الفصل الرابع

أقمار وحلقات الكواكب العملاقة

تشترك جميع الكواكب العملاقة الأربعة في امتلاكها حلقات ومجموعة كبيرة من الأقمار التابعة، وتوجد تنويعات من تلك الحلقات والأقمار بناءً على الأهمية والحجم، لكن أوجه التشابه بين الأنظمة الحلقية القمرية تفوق أوجه الاختلاف.

(١) الأنظمة الحلقية القمرية

تتحرك معظم الأقمار الخارجية التابعة لكل كوكب عملاق في مدارات لا تراكزية، وتكون حركتها عادةً في الاتجاه المعاكس لدوران الكوكب الذي تتبعه. والعديد من هذه المدارات يكون مائلًا بدرجة تزيد على ٣٠ درجة بالنسبة إلى خط استواء الكواكب التي تتبعها تلك الأقمار. وقد أطلق على هذه الأجرام اسم «الأقمار غير النظامية» نظرًا لأن مداراتها تكون في المعتاد لا تراكزية ومائلة، وتدور في الاتجاه العكسي، فضلًا عن حقيقة أن جاذبيتها ضئيلة لدرجة لا تمكِّنها من أن تحتفظ بشكل كروي (يبلغ أقصى قطر لها نحو ١٠٠ كيلومتر، وفي أغلب الأحيان لا يتجاوز بضعة كيلومترات). والأقمار غير النظامية هي الفئة الأكثر عددًا؛ فوفقًا لآخر التقديرات، يتبع كوكبَ المشتري ٥٥ قمرًا بأنصاف محاور رئيسية مدارية تتراوح بين ١٠٥ إلى ٤٠٠ ضعف نصف قطر المشتري، ويتبع كوكبَ زحل ٣٨ قمرًا بمدارات تتراوح بين ١٨٤ و٤١٧ ضعفًا من نصف قطر زحل، ويتبع كوكبَ أورانوس ٩ أقمار بمدارات تتراوح بين ١٦٧ و٨١٨ ضعفًا من نصف قطر أورانوس، ويتبع كوكبَ نبتون ٦ أقمار بمدارات تتراوح بين ٢٢٣ و١٩٥٤ ضعفًا من نصف قطر نبتون.

«الأقمار النظامية» الكبيرة الحجم تدور في مدارات في عكس اتجاه عقارب الساعة، وتكون هذه المدارات أقرب إلى الكواكب التابعة لها تلك الأقمار، وبدرجات ميل منخفضة

جدًّا. ويتبع كوكبَ المشتري أربعةُ أقمار نظامية (تلك التي اكتشفها جاليليو) تتراوح أنصاف محاورها الرئيسية المدارية بين ٥٫٩ إلى ٢٦٫٣ ضعفًا من نصف قطر المشتري. وهذه عوالم كبيرة، وهي تشترك في الكثير من الخصائص الجيولوجية مع الكواكب الأرضية، بالرغم من أنها لا تفي بمتطلبات الاتحاد الفلكي الدولي المؤهلة لها كي تُصنف ضمن الكواكب. ويتبع كوكبَ زحل ثمانيةُ أقمار نظامية (جميعها باستثناء واحد فقط أصغر حجمًا بكثير من أقمار المشتري، وتتراوح مداراتها بين ٣ و٥٩ ضعفًا من نصف قطر زحل)، ويتبع كوكبَ أورانوس ٥ أقمار نظامية (تتراوح مداراتها بين ٥ و٢٣ ضعفًا من نصف قطر أورانوس). ويتبع نبتون قمرٌ نظاميٌّ واحدٌ كبيرٌ يطلق عليه تريتون يبلغ مداره ١٥ ضعفًا من نصف قطر الكوكب. وبالرغم من أن هذا القمر «نظامي»، فإنه يتميز بدورانه العكسي. ثمة سمة مهمة تجمع بين الأقمار النظامية كافة (بما فيها تريتون)، وهي أن قوى المد تتحكم فيها بحيث تدور حول محورها دورانًا متزامنًا، بمعدل دورة حول نفسها مرة كل دورة حول الكوكب الذي تتبعه، وبذلك تجعل وجهها مواجهًا دائمًا لكوكبها (مثلما هو الحال في القمر الأرضي).

وبالاقتراب أكثر، نجد كتلًا من حطامٍ ذاتَ أشكال غير منتظمة يكون من السهل تمييزها باعتبارها «قميرات داخلية». وهذه القميرات تدور في مدارات دائرية استوائية في عكس اتجاه عقارب الساعة. وهكذا الحال بالنسبة للجسيمات التي تتشكل منها الحلقات. ونظرًا لأن بعض مدارات القميرات الداخلية تقع ضمن الحلقات، لا يوجد — على الأرجح — فارق جوهري بين جسيم حلقة كبيرة وقمير داخلي صغير. ولا يتبع كوكبَ المشتري سوى أربعة قميرات داخلية معروفة، لكن زحل يتبعه ١٤ قميرًا، منها سبعة قميرات تقع مداراتها بين مدارات أقماره النظامية الداخلية. ويتبع كوكبَ أورانوس ١٣ قميرًا، وأما نبتون فيتبعه ٦.

ويتباين عرض وعدد الحلقات من كوكب إلى آخر، مع كون حلقات كوكب زحل هي الأبرز والأكثر إبهارًا إلى الآن، لكن بوجه عام لا يتجاوز سمكها بضع عشرات الكيلومترات. وفي الأغلب تكون هذه الحلقات أقرب إلى كوكبها من مسافة تُعرف باسم «حد روش»، وهو حد تدمِّر فيه قوى المد أيَّ جرم كبير يدخل في نطاق الكوكب. ويُنظر إلى معظم الحلقات باعتبارها حطامًا متخلفًا من التدمير المدي لقمر أو مذنب شرد مقتربًا بشدة من الكوكب، لكن من الواضح أن بعض الحلقات الأصغر حجمًا يكون مصدرها أقمارًا قريبة، وتتشكل من جسيمات تذرَّى بقوة في الفضاء أو تلقي بها اصطدامات.

وتتكون حلقات كوكب زحل من جليد، وتعكس نحو ٨٠٪ من ضوء الشمس الذي يسقط عليها، وبالرغم من مظهرها البارز (انظر الشكل رقم ٢-١)، فإن المادة الموجودة بداخلها لن تكفي إلَّا لتشكيل جرم يبلغ قطره ١٠٠ كيلومتر، إذا فرضنا أننا جمعناها معًا بشكل كامل. وبالرغم من أن جسيمات كل حلقة لم يتم تصويرها تصويرًا مباشرًا، فإن المعدل الذي تبرد به الحلقات، عندما يسقط عليها ظِل الكوكب الذي تتبعه، يشير إلى أن حلقات كوكب زحل هي — في الأغلب — جسيمات يتراوح حجمها بين سنتيمتر واحد وخمسة أمتار. وعلى النقيض من ذلك، تتكون حلقات كوكب المشتري الأصغر حجمًا — في الأغلب — من جسيمات ذات أحجام ميكرومترية، تكون أيضًا أقل قدرة بكثير على عكس ضوء الشمس مقارَنةً بالكتل الجليدية اللامعة لحلقات كوكب زحل. وتعكس المادة التي تتشكل منها الحلقات في كوكبَي أورانوس ونبتون ضوء الشمس بدرجة سيئة (مثل مادة حلقات كوكب المشتري)، لكن حجمها — في الأغلب — يتراوح بين سنتيمترات وأمتار (مثل مادة حلقات كوكب زحل).

ويؤدي الرنين المداري إلى تفاعل جذبوي معقد بين الحلقات والقميرات الداخلية التي تدور بينها (انظر شكل ٤-١). وغالبًا ما يُطلق على هذه اسم «الأقمار الرعاة»؛ لأن البعض منها يشغل الكثير من الفجوات الموجودة في الحلقات، والبعض الآخر يشكل حلقات ضيقة ويشوهها، ويمنع مداراتها من الخروج عن مدارات تلك الأقمار أو الشرود بعيدًا عنها.

وبوجه عام، تكون الحلقات أقرب إلى كوكبها منها إلى الأقمار النظامية التابعة، لكن كوكب زحل يعد استثناءً؛ إذ إن له حلقة خارجية غير منتظمة تتكون من مادة قاتمة غبارية تتمركز حول مدار فوبي؛ وهو أحد الأقمار الداخلية غير النظامية. والمادة التي تشكلت منها هذه الحلقة التي اكتُشفت عام ٢٠٠٩، باستخدام تليسكوب يعمل بالأشعة تحت الحمراء موجود في الفضاء، يُعتقد أن مصدرها القمر فوبي، وإن كانت الكيفية التي حدث بها ذلك ليست مفهومة إلى الآن.

(٢) أقمار مثيرة للاهتمام

في وقت من الأوقات، كان الجميع تقريبًا يتوقعون أن تكون حتى أكبر الأقمار التابعة للكواكب الخارجية أجرامًا موحشة، فكان يُعتقد أن الكرات الجليدية القديمة المليئة بحفر كثيفة نتيجة الاصطدامات ربما تسجِّل تاريخ قصف الكواكب الخارجية من المجموعة

شكل ٤-١: منظر يغطي جزءًا عرضه ٥ آلاف كيلومتر من النظام الحلقي لكوكب زحل، الذي تم رصده بواسطة بعثة الفضاء «كاسيني» في ٢٧ يوليو ٢٠٠٩. وبمقياس الرسم هذا، يتعذر تمييز انحناء الحلقات حول الكوكب (خارج المنظر جهة اليمين). تعكس الحلقات معظم ضوء الشمس حيث تحتشد الجسيمات بكثافة شديدة، ويظهر الفضاء الأسود من خلال الفجوات الخالية من الجسيمات. والقمر «بان» — قمر راعٍ يبلغ قطره ٢٨ كيلومترًا — يمكن رؤيته وهو يدور في أوسع فجوة. وإضافة إلى شَغْل هذا القمر معظمَ هذه الفجوة، فإنه يمارس تأثيره على الحلقات الضيقة والمتقطعة داخل الفجوة. والطول الاستثنائي لِظِل هذا القمر الساقط على الحلقات الموجودة على يمينه يرجع إلى أن هذه الصورة الْتُقطت عندما كانت الشمس قريبة جدًّا من مستوى الحلقات.

الشمسية، لكنها لم تكن مثيرة للاهتمام ما لم يكن المرء يرغب في دراسة التطور المداري المشترك لتلك الكواكب. كانت هذه هي الرؤية الشائعة حتى ٢ مارس ١٩٧٩، عندما نشر ستانتون بيل؛ من جامعة كاليفورنيا (بالتعاون مع زميلين آخرين)، بحثًا يُبيِّن أن الرنين المداري الذي نسبته ١:٢ بين آيو وأوروبا؛ قمرَي جاليليو الداخليَّيْن التابعَيْن لكوكب المشتري، لا بد أنه يؤدي إلى قدر هائل من التشوُّه المدي في شكل القمر آيو إلى الدرجة التي يصبح عندها محتواه الداخلي مصهورًا. وبناءً على تقديرات الكثافة إضافة إلى التحليل الطيفي لأسطح الأقمار التابعة للمشتري، تَبين بالفعل أن القمر آيو له قشرة صخرية على العكس من الأقمار التابعة الأخرى التي يسودها الجليد. وافتراض وجود

محتوًى مصهور داخل جسم صخري (ترتفع فيه درجة حرارة الانصهار ارتفاعًا شديدًا) كان بمنزلة خطوة شديدة الجرأة. وربما لم يكن سيصدِّق هذا الزعمَ سوى قلة قليلة لولا قيام مركبة الفضاء «فويدجر ١» برحلة بعد ذلك بعدة أيام، وبثها صورًا لبراكين ثائرة تعلوها أعمدة الرماد البركاني بارتفاع ٣٠٠ كيلومتر.

وبالرغم من أن التسخين المدي للقمر آيو هو الأقوى إلى الآن، تؤثر نفس العملية على الكثير من الأقمار الأخرى، بل وهناك عدد أكبر منها يحمل دلائل لحالات تسخين مدِّي وقعت لها في الماضي. وهذا يجعلها متنوعة ومثيرة لاهتمام الجيولوجيين الذين لا يُمانعون في الاعتقاد بأنه في أغلب هذه الأقمار يكون اللب وحده مكونًا من الصخر، والذي يحاط بدثار جليدي سميك يحتمل أن يكون مزودًا بقشرة جليدية متمايزة كيميائيًّا عند السطح. وفي ظل درجات حرارة السطح المنخفضة التي تسود الكواكب الخارجية (التي تتراوح بين ١٤٠ درجة مئوية تحت الصفر بالنسبة لأقمار المشتري و٢٣٥ درجة مئوية تحت الصفر بالنسبة لأقمار نبتون)، تكُون الخواص الميكانيكية وسلوك انصهار الجليد مشابهَين إلى حدٍّ بعيدٍ للكيفيةِ التي يكون عليها سلوك الصخر في الكواكب الداخلية من المجموعة الشمسية. بعبارة أخرى، يكون لدى هذه الأجرام نفس سلوك وتركيب الكواكب الأرضية مع إحلال الصخر محل الحديد في اللب، والجليد محل الصخر في القشرة والدثار.

ويعد القمر آيو استثناءً لكونه خاليًا من الجليد، ولامتلاكه قشرة ودثارًا صخريين يحيطان بلب حديدي، وكان من الممكن أن يُصنف باعتباره كوكبًا أرضيًّا لو أنه كان يدور حول الشمس وليس حول كوكب المشتري. والقمر أوروبا هجين؛ إذ يمتلك تركيبًا مماثلًا للقمر آيو، وهو مطمور تحت ما يتراوح بين ١٠٠ إلى ١٥٠ كيلومترًا من الجليد. وفيما يلي سأتناول هذين القمرين وبعض الأقمار الأخرى التي هي مثار إعجابي، مع التركيز على الأمثلة الأكثر حيوية، بالرغم من أنه حتى الكرات الجليدية التي بها فوهاتٌ اتضح أنها أكثر إثارة للاهتمام من الأجرام الكروية الكئيبة المتخيَّلة في السابق.

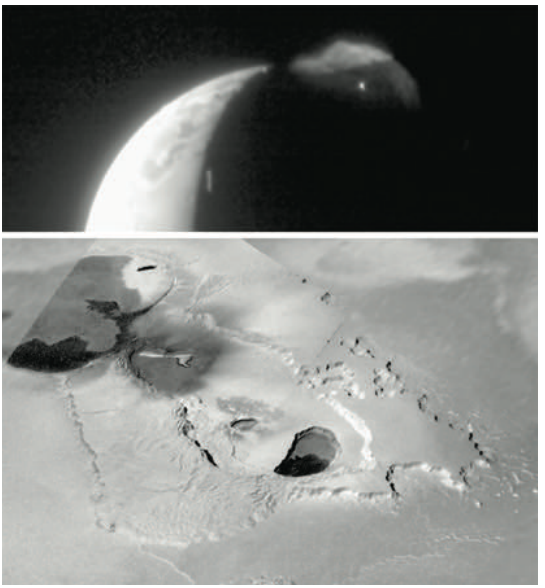
(٢-١) آيو

لا يزيد حجم أو كثافة القمر آيو على حجم وكثافة قمرنا الأرضي إلَّا بقدر طفيف (يبلغ قطر آيو ٣٦٤٢ كيلومترًا)، لكن توجد اختلافات هائلة بينهما؛ فسطح القمر آيو تغير بسرعة كبيرة بفعل العمليات البركانية إلى حد أنه لا تُرى فوهة صدمية واحدة، بالرغم من

حقيقة أن تأثير جاذبية كوكب المشتري في تركيز المقذوفات الشاردة نحو الداخل، لا بد أن يكون معناها أن القمر آيو قد تعرض لاصطدامات أكثر من القمرين الكثيفَي الفوهات: جانيميد وكاليستو، اللذين يدوران خلف القمر أوروبا. وفي عام ١٩٧٩، عندما دُرست الصور المقربة الملونة للقمر آيو، التي التقطتها بعثة «فويدجر ١» الأولى، جعل لونُه الأصفرُ الكثيرين يفترضون أن تدفقات الحمم البركانية المفصصة التي أمكن التعرف عليها على سطحه مُكوَّنةٌ من الكبريت. ومع ذلك، فمن المسلَّم به حاليًّا أن براكين القمر آيو عبارة عن مادة سليكية منصهرة («صخر» حقيقي). ودرجات الحرارة المسجلة في قلب الفوهات البركانية الثائرة تزيد على ١٠٠٠ درجة مئوية، بالرغم من البرودة الشديدة فيما وراء المناطق النشطة. والغاز الذي يتسرب ليسبب اندلاع الثورات البركانية، كتلك المبينة في الشكل رقم ٤-٢، يكون في الأساس ثاني أكسيد الكبريت (بينما يكون في أغلبه بخار ماء على كوكب الأرض)، ويتكثف كلٌّ من الكبريت وثاني أكسيد الكبريت على السطح في صورة «صقيع» يضفي اللون الأصفر على القمر آيو.

ويقع القمر آيو ضمن حزام من الجسيمات المشحونة يحدها المجال المغناطيسي لكوكب المشتري، ويكون الإشعاع هناك قويًّا بشدة إلى الحد الذي جعل مراقبي بعثة «جاليليو»، التابعة لوكالة ناسا، لا يسمحون للمركبة بتكرار عملية المرور عن قرب من قمر آيو؛ ومن ثم لم تُلتقط صور جيدة إلَّا لجزء صغير من القمر آيو، بحيث أظهرت تفاصيل لمساحة لا يتجاوز حجمها بضع مئات الأمتار. وفي أكثر الصور تفصيلًا، لم يَزِدْ قطر البكسلات عن ١٠ أمتار، وحتى في هذه الصور لم يُعثر على أي فوهات صدمية.

وإذا كان معدل النشاط البركاني الحالي على قمر آيو معبرًا عن نشاطه على المدى الطويل، فلا بد أن قشرته ودثاره بالكامل قد تغيرا عدة مرات؛ فتغطية الأسطح الأقدم بتدفقات حمم بركانية وغبار متساقط من أعمدة الانفجار البركاني، التي تصل إلى متوسط معدل طمر عامٍّ يُقدَّر ببضعة سنتيمترات في العام، تطمس معالم الفوهات الصدمية بسرعة شديدة إلى الحد الذي لا تظهر عنده أيٌّ منها. وإذا فُرض وكان للقمر آيو طبقة خارجية من الجليد، فإن النشاط البركاني أدى إلى تبخرها منذ وقت طويل، لتتبدد في الفضاء؛ لأن جاذبية هذا القمر تكون ضعيفة إلى الحد الذي لا يمكِّنها من الاحتفاظ ببخار ماء أو أي غاز خفيف آخر. وقمر آيو كان سيصبح مكانًا مذهلًا يزوره علماء البراكين، لكن البيئة الإشعاعية القاسية جعلت سطحه غير ملائم تمامًا للاستكشاف البشري.



شكل ٤-٢: الصورة العلوية: جزء من القمر آيو وهو في طور الهلال كما رصدته بعثة «نيو هورايزونز» الفضائية، التي كانت معنية في الأساس بكوكب بلوتو ومرت بكوكب المشتري في مارس ٢٠٠٧. ويرتفع عمود الرماد البركاني من فوهة بركانية في موقع يُطلق عليه كالديرا «تفشتار» في الجانب الليلي المظلم إلى نحو ٣٠٠ كيلومتر، بحيث يكون جزؤه العلوي في ضوء الشمس. ويمكن رؤية وهج متقد من منبعه. والجزء السفلي المظلل من العمود مضاء إضاءة خافتة عن طريق الضوء المنعكس من كوكب المشتري. الصورة السفلية: منظر يغطي مساحة عرضها ٢٥٠ كيلومترًا من تفشتار الْتُقط قبل المنظر السابق بثماني سنوات، وذلك بواسطة بعثة «جاليليو» الفضائية، وضوء الشمس يأتي من جهة اليسار. وأكثر المواد قتامة عبارة عن تدفقات حمم بركانية حديثة، والخط اللامع المتجه من الشرق للغرب بالقرب من الجزء العلوي الأيسر عبارة عن حمم بركانية متوهجة ثارت من صدع بركاني.

(٢-٢) أوروبا

أوروبا هو القمر المفضل لدي، وهو قمر يبلغ قطره ٣١٣٠ كيلومترًا. والصور التي التقطتها مركبة الفضاء «فويدجر» من خلال تحليقها بالقرب من القمر في عامَي ١٩٨٠ و١٩٨١ أظهرت سطحه على شكل قشرة بيض مشقوقة، مع وجود عدد قليل جدًّا من

الفوهات الصدمية. من الواضح أن التسخين المدي جدَّد الطبقة الخارجية الجليدية للقمر، بالرغم من أن هذا لم يحدث بنفس السرعة الهائلة التي حدث بها في حالة القمر آيو. والصور العالية الوضوح التي التقطتها بعثة «جاليليو» أظهرت تاريخًا لسطح معقد، وأثارت جدلًا شديدًا؛ فقد كان معلومًا بالفعل أن سطح القمر أوروبا مكون في الأساس من جليد مائي. وتُبين الكثافة الكلية لهذا القمر أن سمك هيكله الجليدي لا بد أنه يتراوح بين ١٠٠ و١٥٠ كيلومترًا، وهو يعلو محتوًى داخليًّا صخريًّا أكثر كثافة، لكن الجدل بشأن الكثافة لا يمكن أن يميز بين الجليد الصلب والماء السائل؛ فجليد السطح قوي وسهل التفتُّت بفضل انخفاض درجة حرارته. والجدل الذي ثار تمحور حول حالة «الجليد» أسفل السطح. فهل كان في حالة تجمد وصولًا إلى الصخر، أم أن الجزء السفلي منه سائل مغطًّى بهيكل جليدي طافٍ؟

والاحتمال الثاني يتطلب معدلًا أكبر للتسخين المدي الداخلي جنبًا إلى جنب مع التصور الغريب لمحيط هائل من الماء السائل أسفل الجليد. وأرى أن الأدلة المُستقاة من صورٍ كَتِلْك المبينة في الشكل رقم ٤-٣ توضح أن الجليد رقيق بوجه عام، ولا يتجاوز سمكه بضعة كيلومترات؛ ومن ثم لا بد أنه يطفو فوق الماء، لكن على مدار السنوات العديدة التي استغرقتها الجولة المدارية لمركبة الفضاء «جاليليو» حول منظومة كوكب المشتري، أصرت مجموعة معارضة قوية في فريق التصوير على محاولة توضيح خصائص السطح؛ باعتبارها ناتجة عن عمليات يحفزها الحمل الحراري في الحالة الصلبة في الطبقة الجليدية السميكة.

وما يعد الآن الأساس المقبول بوجه عامٍّ لجيولوجيا القمر أوروبا يمكن توضيحه على نحو رائع بالرجوع إلى الشكل رقم ٤-٣؛ فالشكل يبين العديد من «أطواف» الجليد الثابتة التي لها حواف يبلغ ارتفاعها ١٠٠ متر. وأسطح هذه الأطواف الجليدية تتميز بنمط من النتوءات والأخاديد يسير في اتجاهات متنوعة. وبين الأطواف الجليدية، تكون البنية أكثر فوضوية وتفتقر إلى نمط واضح. وتوجد مساحات كبيرة من القمر أوروبا (وراء هذه المنطقة) لم تنقسم إلى أطواف، ويكون نمط السطح فيها نتوءات وأخاديد متصلة. ومن الواضح أن الأطواف الجليدية الموجودة في الشكل رقم ٤-٣ عبارة عن أجزاء متكسرة من هذا النوع من المساحات. وقد نتج نمط النتوءات والأخاديد عن فتح وغلق الشقوق بين الأطواف الجليدية، اللذين يَحدُثان — على الأرجح — في دورة مدية تتزامن مع الفترة المدارية للقمر، والتي تكون كل ٣,٦ أيام. وبوجه عام، يمكن أن تصبح بعض

شكل ٤-٣: صورة مقربة تغطي مساحة تبلغ ٤٢ كيلومترًا من جزء من منطقة كونامارا كيوس في القمر أوروبا؛ حيث سمح «تخلل الانصهار» من المحيط الموجود أسفل السطح بانجراف أطواف الجليد بعيدًا بعضها عن بعض قبل أن تتجمد المنطقة من جديد. وضوء الشمس يأتي من جهة اليمين.

الشقوق نشطة في أي وقت من الأوقات؛ فعندما ينفتح شق (ربما بعرض متر واحد أو ما شابه)، يُسحب الماء من أسفل لأعلى. والماء المكشوف مؤقتًا للفضاء البارد الموجود أعلى الشق يغلي ويتجمد على نحو متزامن، لكنه سرعان ما يصبح مغطًّى بالوحل. وعندما ينغلق الشق، يخرج بعض الوحل إلى السطح مشكِّلًا نتوءًا فوق الشق المنغلق. وفي المرة التالية التي ينفتح فيها الشق، ينشق النتوء ويضاف إليه المزيد من الوحل عندما ينغلق الشق مرة أخرى. وتكفي بضع سنوات من الفتح والانغلاق كي تحيط نتوءات بالحجم الذي نراه بأخاديد مركزية. وفي نهاية المطاف تنغلق الشقوق على نحو دائم، لكن يبدأ شق جديد في النشاط في مكان آخر؛ ومن ثم يتشكل النمط معطِيًا السطح المحتوي على نتوءات وأخاديد والمُغطِّي لجزء كبير من القمر أوروبا شكلًا يشبه كرة من الخيط.

يبين الشكل رقم ٤-٣ الاضطراب الذي يحدث لسطح «كرة الخيط» بفعل عملية مهمة أخرى تؤثر على القمر أوروبا. هذه العملية يُطلق عليها اسم «تخلل الانصهار»، وهي تؤدي إلى مزيج فوضوي من الأطواف الجليدية المتكسرة يُطلق عليه «فوضى». وتحت أي منطقة فوضى تتشكل مستقبلًا، يصبح المحيط دافئًا على نحو غير عادي

— ربما يرجع ذلك إلى الثورات البركانية السليكية في قاع المحيط — وتنصهر قاعدة الهيكل السطحي الجليدي تدريجيًّا، ويصبح الجليد أقل سمكًا. وفي نهاية المطاف، يصل الانصهار إلى السطح، وتنفصل الأطواف الجليدية عن الحواف المكشوفة من الهيكل الجليدي، وتنجرف نحو المحيط المكشوف. وأي ماء مكشوف سرعان ما يتجمد من جديد، وربما يكون من الأفضل تصور أطواف جليدية ذات سمك يُقدر بكيلومتر تشق طريقها نحو بحر مغطًّى بوحل جليدي، وليس مسطحًا مائيًّا مكشوفًا مثل الذوبان الصيفي لسرب جليدي في المحيط القطبي الشمالي على كوكب الأرض. وفي الجزء الشمالي الغربي من الشكل رقم ٤-٣، يمكنك أن ترى الطريقة التي تجمعت بها في الأساس العديدُ من الأطواف الجليدية؛ لأنها لم تنجرف بعيدًا بعضها عن بعض كثيرًا، ويمكن مطابقة بنيات «كرة الخيط» الخاصة بكلٍّ منها.

وبعد زوال الزيادة المؤقتة في درجة الحرارة، يتجمد المحيط من جديد وتتوقف الأطواف الجليدية عن الانجراف، ويبدأ جليد سطح البحر المعاد تجمده الموجود أسفل الأطواف الجليدية في اكتساب مزيد من السُّمك مرة أخرى. وعندما تصبح المنطقة المعاد تجمدها سميكة وهشة بما يكفي، يمكن أن تنفتح شقوق جديدة، ويبدأ جيل جديد من بنيات كرة الخيط في الظهور فوق المنطقة بأكملها. وفي الشكل رقم ٤-٣، يوجد شق ناشئ تتاخمه سلسلة نتوءات ضيقة على كل جانب من الجانبين، ويكون هذا الشق قُطري الاتجاه، وهو يبدو عاديًّا عند عبوره الأطواف الجليدية، ولكن يمكنك أن تستنتج أنه ناشئ؛ لأنه يقطع البحر المُعادَ تجمُّده الواقع بين الأطواف الجليدية.

وحتى إن كانت هذه القصة تحمل قدرًا ضئيلًا من الصحة، فإنها تنطوي على بعض التبعات المثيرة للتفكير؛ فالتفاعلات الكيميائية مع الصخر الباطني ستجعل المحيط مالحًا — بالرغم من أن أكثر الأملاح المذابة وفرةً قد تكون كبريتات المغنيسيوم وليس كلوريد الصوديوم — كما في المحيطات الموجودة على كوكب الأرض. فأي محيط من نوعية المحيطات التي تعلو صخرًا ساخنًا بفعل التسخين المدي يوفر موطنًا ملائمًا لقيام حياة يماثل الموطن الذي يُعتقد أن تكون قد بدأت فيه الحياة على كوكب الأرض. وعدم وصول ضوء الشمس ليس عائقًا؛ لأن «الكائنات المنتجة الأولية» عند قاعدة السلسلة الغذائية يمكن أن تستمد طاقتها من اختلال التوازن الكيميائي، الذي يحدث للمحيط في ينابيع حارة مغمورة (مَنافس مائية حرارية). وهذه الحياة توصف بأنها تتعلق بالتمثيل الكيميائي في مقابل التمثيل الضوئي. وفي قيعان المحيطات على كوكب الأرض، يُطلق على

أكثر المنافس سخونة اسم «المداخن السوداء»؛ بسبب عمود جسيمات الكبريتيد المعدنية الذي يتشكل عندما يمتزج مائع المَنفس بماء المحيط. وهذه المنافس بمنزلة واحات مذهلة للحياة؛ حيث تتغذى مجتمعات الكائنات الحية (بما يشمل بعض الكائنات المتقدمة مثل الجمبري وسرطان البحر) على ميكروبات تعتمد على التمثيل الكيميائي، وتكتسب طاقتها عن طريق تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى ميثان. وإذا كانت الحياة على كوكب الأرض بدأت في مثل هذه الظروف، فلماذا إذن لا يرجح حدوث ذلك على القمر أوروبا أيضًا؟

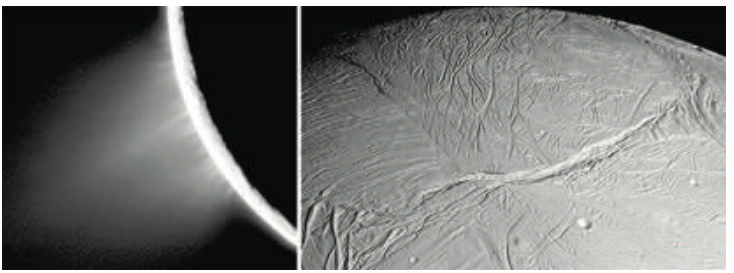
من الصعب جدًّا العثور على حياة مغمورة تحت الجليد الذي يبلغ سمكه عادةً عدةَ كيلومترات؛ وهو الأمر الذي يتطلب من الهابطين على القمر أوروبا ثقب أو صهر حفرة في الجليد لإدخال مسبار روبوتي يمكن أن يستقر في عمود «مدخنة سوداء». ومع ذلك، مثل هذه البعثة الطموحة قد لا تدعو إليها الحاجة بالضرورة إذا كانت النتوءات الموجودة على أيٍّ من جانبَي الشق الناشئ تَشكَّلت من الوحل الذي سُحب لأعلى من المحيط. وأثناء انفتاح الشق، يمكن أن يوفر موطنًا ملائمًا لقيام حياة تعتمد على التمثيل الضوئي لكائنات مثل النباتات أو الطحالب البحرية (وهو الأمر الأكثر معقولية). ومثل الحياة على كوكب الأرض، من الممكن أن تكون تلك الكائنات قد تطورت من أسلاف تعتمد على التمثيل الكيميائي. ويمكن أن يجعل الإشعاعُ بضعةَ السنتيمترات العليا من عمود الماء المكشوف غيرَ ملائمة للحياة، لكن يمكن أن يتوفر قدر كافٍ من ضوء الشمس لحدوث تمثيل ضوئي في بضعة الأمتار التالية. وإذا كانت هناك كائنات منتجة أولية (النباتات والطحالب) تعتمد في عيشها على ضوء الشمس، فمن المحتمل أن تكون هناك حيوانات تتغذى عليها. ولِتَبيُّن هذا الأمر، تتمثل الخطوة الأولى في فحص عينة من النتوء الذي يظهر خارج الشق.

والتعاون الكبير التالي الذي يمكن أن يتم بين وكالة ناسا الفضائية ووكالة الفضاء الأوروبية في مجال استكشاف الكواكب الخارجية من المجموعة الشمسية، من المرجح أن يكون بعثة فضائية إلى منظومة كوكب المشتري. وسوف يكون هدف تلك البعثة الأساسيُّ التحققَ من وجود محيط بالقمر أوروبا، باستخدام رادار مخترق للجليد، وعن طريق قياس مقدار الانحناء المدي (الذي قد لا يتجاوز نحو متر واحد في حالة الجليد السميك المستقر في القاعدة، وقد يصل إلى نحو ٣٠ مترًا بالنسبة لهيكل جليدي «رقيق» يطفو على سطح محيط). والمؤسف أنه لا يمكن التفكير في هبوط إحدى المركبات الفضائية على سطح القمر أوروبا بعدُ، لكن سوف يكون هناك على الأقل مطياف عالي الوضوح من المدار للبحث عن جزيئات بيولوجية المنشأ في مادة النتوء.

(٢-٣) إنسيلادوس

ربما كان سيصبح أسهل كثيرًا العثور على واسماتٍ بيولوجية لو كان ممكنًا الحصول على عينة من جليد القمر أوروبا دون الاضطرار إلى الغوص إلى السطح. ويتيح إنسيلادوس، وهو قمر تابع لكوكب زحل، هذه الفرصة. لا يتجاوز قطر هذا القمر ٥٠٤ كيلومترات، وله كثافة منخفضة انخفاضًا شديدًا؛ لدرجة أنه لا يحتوي على الكثير من الصخور. وقد أظهرت مركبة الفضاء «فويدجر» أن هذا القمر عالم صغير غريب، به فوهات كثيفة في أجزاء منه، لكن من الواضح أنه يفتقر إلى هذه الفوهات في أماكن أخرى. والصور الأعلى وضوحًا التي تم بثها عن طريق مركبة الفضاء «كاسيني»، التي بدأت استطلاعًا مداريًّا لمنظومة كوكب زحل في عام ٢٠٠٤؛ تُظهر سطحًا تقطعه العديد من التشققات المتنوعة (بالرغم من أن ذلك مخالف إلى حد بعيد لمناطق كرة الخيط في القمر أوروبا). كما أن المركبة اكتشفت تدفقات من بلورات جليدية تنطلق نحو الفضاء من الشقوق القريبة من القطب الجنوبي (انظر الشكل رقم ٤-٤). ولحسن الحظ أن «كاسيني» كانت تحمل معها مطيافًا كبيرًا مصممًا لدراسة الأيونات والجسيمات المحايدة؛ حيث تم تعديل مسار مركبة الفضاء بحيث يسمح لها باختراق العمود المائي الحراري والتقاط بعض العينات. وقد وُجد أن هذه العينات تحتوي على الماء والميثان والأمونيا وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون. والأرجح أنه كانت هناك أيضًا بعض الجزيئات العضوية البسيطة، بالرغم من أن هذا مصطلح كيميائي يدل على ذرات كربون مرتبطة معًا، ولا يشير ضمنًا إلى أي أصل بيولوجي. ولو كانت عُرفت الأعمدة المائية الحرارية مسبقًا، لربما كانت اشتملت حمولة مركبة الفضاء «كاسيني» على أجهزة مناسبة على نحو أفضل لاكتشاف الواسمات البيولوجية.

وشبه مؤكد أن التسخين المدي (الذي يحفزه رنين مداري نسبته ١:٢ للقمر بعد التالي التابع لزحل، الذي يُطلق عليه اسم ديون) يحفز على تشكيل الشقوق ويعطي زخمًا للأعمدة المائية الحرارية. ومع ذلك، لم يتوقع أحد أن القمر إنسيلادوس بهذه الدرجة من النشاط. وهذا أمر محير على اعتبار أن ميماس، وهو القمر المجاور له والمشابه له في الحجم، عبارة عن كرة جليدية نمطية بها فوهات، وليس بها دلائل تشير إلى وجود تاريخ من النشاط. ومن غير المحتمل أن يكون بالقمر إنسيلادوس محيط كبير مخبوء أسفل سطحه، لكن ربما توجد أخاديد من الماء السائل أسفل منابع الأعمدة. والماء السائل مهم



شكل ٤-٤: صورتان للقمر إنسيلادوس التقطتهما مركبة الفضاء «كاسيني». الصورة اليسرى: منظر لهلال شديد الوضوح يُظهر عمودًا مائيًّا حراريًّا يمتد نحو ١٠٠ كيلومتر على الأقل فوق السطح. الصورة اليمنى: منظر مائل لجزء من القمر إنسيلادوس تظهر به العديد من الشقوق المتنوعة، كتلك التي من المعلوم أن العمود قد نشأ منها في الأساس، وعدد قليل من الفوهات الصدمية (التي هي صغيرة جدًّا بحيث لم تتمكن مركبة الفضاء «فويدجر» من رصدها) يبين أن هذه المنطقة لم تَعُد نشطة على الأرجح.

لوجود حياة، لكنَّ توفُّر المواد المغذية داخل إنسيلادوس يكون بالتأكيد أكثر محدودية بكثير منه داخل جرم كبير مثل القمر أوروبا؛ ومن ثم فإن إنسيلادوس لا يبدو موطنًا واعدًا للحياة.

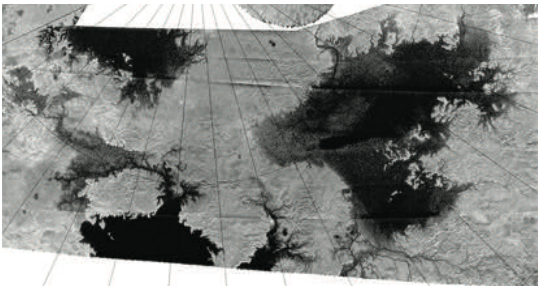
(٤-٢) تيتان

تيتان هو القمر الوحيد التابع لكوكب زحل الذي ينافس أقمار جاليليو التابعة لكوكب المشتري من حيث الحجم (حيث إن قطره يبلغ ٥١٥٠ كيلومترًا). وقد أظهرت مركبة الفضاء «فويدجر» هذا القمر في هيئة كرة برتقالية ضبابية؛ لأنه — من بين كل الأقمار — يمتلك غلافًا جويًّا كثيفًا. ويحتوي هذا الغلاف الجوي على ٩٧٪ نيتروجين، لكن السببَ في عتامته الميثانُ، إضافة إلى مشتقاته الكيميائية الضوئية التي تحوِّل طبقة الستراتوسفير إلى دخان ضبابي معتم. ويمتلك هذا القمر قشرة ودثارًا مكونين من الجليد (أغلبه جليد مائي)، ويشغلان الثلث الخارجي من نصف قطر القمر، ويعلوان لبًّا صخريًّا. وربما

يوجد لب داخلي حديدي، وفي هذه الحالة من المفترض أن تكون قاعدة الدثار الجليدي أكثر عمقًا لتعادل متوسط الكثافة العامة. وفترة دوران تيتان حول محوره تتأثر بالرياح الموسمية؛ ما يبين لنا أن الغلاف الصخري لا بد أن يكون مفصولًا عن المحتوى الداخلي، والأرجحُ أن الحاجز الفاصل بينهما هو محيط داخلي يكون في أغلبه ماءً، أو مزيجًا من الماء والأمونيا (الذي يمكن أن يظل سائلًا في درجة حرارة أقل بشكل ملحوظ مقارنة بالماء النقي). ومعظم النماذج تعتبره طبقة «ضمن» الدثار الجليدي وليس على قمة الصخر الداخلي مباشرة.

وقد تعاملت بعثة «كاسيني» مع مشكلة التعرف على طبيعة سطح تيتان بثلاث طرق؛ فقد حصلت على صور مشوشة لكن مقبولة لسطح هذا القمر في نطاقات ضيقة من الأشعة تحت الحمراء القريبة؛ حيث يكون الدخان الضبابي أقل قتامة، واستخدمت رادار تصوير مثل مسبار «ماجلان» المرسَل لكوكب الزهرة لرؤية السطح بصرف النظر عن السحب، وحملت مسبارًا يُطلق عليه «هايجنز» التقط صورًا من أسفل السحب خلال الهبوط المظلي إلى السطح. والعمليات الجيولوجية التي تتم في سطح تيتان التي أظهرتها هذه المجموعة من طرق التصوير تُشبه إلى حد بعيد الكثيرَ من العمليات التي تحدُث على كوكب الأرض؛ فالقشرة تتكون في الأساس من جليد مائي يتسم بالصلابة الشديدة، ويشبه الصخر في سلوكه في بيئة سطح تيتان، التي تصل درجة حرارتها إلى ١٨٠ درجة تحت الصفر. واستقر المسبار «هايجنز» بالقرب من خط الاستواء على سهل رملي يتناثر عليه الحصى؛ كان أشبه بكوكب المريخ باستثناء أن الرمل والحصى كليهما كانا مكوَّنين من الجليد. من الوارد أن تكون الريح قد عصفت بالرمل. وتُظهر صور الرادار حقولًا شاسعة من كثبان رمل عصفت بها الريح إلى أجزاء أخرى من القمر، لكن لا بد أن يكون الحصى قد نُقل عن طريق سائل متدفق، أغلب الظن أنه ميثان CH_4 أو إيثان C_2H_6، وذلك في ضوء تركيب الغلاف الجوي للقمر ودرجة حرارة سطحه. وخلال هبوط المسبار هايجنز، التقط صورًا لقنوات تصريف متفرعة بالقرب من موقع الهبوط، ويكشف التصوير الراداري أنظمة أودية معقدة في العديد من المناطق الأخرى تبدأ في المرتفعات التي تكون فيها «قاعدة» القشرة الجليدية مكشوفة، وتصب في أحواض منخفضة تتراكم فيها الرواسب. أهم من ذلك أن المسبار عثر على بحيرات من الميثان السائل المختلط بالإيثان بالقرب من كلا القطبين (انظر الشكل رقم ٤-٥). وبعض قيعان البحيرات كانت جافة، وبعضها الآخر كانت له حواف ضحلة أو سبخية، ومن المحتمل

أنها تتنوع موسميًّا. ومن الواضح أن تيتان نشط جيولوجيًّا؛ فقد تم التعرُّف على بضع فوهات صدمية متآكلة بشدة، ويشتبه في وجود بعض مواقع «براكين جليدية»؛ حيث تثور «الماجما» الجليدية بدلًا من تدفقات الحمم البركانية الأرضية.



شكل ٤-٥: فسيفساء لصور رادارية التقطتها بعثة «كاسيني» تغطي مساحة قدرها ١١٠٠ كيلومتر بالقرب من القطب الشمالي للقمر تيتان. والمناطق الداكنة هي بحيرات يتجاوز حجم أكبرها ١٠٠ ألف كيلومتر مربع، وهي أكبر ٢٠٪ من بحيرة سوبيريور في أمريكا الشمالية. ويمكن رؤية قنوات تصريف متفرعة تغذي تلك البحيرات. وقد تم إضافة خطوط الطول، والمناطق الخاوية لم يتم تصويرها.

غير معلوم إلى أي مدًى تسهم البراكين الجليدية والعمليات التكتونية في نحت وإعادة تجديد سطح القمر تيتان، بيد أنه من الواضح أنَّ تآكُل القاعدة (وهي الجليد في هذه الحالة بالطبع) متبوعًا بنقل وترسيب الرواسب هما العاملان المؤثران الرئيسيان في هذا الشأن. والمطر الذي يسقط على القمر تيتان لا بد أن يكون محتويًا على قطيرات من الميثان الذي يتخلل السطح، كما هو الحال مع سقوط الأمطار على كوكب الأرض، ويغذي ينابيع تَملأ جداول وأنهارًا به. ومن غير المعروف على سبيل اليقين مدى قدرة الميثان على التفاعل كيميائيًّا مع «القاعدة» الجليدية، ومدى قدرته النحتية ومعدل تبخُّره مرة أخرى إلى الغلاف الجوي، والمدة التي يظل خلالها هناك قبل أن يتساقط مطرًا مرة أخرى. وكل هذه لا بد أن تكون عوامل في دورة ميثان تشبه دورة الماء على سطح كوكبنا الأرضي. ومنذ وقت طويل، كان بكوكب المريخ هطول أمطار وأنهار وبحيرات، لكن القمر تيتان هو المكان الوحيد بخلاف كوكب الأرض الذي تحدُث فيه هذه الأشياء اليوم. في يومٍ ما،

سوف نرسل مسبارًا آخر لاستكشاف القمر تيتان على نحو أكثر دقة، وربما تشتمل الرحلة حينها على منطاد ينجرف أسفل الدخان الضبابي بقابلية متنوعة للطفو؛ بحيث يستطيع أن يهبط في أماكن مثيرة للاهتمام. ومثل هذه البعثة يمكن أن تأخذ عينات من سائل بحيرة من بحيرات هذا القمر، وتحصل على صور للموجات التي تتكسر على شاطئ شديد الغرابة.

(٢-٥) ميراندا وأرييل

بالرغم من أن البراكين الجليدية الموجودة حاليًّا على القمر تيتان لا تزال موضع جدل، فلا يمكن التشكيك في البراكين الجليدية القديمة الموجودة على اثنين من الأقمار النظامية الخمسة التابعة لكوكب أورانوس، وهما أرييل وميراندا؛ حيث تكون درجة حرارة السطح ٢٠٠ درجة مئوية تحت الصفر. ويمكن رؤية تأثيراتها في صور التقطتها بعثة «فويدجر ٢» التي زارت منظومة أورانوس في يناير ١٩٨٦.

والقمر أرييل هو أكبر القمرين حجمًا؛ إذ يبلغ قطره ١١٥٨ كيلومترًا، وهو جرم كروي معقد يقطع أرضه القديمة المليئة بالفوهات العديد من التصدعات التي تحيط بكتل صخرية مرتفعة. ومعظم هذه التصدعات تشكل حدودًا لأودية ذات أرضية منبسطة من النوع الذي يعبِّر عنه المصطلح الوصفي «تشاسما». ومع ذلك، بدلًا من أن تكون أرضيات معظم هذه الأودية منخفضة، فإنها غُطيت بمادة ملساء أو — على الأقل — بشيء يبدو أملس في صور بعثة «فويدجر».

الأرجح أنه في الماضي السحيق (منذ أكثر من مليارَي سنة)، أدَّى التسخين المدي إلى تحطيم سطح القمر أرييل وانبثاق الحمم البركانية الجليدية. وقد غطَّت هذه الحمم أرضيات الأودية، ويمكن أن نراها في بعض الأماكن وقد امتدت فيما وراءها لتطمر جزئيًّا بعض الفوهات الصدمية الأكثر قِدَمًا. ونتيجة لبعد كوكب أورانوس عن الشمس، يُتوقع أن يكون الجليد المتكون عليه عبارة عن مزيج أكثر تعقيدًا من الجليد المالح، بدرجة طفيفة، الذي عُثر عليه في الأقمار التابعة لكوكب المشتري. والناتج الذي يستخلص — على الأرجح — من عملية الانصهار الجزئي هو مزيج من الماء والأمونيا بنسبة ١:٢، وهو عبارة عن مائع بدرجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية تحت الصفر، ويمكن أن ينتج عن طريق التسخين لدرجة أقل بكثير مما هو مطلوب لانصهار جليد الماء النقي.

ويمكن أن تُرى أيضًا تدفقات حمم بركانية «متفرقة» على القمر ميراندا؛ وهو أصغر الأقمار النظامية التابعة لكوكب أورانوس (حيث يبلغ قطره ٤٧٢ كيلومترًا). ورغم صغر هذا القمر، فإنه يمتلك سطحًا متنوعًا على نحو لافت، ربما يكون أكثر تنوعًا حتى من القمر إنسيلادوس، بالرغم من أن عدد الفوهات الصدمية العلوية يشير إلى أن آخر نشاط له كان — على الأرجح — منذ مليارات السنين. ولم ترصد «فويدجر ٢» سوى نصف هذا القمر. ونصف هذه المنطقة المصورة كثيف الفوهات، لكنه مختلف في أن معظم فوهاته (الفوهات الأقدم) تبدو ملساء كما لو أن شيئًا سقط عليها من أعلى وغطَّاها، والفوهات الأحدث فقط هي التي تحتفظ بشكلها الأصلي. أما النصف الثاني من المنطقة المصورة، فيشتمل على ثلاث وحدات أرضية حادة الحافة تُعرف باسم «الأكاليل». وكل إكليل منها مختلف، لكنها جميعًا تحتوي على أرضية ذات حافة حادة أو ذات نمط منتظم، بما يشمل سمات عُرفت بأنها تدفقات حمم بركانية جليدية (الأرجح أنها حمم من الماء والأمونيا كما هو الحال على القمر أرييل)، مع وجود فوهات في حالتها الأصلية تُقابل تلك الموجودة في الأرضية الكثيفة الفوهات.

وقد استُبعدت واحدة من أولى النظريات التي تمحورت حول القمر ميراندا، والتي كانت ترى أن كل إكليل يمثل شظية ناتجة من عملية انحلال كارثي عامٍّ وإعادة تراكم. والأرجح أن الأكاليل عبارة عن مواقع لبراكين جليدية خلَّف فيها طور الاضمحلال دون غيره آثارًا مميزة تشبه التدفقات. وتغطية الفوهات الأقدم في الأرضية خلْف الأكاليل قد يُثبت حدوث ثورات بركانية ناثرةً جسيمات جليدية في الفضاء؛ ليستقر بعضها في صورة أشبه بالجليد لمنع تكرار طبوغرافية كانت موجودة من قبل. نحن لا نعلم متى ولماذا حدث هذا، ومن غير المحتمل أن نتبين الحقيقة إلى أن تقوم بعثة أخرى برحلة فضائية إلى كوكب أورانوس، وهو الأمر الذي لن يتم — على الأرجح — قبل منتصف القرن.

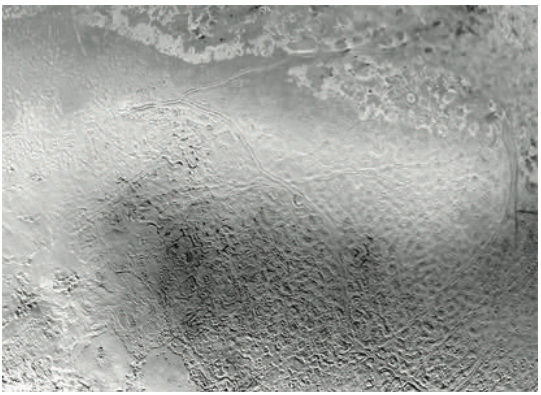
(٢-٦) تريتون

تريتون هو أضخم أقمار نبتون (حيث يبلغ قطره ٢٧٠٦ كيلومترات)، والجزء الخارجي منه جليدي، لكنه يكون كثيفًا بدرجة تكفي لأنْ يكون له لب صخري كبير. وعندما مرت بعثة «فويدجر ٢» بالقرب من تريتون في عام ١٩٨٩، اكتشفت أغطية قطبية من جليد

النيتروجين المتجمد (اكتشف سابقًا من كوكب الأرض بواسطة التحليل الطيفي). ومثل ثاني أكسيد الكربون في الأغطية الجليدية على كوكب المريخ، تنكمش هذه الأغطية في فصل الصيف — على الأرجح — عن طريق التصعد وليس الانصهار، وتضيف محتواها إلى الغلاف الجوي الرقيق للقمر تريتون، الذي يتكون في الأساس من النيتروجين. وجليد القاعدة الثابت الذي يشكل قشرة تريتون عبارة — على ما يبدو — عن مزيج من الميثان وثاني أكسيد الكربون والماء. وقد يحتوي هذا المزيج على الأمونيا أيضًا، وهو ما يكاد يكون غير مرئي لمنظار التحليل الطيفي.

وأفضلُ صور القمر تريتون ذاتُ درجة وضوح تقدَّر بنحو ٤٠٠ متر لكل بكسل، وهي تُظهر سطحًا معقدًا من الناحية الجيولوجية خلف الغطاء القطبي، بما يشمل تشكيلات أرضية متنوعة يمكن أن تكون قد تكوَّنت عن طريق البراكين الجليدية (انظر الشكل رقم ٤-٦). وتحدث الفوهات الصدمية في أي مكان ولكن ليس بأعداد هائلة، ومن الوارد أن يكون عمر جزء كبير من السطح أقل من مليار عام. والقمر تريتون معروف أيضًا بأن به ينابيع حارة تثور من خلال الغطاء القطبي لتقذف بجسيمات قاتمة لارتفاع يبلغ نحو ٨ كيلومترات. وتوجد أيضًا بعض السحب ذات الارتفاعات العالية التي تتكون من بلورات نيتروجين، وهي تشبه السحب الرقيقة المرتفعة الموجودة في غلافنا الجوي.

ولم ترصد بعثة «فويدجر» سوى الغطاء القطبي الجنوبي؛ لأن معظم نصف الكرة الشمالي كان في ظلام. ولفصول تريتون طبيعة خاصة؛ نظرًا لميل محور نبتون بمقدار ٢٩٫٦ درجة، ولميل مدار تريتون بمقدار ٢١ درجة. وعلاوة على ذلك، يميل المستوى المداري للقمر تريتون حول محور نبتون بحيث لا تساوي الدورة الموسمية الكاملة على تريتون الفترة المدارية لنبتون حول الشمس التي تبلغ مدتها ١٦٤ سنة، ولكن تساوي ٦٨٨ سنة، مع دورات فرعية مدتها ١٦٤ سنة. وخلال الدورة الكاملة، تتراوح زاوية العرض تحت الشمسي على تريتون بين ٥٠ درجة شمالًا و٥٠ درجة جنوبًا. وبالمصادفة، عندما حلَّقت مركبة الفضاء «فويدجر ٢» بالقرب من تريتون، كان يقترب من الصيف الجنوبي المتطرف حيث كان متعامدًا تمامًا مع الشمس عند ٥٠ درجة جنوبًا؛ ومن ثم فإن جزءًا كبيرًا من نصف الكرة الشمالي كان في ظلام، ولم يكن ممكنًا رصده. وقد أظهر الغطاء القطبي الجنوبي المضاء بالشمس علامات على انكماشه، وتم التحقق من تصعُّده إلى غاز عن طريق عمليات رصد له من كوكب الأرض، في عام ١٩٩٧، أظهرت



شكل ٤-٦: فسيفساء من صور التقطتها بعثة «فويدجر» تغطي منطقة يبلغ عرضها ٢٠٠٠ كيلومتر من القمر تريتون. جهة الجنوب في الجزء العلوي من الصورة، ويأتي ضوء الشمس من أعلى اليمين. والحافة المشقوقة للغطاء القطبي الجنوبي تتجه قطريًّا عبر الجزء العلوي من الصورة. والنتوءات الضيقة الطويلة المنحنية (الأثلام) يمكن أن تكون صدوعًا اندلعت منها الماجما البركانية الجليدية. والسهول والأحواض الملساء الموجودة في الجزء السفلي الأيسر من الصورة هي — على الأرجح — مناطق من الحمم البركانية الجليدية. والمنطقة ذات النقر الموجودة في الجزأين الأوسط والسفلي الأيمن من الصورة يُطلق عليها «منطقة الكنتالوب»؛ بسبب التشابه الشكلي بينها وبين غلاف ثمرة الكنتالوب، لكن منشأها غير معلوم.

أن الضغط الجوي كان قد تضاعف في السنوات الثماني التي مرت منذ زيارة بعثة «فويدجر» لتريتون. وأثناء ذلك، كان الغطاء القطبي الشمالي غير المرئي يتنامى على الأرجح؛ حيث تكاثف النيتروجين الجوي على السطح البارد.