إن لدينا واحدًا في المنطقة المشتركة بمكتبي. عند تسلُّمِه، وجدنا معه إرشادات لضمان سرعة التركيب. من الواضح أن (الافتقار إلى) المهارة اليدوية لدى عالم الفيزياء الفلكية المُعتمد على النظريات لم يُؤخذ في الاعتبار. إذ استغرق أربعة منا بضع ساعات في تركيبه. تتميز الهوائيات بأسعارها الزهيدة للغاية أيضًا، حيث يبلغ سعرها حوالي ٢٠٠ يورو فقط، من دون الأجهزة الإلكترونية. لم نتأكد بعد مما إذا كنا قد وصلنا إلى التصميم النهائي للهوائي، لكنه يشبه بشكل عام شجرة عيد الميلاد، ومن ثمَّ نسميه هوائي شجرة عيد الميلاد (وبالتالي نزينه في ديسمبر).

يمكن لمصفوفات الهوائيات الشبكية، مثل مصفوفة الترددات المنخفضة ومصفوفة الكيلومتر المربع، إجراء الرصد في اتجاهات مختلفة من خلال جمع إشارات الهوائيات، بدلاً من توجيهه طبق. ويبين شكل ١١-١ مصدرين مختلفين في الفيزياء الفلكية يصدران إشعاعًا. يلتقط هوائيان هذا الإشعاع، لكن الإشارة تصل إلى كل هوائي في وقت مختلف عن الآخر. ويسمى الفرق بين زمن الوصول في الحالتين بالتأخير الزمني. يتغير التأخير الزمني حسب مكان وجود المصدر في السماء. ولتوجيه مصفوفة شبكية في اتجاه معين، عليك أن تحدد فقط الإشارات ذات التأخير الزمني المكافئ للاتجاه الذي تريد رصده. وبهذه الطريقة، يمكننا القول إن المصفوفة يمكنها التحكم في اتجاهها (أو المنطقة التي ترصدها في السماء). مع وجود ١٣١ ألف هوائي، فإن العملية تكون معقدة للغاية وكمية البيانات التي تستقبلها الهوائيات هائلة. تعمل مصفوفة الكيلومتر المربع على الإسراع من التطورات التكنولوجية لمواكبة متطلبات البيانات المتوقعة، وفي الوقت نفسه إصدار قائمة لا حصر لها من الإحصاءات الفائقة. وسيعمل جهازان من أجهزة الكمبيوتر الفائقة، أحدهما في أستراليا والآخر في جنوب أفريقيا، على تسجيل كم هائل من البيانات يكفي لاستنفاد سعة مليون جهاز كمبيوتر محمول سنويًا. وكانت سرعة تدفق البيانات إلى هوائيات مصفوفة الكيلومتر المربع المنخفضة الترددات أسرع بمقدار ١٠٠ ألف مرة من سرعة النطاق العريض المتوقعة في عام ٢٠٢٢. ماذا عن الكابلات الضوئية التي تربط جميع الهوائيات بجهازَي الكمبيوتر الفائقين؟ هناك ما يكفي منها للالتفاف حول الأرض مرتين. تعد مصفوفة الكيلومتر المربع المنخفضة الترددات بتقديم أداءٍ باهر. بدأ بناء المصفوفة خلال عامي ٢٠٢٠ و٢٠٢١، وبالتالي من المقرر أن تظهر أولى الملاحظات المنبثقة عن عمليات الرصد العلمي في عام ٢٠٢٧. إن مصفوفة الكيلومتر المربع هي التجربة الثانية في مسيرتي المهنية، بعد مصفوفة الترددات المنخفضة، وأتطلع بشغف إلى تدفق البيانات الأول الذي

سيغمر أنظمتنا. نحن الآن في وضع مميز بفضل ما يتوفر لدينا من كم هائل من البيانات، ولكن الأمر يستلزم منا اتخاذ قرارات سريعة بشأن ما يجب الاحتفاظ به وما يجب حذفه، حيث لا توجد مساحة تخزين كافية للاحتفاظ بهذه البيانات كلها.



شكل ١١-١: يعتمد التأخير الزمني بين هوائيين يستقبلان إشارة على الموقع المصدر. يمكن عكس برمجة هذا الوضع بحيث تحلل فقط الإشارات ذات التأخير الزمني المناسب للاتجاه الذي نريد النظر إليه.

مع الجيل الحالي من التلسكوبات، مثل مصفوفة الترددات المنخفضة ومصفوفة مورشيسون الواسعة المجال، نطمح إلى تحقيق أول اكتشاف لعصر إعادة التأين؛ وهو قياس درجة حرارة الهيدروجين التي تشير إلى تكون الفقاعات المتأينة وتداخلها في نهاية المطاف. وفي النهاية، تتأثر نتائج هذه التجارب بعوامل كثيرة، مثل مقدار الضجيج المتداخل مع الإشارة، والضجيج الصادر عن الجهاز نفسه، والضجيج القادم من السماء. ويمكننا التغلب على هذا الضجيج كلما زاد عدد عمليات الرصد التي نجرها أو كلما زاد عدد الهوائيات المستخدمة في التلسكوب. ولالتقاط صورة، لا بد أن تكون نسبة الإشارة إلى الضجيج واحدًا صحيحًا أو أكثر؛ أي يجب أن تكون قوة الإشارة متناسبة على الأقل مع مقدار الضجيج الصادر. يصعب تحقيق ذلك الأمر باستخدام الجيل الحالي من التلسكوبات، ولذا علينا أن نقنع بإجراء أول استكشافات إحصائية من نوعها. ومع ذلك،

في حالة مصفوفة الكيلومتر المربع، التي تضم ١٣١ ألف هوائي، فإن مستوى الضجيج يكون أقل بكثير حتى إن شرط «نسبة الإشارة : الضجيج = ١» يمكن أن يتحقق تقريباً بمجرد تشغيل المصفوفة. سيتعين إجراء بعض التعديلات في إعدادات التلسكوب، ولكن عندما يصبح جاهزاً للعمل في أواخر العشرينيات من القرن الحادي والعشرين، يمكننا أن نتوقع الحصول على صور واضحة للفقاعات. والمذهل حقاً في الأمر أننا سنتمكن من التقاط هذه الصور على مدى فترة زمنية تقارب مليار عام، مما يتيح لنا رسم خريطة لكيفية تطور الكون. إنه فيلم واقعي لكوننا وهو ينمو على مدى مليار سنة، أمام أعيننا مباشرة.

والسؤال هنا: كيف ستبدو تلك الفقاعات؟ حسناً، يعتمد الأمر على متغيرات كثيرة، سواء فيما يتعلق بالفيزياء الفلكية (العوامل المتعلقة بالغاز) أو بالكون (العوامل المتعلقة بالمادة المظلمة وبنية الكون). يمكننا التعرف على ما يوجد داخل الفقاعات من خلال بحث أوجه التعاون مع التلسكوبات الأخرى. على سبيل المثال، إذا تمكنا من دراسة جزء بعينه من الكون باستخدام مصفوفة الكيلومتر المربع وأحد التلسكوبات البصرية، فقد نتمكن من ربط فقاعات راديوية محددة بالمجرات البصرية المرصودة، وكشف العلاقة بين شكل الفقاعة وحجمها وما تحويه داخلها. وسيؤثر أيضاً التوزيع الأساسي للمادة المظلمة في مكان تكوّن النجوم الأولى والثقوب السوداء. فكلما زادت كثافة المادة المظلمة، زاد تأثير قوة جاذبيتها على الغاز، وزادت احتمالية تكوّن نجم. هذا يمنحنا فرصة رائعة لاستخدام توزيع الفقاعات كوسيلة لتتبع توزيع المادة المظلمة التي تشكّلت منها البنية الأساسية للكون القديم.⁶ وسيطلب ذلك ساعات عديدة من الرصد، لكنه سيساهم كثيراً في علم الكونيات. أما من منظور الفيزياء الفلكية، فإن أشكال الفقاعات تتأثر كثيراً بالكون الأساسي الذي تحويه داخلها والذي أدى إلى تشكّلها. فمن المرجح أن تكون فقاعات الكوازارات (الثقوب السوداء) أكبر حجماً وأكثر تبايناً في الشكل من الفقاعات الكروية المنتظمة للمجرات التي تشكّل النجوم، ومن المرجح أن معظم الفقاعات التي نراها تحوي داخلها العديد من المكونات الأساسية التي تشكّلت منها. وهذا يعني أن الفقاعات لا تحتوي على نجم أو ثقب أسود واحد فحسب، بل تحتوي على العديد من الثقوب السوداء و/أو النجوم داخل العديد من المجرات. ويمكننا الاسترشاد بأشكال الفقاعات في تحديد محتواها ومكوّناتها الأساسي.

في المرحلة الأولى من مصفوفة الكيلومتر المربع، التي تتضمن ١٣١ ألف هوائي، سنغطي في رحلتها الاستكشافية للكون الفترة ما بين ١٠٠ مليون سنة ومليار سنة تقريباً

بعد الانفجار العظيم. تشمل هذه الفترة عصر إعادة التأين وبداية الفجر الكوني. وفي المرحلة الثانية من المصفوفة، التي ستتضمن ما يصل إلى مليون هوائي، سنغوص أكثر في أعماق الزمن ونلتقط صورًا من العصور المظلمة. وحتى في المرحلة الأولى، سنستكشف جزءًا كبيرًا من الكون المرئي. في الوقت الحالي، تقتصر عمليات الرصد لدينا على المناطق القريبة نسبيًا من كوكب الأرض، كما في حالة مسح المجرات، أو عمليات الرصد الأحادية لاستكشاف المراحل الأولى من الكون، مثل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي. وقد أشار العلماء المشاركون في مصفوفة الكيلومتر المربع إلى أنهم الآن بصدد استخلاص العديد من الاستنتاجات الكونية المستندة إلى هاتين المجموعتين من البيانات، وذلك على افتراض «أنهما لم يتخللها حدث شيء غريب».⁷ من المثير للاهتمام أن استنتاجاتنا، على سبيل المثال، بشأن مقدار المادة المظلمة الموجودة في الكون وماهية سلوكها، تعتمد على مجموعة بياناتٍ منقوصة وغير مكتملة. فالبيانات غير المكتملة تؤدي إلى استنتاجاتٍ غير صحيحة. سترصد مصفوفة الكيلومتر المربع أجزاءً أكبر من الكون مقارنةً بما رُصدَ من قبل، مما يجعل مصفوفة الكيلومتر المربع المرصد الكوني المثالي للتحقق من جميع النماذج الموجودة لدينا باستخدام مجموعة بيانات أكبر بكثير، تغطي نطاقًا أكبر من حيث المكان والزمان، على نحو غير مسبوق في علم الفلك.

رحلة زهاب وعودة إلى القمر

تعد مصفوفة الكيلومتر المربع بمستقبل باهر بسبب قدرتها على تصوير الفقاعات واستكشاف الماضي وصولاً إلى الفجر الكوني. إنَّ وضعها في منطقة كهذه، ذات كثافة سكانية منخفضة وتداخل راديوي ضئيل، سيسهل علينا الأمور بعض الشيء. حيث كنا نحتاج عادةً إلى بذل الكثير من الجهد لإزالة الضوضاء البشرية الصادرة عن الهواتف المحمولة وطواحين الهواء والطائرات والراديو وما إلى ذلك. ولا يزال يتعين علينا فعل ذلك إلى حد ما، حتى في قلب الصحراء (فهناك موجات راديو صادرة عن أفران الميكروويف!). وهذا مهم بوجه خاص لعمليات الرصد المستقبلية للعصور المظلمة، وهي الفترة التي سبقت ظهور النجوم الأولى؛ أي بعد ١٠٠ مليون سنة من الانفجار العظيم. ولرصد الضوء من هذه المسافة الشحيحة، يتعين علينا ضبط تلسكوباتنا الراديوية على تردداتٍ منخفضة للغاية، تتراوح بين ٠,١ ميغاهرتز و ٣٠ ميغاهرتز، ويشكّل هذا تحديًا في حالة التلسكوبات الأرضية. فهناك طبقات من الغلاف الجوي تعلو رءوسنا، وتُعرف الطبقة العليا باسم

الأيونوسفير. تتأين طبقة الأيونوسفير بفعل الإشعاع الشمسي، ويؤثر اضطراب الذرات داخلها كثيرًا على نقل موجات الراديو. في حالة تلسكوبات مثل مصفوفة الترددات المنخفضة ومصفوفة الكيلومتر المربع، يُبذل الكثير من الجهد للتخفيف من تأثير الأيونوسفير على البيانات المرصودة، لكن المشكلة تتطور باستمرار. تتغير الأيونوسفير يوميًا بعد يوم، وساعة بعد ساعة، بسبب تقلب الرياح الشمسية التي تؤينها. ولن تسمح بنقل موجات الراديو على الإطلاق عندما يقل ترددها عن حد معين، ويمكن أن يصل هذا الحد الأدنى للتردد إلى ١٠ ميغاهرتز، كما حدث تمامًا في العصور المظلمة. ومن ثم، ترد موجات الراديو التي يقل ترددها عن هذا الحد من طبقة الأيونوسفير مباشرة، إما عائدةً إلى الفضاء أو إلى الأرض، حسب المكان الذي بدأت منه. يستخدم مهندسو الاتصالات اللاسلكية هذا التأثير كطريقة فعّالة لنقل إشارات الراديو اللاسلكية عبر القارات عن طريق ارتداد الإشارات من الغلاف الجوي. وهذا يعني أن تداخل الترددات الراديوية الذي يحدث لترددات العصور المظلمة يمثل مشكلة كبيرة، لدرجة أنه يكاد يكون من المستحيل العثور على منطقة خالية من الموجات الراديوية في أي مكان على الأرض. ولذلك علينا التوجه إلى الفضاء!

لا أستطيع التعبير عن مدى الإثارة التي يمثلها مفهوم البعثة الفضائية لدى عالم الفلك الراديوي. فقد اعتدنا أن نراقب بتهكم غرف زملائنا النظيفة وعمليات إطلاق الصواريخ، كل ذلك بينما نخرج هوائياتنا المسطحة ونجهزها للانطلاق في رحلة إلى الصحراء على متن شاحنة. ولذلك عندما سنحت الفرصة لعلماء الفلك الراديوي، استغلوها استغلالاً كبيراً. وكان من أبرز الحلول المطروحة وضع مصفوفة راديو على الجانب البعيد من القمر. يوفر القمر مكاناً مثاليًا يمكن الاختباء خلفه؛ لأن الجانب البعيد منه يظل دائماً هو الجانب «المظلم»، المحجوب دوماً عن الأرض. ويرجع ذلك إلى ظاهرة تسمى التقييد المدّي، حيث يتطابق الزمن الذي يستغرقه القمر للدوران حول محوره مع الزمن الذي يستغرقه القمر للدوران حول الأرض؛ ولذا على الرغم من دوران القمر وحصول الجانب «المظلم» على القدر نفسه من ضوء الشمس، فإننا لا نرى إلا وجهًا واحدًا للقمر. ونظرًا إلى أن الجانب البعيد من القمر محجوب عنا إلى الأبد، فستكون مصفوفة الراديو الموضوعة عليه بعيدة تمامًا عن ضجيج الأرض. تدور فكرة الولايات المتحدة في بناء مصفوفة الجانب البعيد لإجراء استقصاءات علمية راديوية عن العصور المظلمة والكواكب خارج النظام الشمسي⁸ حول توزيع ١٢٨ هوائيًا باستخدام مركبة جواله على مسافة تزيد على ١٠ كيلومترات (٦ أميال)، أما في حالة الهوائيات القمرية المنخفضة التردد المخصصة لعلم الفلك الراديوي (وهو الاسم الذي وضعه الفريق نفسه المختص بمصفوفة الترددات المنخفضة)،

⁹فستُشن ٥٠ مركبة قمرية أو أكثر إلى القمر، كل منها مزوّد بهوائي. وعلى مسافة أقصاها ١٠ كيلومترات (٦,٢١ أميال)، ستتحرك المركبات الجوّالة حتى تصل إلى التشكيل المطلوب للهوائيات. تصوّر أنك تنظر إلى القمر وتعرف أن هناك ٥٠ عربة صغيرة تتجول على الجانب الآخر منه. من المثير للاهتمام أن هناك بعثة صينية تسمى «تشانج آه» (اسم إلهة القمر الصينية) قد اتخذت الخطوات الأولى في مشروع الهوائيات القمرية المنخفضة التردد المخصصة لعلم الفلك الراديوي. وتتميز بعثات «تشانج آه» بأنها سلسلة من الجهود المتوالية. فقد نجحت بعثة «تشانج آه» الأولى والثانية في دخول مدار القمر، وتمكنت الثالثة من الهبوط بسلسلة على القمر (إذ لم ينكسر أي شيء)، وحققت البعثة الرابعة أول هبوط آلي بالكامل على الجانب البعيد من القمر في ٣ يناير ٢٠١٩. كان الهدف الرئيسي للمهمة هو استكشاف جيولوجيا القمر من خلال الهبوط على واحدة من أعرق وأكبر الفوهات في المجموعة الشمسية؛ وهي عميقة جدًا لدرجة أنها تخترق غلاف القمر. يُعتقد أن جيولوجيا الجانب البعيد من القمر تختلف عن الجانب القريب، وهي قادرة على تزويدنا بمزيد من الأدلة حول كيفية تشكّل القمر في المراحل الأولى لمجموعتنا الشمسية. ولكي يتواصل مسبار «تشانج آه» الرابع مع الأرض، فإنه يعتمد على قمر صناعي لترحيل الإشارات يطل على الجانب البعيد من القمر والأرض، عند النقطة L2 التي تقع في مجال جاذبية الأرض والقمر. يُطلق على هذا القمر الصناعي اسم «تشويه تشياو»، أو «جسر العقق»، في إشارة إلى حكاية شعبية صينية عن عاشقين يُنفيان إلى جانبيين متقابلين من درب التبانة ويتقابلان لفترة وجيزة كل عام على جسر مصنوع من طيور العقق. تُجرى من خلال هذا القمر الصناعي تجربة تهدف إلى تحديد خصائص تداخل الترددات الراديوية والضوضاء الموجودة في خلفية القمر. يتكوّن المستكشف الهولندي-الصيني المنخفض التردد،¹⁰ من ثلاثة هوائيات بطول ٥ أمتار (١٦ قدمًا) موضوعة على القمر الصناعي «تشويه تشياو». وهي حاليًا تسجل البيانات، وتنصت بشدة لسماع ما يمكن سماعه على الجانب البعيد من القمر، لتحديد ما إذا كان هادئًا بدرجة كافية لإجراء التجارب المقترحة. إنها الخطوة الأولى في خارطة طريق تطمح إلى إرسال فرقة من العربات الجوّالة.

هل سيتجه علم الفلك الراديوي المهتم بالفوتون الذي يبلغ طوله الموجي ٢١ سم إلى الفضاء في العقود القليلة المقبلة؟ أمل ذلك. فالتوجه نحو الفضاء هو فرصتنا الحقيقية الوحيدة لاستكشاف العصور المظلمة. والعصور المظلمة عامل أساسي في تعزيز فهمنا للفيزياء

الفلكية وعلم الكونيات، وذلك بوصفها تمثل أنقى الفترات وأبسطها في تاريخ الكون. فقبل التعقيدات التي طرأت على الكون بتكوّن النجوم والمجرات والكواكب، لم يكن هناك سوى كون هادئ مليء بالمادة المظلمة والهيدروجين. ومن ثَمَّ، يمكننا على سبيل المثال التوصل إلى توقعاتٍ دقيقة بشأن حالة المادة المظلمة، وحتى لو انطوت توقعاتنا على بعض الأخطاء، فذلك يشير إلى وجود ظواهر فيزيائية تتعدى حدود النظريات الفيزيائية القياسية، مما يستوجب وضع قوانين ونظريات فيزيائية جديدة.

تكمّن أهمية علم الفلك الراديوي حاليًا في كونه يجمع بين الممارسات التقليدية البسيطة وأحدث الأبحاث العلمية. فبينما نحن واقفون على أرض صلبة، نضع الركائز الأساسية لبناء مصفوفاتٍ من الهوائيات الضخمة في الأماكن النائية. ولكن البيانات التي تجمعها هذه الهوائيات تفوق إمكانات المعالجة في تقنياتنا الحالية. ومن ثَمَّ، نسعى إلى تطوير التقنيات الخاصة بكابلات الألياف الضوئية وتخزين البيانات وأنظمة التبريد. وفي حين أننا قصرنا نماذجنا الحالية على دراسة الفجر الكوني وعصر إعادة التأين، بعد عقود من عمليات المحاكاة والحسابات، من المحتمل دائمًا أن تنتفي صحة كل هذه النماذج. فيما يلي اقتباس لجزء من المقترح العلمي لمصفوفة الكيلومتر المربع من عام ٢٠٠٤:

بالنظر إلى التجارب السابقة، نجد أن تميّز مصفوفة الكيلومتر المربع لا يكمن في الأسئلة القديمة التي أُجيبَ عنها من قبل، ولكنه يكمن في الأسئلة الجديدة التي تثيرها أنماط جديدة من عمليات الرصد التي لن يتسنى تنفيذها إلا من خلال مصفوفة الكيلومتر المربع. فمصفوفة الكيلومتر المربع أداةٌ لمستخدمين لم يُولدوا بعد، ويقع على عاتق مصمّميها مسئولية إفساح المجال لاستكشاف المجهول.

من المتوقع أن يبلغ العمر الافتراضي لمصفوفة الكيلومتر المربع نحو ٥٠ عامًا، ومن ثَمَّ ستستمر في أخذ القياسات لفترة طويلة بعد تقاعدي. ومن المثير حقًا أن الأشخاص الذين سيرعون في استخدام مصفوفة الكيلومتر المربع في نهاية عمرها الافتراضي لم يُولدوا بعد. وهم من سيجيبون عن الأسئلة التي لم تخطر حتى على أذهاننا. في محاضرة ألقينها خلال صيف عام ٢٠١٩، رفع طالب في المرحلة الثانوية يده وسألني: «هل يُشعرُك علم الكونيات بالإحباط؟» كان يشير بذلك إلى العناصر التي تناولتها

في المحاضرة حيث سلّطت الضوء على حجمنا المتناهي الصغر وأعمارنا اللحظية، مقارنةً بالكون العتيق المترامي الأطراف من حولنا. في بعض الأحيان، قد يكون العمل في وظيفة تذكرك يوميًا بمدى ضآلتك وعدم أهميتك ... أمرًا منهكًا ومستنفدًا للطاقة. ومع ذلك، فإن علاقتي بعلم الكونيات كانت إيجابية إلى حد كبير. فهو يجعلني أشعر بأنني محظوظة. ذلك حيث أدرك مدى توازن الأحداث التي أفضت إلى وجودنا، وعنصر المصادفة الذي ساعدنا في فهم الكون بهذا القدر الذي عليه الحال الآن. لقد وصلت مهارتنا إلى درجة أن قطعة صخرية تدور حول كوكبنا أصبحت مدخلنا إلى فهم ماضينا السحيق؛ ذلك الماضي الذي نحن على وشك رؤيته بأنفسنا. بطريقة ما، نجحنا نحن البشر، رغم ما نوصف به من كوننا كائنات صغيرة وضئيلة الأهمية، في وقف الصراع المحتدم بينهم لفترة كافية لوضع خطة لإجراء تجربة تمتد لعقود. أشعر كما لو أنني حصلت على تذاكر لحضور أعظم عرض في العالم. وهذا ليس بالأمر المحبط على الإطلاق، بل هو أمر مذهل. وقد حان الوقت للاستمتاع بالعرض.

مراجع مفيدة

Wild, S. 2012. *Searching African Skies*. Jacana Media (Pty) Ltd., Johannesburg, South Africa.

ملحق الصور



شكل ١: إكليل الشمس كما ظهر أثناء كسوف الشمس الكلي في عام ٢٠١٧.

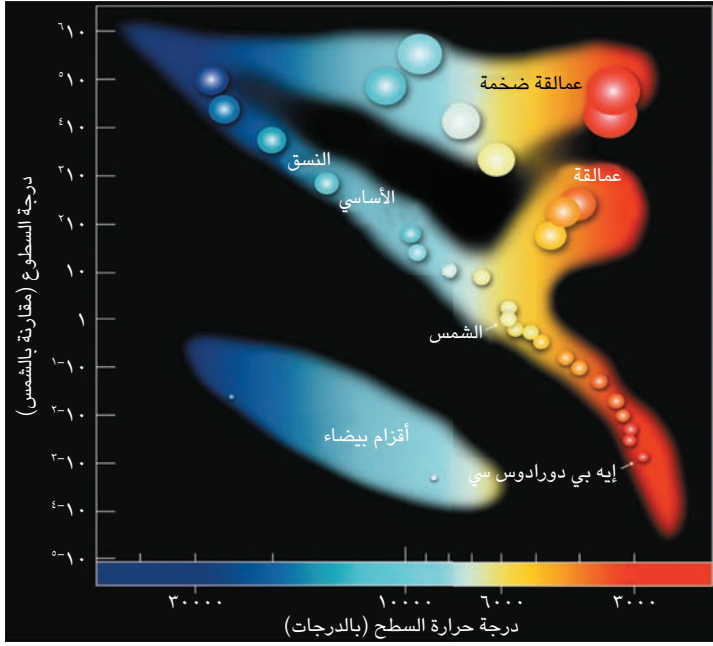
الضوء الأول



شكل ٢: لوحة الإكليل التي رسمها الفنان هوارد بتلر أثناء كسوف الشمس عام ١٩٢٥.



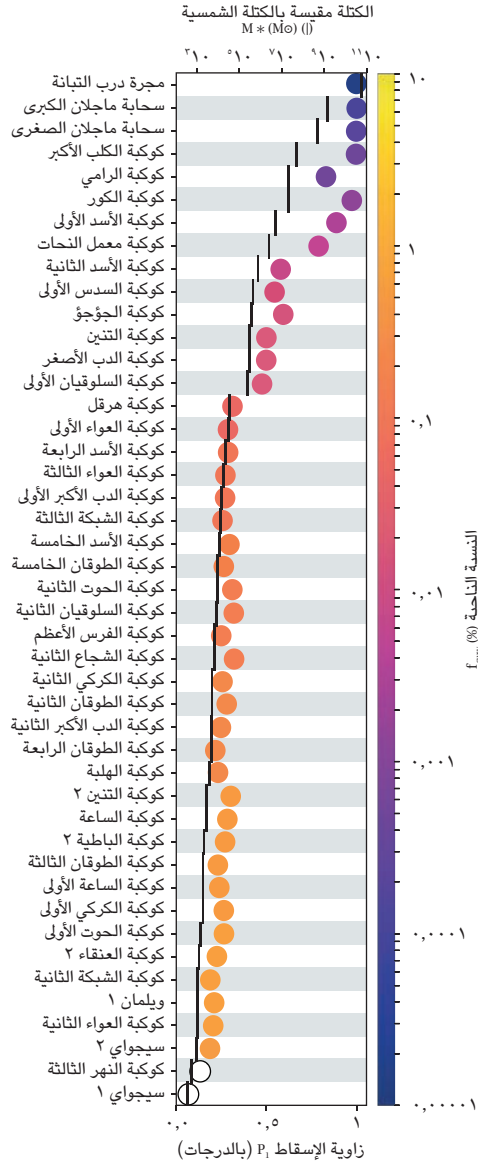
شكل ٣: مجرة «قنطورس أ» كما رُصدت عند استخدام الطول الموجي المرئي فقط ومع تراكب النتوءات المستديرة الراديوية العملاقة.



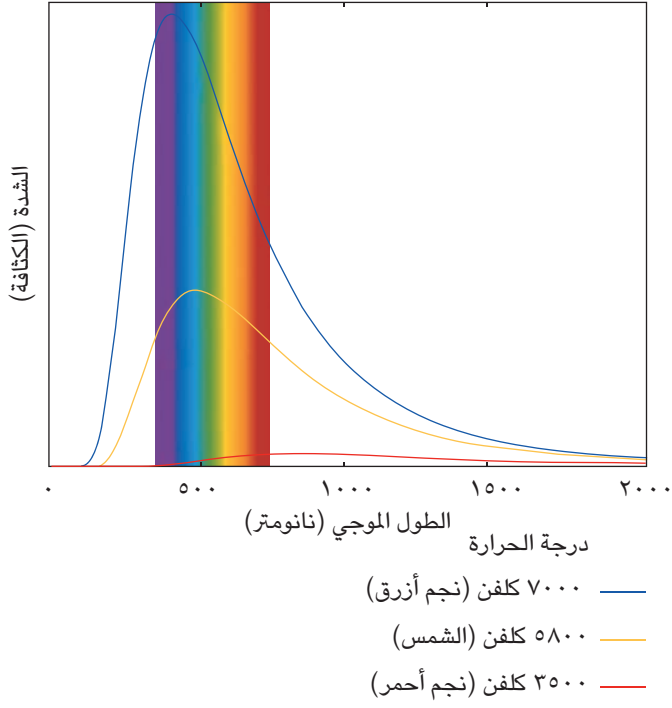
شكل ٤: مخطط هرتسبرونج-راسل.



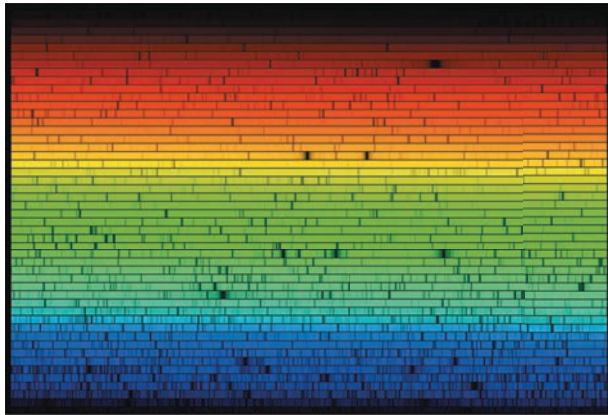
شكل ٥: مجرة أندروميديا، أحد أقرب المجرات إلينا.



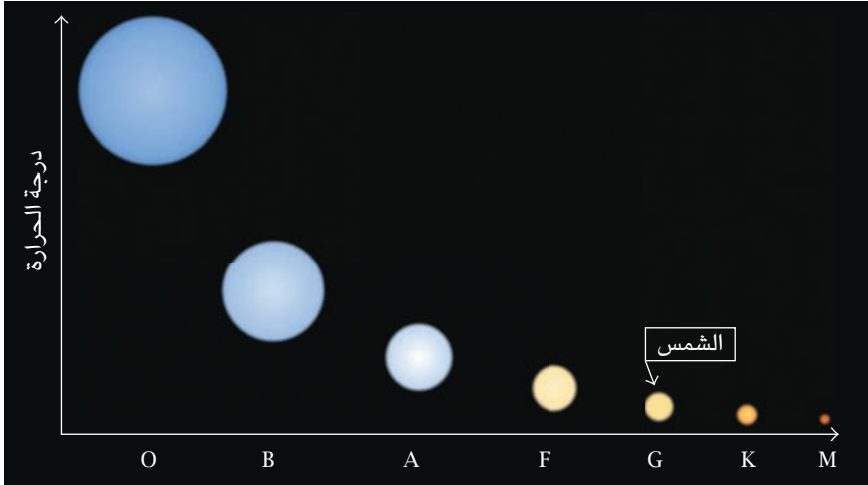
شكل ٦: البحث عن نجم أول في المجرات القزمة (انظر الفصل الثامن).



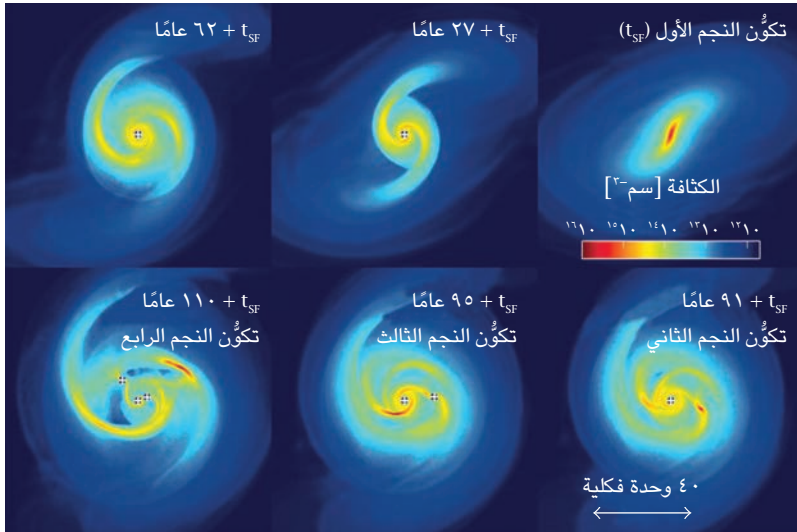
شكل ٧: أمثلة على منحنيات الجسم الأسود النجمية.



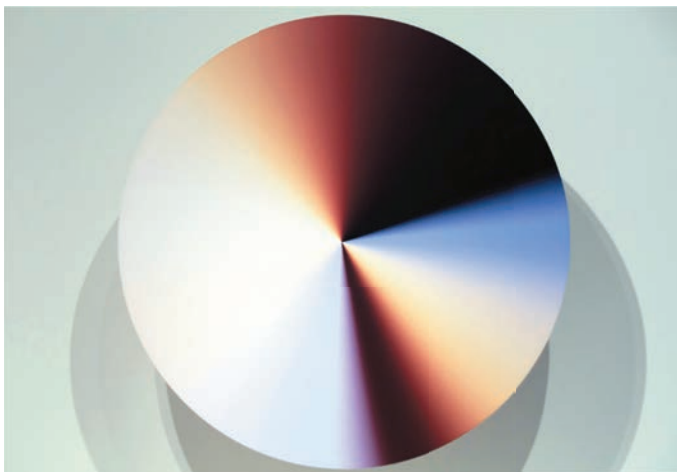
شكل ٨: الطيف الشمسي في الأطوال الموجية المرئية.



شكل ٩: في نظام جامعة هارفارد لتصنيف النجوم، يبلغ متوسط درجة حرارة سطح نجم من الفئة O حوالي ٣٠ ألف كلفن أو أكثر، في حين أن درجة حرارة نجم من الفئة M تقترب من ٣ آلاف كلفن.



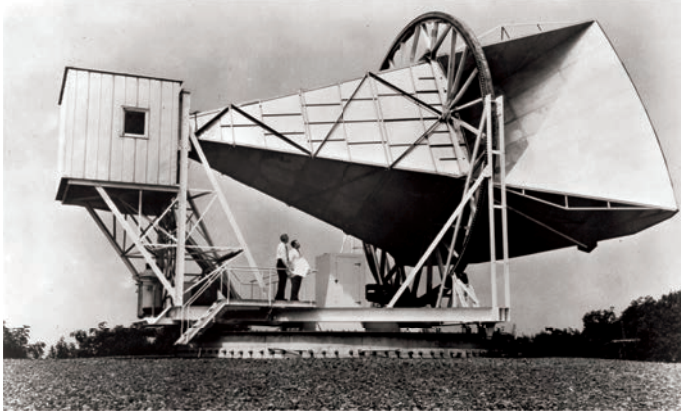
شكل ١٠: قرص من الغاز ينقسم إلى أربعة نجوم أولية من نجوم الجبهة الثالثة في فترة زمنية قصيرة تتجاوز مائة عام بقليل.



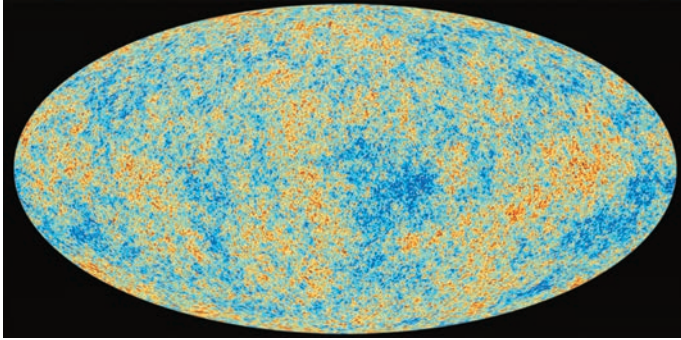
شكل ١١: «الطيف الكوني» لكاتي باترسون. صورة لمانو بالوميكي.



شكل ١٢: سيسيليا باين-جابوشكين.



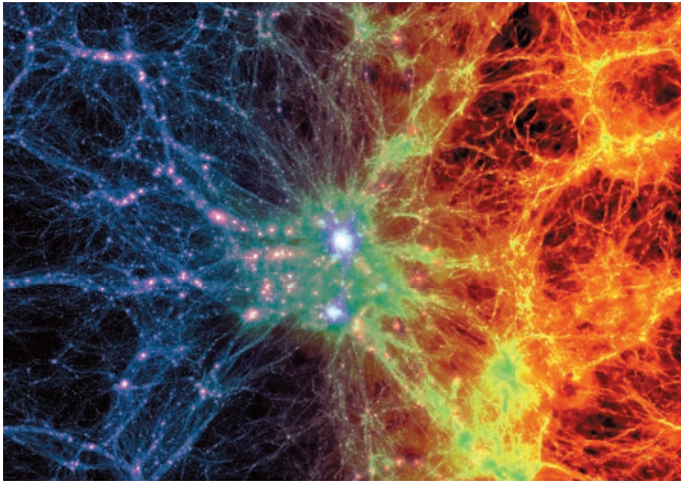
شكل ١٣: بنزياس وويلسون يحددان في الهوائي البوقي بهومدل في مختبر «بل تليفون».



شكل ١٤: خريطة بلانك لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي.



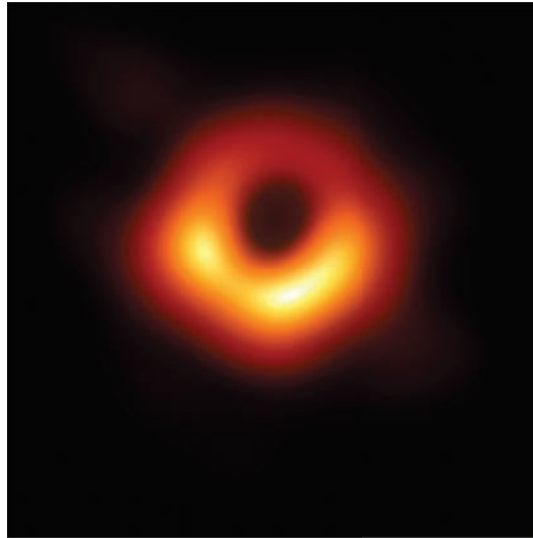
شكل ١٥: ستروماتوليت في خليج القرش بغرب أستراليا.



شكل ١٦: الشبكة الكونية. توزيع الغاز (يمينًا) وتوزيع المادة المظلمة (يسارًا) من محاكاة إليوسترز لتكوّن المجرات الكونية.



شكل ١٧: حقل هابل الفائق العمق.



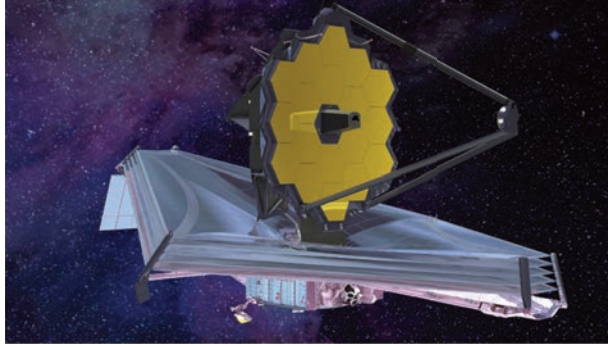
شكل ١٨: صورة لأفق الحدث بالثقب الأسود الفائق الضخامة في مجرة إم ٨٧، ملتقطة بتلسكوب «أفق الحدث».



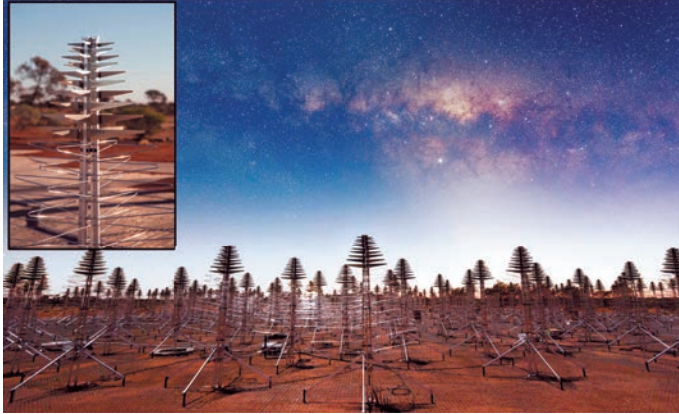
شكل ١٩: مجرتا الفئران أثناء عمليتي التصادم والاندماج المطولتين.



شكل ٢٠: مجرتا الهوائيات؛ حيث تسببت عملية اندماج عنيفة في حدوث مراحل جديدة من تكوين النجوم.



شكل ٢١: تصوّر فني لتلسكوب جيمس ويب الفضائي.



شكل ٢٢: نظام التحقق من المصفوفة الشبكية، المرحلة التجريبية لتقنية مصفوفة الكيلومتر المربع المرتقبة، مع ظهور مجرة درب التبانة بالأعلى.



شكل ٢٣: يتملكني هنا شعور قوي بالفخر بواحدة من محطات مصفوفة الترددات المنخفضة في المركز الرئيسي للتلسكوب الراديوي بالقرب من إكسلو بهولندا.



شكل ٢٤: تلسكوب جرين بانك في ١٥ نوفمبر ١٩٨٨ (يمينًا) و ١٦ نوفمبر ١٩٨٨ (يسارًا).

المراجع

الفصل الأول: فوق قوس قزح

- (1) Dvorak, J. 2017. *Mask of the Sun: The Science, History and Forgotten Lore of Eclipses*. Pegasus Books Ltd, Cambridge, UK.
- (2) www.space.com/37764-new-york-city-1925-total-eclipse.html.
- (3) Brown, E. W. 1925. The Eclipse of January 24, 1925, *Science* 61 (1566): 10–12.
- (4) Claridge, G. 1937. Coronium. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 31 (8): 337–3446.
- (5) Nordgren, T. 2016. *Sun Moon Earth: The History of Solar Eclipses from Omens of Doom to Einstein and Exoplanets*. Basic Books, New York, US.
- (6) www.space.com/27412-christopher-columbus-lunar-eclipse.html.
- (7) Marchant, J. 2009. *Decoding the Heavens: Solving the Mystery of the World's First Computer*. Windmill Books, London, UK.
- (8) Halley, E. 17145. Observations of the late total eclipse ... *Philosophical Transactions of the Royal Society* 29 (343): 245–262.
- (9) Brown, E. W. 1926. Discussion of Observations of the Moon at and Near the Eclipse of 1925 January 24. *Astronomical Journal*, 37 (866): 9–19.

(10) *The New York Times*, vol. LXXIV, no. 24, 473, Sunday, 25 January 1925.

(11) www.nasa.gov/feature/goddard/2017/chasing-the-total-solar-eclipse-from-nasa-s-wb-57f-jets.

(12) Klimchuk, J. A. 2006. On Solving the Coronal Heating Problem. *Solar Physics*, 234 (1): 41–77.

(13) G Caspi, A. et al. 2020. A New Facility for Airborne Solar Astronomy: NASA's WB-57 at the 2017 Total Solar Eclipse.

The Astrophysical Journal, 895 (2): id.131.

(14) Gleick, J. 2004. *Isaac Newton*. Harper Perennial.

(15) Herschel, W. 1800. Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 90: 284–292.

(16) Einstein, A. 1905. On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light. *Annalen der Physik* 322 (6): 132–148.

(17) Gracheva, E. et al. 2010. Molecular Basis of Infrared Detection by Snakes. *Nature* 464: 1006–1011.

(18) Hogg, C. 2011. Arctic Reindeer Extend their Visual Range into the Ultraviolet. *Journal of Experimental Biology* 214: 2014–2019.

(19) Lockyer, N. 1869. Spectroscopic Observations of the Sun. No. II. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 159: 425–444.

(20) www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe-humanity-s-first-visit-to-a-star.

(21) Sobel, D. 1996. *Longitude*. Fourth Estate, London, UK.

(22) Rømer, O. 1676. Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Roemer de l'Académie des sciences. *Journal des sçavans*: 233–236.

(23) Rømer, O. 1676. Démonstration Touchant le Mouvement de la Lumière Trouvé par M. Roemer de l'Académie des Sciences. *Journal des sçavans*: 233–236.

(24) Rømer, O. 1677. A Demonstration Concerning the Motion of Light, Communicated from Paris, in the *Journal des Scavans*, and Here Made English. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*: 893–894.

(25) Gamow, G. 1967. *A Star Called the Sun*. Pelican, London, UK.

(26) Woolf, V., Olivier Bell, A. 1990. *A Moment's Liberty: Shorter Diary of Virginia Woolf*. Chatto & Windus.

(27) Private Communication with Royal Society Librarian Keith Moore.

(28) Green, L. 2017. *15 Million Degrees*. Penguin, London, UK.

الفصل الثاني: أين تقع نجوم الجبهة الثالثة؟

(1) <https://abcnews.go.com/Business/beanie-babies-mania-ends-bankruptcy/story?id=19785126>.

(2) Kahneman, D. *et al.* 1991. Anomalies: The Endowment Effect, Loss Aversion, and Status Quo Bias. *Journal of Economic Perspectives*, vol. 5, no. 1: 193–206.

(3) Davis, W. 2009. *The Wayfinders: Why Ancient Wisdom Matters in the Modern World*. House of Anansi Press Ltd, Canada.

(4) Dempsey, F. 2009. Aboriginal Sky Lore of the Constellation Orion in North America. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, vol. 103, no. 2: 65.

(5) Sobel, D. 2017. *The Glass Universe*. Harper Collins Publishers, New York, US.

(6) Haramundanis, K. 1996. *Cecilia Payne-Gaposchkin: An Autobiography and Other Recollections*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- (7) Payne, C. 1924. On the Spectra and Temperatures of the B Stars. *Nature*, vol. 113, 2848: 783–784.
- (8) Payne, C. 1925. Stellar Atmospheres. PhD Thesis, Radcliffe College.
- (9) Payne, C. *The Dyer's Hand*. Privately Printed Autobiography.
- (10) Baade, W. 1944. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. *Astrophysical Journal*, vol. 100: 137.
- (11) Baade, W. 1944. NGC 147 and NGC 185, Two New Members of the Local Group of Galaxies. *Astrophysical Journal*, vol. 100: 147.
- (12) Russell, H. 1948. On the Distribution of Absolute Magnitude in Populations I and II. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 60, no. 354: 202–204.
- (13) Bond, H. 1981. Where is Population III? *Astrophysical Journal*, v 248: 606–611.

الفصل الثالث: الانفجار الصغير

- (1) Watanabe, S. *et al.* 1995. Pigeons' Discrimination of Paintings by Monet and Picasso. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, vol. 63: 165–174.
- (2) Scarf, D. *et al.* 2016. Orthographic Processing in Pigeons (*Columba Livia*). *Proceedings of the National Academy of Sciences Sep 2016*, 201607870.
- (3) Scarf, D. *et al.* 2011. Pigeons on Par with Primates in Numerical Competence. *Science* 334, (6063): 1664.
- (4) Levenson, R. *et al.* 2015. Pigeons (*Columba Livia*) as Trainable Observers of Pathology and Radiology Breast Cancer Images. *PLoS ONE* 10(11): e0141357.
- (5) Armando, the 'Lewis Hamilton of Pigeons' Sells for Record €1.25m. March 2019. www.bbc.co.uk/news/world-europe-47610896.

(6) Blechman, A. 2017. *Pigeons: The Fascinating Saga of the World's Most Revered and Reviled*. Grove Press, New York, US.

(7) Scarf, D. *et al.* 2011. Pigeons on par with primates in numerical competence. *Science* 334, (6063): 1664.

(8) For Heaven's Sake Stop It. May 2010. www.lettersofnote.com/2010/05/for-heavens-sake-stop-it.html.

(9) 'Mary of Exeter'. www.pdsa.org.uk/get-involved/dm75/the-relentless/mary-of-exeter.

(10) The Pigeon, the Antenna and Me: Robert Wilson. October 2015. www.scientificamerican.com/video/the-pigeon-the-antenna-and-me-robert-wilson.

(11) Doyle, A. 2015. *The Sign of Four*. Penguin English Library, London, UK.

(12) Chown, M. 1993. *Afterglow of Creation*. Arrow Books, London, UK.

(13) The pigeon, the antenna and me: Robert Wilson. October 2015. www.scientificamerican.com/video/the-pigeon-the-antennaand-me-robert-wilson.

(14) The Big Bang's Echo. *NPR News*. May 2005. www.npr.org/templates/transcript/transcript.php?storyId=4655517.

(15) What Is a Cosmological Constant? https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/uni_accel.html.

(16) Van der Marel, R. *et al.* 2012. The M31 Velocity Vector. III. Future Milky Way M31–M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun. *The Astrophysical Journal* 753 (1).

(17) Hubble, E. 1929. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 15, issue 3, 168–173.

(18) Lemaître, A. G. 1931. A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic

Nebulæ. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 91: 483–490.

(19) The Steady-State Challenge. www.britannica.com/science/astronomy/The-steady-state-challenge.

(20) Chown, M. 1993. *Afterglow of Creation*. Arrow Books, London, UK.

(21) Dicke, R. *et al.* 1965. Cosmic Black-Body Radiation. *The Astrophysical Journal*, vol. 142: 414–419.

(22) Penzias, A. & Wilson, R. 1965. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *The Astrophysical Journal*, vol. 142: 419–421.

(23) ‘The Nobel Prize in Physics 1978’. www.nobelprize.org/prizes/physics/1978/summary.

(24) ‘The Nobel Prize in Physics 2019’. www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary.

(25) McAllister, A. 2016. *A Year Full of Stories: 52 Folk Tales and Legends from around the World*. Frances Lincoln Children’s Books, London, UK.

(26) Weinberg, S. 1993. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Basic Books, New York, US.

الفصل الرابع: سحابة غاز محظوظة

(1) Okinawa’s Annual Tug-of-War Requires Lots of Workers, and Rope. October 2006. www.stripes.com/news/okinawa-s-annual-tug-of-war-requires-lots-of-workers-rope-1.54989.

(2) Rope Breaks for the First Time at Annual Great Tug-of-War. October 2019. <http://english.ryukyushimpo.jp/2019/10/18/31190>.

(3) Adams, D. 2016. *The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy*. Pan, London, UK.

(4) *The Apollo 15 Hammer-Feather Drop*. July 2018. <https://moon.nasa.gov/resources/331/the-apollo-15-hammer-feather-drop>.

- (5) Two Lose Arms in Taiwan Tug-of-War. 25 October 1997. *The Nation*.
- (6) Rope breaks for the first time at annual great tug-of-war. October 2019. <http://english.ryukyushimpo.jp/2019/10/18/31190>.
- (7) Carroll, B. & Ostlie, D. 2017. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (8) Grossman, D., Ganz, C. & Russell, P. 2017. *Zeppelin Hindenburg: An Illustrated History of LZ-129*. The History Press, Cheltenham, UK.
- (9) Hydrogen and Helium in Rigid Airship Operations. www.airships.net/helium-hydrogen-airships.
- (10) Green, L. 2017. *15 Million Degrees*. Penguin, London, UK.
- (11) Charles 'Don' Albury, 84. *Time Magazine*, 25 July 2005.
- (12) Phillips, A. 2010. *The Physics of Stars*. Wiley.
- (13) Green, L. 2017. *15 Million Degrees*. Penguin, London, UK.
- (14) Carroll, B. & Ostlie, D. 2017. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (15) Fukushima Melted Fuel Removal Begins 2021, End State Unknown. <https://abcnews.go.com/International/wireStory/fukushima-melted-fuel-removal-begins-2021-end-state-67426592>.
- (16) www.iter.org.
- (17) Mužić, K. *et al.* 2017. The Low-Mass Content of the Massive Young Star Cluster RCW 38. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 471 (3): 3699–3712.

الفصل الخامس: العصور المظلمة

- (1) <http://katiepaterson.org>.
- (2) http://katiepaterson.org/portfolio/the_cosmic_spectrum.

- (3) Baldry, I. *et al.* 2002. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Constraints on Cosmic Star Formation History from the Cosmic Spectrum. *The Astrophysical Journal* 569 (2).
- (4) Falchi, F. *et al.* 2016. The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness. *Science Advances* 2 (6).
- (5) www.theguardian.com/science/2018/feb/28/cosmic-dawn-astro-nomers-detect-signals-from-first-stars-in-the-universe.
- (6) <https://loco.lab.asu.edu/edges>.
- (7) Bowman, J. *et al.* 2018. An Absorption Profile Centred at 78 megahertz in the Sky-Averaged Spectrum. *Nature* 555: 67–70.
- (8) Barkana, R. 2018. Possible Interaction between Baryons and Dark-Matter Particles Revealed by the First Stars. *Nature* 555: 71–74.
- (9) Vogelsberger, M. *et al.* 2014. Introducing the Illustris Project: Simulating the Coevolution of Dark and Visible Matter in the Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 444, 2: 1518–1547.
- (10) This Is How Much Dark Matter Passes through Your Body Every Second. July 2018. www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/07/03/this-is-how-much-dark-matter-passes-through-your-body-every-second/#7cb9baaf7ccd.
- (11) <http://katiepaterson.org/portfolio/all-the-dead-stars>.
- (12) Sidhu, J. S., Scherrer, R. J. & Starkman, G. Death and Serious Injury from Dark Matter. *astro-ph/arXiv*: 1907.06674.
- (13) Bernabei, R. *et al.* 2018. First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase 2. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 19, issue 4: 307–325.
- (14) Muñoz, J. B. & Loeb, A. 2018. A Small Amount of Mini-Charged Dark Matter Could Cool the Baryons in the Early Universe. *Nature* 557: 684–686.

- (15) Ewall-Wice, A. *et al.* 2018. Modeling the Radio Background from the First Black Holes at Cosmic Dawn: Implications for the 21cm Absorption Amplitude. *The Astrophysical Journal* 868: 63.
- (16) Fixsen, D. J. *et al.* 2011. ARCADE 2 Measurement of the Absolute Sky Brightness at 3–90 GHz. *The Astrophysical Journal*, vol. 734: 11.
- (17) Dowell, J. & Taylor, G. B. 2018. The Radio Background below 100 MHz. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 858: 6.
- (18) <http://katiepaterson.org/portfolio/earth-moon-earth>.

الفصل السادس: تشظي النجوم

- (1) www.epa.gov/greatlakes/facts-and-figures-about-great-lakes.
- (2) Toledo Water Clears, but Outlook Is Cloudy. August 2014. *The Wall Street Journal*. www.wsj.com/articles/toledo-mayor-orders-more-drinking-water-tests-1407141074.
- (3) Kopp *et al.* 2005. The Paleoproterozoic Snowball Earth: A Climate Disaster Triggered by the Evolution of Oxygenic Photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102 (32): 11131–11136.
- (4) Schirrmeister, B. *et al.* 2013. Evolution of Multicellularity Coincided with Increased Diversification of Cyanobacteria and the Great Oxidation Event. *PNAS* January 29, 110 (5): 1791–1796.
- (5) Schirrmeister, B. *et al.* 2013. Evolution of Multicellularity Coincided with Increased Diversification of Cyanobacteria and the Great Oxidation Event. *PNAS* January 29, 110 (5): 1791–1796.
- (6) Jeans, J. 1928. *Astronomy and Cosmogony*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (7) Phillips, A. C. 2010. *The Physics of Stars*. Wiley.
- (8) Whale Explodes in Taiwanese City. Jan 2004. <http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/3437455.stm>.

- (9) Tajika E. & Harada M. 2019. Great Oxidation Event and Snowball Earth. In: Yamagishi A., Kakegawa T. & Usui T. (eds), *Astrobiology*. Springer, Singapore.
- (10) Walker, G. 2014. *Snowball Earth*. Bloomsbury, London, UK.
- (11) Clark, P. 2011. The Formation and Fragmentation of Disks around Primordial Protostars. *Science*, vol. 331, issue 6020: 1040–.
- (12) Loeb, A. 2010. *How Did the First Stars and Galaxies Form?* Princeton University Press, New Jersey, US.
- (13) Susa, H. 2019. Merge or Survive: Number of Population III Stars per Minihalo. *The Astrophysical Journal*, vol. 877, issue 2, article id. 99: 10 pp.
- (14) Hosokawa, T. *et al.* 2016. Formation of Massive Primordial Stars: Intermittent UV Feedback with Episodic Mass Accretion. *The Astrophysical Journal*, vol. 824, issue 2, article id. 119: 26 pp.
- (15) Walker, G. 2014. *Snowball Earth*. Bloomsbury, London, UK.
- (16) Greif, T. *et al.* 2012. Formation and Evolution of Primordial Protoprostellar Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 424, issue 1: 399–415.
- (17) Stacy, A. & Bromm, V. 2013. Constraining the Statistics of Population III Binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 433, issue 2: 1094–1107.
- (18) Carroll, B. & Ostlie, D. 2017. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (19) Wise, J. *et al.* 2012. The Birth of a Galaxy: Primordial Metal Enrichment and Stellar Populations. *The Astrophysical Journal*, vol. 745, issue 1, article id. 50: 10 pp.

الفصل السابع: علم الآثار النجمي

- (1) www.nationalgeographic.com/history/magazine/2018/03-04/findingkingtutstomb.
- (2) Growth Reference Data for 5–19 Years. www.who.int/growthref.
- (3) Evolution of Adult Height Over Time. www.ncdrisc.org/datadownloads-height.html.
- (4) Habicht, M. E. *et al.* 2015. Body Height of Mummified Pharaohs Supports Historical Suggestions of Sibling Marriages. *American Journal of Physical Anthropology* 157, 3.
- (5) Stacy, A. & Bromm, V. 2013. Constraining the Statistics of Population III Binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 433, issue 2: 1094–1107.
- (6) Stacy, A. *et al.* 2016. Building up the Population III Initial Mass Function from Cosmological Initial Conditions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 462, issue 2: 1307–1328.
- (7) Asplund, M. *et al.* 2009. The Chemical Composition of the Sun. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 47, issue 1: 481–522.
- (8) Frebel, A. 2015. *Searching for the Oldest Stars: Ancient Relics from the Early Universe*. Princeton University Press, New Jersey, US.
- (9) Frebel, A. 2018. From Nuclei to the Cosmos: Tracing Heavy-Element Production with the Oldest Stars. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 68, issue 1: 237–269.
- (10) Frebel, A. 2018. From nuclei to the cosmos: tracing heavyelement production with the oldest stars. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 68, issue 1: 237–269.
- (11) Chamberlain, J. & Aller, L. H. 1951. The Atmospheres of A-Type Subdwarfs and 95 Leonis. *Astrophysical Journal*, vol. 114: 52.

(12) Roman, N. 1950. A Correlation between the Spectroscopic and Dynamical Characteristics of the Late F- and Early G-Type Stars. *Astrophysical Journal*, vol. 112: 554.

(13) Baade, W. 1944. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. *Astrophysical Journal*, vol. 100: 137.

(14) Frebel, A. & Norris, J. 2013. *Metal-Poor Stars and the Chemical Enrichment of the Universe, Planets, Stars and Stellar Systems 5*, by Oswalt, Terry D.; Gilmore, Gerard. Springer Science + Business Media Dordrecht, Berlin, Germany. p. 55.

(15) Lucey, M. *et al.* 2019. The COMBS Survey – I. Chemical Origins of Metal-Poor Stars in the Galactic Bulge. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 488, issue 2: 2283–2300.

(16) Nordlander, T. *et al.* 2019. The Lowest Detected Stellar Fe Abundance: the Halo Star SMSS J160540.18–144323.1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, vol. 488, issue 1: L109–L113.

(17) Keller, S. *et al.* 2014. A Single Low-Energy, Iron-Poor Supernova as the Source of Metals in the Star SMSS J031300.36–670839.3. *Nature*, vol. 506, issue 7489: 463–466.

(18) Iben, I. 1983. Open Questions about the Formation of Heavy Elements in ‘Z = O’ Stars. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, vol. 54: 321–330.

(19) Comelli, D. *et al.* 2016. The Meteoritic Origin of Tutankhamun’s Iron Dagger Blade. *Meteoritics & Planetary Science* 51, no. 7: 1301–1309.

(20) Stulp, G. 2015. Does Natural Selection Favour Taller Stature among the Tallest People on Earth? *Proceedings of the Royal Society B*. 282, 1806.

(21) Lawrence Hugh Aller 1913–2003, a Biographical Memoir. www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/aller-lawrence.pdf.

الفصل الثامن: الالتهام المَجْري

- (1) Willman, B. & Strader, J. 2012. 'Galaxy,' Defined. *The Astronomical Journal*, vol. 144, issue 3, article id. 76L: 12 pp.
- (2) Belokurov, V. *et al.* 2007. Cats and Dogs, Hair and a Hero: a Quintet of New Milky Way Companions. *The Astrophysical Journal*, vol. 654, issue 2: 897–906.
- (3) Geha, M. *et al.* 2009. The Least-Luminous Galaxy: Spectroscopy of the Milky Way Satellite Segue 1. *The Astrophysical Journal*, vol. 692, issue 2: 1464–1475.
- (4) Simon, J. *et al.* 2011. A Complete Spectroscopic Survey of the Milky Way Satellite Segue 1: The Darkest Galaxy. *The Astrophysical Journal*, vol. 733, issue 1, article id. 46: 20 pp.
- (5) Fattahi, A. *et al.* 2020. A Tale of Two Populations: Surviving and Destroyed Dwarf Galaxies and the Build up of the Milky Way's Stellar Halo. arXiv:2002.12043.
- (6) Bromm, V. & Yoshida, N. 2011. The First Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 49, issue 1: 373–407.
- (7) Greif, T. *et al.* 2008. The First Galaxies: Assembly, Cooling and the Onset of Turbulence. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 387, issue 3: 1021–1036.
- (8) Jeon, M. *et al.* 2014. Recovery from Population III Supernova Explosions and the Onset of Second-Generation Star Formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 444, issue 4: 3288–3300.
- (9) Wise, J. & Abel, T. 2008. Resolving the Formation of Protogalaxies. III. Feedback from the First Stars. *The Astrophysical Journal*, vol. 685, issue 1: 40–56.
- (10) Muratov, A. *et al.* 2013. Revisiting the First Galaxies: The Epoch of Population III Stars. *The Astrophysical Journal*, vol. 773, issue 1, article id. 19: 9 pp.

- (11) Gendin, N. & Kravtsov, A. 2006. Fossils of Reionization in the Local Group. *The Astrophysical Journal*, vol. 645, issue 2: 1054–1061.
- (12) Simon, J. *et al.* 2011. A complete spectroscopic survey of the Milky Way Satellite Segue 1: the darkest Galaxy. *The Astrophysical Journal*, vol. 733, issue 1, article id. 46: 20 pp.
- (13) Frebel, A. *et al.* 2014. Segue 1: An Unevolved Fossil Galaxy from the Early Universe. *The Astrophysical Journal*, vol. 786, issue 1, article id. 74: 19 pp.
- (14) Vargas, L. *et al.* 2013. The Distribution of Alpha Elements in Ultra-Faint Dwarf Galaxies, *The Astrophysical Journal*, vol. 767, issue 2, article id. 134: 13 pp.
- (15) Webster, D. 2016. Segue 1 – A Compressed Star Formation History before Reionization. *The Astrophysical Journal*, vol. 818, issue 1, article id. 80: 11 pp.
- (16) Jacobson, H. & Frebel, A., 2014. Observational Nuclear Astrophysics: Neutron-Capture Element Abundances in Old, Metalpoor Stars. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol. 41, issue 4, article id. 044001.
- (17) Frebel, A. *et al.* 2014. Segue 1: An Unevolved Fossil Galaxy from the Early Universe. *The Astrophysical Journal*, vol. 786, issue 1, article id. 74: 19 pp.
- (18) Frebel, A. *et al.* 2014. Segue 1: An Unevolved Fossil Galaxy from the Early Universe. *The Astrophysical Journal*, vol. 786, issue 1, article id. 74: 19 pp.
- (19) Roederer, I. 2013. Are There any Stars Lacking Neutron-Capture Elements? Evidence from Strontium and Barium. *The Astronomical Journal*, vol. 145, issue 1, article id. 26: 6 pp.

- (20) Magg, M. *et al.* 2018. Predicting the locations of possible longlived low-mass first stars: importance of satellite dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 473, issue 4: 5308–5323.
- (21) Simon, J. 2019. The faintest dwarf galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 57: 375–415.
- (22) Scott, P. *et al.* 2010. Direct constraints on minimal supersymmetry from Fermi-LAT observations of the dwarf galaxy Segue 1. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, issue 01, id. 031.
- (23) MAGIC Collaboration. 2016. Limits to Dark Matter Annihilation Cross-Section from a Combined Analysis of MAGIC and Fermi-LAT Observations of Dwarf Satellite Galaxies. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, issue 02, article id. 039.
- (24) Ajello, M. *et al.* 2016. Fermi-LAT Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission toward the Galactic Center. *The Astrophysical Journal*, vol. 819, issue 1, article id. 44: 30 pp.
- (25) Spekkens, K. *et al.* 2013. A Deep Search for Extended Radio Continuum Emission from Dwarf Spheroidal Galaxies: Implications for Particle Dark Matter. *The Astrophysical Journal*, vol. 773, issue 1, article id. 61: 16 pp.
- (26) Jeltema, T. & Profumo, S. 2016. Deep XMM Observations of Draco Rule out at the 99% Confidence Level a Dark Matter Decay Origin for the 3.5 keV Line. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 458, issue 4: 3592–3596.
- (27) Brandt, T. 2016. Constraints on MACHO Dark Matter from Compact Stellar Systems in Ultra-Faint Dwarf Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 824, issue 2, article id. L31: 5 pp.
- (28) Bullock, J. & Boylan-Kolchin, M. 2017. Small-Scale Challenges to the Λ CDM Paradigm. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 55, issue 1: 343–387.

- (29) Homma, D. *et al.* 2019. Boötes. IV. A New Milky Way Satellite Discovered in the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey and Implications for the Missing Satellite Problem. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 71, issue 5, id. 94.
- (30) Fattahi, A. *et al.* 2020. The Missing Dwarf Galaxies of the Local Group. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 493, issue 2: 2596–2605.

الفصل التاسع: الغسق الكوني

- (1) www.jwst.nasa.gov.
- (2) www.youtube.com/watch?v=bTxLAGchWnA.
- (3) www.theverge.com/2018/8/1/17627560/james-webb-space-telescope-cost-estimate-nasa-northrop-grumman.
- (4) Surace, M. *et al.* On the Detection of Supermassive Primordial Stars – II. Blue Supergiants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 488, issue 3: 3995–4003.
- (5) Pawlik, A. *et al.* 2011. The First Galaxies: Assembly of Disks and Prospects for Direct Detection. *The Astrophysical Journal*, vol. 731, issue 1, article id. 54: 17 pp.
- (6) James, O. *et al.* 2015. Gravitational Lensing by Spinning Black Holes in Astrophysics, and in the Movie *Interstellar*. *Classical and Quantum Gravity*, vol. 32, issue 6, article id. 065001.
- (7) <https://eventhorizontelescope.org>.
- (8) Event Horizon Telescope Collaboration. 2019. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 875, issue 1, article id. L1: 17 pp.
- (9) Moriya, T. *et al.* 2019. Searches for Population III Pair-Instability Supernovae: Predictions for ULTIMATE-Subaru and WFIRST. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 71, issue 3, id. 59.

(10) Hartwig, T. *et al.* 2018. Detection Strategies for the First Supernovae with JWST. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 479, issue 2: 2202–2213.

(11) Yue, B. *et al.* 2014. The Brief Era of Direct Collapse Black Hole Formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 440, issue 2: 1263–1273.

(12) Natarajan, P. *et al.* 2017. Unveiling the First Black Holes with JWST: Multi-Wavelength Spectral Predictions. *The Astrophysical Journal*, vol. 838, issue 2, article id. 117: 10 pp.

(13) Bañados, E. *et al.* 2018. An 800-Million-Solar-Mass Black Hole in a Significantly Neutral Universe at a Redshift of 7.5. *Nature*, vol. 553, issue 7689: 473–476.

(14) Smith, B. *et al.* 2018. The Growth of Black Holes from Population III Remnants in the Renaissance Simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 480, issue 3: 3762–3773.

(15) Woods, T. *et al.* 2017. On the Maximum Mass of Accreting Primordial Supermassive Stars. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 842, issue 1, article id. L6: 5 pp.

(16) www.ligo.caltech.edu.

(17) Levin, J. 2016. *Black Hole Blues and Other Songs from Outer Space*, Vintage, London, UK.

(18) Abbott, B. *et al.* 2016. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, vol. 116, issue 6, id. 061102.

(19) <https://lisa.nasa.gov>.

الفصل العاشر: عصر إعادة التأين

(1) Schaerer, D. 2002. On the Properties of Massive Population III Stars and Metal-Free Stellar Populations. *Astronomy and Astrophysics*, v. 382: 28–42.

(2) Ahn, K. *et al.* 2012. Detecting the Rise and Fall of the First Stars by Their Impact on Cosmic Reionization. *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 756, issue 1, article id. L16: 7 pp.

(3) Mesinger, A. *et al.* 2013. Signatures of X-Rays in the Early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 431, issue 1: 621–637.

(4) Fan, X. *et al.* 2001. A Survey of $z > 5.8$ Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. I. Discovery of Three New Quasars and the Spatial Density of Luminous Quasars at $z \sim 6$. *The Astronomical Journal*, vol. 122, issue 6: 2833–2849.

(5) Giallongo, E. *et al.* 2015. Faint AGNs at $z > 4$ in the CANDELS GOODS-S Field: Looking for Contributors to the Reionization of the Universe. *Astronomy & Astrophysics*, vol. 578, id. A83: 14 pp.

(6) Madau, P. & Haardt, F. 2015. Cosmic Reionization after Planck: Could Quasars Do It All? *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 813, issue 1, article id. L8: 6 pp.

(7) Stacy, A. & Bromm, V. 2013. Constraining the Statistics of Population III Binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 433, issue 2: 1094–1107.

(8) Xu, H. *et al.* 2014. Heating the Intergalactic medium by X-Rays from Population III Binaries in High-Redshift Galaxies. *The Astrophysical Journal*, vol. 791, issue 2, article id. 110: 17 pp.

(9) Robertson, B. *et al.* 2013. New Constraints on Cosmic Reionization from the 2012 Hubble Ultra Deep Field Campaign. *The Astrophysical Journal*, vol. 768, issue 1, article id. 71: 17 pp.

(10) Kaurov, A. *et al.* 2016. The Effects of Dark Matter Annihilation on Cosmic Reionization. *The Astrophysical Journal*, vol. 833, issue 2, article id. 162: 7 pp.

(11) Liu, H. *et al.* 2016. Contributions to Cosmic Reionization from Dark Matter Annihilation and Decay. *Physical Review D*, vol. 94, issue 6, id. 063507.

(12) Schön, S. *et al.* 2018. Dark Matter Annihilation in the Circumgalactic Medium at High Redshifts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 474, issue 3: 3067–3079.

(13) Bromley–Davenport, J. 2013. *Space Has No Frontier: The Terrestrial Life and Times of Sir Bernard Lovell*. Bene Factum Publishing, London, UK.

(14) www.lofar.org.

الفصل الحادي عشر: المجهولات المجهولة

(1) Lorimer, D. *et al.* 2007. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin. *Science*, vol. 318, issue 5851: 777–.

(2) Petroff, E. *et al.* 2019. Fast Radio Bursts. *The Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 27, issue 1, article id. 4: 75 pp.

(3) Petroff, E. *et al.* 2015. Identifying the Source of Perytons at the Parkes Radio Telescope. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 451, issue 4: 3933–3940.

(4) www.skatelescope.org.

(5) Hoare, M. *et al.* SKA and the cradle of life. *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array PoS(AASKA14)115*. 9–13 June, 2014.

(6) Pritchard, J. *et al.* Cosmology from EoR/Cosmic Dawn with the SKA. *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array PoS(AASKA14)012*. 9–13 June, 2014.

(7) Pritchard, J. *et al.* Cosmology from EoR/Cosmic Dawn with the SKA. *Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array PoS(AASKA14)012*. 9–13 June, 2014.

(8) Burns, J. *et al.* 2019. FARSIDE: A Low Radio Frequency Interferometric Array on the Lunar Farside, Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, APC White Papers, no. 178. *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 51, issue 7, id. 178.

(9) Bentum, M. *et al.* 2020. A Roadmap Towards a Space-Based Radio Telescope for Ultra-Low Frequency Radio Astronomy. *Advances in Space Research*, vol. 65, issue 2: 856–867.

(10) www.isispace.nl/projects/ncle-the-netherlands-china-low-frequency-explorer.

