المملكة العربية السعودية

مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST

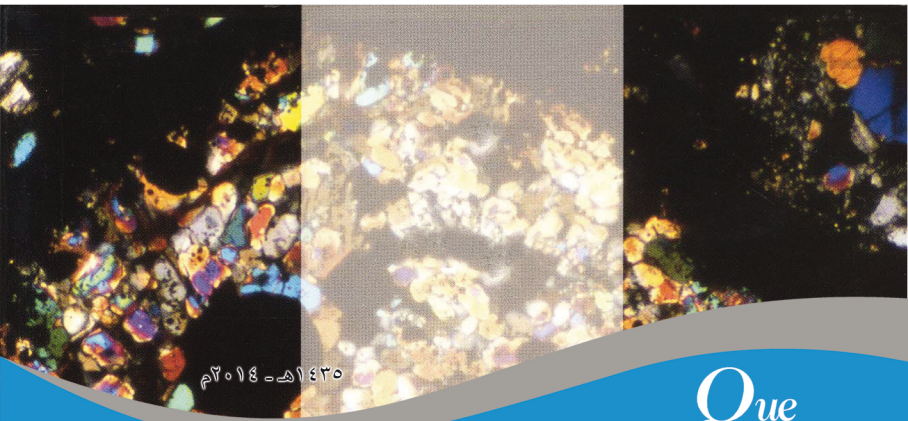
كتاب العربية

# الأحجار النيزكية


تأليف: ماتيو غونيل

ترجمة: زينا مغربل

مراجعة: أبو بكر سعد الله


١٤٣٥هـ - ٢٠١٤م


ماذا أعرف؟

Que sais-je?

المملكة العربية السعودية

مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST

كتاب العربية

# الأحجار النيزكية


تأليف : ماتيو غونيل

ترجمة : زينا مغربل

مراجعة : أبو بكر سعد الله


ماذا
أعرف ؟

*Que*
*s a i s - j e ?*

ح مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية، ١٤٣٥هـ
*فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر*

غونيل، ماتيو
الأحجار النيزكية. / ماتيو غونيل؛ زينا مغربل؛ أبو بكر سعدالله
الرياض، ١٤٣٥هـ
١٢١ص ؛ ١٢×١٨,٥ سم
ردمك: ٨-٦٤-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨
١- الشهب والنيازك ٢- الأحجار أ.مغربل، زينا(مترجم) ب سعد
الله، أبو بكر (مر١جع) ج.العنوان
ديوي ٥٢٣,٦ ١٤٣٥/٥٧٤٩

**رقم الإيداع:** ١٤٣٥/٥٧٤٩
**ردمك:** ٨-٦٤-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨

جميع الحقوق محفوظة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
ص.ب. ٦٠٨٦ الرياض ١١٤٤٢
المملكة العربية السعودية
هاتف : ٤٨٨٣٤٤٤ ـ ٤٨٨٣٥٥٥-٠١١ فاكس : ٤٨٨٣٧٥٦-٠١١
الموقع الالكتروني: www.kacst.edu.sa
المكتبة الالكترونية: kacst.edu.sa/ar/about/publications
البريد الالكتروني: awareness@kacst.edu.sa

الطبعة الأولى الفرنسية: أغسطس ٢٠٠٩م
ISBN 978-2-13-057428-6

تم الإصدار ضمن التعاون المشترك بين مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
والمجلة العربية (الثقافة العلمية للجميع)

# تنويـــــه

الأحجار النيزكية رجوم سقطت على الأرض من السماء. هي أقدم ما استطاعت يد الإنسان الإمساك به، وعُمرها عمر المنظومة الشمسية. هي آيات غامضة تدعونا لإلقاء نظرة شاملة على الأرض والسماء في آن واحد، ومواد علمية تقدم منفذاً للبحث المعاصر عند دراستها بالأدوات الأكثر تطوراً. هذا التصريف بين الماضي والحاضر، بين التاريخ الطبيعي والبحث المتقدم، يجعل من الأحجار النيزكية أشياء لا مثيل لها.

تُعرف دراسة الأحجار النيزكية بعلم الكيمياء الكونية، في اللغة الفرنسية cosmochimie، أو علم النيازك باللغة الإنجليزية meteoritics. ومن المحاور العلمية التي يقوم عليها علم النيازك تفاعل جسمين قائمين خارج الأرض مع الغلاف الحيوي، وتكوين منظومتنا الشمسية، والتطور الجيولوجي الخاص بالأجرام السماوية وحتى نشأة الحياة على الأرض. وفضلاً عن العينات القمرية التي عادت بها البعثات الفضائية أبولّو Apollo و لونا Luna ، وغبار المذنبات الذي جمع مؤخراً من قبل بعثة ستاردست Stardust الذي أطلقته الإدارة القومية للملاحة الفضائية والفضاء ("ناسا" NASA)، تُعدّ الأحجار النيزكية العينات الصلبة الوحيدة الخاصة بأجسام المنظومة الشمسية التي يمكن دراستها مخبرياً.

يطمح هذا الكتاب إلى إلقاء نظرة مزدوجة على الأحجار النيزكية: طبيعية وعلمية. وقد وجب التبسيط في بعض الأحيان، وتفادي الخوض في بعض مواضيع النقاش المحتدم في البحث المعاصر، لعلنا نضعها في نصابها الصحيح بشكل ما. وكُنا، أثناء إعداد هذا العمل، نواجه صعوبة الكتابة عن النيازك دون التمكن من استخدام الصور: سيكون علينا الاكتفاء بالكلمات والاستغناء عن نظرات ثاقبة إلى قلب الرجوم أو خارج النجوم.

والجدير بالذكر أن المصطلحات التي طُبعت بخط أكثر سمكاً هي

مصطلحات رئيسية، تتيح للقارئ الذي يطالع هذا الكتاب بأسئلة مسبقة في الذهن، إيجاد بعض عناصر الإجابة بسهولة- ذلك ما نأمله على الأقل. ومن هذا المنظور أيضاً، تعمّدنا الإكثار من التذكير الهادف إلى تسهيل مطالعة هذا الكتاب بشكل لا يكون بالضرورة متسلسلاً.

يلخص هذا الكتاب ملاحظات وتصورات ومفاهيم قام بتطويرها عدد كبير من الشخصيات العلمية على مدى مائتي عام. وبالرغم من ضيق حجم الكتاب فقد ذُكِر كل من كان له فضل في تمهيد أو اكتشاف في هذا السياق. ولا لزوم للتأكيد بأنه لا يمكن في أي حال من الأحوال أن تنسب إلينا النتائج المعروضة لاحقاً. فنحن في أحسن الأحوال مجرد ناقلين.

كما أود الإعراب عن امتناني وتقديري لكل من: م. سولو M. Selo، ج. غاتاسيكا J. Gattacecca، م. شوسيدون M. Chaussidon ، م. فيتو دي كيراول M. Vittu de Kerraoul، ف. غالانت F. Galante وهـ. بريجانت H. Prigent لقراءتهم الجادة والودية لنص الكتاب، ولكل من م. سيرانو M. Serrano، سي. فييني C. Fieni، م. دينيز M. Denise، أ. بنغانا A. Bengana وج. دسبريه J. Desprez لمساعدتهم في إنتاج الأشكال، وف. روبرت F. Robert لدعمه المستمر، وج. دوبرا J. Duprat لآرائه المستنيرة والودية. وقد لجأت، أثناء إعدادي لهذا الكتاب، لعدد كبير جداً من خبراء النيازك للتأكد من رقم ما أو التدقيق فيه. أودّ الإعراب عن شكري لكل منهم، وبخاصة للقائمين على مجموعات النيازك المتوفرة في المتاحف الكبيرة، إضافة إلى جيف غروسمان Jeff Grossman، الأمين العام لجمعية علم النيازك Meteoritical Society. ولن أوفي مؤسسة تريي Fondation des Treilles حقها من الشكر والتقدير لاستقبالي مدة أسبوعين. إذ تسعى هذه المؤسسة التي أنشأتها آن غرونير شلامبيرجر Anne Gruner Schlumberger إلى إطلاق وحفز الحوار بين العلوم والفنون بهدف تعزيز تقدم الابتكار والبحث المعاصر. كما تستقبل باحثين وكتّاب في مقر تريي (منطقة فار Var). انظر www.lestreilles.com.

الفصل الأول

# بعض مفاهيم علم الكواكب والكيمياء الكونية

## ١. تعريف ببعض المصطلحات التمهيدية

الأحجار النيزكية حجارة سقطت من السماء ويزيد حجمها على الميليمتر الواحد. أعظم الرجوم حجماً هو هوبا Hoba (في ناميبيا) الذي تم اكتشافه عام ١٩٢٠م الذي يزن حوالي ٦٠ طناً. أما الأحجار النيزكية المجهرية فذرات غبار سقطت من السماء يتراوح حجمها بين المايكرومتر (أي الجزء من المليون من المتر) والميليمتر. نميّز هنا بين النيازك الساقطة وهي النيازك التي شوهد هبوطها على الأرض، والنيازك المكتشفة أي تلك التي عُثر عليها إما بمحض الصدفة أو نتيجة حملات بحث منهجية (انظر العنوان «جمع المادة الناشئة خارج الأرض» في الفصل الثالث).

تُسمى النيازك الساقطة والمكتشفة باسم القرية الأقرب من مكان إيجاد الحجر النيزكي، إلا أن هذه القاعدة لا تنطبق على تلك التي تم اكتشافها في الصحاري أو في القارة القطبية الجنوبية، نظراً لعددها الكبير وندرة المرافق والتجهيزات في مثل هذه المناطق. يشار إلى الأحجار النيزكية المكتشفة في الصحراء الكبرى باسم NWA ٣٥٢، لتمييز الرجم الـ٣٥٢ الذي نسب إلى شمال غرب إفريقيا (North West Africa أو NWA). أما الأحجار النيزكية التي يتم العثور عليها في القارة القطبية الجنوبية، فتشير تسميتها إلى منطقة وسنة إيجادها. فعلى سبيل المثال،ALH ٨٤٠٠١ هو أول أحجار النيازك التي عثرت عليها البعثة الأمريكية قرب جبال ألن هيلز Alan Hills في حملة ١٩٨٣-١٩٨٤ (الشكل١).

**الشكل ١ - القارة القطبية الجنوبية**

يبين الشكل بعض مواقع جمع أحجار النيازك والأحجار النيزكية المجهرية. وتوافق المواقع التي تمتد من الجبال الحدودية إلى جرف بيكورا سلسلة الجبال العابرة لأنتاركتيكا

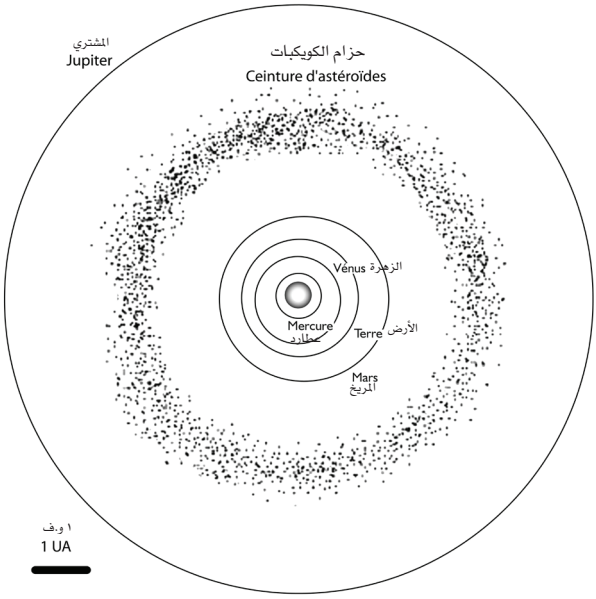
ولكي يصنف جسم ما رسمياً بالحجر النيزكي، ينبغي أن يقوم فريق متخصص بتوصيفه، ومن ثم إعلانه لدى جمعية علم النيازك Meteoritical Society التي تقوم سنوياً بتحرير نشرة Meteoritical Bulletin غايتها إحصاء النيازك الجديدة سنوياً. كما ينبغي تسليم ٢٠ غراماً (أو ٢٠٪ من رجم يزن أقل من ١٠٠غرام) من العيّنة (تمثل نوع العينة) إلى مؤسسة علمية.

## ٢ - بعض مفاهيم علم الكواكب

تُعرف المنظومة الشمسية بأنها مجموعة الأجسام التي تدور حول الشمس. وشمسنا هي أعظم أجسام المنظومة الشمسية، كما أنها مجرد نجم عادي، من نوع G، كتلته تساوي ٣ x ١٠ ٣٢ غ .يبلغ حجم المنظومة الشمسية مقدار عدة مئات من الوحدات الفلكية (و.ف.) ، علماً بأن أقرب النجوم، وهو الأقرب القنطوري Proxima Centauri، يقع على بعد ٢٦٠،٠٠٠ و.ف. وهكذا فالمنظومة الشمسية في منأى عن نجوم مجرتنا، تماماً كما تُعدُّ مجرتنا بعيدة عن المجرات الأخرى.

تنطوي المنظومة الشمسية على ثمانية كواكب (عطارد، الزهرة، الأرض، المريخ، المشتري، زحل، أورانوس، نبتون). وتُعرف الأجسام التي في دوران حول كوكب آخر بالأقمار. وقد يكون القمر كروياً أو غير منتظم الشكل. ويعرف بلوتون- وغيره من الأجسام السماوية الأخرى ذات الحجم الكروي غير الكبير بما يكفي للتخلص بشكل ديناميكي من جميع الأجسام التي من حولها- باسم الكواكب القزمة.

الأجسام الصغيرة هي أجسام ذات حجم ليس كبيراً بما يكفي للاستقرار في حالة اتزان كروي، علماً بأننا نميّز فيها بين الكويكبات والمذنبات. هذا وتلتقي معظم الكويكبات بين كوكبي المريخ والمشتري، في حزام الكويكبات الرئيسي. أما الكويكبات القريبة من الأرض فهي كويكبات تغيرت مداراتها نتيجة تفاعلها القريب مع الكواكب، والتي يتقاطع مدارها مع مدار الأرض. تكمن المذنبات وراء مدار المشتري. وتعد المذنبات عموماً مختلفة عن الكويكبات بسبب نشاطها، أي قدرتها على إطلاق الماء وثاني أكسيد الكربون لدى دنوّها من الشمس. يبين الشكل ٢ رسماً تخطيطياً لجغرافيا المنظومة الشمسية.




**الشكل ٢ - تمثيل تخطيطي للمنظومة الشمسية. تقع الشمس في المركز.**

الأحجار النيزكية هي شظايا أو كسور صخور تصدعت نتيجة الاصطدام بالأجرام السماوية (انظر أدناه العنوان "البلياردو الكونية" الوارد في هذا الفصل)، فقد يعود أصلها إلى الكواكب أو الكواكب القزمة أو إلى الأقمار أو الكويكبات أو المذنبات. عندئذ تُعرف هذه الأخيرة بالجسم الأم الذي انبثق منه الحجر النيزكي.

### ٣ - بعض مفاهيم كيمياء الأرض

يبيّن التركيب الكيميائي الخاص بصخرة ما مقدار مختلف المكونات الكيميائية الثابتة. ونميّز وفق هذه الكميات المكونات الرئيسية (بعض عشرات المائة)، والثانوية (من بعض الأجزاء من الألف، وحتى نسب

ضئيلة منها)، فضلاً عن العناصر الشحيحة (التي تقلّ عن الجزء من الألف) والعناصر المقاومة للحرارة التي تكوّن سبائك عالية الحرارة من العناصر المتطايرة، علما أن حالتها المفضّلة هي الحالة الغازية. أما الغازات النادرة (الهيليوم النيون، الأرجون، الكريبتون والزينون) فهي عناصر قليلة التفاعل الكيميائي (تسمى بالغازات الخاملة) تظل في الحالة الغازية.

تعد حالة تأكسد الحديد خاصية بالغة الأهمية بالنسبة للصخور، فقسط كبير من حديد الأرض مؤكسد، أي أن ذرة الحديد ترتبط نمطياً بذرة الأكسجين ($Fe^{2+}$ مرتبط على شكل FeO) أو بذرة ونصف ذرة الأكسجين ($Fe^{3+}$ مرتبط على شكل $Fe^2O^3$ ). ونجد كذلك الحديد في الرجوم في حالته المختزلة (خلاف الأكسدة)،أي بشكله الفلزّي ($Fe^o$ ). ويعود هذا الاختلاف بين الصخور الأرضية والنيزكية إلى تكوّن معظم النيازك في مناخ أكثر اختزالاً (أي أقل احتواءً على الأكسجين) من الأرض. والجدير بالذكر أن الحديد ليس العنصر الكيميائي الوحيد ذا حالات تأكسد مختلفة. فقد يوجد الكبريت مثلاً على شكل كبريتيد ($S^{2-}$ مرتبط كما FeS)، أو كبريت معدني ($S^o$ ،S) أو كبريتات ($S^{6+}$ مرتبط كما $SO_3$).

يحدد علم الصخور (البتروغرافيا) طبيعة مختلف مكونات صخرة ما وعلاقات هذه المكونات ببعضها البعض، في حين يصف علم المعادن مختلف المعادن الموجودة في صخرة ما، وتكوينها. يتشكل المعدن من ذرات وفق بنية بلورية محددة (ترتيب الذرات فيما بينها). وبما أن عناصر كيميائية مختلفة قد تشغل المقر البلوري الواحد، فقد يختلف التركيب الكيميائي الخاص بالمعادن. ومن الأصناف الكيميائية الرئيسية للمعادن: السليكات، والأكاسيد، والكبريتيدات، والمعادن العنصرية الحرة. السليكات هي معادن تربط الشوارد الموجبة (أو الكتيونات cations) مثل Ca، Fe، Mg بالمجموعة $SiO_4$، في حين تربط الأكاسيد الشوارد الموجبة (Ca، Fe، Mg ) بذرات الأكسجين. وتربط الكبريتيدات الكبريت المختزل

(انظر أعلاه) بشارد موجب. هذا وتعد المعادن العنصرية Native elements الحرة عناصر نقية أو سبائك من العناصر النقية، مع العلم بأن الحديد هو المعدن العنصري السائد في الأحجار النيزكية.

كثافة الأحجار المكونة بشكل رئيسي من الأكاسيد والسليكات تساوي حوالي ٣ غ/سم٣، في حين تبلغ كثافة الحديد نحو ٧غ/سم٣.

## ٤ - بعض مفاهيم الكيمياء الكونية النظائرية

تتكون الذرة من نواة يدور حولها موكب من الإلكترونات. وتتألف النواة بدورها من بروتونات ونترونات، حيث تكون البروتونات ذات شحنة موجبة والنترونات مجردة من الشحنة. أما الإلكترونات فذات شحنة سالبة. يتساوى عدد البروتونات مع عدد الإلكترونات: بذلك تكون الذرة متعادلة كهربائياً. يحدد عدد البروتونات (الذي يرمز إليه بـ Z) عنصراً كيميائياً، فللهيدروجين على سبيل المثال بروتون واحد، وللهيليوم بروتونان، وللأكسجين ٨، وللحديد ٢٦. وقد يكون للعنصر الكيميائي الواحد عدد متفاوت من النترونات (N).

يمكن ألا يكون للهيدروجين نترون أو يكون له نترون واحد. وقد يكون للأكسجين ٨، أو ٩ أو ١٠ نترونات، وهو ما يعرف بالنظائر المستقرة للعنصر الواحد. للأكسجين ثلاثة نظائر مستقرة: $^{16}O$ (٨ بروتونات و ٨ نترونات)، $^{17}O$ (٨ بروتونات و ٩ نترونات) و $^{18}O$ (٨ بروتونات و ١٠ نترونات). وللحديد أربعة نظائر مستقرة : $^{54}F$(٢٦ بروتوناً و ٢٨ نتروناً)، $^{56}F$ (٢٦ بروتوناً و ٣٠ نتروناً)، $^{57}F$ (٢٦ بروتوناً و٣١ نتروناً)، $^{58}F$ (٢٦ بروتوناً و ٣٢ نتروناً). ولبعض العناصر الكيميائية نظير مستقر واحد، كالألومنيوم ($^{27}Al$ ١٣ بروتوناً و ١٤ نتروناً). ونتحدث على صعيد الجزيئات عن تماكب النظائر.

يُعَدّ النظير مشعاً حين يتفكك إلى نظير آخر، يعرف بالنواة الوليدة. يتقلص الألومنيوم ٢٦ ($^{26}Al$، ١٣ بروتوناً و١٣ نتروناً) إلى $^{26}MG$ خلال دورة تبلغ ٧٤٠ ألف عام (الدورة اللازمة لتفكك نصف ذرات المادة

المشعة). فإن وجدت ١٢٠ نوى ألومنيوم-٢٦ عند زمن ز= ٠، لا يبقى سوى ٦٠ منها بعد مرور ٧٤٠ ألف سنة، و ٣٠ بعد ١،٤٨ مليون عام، و١٥ بعد مرور ٢،٢٢ ميلون عام. وبعد مرور زمن يساوي س مدة، تُقسم الكمية المبدئية على ٢س.

يتوقف تباين التركيب النظيري للمادة خلال بعض العمليات، كالتبخر والتكثف أو التبلور المجزأ، على الكتلة النسبية الخاصة بالنظائر المعنية، وهو ما يسمى بالتجزئة القائمة على الكتلة. تتفاوت شدة التجزئة بتفاوت طبيعة العمليات التي أسفرت عنها ومدتها وخصائصها الكيميائية والفيزيائية. ويمكن تفسير مختلف أوجه التركيب النظيري الخاص بعينات المواد الأرضية على ضوء التجزئة القائمة على الكتلة. بيد أن الأحجار النيزكية تظهر أوجه اختلاف في تركيبها النظيري لا يمكن تفسيرها بالتجزئة القائمة على الكتلة. هذا ما يُعرف بالشذوذ النظيري أو التجزئة غير القائمة على الكتلة.

### ٥- من الأجسام البدائية إلى الأجسام المتمايزة

تتسبب العناصر المشعة الموجودة في الأجرام السماوية في تسخين هذه الأخيرة. ومن ثمّ تبرد الأجرام السماوية من خلال سطحها. فإذا كانت نسبة السطح إلى الحجم متدنية (وهي نسبة تتناسب عكسياً مع نصف القطر)، أي إذا كان الجسم كبيراً، يتعذر عليه التبريد الذاتي فترتفع درجة حرارته الداخلية.

لذلك كانت درجة الحرارة الداخلية الخاصة بالأجسام السماوية السميكة مرتفعة إلى حد انصهارها كلياً أو جزئياً، حتى انفصل الطور الفلزي عن الطور السليكاتي ( اللذين لا يمتزجان في الحالة السائلة). وهذا ما يُعرف بالتمايز. يوجد الحديد عند المركز في حين تشكل السليكات -وهي الأخف وزناً- الوشاح والقشرة (انظر الشكل ٩ في الفصل ٤). فالأرض وغيرها من الكواكب الأرضية (عطارد، الزهرة، المريخ) أجسام متمايزة. وهذا أيضاً حال بعض الكواكب التابعة لها، مثل القمر

والكويكبات الأكبر حجماً.

ومن الأجسام الكبيرة ما لا يصل إلى درجات حرارة كافية للذوبان، إما لصغر كتلها، وإما لعدم احتوائها على عناصر مشعّة، وحينئذ لا ينفصل الفلز عن السليكات. إلا أن ارتفاعاً معتدلاً في درجة الحرارة يسفر عن تعبئة العناصر الكيميائية لهذا الجسم مجدداً، وهو ما يعرف بالتحول الحراري. (انظر العنوان الفرعي الثاني "التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية» ضمن الفصل السابع).

تحتوي بعض الأجسام الصغيرة والكواكب القزمة على جليد الماء وأول أكسيد الكربون، ويمكن أن يسفر ارتفاع درجة الحرارة عن صهر الجليد، فيجري الماء وأول أكسيد الكربون على هذا الجسم بحالته الغازية أو السائلة، ويتفاعلان مع المعادن الأولية من الصخرة لتكوين المعادن الثانوية مثل الغضار أو الكربونات أو الماجنيتيت، وهو ما يُعرف بالتغير المائي الحراري (انظر العنوان الفرعي الثاني "التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية» ضمن الفصل السابع)، ولاسيما أن هذه العمليات الكيميائية الفيزيائية هي عمليات مثيلة لتلك التي توجد في المصادر المائية الحرارية على الأرض.

## ٦- البلياردو الكونية

لطالما لعب الاصطدام دوراً كبيراً في تاريخ المنظومة الشمسية. ويحدث التصادم بين الكويكبات والمذنبات والكواكب بمعدلات سرعة نسبية تتراوح بين بضعة كيلومترات في الثانية وعشرات الكيلومترات في الثانية، علماً بأن التصادم قد ينجم عنه إطلاق أجزاء من الجسم الذي يصطدم به الجسم المتحرك في الفضاء في بعض الحالات التي تتحرر فيها هذه الأجزاء من جاذبيته التثاقلية.

وليتحرر جزء من جسم سماوي من جاذبيته التثاقلية، لا بد من بلوغه سرعة تناهز سرعة الإفلات الخاصة بهذا الجسم. الجدير بالذكر أن سرعة إفلات جسم ما تتناسب مع $\sqrt{p}\sqrt{p}\,\mathrm{Rx}$ حيث R نصف قطر

الجسم و p كثافة هذا الجسم. من هنا، كلما عظُم حجم جسم، تعذّر الإفلات من جاذبيته التثاقلية. نشير إلى أن سرعة الإفلات الخاصة بكوكب الأرض هي ١١,٢ كم/ث.

باستطاعة شظايا أو كسور الكويكبات والمذنبات والكواكب التحرك في الفضاء ما بين الكواكب مئات ملايين السنين (انظر العنوان الفرعي الثاني "أعمار تعرض الحجارة النيزكية» ضمن الفصل الخامس). فإن اقتربت هذه الشظايا بما يكفي من الأرض، جذبتها قوة الأرض التثاقلية، فسقطت على سطحها. لتصبح حينئذ حجارة نيزكية.

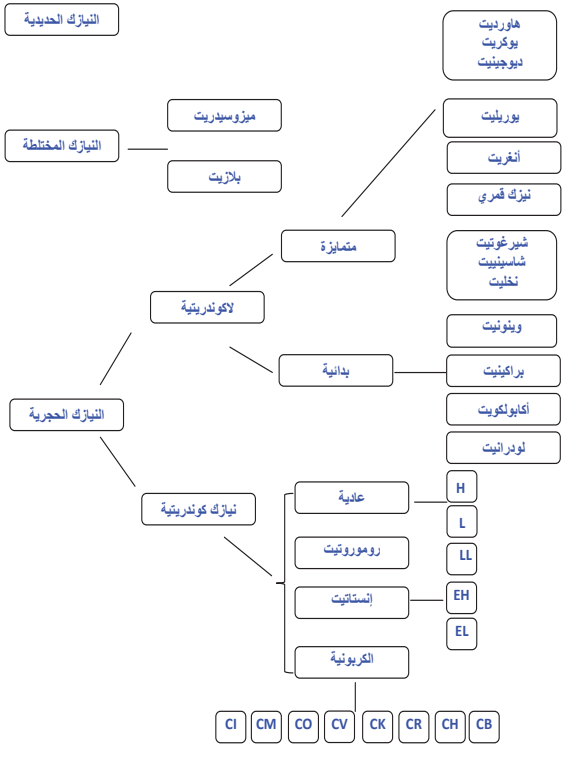
وقد تراجع معدل الاصطدام بشكل مستمر منذ تكوين المنظومة الشمسية، باستثناء واحد يُعرف بالكارثة القمرية أو القصف الشديد المتأخر. فمنذ ٣,٨ مليار عام، كان اندفاق الكويكبات والمذنّبات خلال ١٠٠ مليون عام في المنظومة الشمسية يعادل مليون ضعف ما هو عليه اليوم.

## ٧ - تصنيف النيازك

لا بد من ترتيب النيازك وفق نظام تصنيف منطقي (الشكل ٣)، كما هو الحال في جميع العلوم الطبيعية. يستند تصنيف النيازك إلى تركيبها الكيميائي، إضافة إلى الخصائص البتروغرافية والمعدنية، بحيث يكون لكل مجموعة من النيازك تركيبها النظائري الخاص من الأكسجين (بالنسبة لنيازك الحديد، نقيس السليكات التي تحتويها). وقد خلص الإجماع العام إلى كون الأجسام التي لها التركيب النظائري نفسه تنبثق من جسم واحد (انظر العنوان الفرعي الثاني "بعض مفاهيم علم الكواكب» ضمن هذا الفصل).

نميز ثلاث مجموعات رئيسية من النيازك: النيازك الحجرية (٩٤,٤٪)، النيازك المختلطة (١,١٪)، النيازك الحديدية (٤,٥٪). وتتكون النيازك الحجرية بشكل أساسي من سليكات الحديد والمغنيسيوم، مع نسبة ضئيلة من فلز الحديد. أما النيازك الحديدية فمكونة بشكل

رئيسي من الحديد الفلزي، مع نسب ضئيلة من السليكات في بعض الأحيان، في حين تتكون النيازك المختلطة من مزيج السليكات والفلز.




**الشكل ٣ - تصنيف مبسط للنيازك**

نميّز من النيازك الحجرية ما بين النيزك الكوندريتي Chondrite والنيزك اللاكوندريتي Achondrite. فالنيازك الكوندريتية (٨٦٪) هي، تعريفاً، صخور غنية بالكريات الكوندريولية –وهي تجمعات كروية من سليكات الحديد والمغنيسيوم وفلز الحديد والزجاج. وفضلاً عن ذلك، تتضمن النيازك الكوندريتية حبيبات فلزية منفردة (أي أنها ليست جزءاً من الكريات الكوندريولية) ومحتبسات من الألومنيوم الكلسي، وهي أجسام صلبة مفعمة بالسليكات وأكاسيد الألومنيوم والكلسيوم، يتراوح حجمها بين ١٠ ميكرومتر واحد سم، معززة بمادة الترابط[1]. وتتمايز مجموعات النيازك الكوندريتية فيما بينها بخصائصها الصخرية والكيميائية وبحالة التأكسد.

أكثر النيازك الكوندريتية شيوعاً هي النيازك الكوندريتية العادية (٧٩,٩٪)، وهي غنية بالكريات الكوندريولية وتفتقر إلى مادة الترابط والمحتبسات من الألومنيوم الكلسي. ويمكن تمييز ثلاث مجموعات فرعية منها وفق الفروق في كميات الفلز فيها : H و L و LL. أما النيازك ذات الانستاتيت (١,٦٪) فغنية بالانستاتيت ($MgSiO_3$) والفلز. وتتضمن النيازك الكربونية (٤,٣٪) كميات كبيرة (حوالي عدة أجزاء من المائة من الكتلة) من المواد الكربونية غير الغرافيت أو الألماس، وهي ثرية بالألومنيوم الكلسي وبمادة الترابط.

والجدير بالذكر أن هناك ثماني مجموعات من النيازك الكوندريتية الكربونية هي :

CI. CM. CO. CV. CR. CH. CB. CK

علماً بأنها تختلف بتركيبها الكيميائي، وأحجام كرياتها الكوندريولية، ومقدار محتبسات الألومنيوم الكلسي فيها، وحالة تأكسدها، وتضمنها أو افتقارها للمعادن الثانوية، كالغضار أو الكربونات. ويتيح التصنيف الصخري لهذه النيازك، حسب شدة التحول الحراري، تعزيز تصنيف

[1] يعادل المايكرومتر جزءاً من المليون في المتر.

النيازك، ما سيعرض لاحقاً تحت العنوان الفرعي الثاني "التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية» ضمن الفصل السابع.

النيازك اللاكوندريتية (٨,٢٪) نيازك حجرية لا تحتوي على كريات كوندريولية، منها النيازك اللاكوندريتية البدائية. النيازك اللاكوندريتية المتمايزة هي صخور نارية، أي صخور انصهرت كلياً في لحظة ما من تاريخها. وأكثر النيازك المتمايزة انتشاراً هي الهاورديت، واليوكريت، والديوجنيت (٦,٣٪)، وهي تشترك في تركيبها النظائري الخاص بالأكسجين، ويشار إليها جمعاً بـ «هـ إ د» HED. وكذلك الأمر بالنسبة للشيرغوتيت، والنخليت، والشاسينييت التي نشأت من المصدر نفسه على الأرجح، ويشار إليها بـ "س إ سي» SNC. أما النيازك اللاكوندريتية البدائية (٠,٣٪) فصخور ذات نسيج ناري، لكنها تمكّنت من الاحتفاظ ببعض الخصائص (التركيب الكيميائي والنظائري) التي تميز النيازك الكوندريتية.

تتكون النيازك الحديدية بشكل أساسي من الحديد الفلزي، متضمنة نسبة مئوية محدودة من النيكل. وتتألف النيازك المختلطة (البلازيت والميزوسيديريت) من مزيج من السليكات والفلز.

انبثقت النيازك الكوندريتية من كويكبات ومذنبات بدائية، أي تلك التي لم يطرأ عليها أي تطور جيولوجي منذ تكوّن المنظومة الشمسية. فقد تشكلت مكونات النيازك الكوندريتية ومن ثم تجمعت في القرص المزوّد، وهي تحمل في ثناياها بعض خفايا المنظومة الشمسية (انظر مطلع الفصل السادس)، والتطور المبكر للكويكبات الصغيرة (انظر العنوان الفرعي الثاني «التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية» ضمن الفصل السابع) ومنشأ الحياة على كوكب الأرض (انظر مطلع الفصل الثامن). ذلك أن النيازك المتمايزة والمختلطة والحديدية تقدم لنا عينات من سطح ونواة الجسم السماوي

المتمايز، والحد الفاصل بين نواته ووشاحه. أنها تخبرنا بظواهر التمايز الخاصة بالأجسام السماوية (انظر العنوان الفرعي الثالث " التمايز " ضمن الفصل السابع).

# نبذة تاريخية

## ١. خرافات وانبهار

**١. العصر القديم-** يعود استخدام المجتمعات الإنسانية لأدوات مصنوعة من حديد النيازك لما قبل العصر الحديدي، وبخاصة فيما يتعلق بتصنيع الأسلحة. وثمة نصوص مجازية أو أسطورية، كتلك الخاصة بأمطار الحديد والكبريت المنهمرة من السماء، مسفرةً عن تدمير قرى «سدوم» و«عمورة» (سفر التكوين 24 XXII.)، عدها بعض المؤلفين المعاصرين حالات سقوط نيازك.

بيد أن الحجر النيزكي إيغوس بوتاموسAegos Potamos الذي خرّ عام ٤٦٧ قبل الميلاد، هو أول حجر نيزكي يذكره الكيان الغربي. "يذكر الإغريق بفخر كيف استطاع أناكساغوراس الكلازموني Anaxagoras of Clazomenae، في العام الثاني من الأولمبياد الثامنة والسبعين، بفضل معرفته بعلم الفلك، التنبؤ بالأيام التي ستشهد هبوط أحجار من الشمس، وكيف حدث ذلك في وضح النهار في منطقة تراقيا القريبة من إيغوس بوتاموس Aegos Potamos (بوسعنا في الوقت الراهن رؤية هذه الصخرة: فهي بحجم عربة ذات منصة، وهي بنّية اللون)، في حين كان ثمة مذنب يحترق في الوقت نفسه، ليلاً."[١]

وحتى قبل بليني الأكبر Gaius Plinius Secundus (٢٣م-٧٩م)، ورد ذكر قدرات أناكساغوراس الكلازموني (٥٠٠م-٤٢٨م) على التنبؤ في السجل التاريخي المنحوت على صخور باروس Paros الرخامية (وهي رواية مجهولة المؤلف تعود لعام ٢٦٣ قبل الميلاد. وقد عُثر عليها في

[١] بليني، تاريخ طبيعي، II، ١٤٩.

باروس في اليونان)، وقبل ذلك عند أرسطو (٣٨٤م-٣٢٢م) في "الظواهر الجوية". كذلك ورد ذكرها من قبل مؤلفين لاحقين مثل ديوجنِس لائرتيوس Diogenes Laërtius (القرن الثالث بعد الميلاد) أو يوسيبوس Eusebius (٢٦٥م-٣٣٩م). ويشير أميانوس مارسيليانوس Ammianus Marcellinus (٣٣٠م-٣٩٥م) إلى اكتساب أناكسوغوراس معرفته من "كتب المصريين السرية". من منظور أناكساغوراس، فالشمس وسائر الأجسام السماوية هي أحجار "تمسكها قوة الدوامة الدائرية، ومن شأن زوالها أن يتسبب في سقوطها".[٢] حملت هذه الآراء البدعية أبناء أثينا على محاكمة أناكساغوراس؛ لكنه تمكن بمساعدة بيركليس Pericles (حوالي ٤٩٥م-٤٢٩م) من الهرب، متجهاً إلى المنفى في لامباسكس Lampsacus بآسيا الصغرى.

وفي "الظواهر الجوية" يستأنف أرسطو ملاحظة أناكساغوراس، مؤكداً على ربط سقوط الصخور بمرور مذنب قبل ذلك بأيام. ذلك أن أرسطو يرى بأن لدى مرور مذنب ما "تتكون ريح عاتية إما في استمرارها أو في شدتها"[٣]. فمن منظور هذا الفيلسوف، ليست النيازك سوى حجارة تحملها الرياح في الغلاف الجوي، فهي تنتمي إلى العالم تحت القمري (أي الأرضي والهالك) وتسفر عن زفير مزدوج، «أحدهما بخار الرطوبة المتوافرة في الأرض وفوقها، والآخر أشبه بدخان الأرض وهو عاصف».[٤] والجدير بالذكر أن هذا التفسير يتميز بعدم المساس بمفهوم كمال السماوات: الأمر الذي سيكون له دور كبير في نظرتنا إلى الرجوم حتى نهاية القرن الثامن عشر. كما يروي بليني الأكبر[٥] أنه شهد بنفسه سقوط حجر نيزكي عام ٧٠ بعد الميلاد في غاليا ناربونيسس Gallia

[٢] ديوجنِس لائرتيوس، حياة ومذاهب الفلاسفة اللامعين، II، ١٢.

[٣] الظواهر الجوية، I، ٧، ٣٠.

[٤] الظواهر الجوية، I، ٤، ٥.

[٥] بليني، تاريخ طبيعي، II، ٥٩.

Narbonensis (فرنسا) حيث كان قنصلاً رومانياً. وقد ذكر من قبله المؤلف اللاتيني تيتوس ليفيوسTite-Live (٥٩ق.م-١٧ق.م) عدداً من حوادث سقوط النيازك في إيطاليا الوسطى، وبخاصة عند مونتي ألبانو Monte Albano (على بعد حوالي ٢٠ كم جنوب روما).

كانت الصخور الهاوية من السماء في حوض البحر الأبيض المتوسط موقرة تحت مسمى "بيتيل" باللغة اليونانية الذي يعود على الأرجح إلى العبرية "بيث'يل" Beth'El (أي "سكن الإله")، كما كان الأمر بالنسبة لصخرة كوبيلي Cybele، المعبودة في فريجيا Phrygia (آسيا الصغرى). ففي عام ٢٠٥ قبل الميلاد، أُحضرت الصخرة إلى روما تلبية لنبوءة ربطت ما بين انتصار روما على حنّبعل Hannibal (٢٤٧-١٨٣ قبل الميلاد) ونقل الصخرة مروراً بدروب المدينة. وعند وصولها، نُصّبت على هضبة بالاتين Palatine، لتصبح مقرّ عبادة استمر حتى عصر الإمبراطورية السفلى. كانت صخرة كوبيلي إحدى سبعة ركائز كان يعدّ أمن ورفاه روما آنذاك قائماً عليها. أما صخرة حمص (إيميسا Emesa) السوداء (مدينة حمص في سوريا الحديثة) فكان إيل جبل Elagabalus الذي نصب إمبراطوراً في ٢١٩ بعد الميلاد، هو من أتى بها إلى روما، حيث حلت عبادتها محل عبادة الإله أبولّو طوال ثلاث سنوات حُكْم إيل جبل الزاخر بالأحداث.

لسوء الحظ، أن جميع هذه الأحجار النيزكية فُقدت منذ ذلك الحين.

**٢. العصور الوسطى-** في اليابان، وفي التاسع عشر من شهر مايو عام ٨٦١م، سقط حجر نيزكي بالقرب من قرية نوغاتا-شي Nogata-shi في جزيرة كيوشو Kyushu. ولا تزال هذه الصخرة في الحفظ والصون حتى يومنا هذا، شأنها شأن الآثار المقدسة، في علبة خشبية، وقد عُثر عليها في حديقة مزار شنتو Shinto. تتناقل الأجيال شفهياً حكاية سقوط هذا النيزك، دون تمكن أي عالم متخصص في علم النيازك من الحصول على عينة منها حتى عام ١٩٧٩، حيث قام بدراستها ليؤكد أصلها النيزكي، ومن ثمّ صنفها كنيزك كوندريتي عادي. ويعد نيزك نوغاتا أقدم حجر

نيزكي شُهد سقوطه، ذي شظية بقيت محفوظة حتى يومنا هذا.

لم تُبقِ العصور الوسطى إلا على القليل (إن كانت هناك بقايا) من الشهادات المسجلة بشأن سقوط النيازك، توجد معظمها في الحوليات أو الوقائع. تعد الأحجار النيزكية خلال هذه المدة بصفة عامة بمثابة نتاج تكاثف الغلاف الجوي. وكثيراً ما يتم وصفها بأسلوب خيالي: فيرد ذكر سقوط عجول وماعز وحليب وأسنان أسماك القرش.

كما يذكر الفيلسوف الفارسي ابن سينا (٩٨٠م-١٠٣٧م) أمطاراً حجرية في مؤلفه «رسالة المعادن والآثار العلوية" ضمن "كتاب الشفاء" الذي يتناول فيه الخيمياء (الكيمياء القديمة) والمعادن، الذي ترجم إلى اللغة اللاتينية حوالي عام ١٣٠٠م. فهو يجزم بأن نوعين من الصخر هَوَيَا على الأرض، حديد وحجارة، مما يوحي بخبرته في هذه الظواهر، ما يعدّ أيضاً أول تصنيف للنيازك. بل إن سقوطاً نيزكياً كان قد وقع في حياته، إذ يقول: "في زمني، سقطت في إقليم جرجان، كتلة كانت تزن حوالي ١٥٠ ولدى وصولها الأرض، ارتدت كما ترتد كرة مرمية على الحائط، ومن ثم سقطت؛ فصاحب سقوطها صوت مريع؛ وعثر عدد من الأشخاص الذين سارعوا لمعرفة سر هذه الضجة، على هذه الكتلة فحملوها إلى حاكم جرجان".

**٣. من عصر النهضة إلى عصر التنوير-** في السابع من نوفمبر ١٤٩٢م، وبعد أسابيع من اكتشاف كريستوفر كولومبوس (١٤٥١م-١٥٠٦م) للقارة الأمريكية، سقط ١٢٧ كغ من الصخور النيزكية على منطقة أنسيشايم Enshisheim (الواقعة في الألزاس، فرنسا). وقد بلغ دوي هذا السقوط المسامع على بعد مسافة ناهزت الـ١٥٠ كم. وأثرت هذه الظاهرة المضيئة في نفس الشاب ألبريخت دورر Albrecht Dürer (١٤٧١-١٥٢٨) الذي كان حينئذ في مدينة بازل Basel (٤٠ كم جنوب أنسيشايم) إلى درجة أنه رسم النيزك على دفتر رسومه بالألوان المائية عام ١٤٩٤م أثناء إقامته في فينيسيا. وقد اجتمع سكان أنسيشايم حول

الفجوة التي أحدثها الحجر النيزكي فقاموا بجمع عدد كبير من شظايا الصخرة لصناعة التعويذات أو التمائم حتى تدخلت السلطات المحلية لوضع حد للنهب، وإيداع الصخرة الرئيسية -المعتبرة أثراً من الإعجاز- في كنيسة انسيسشايم. وفي عام ١٧٩٣ قام الثوار بأخذها من الكنيسة وإيداعها في متحف محلي.

شهدت أشعار نظمها الشاعر الألماني سباستيان برانت Sebastian Brant (١٤٥٨م-١٥٢١م) باللغتين اللاتينية والألمانية انتشاراً سريعاً على شكل كتيبات، حيث نشرت هذه النصوص فكرة مفادها أن هذه الحجارة هي دعوة من قبل الملك ماكسيمليان Maximilian (١٤٥٩-١٥١٩)، أرشيدوق النمسا ووريث عرش الإمبراطورية الرومانية المقدسة للزحف ضد ملك فرنسا شارل الثامن Charles VIII (١٤٧٠-١٤٩٨)، الذي كان قد سلبه زوجته آن دوقة بريتانيا Anne de Bretagne (١٤٧٧-١٥١٤) قبل عام. وعرفت صخرة أنسيشايم إثر انتصار ماكسيمليان -بعد شهرين- على الجيوش الفرنسية في ١٩ يناير عام ١٤٩٣ خلال معركة سالينس Salins، صدى واسعا لم ينكره أحد قط. وقد حضر الفيلسوف والطبيب الشهير باراسِلسوس Paracelsus (١٤٩٣-١٥٤١) لفحصها عام ١٥٢٨، مستنتجاً أن الصخرة مكوّنة من ملح مماثل للمادة الأرضية، وأنها تألفت في الغلاف الجوي العلوي، ليعيد بذلك سكان أنسيشايم إلى معتقداتهم الخرافية وكنيستهم. وفي عام ١٧٧١، وأثناء قضائه إجازة في منطقة الألزاس (فرنسا)، تفحص غوته Goethe (١٧٤٩-١٨٣٤) صخرة أنسيشايم، ليَسخر بعد ذلك من سذاجة بني البشر الذين تخيلوا رؤية حجارة تتهاوى على حقولهم.

كثيراً ما يُصوَّر موقف علماء عصر التنوير من سقوط النيازك بشكل كاريكاتوري. فبالرغم من طبيعتهم المستنيرة، فإنهم لم يولوا الاهتمام الكافي لشهادات أبناء الريف التي تصف سقوط النيازك. وفي هذا السياق، باتت الحادثة التي تصور لافوازييه Lavoisier وزملاءه في أكاديمية العلوم

فكرة مبتذلة في تاريخ العلوم، وصفها المؤرخ مايكل بولياني Michael Polyani (١٨٩١-١٩٧٦) بقوله: "في القرن الثامن عشر، كانت أكاديمية العلوم متعنّتة في رفضها احتمال سقوط النيازك على الأرض، ذلك ما بدا واضحاً للجميع. فقد حالت معارضتها للمعتقدات الخرافية -التي كان الإرث الشعبي يربطها بتدخل إلاهي- دون إدراكها لهذه الحقيقة".[٦]

إلا أن قراءة متأنية لمقال كل من فوجورو Fougeroux، كاديه Cadet ولافوازييه Lavoisier المخصص لسقوط رجم لوسيه Lucé (فرنسا، ١٧٦٨) الذي حرر عام ١٧٦٩ ونشر عام ١٧٧٧، لا تظهر أي دليل على أي ازدراء إزاء أبناء الريف الشهود على الحدث. بل إن رفضهم أي أصل فضائي لصخرة لوسيه، لا يستند إلا للتحليل الكيميائي لهذه الصخرة وفق الإمكانات المخبرية المتوافرة في منتصف القرن الثامن عشر. ولدى عجزهم عن إثبات وجود عنصر النيكل- الذي استُخدم لاحقاً بعد عدة عقود لإثبات الطبيعة الفضائية التي تميّز الحجارة والحديد الساقط من السماء- خلصوا إلى ربط هذه الصخرة بالحجر الرملي المحمّم. وبالرغم من عناء معظم الاكتشافات العلمية التي شهدها القرن الثامن عشر لإثبات أصل الصخور الساقطة من السماء فإن استنتاجات أعضاء أكاديمية العلوم انطلقت بالفعل من التحليل العلمي، وليس من آراء سابقة كما زعم بولياني.

إنه لمن الأهمية بمكان أن نذكر هنا بيتر سايمون بالاس Peter Simon Pallas (١٧٤١-١٨١١)، أحد أنصار المذهب الطبيعي، الذي أعاد اكتشاف كتلة من الحديد تزن نحو الطن على بعد ١٥٠ كم من مدينة كراسنويارسك Krasnojarsk (سيبيريا). فقد اكتشف حداد من القوقاز، من أتباع المذهب الطبيعي في عصره، يدعى ياكوف مدفيديف Yakov Medvedev هذه الكتلة الحديدية -غير الخفيّة عن قبائل التتار المحلية- عام ١٧٤٩. ولدى اكتشافه إياها، قام مدفيديف بنقل كتلة الحديد من الجبل الذي

٦ كتاب Personal knowledge، ١٩٥٨.

كانت راكدة فيه إلى ورشته الواقعة على بعد ٣٠ فرستاً[٧] منها. وفي عام ١٧٧٦، بعد أربع سنوات من اكتشافها، قام بالاس بنقل كتلة الحديد إلى سانت بطرسبورغ حيث أودعت في قسم الغرائب من قبل بطرس الأكبر، قيصر روسيا (١٦٧٢-١٧٢٥).

وعندئذ، سرعان ما أطلعت أكاديمية العلوم في سانت بطرسبورغ جمعيات العلوم الأجنبية باكتشاف «حديد بالاس». وتعود أهمية «حديد بالاس» إلى كونه أول «كتلة حديد طبيعي» لم يكن ثمة سبيل لتفسير وجودها على الأرض بأنها ناتج نشاط تعدين قديم. وهكذا بات منشأ هذه الصخرة سؤالاً مطروحاً على المجتمع العلمي الأوروبي بأسره.

## ٢. منعطف نهاية القرن الثامن عشر

**١. فرضية تشلادني الجريئة.-** في عام ١٧٩٤، نشر عالم من وتنبيرغ (ألمانيا) ، يدعى إرنست فلورنز فريدريش تشلادني Ernst Florens Friedrich Chladni (١٧٥٦-١٨٢٧) كتاباً صغيراً من ٦٣ صفحة في كل من لايبزغ وريغا، بعنوان "عن أصل كتلة الحديد التي عثر عليها بالاس Pallas، وكتل حديدية أخرى مشابهة وظواهر أخرى مرتبطة بهذه الكتل"[٨]. وكانت النيازك والكرات النارية وسقوط الحجارة هي الظواهر الأخرى التي أشار إليها تشلادني، حيث قدم في كتابه النيازك وسقوط الحجارة (أو الكتل الحديدية) على أنهما صعيدان متباينان لظاهرة واحدة، أي اختراق جسم فضائي الغلاف الجوي بسرعة فائقة.

---

٧ الفرست وحدة روسية لقياس المسافة تعادل نحو ١٦٦٧ مترا (المترجم).

٨ عنوان الكتاب بالألمانية هو
Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr „ ähnlichen Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende " Naturerscheinungen

(المترجم).

أما الكتل الحديدية المشابهة لتلك التي عثر عليها بالاس، فهي أجسام هوت إلى الأرض في العصور القديمة. ويدافع تشلادني في كتابه عن فكرة مفادها أن الكتل الحديدية والحجارة الساقطة من السماء لا تربطها أي علاقة بالأرض، فهي إما شظايا كواكب أو أجسام صغيرة لم تتمكن من التكتل في جسم أكبر حجماً.

كانت ردود الفعل التي استقبلت كتاب تشلادني مجردة تماماً من الحماس، إذ رأى معظم العلماء فيه انتهاكاً للفيزياء النيوتونية Newton (وفيزياء أرسطو) حين اعتبر أنه يمكن لأجسام صلبة أن تواجد في فضاء ما بين الكواكب. وكان ثمة شك في طبيعة ومستوى شهود سقوط الحجارة (ولاسيما القرويون). إلا أن عدداً من العلماء مثل غوتنبرغ جوهان بلومنباخ Göttinberg Johann Blumenbach (١٧٥٢-١٨٤٠) المنتسب للمذهب الطبيعي انحازوا دون أي تحفظ إلى أطروحة تشلادني: "... يبيّن تشلادني بواسطة مزيج مذهل من المعرفة الواسعة والسفسطائية عدم انتماء هذه الكتل، في أي حال من الأحوال، إلى مجال التعدين، وإنما ينتميان لعِلْمَي الأرصاد الجوية والفلك (...) لم تتكون على الأرض ولا في الغلاف الجوي الخاص بكوكبنا، وإنما في مناطق كونية نائية (...) هذه القطع الصغيرة ليست سوى شهب معدنية".[٩]

غدت مسألة أصل النيازك مثار جدل محتدم في المجتمع العلمي الأوروبي، وبخاصة في فرنسا، وبريطانيا، وسويسرا وألمانيا، الأمر الذي عززته حوادث سقوط نيازك مذهلة: سيينا Siena (إيطاليا ١٧٩٤)، وولد كوتج Wold Cottage (بريطانيا، ١٧٩٥)، إفورا مونتيه Évora Monte (البرتغال ١٧٩٦)، وفاراناسي Benares (الهند، ١٧٩٨)، فضلاً عن تنامي عدد المجلاّت العلمية وتبسيط الفكر العلمي على ضفتي بحر المانش (القناة الإنجليزية). وإذا كان ثمة من يؤمن بوجود الحجارة الساقطة

٩ رسالة موجهة في سبتمبر ١٧٩٤ إلى السير جوزف بانكس (١٧٤٣-١٨٢٠)، رئيس الجمعية الملكية في لندن.

من السماء على غرار السير جوزف بانكس Joseph Banks، فقد كانوا يعتقدون أنها تكونت في الغلاف الجوي، في حين بقي عدد آخر، مثل عالم الجيولوجيا السويسري غيوم-أنتوان دي لوك Guillaume-Antoine De Luc (١٧٢٩-١٨١٢)، على يقين بأنها ليست سوى حجارة أرضية لفظتها البراكين أو الأعاصير.

**٢. تحاليل هاورد Howard الكيميائية-** في عام ١٨٠٢، وبتشجيع من سير جوزف بانكس، قام خبير الكيمياء الشاب إدوارد سي. هاورد Edward C. Howard (١٧٧٤-١٨١٦) بتحليل كسرات (معدنية) من أربعة أحجار نيزكية ساقطة، إضافة إلى أربعة أنواع من الحديد الخالص. فأظهر أن جميع العينات التي حُلّلت تضمنت حوالي ١٠٪ من النيكل، ليثبت بذلك أن لجميع هذه العينات أصلا مشتركاً. ذلك إن اتسام هذه الأجسام –التي عُثر عليها على بعد آلاف الكيلومترات، التي انحدرت في أزمنة مختلفة- بخصائص مشتركة أكد من وجهة نظر هاورد فرضية تشلادني الجريئة. والجدير بالذكر أن هذا النجاح ما كان ليتحقق لولا قيام خبير المعادن الفرنسي المهاجر في إنكلترا، جاك-لويس كونت بوربون Jacques-Louis Comte de Bournon (١٧٥١-١٨٢٥)، بفصل مكونات هذه النيازك. فقد قام بعزل المكونات الكوندريتية (انظر العنوان الفرعي السابع "تصنيف النيازك" ضمن الفصل الأول)، والكريات الغريبة (انظر الكريات الكوندريويلية في العنوان الفرعي الثالث "تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية mafic" ضمن الفصل السادس) والبيريت الحديدي (كبريت الحديد) والحبوب المعدنية في هذه الصخور. وهذه الأخيرة هي الوحيدة التي كانت تحتوي على النيكل ما يمكن مقارنته بمحتوى النيازك الحديدية. تجدر الإشارة هنا إلى أنه لو اكتفى هاورد بتحليل الصخرة بمجملها لَمَا كشف عن هذه النسب المرتفعة من محتوى النيكل، ولَمَا استطاع ربط الصخور الساقطة من السماء بأنواع

الحديد الخالص.

وبالرغم من التحاليل الكيميائية التي أجراها هاورد، فقد ظل الكثير من المتشككين رافضين فكرة نشأة النيازك خارج الأرض، كما هو الحال بالنسبة لجوزيف إيزارن Joseph Izarn (١٧٦٦-١٨٣٤)، الطبيب وعالم الفيزياء الفرنسي، الذي نشر عام ١٨٠٣ في باريس مؤلفاً بعنوان "حجارة ساقطة من السماء" (Des pierres tombées du ciel)، وبعنوان فرعي "خواص صخور الغلاف الجوي" (Lithologie atmosphérique). يبيّن العنوان الفرعي قلة تقدير إيزرن لنتائج تحاليل هاورد، وهو الرأي الذي ذهبت إليه فئة من المستنيرين، التي يمثلها بجوندو Jondot، الصحافي لدى صحيفة Journal des Débats: «يوافق رأي إيزرن تماماً الرأي الذي سبق أن أعربت عنه هذه الصحيفة، بمعنى أنه لا يمكن لهذه الكتل الصخرية أن تسقط من السماء، فهي تتكوّن في الغلاف الجوي (...) فلنطمئن أنفسنا إذن؛ لسنا في حرب مع القمر، وحده كوكبنا مسؤول عن الاعتداء على الأرض وزعزعة سعادتها. كل شيء يحصل في الهواء، في ذلك المختبر الضخم الذي يجتمع فيه البرق والبرد والعواصف. وبعد قراءة مؤلف السيد إيزرن وطيّ كتابه، نميل إلى القول: الظاهرة قد فُسّرت؛ وسببها بالغ البساطة، ولا جديد ذكر هنا».[١٠]

**٣. رحلة بيو Biot-** غيّر سقوط نيزك «ليغل» Aigle في السادس والعشرين من أبريل ١٨٠٣ كل شيء. ففي ذلك اليوم ذي السماء الهادئة الخالية من الغيوم، تهاوت ألوف الحجارة على ليغل L'Aigle (نورماندي Normandie السفلى، فرنسا) المعروفة في ذلك الحين بسوق المواشي. وقد ورد ذكر الحادثة للمرة الأولى في التاسع من مايو عام ١٨٠٣ ضمن "تقارير فصل العلوم الرياضية والفيزيائية في المعهد القومي" (Comptes rendus de la classe de sciences mathématiques et physiques de l'Institut national). من المعلوم أن هذا المعهد حلّ في الخامس والعشرين من

١٠ Journal des Débats، ٢٩ أغسطس ١٨٠٣.

أغسطس ١٧٩٥ محل أكاديمية العلوم الملكية). في السادس والعشرين من يونيو، غادر جان باتست بيو Jean-Baptiste Biot (١٧٧٤-١٨٦٢) باريس متجهاً إلى ليغل لتقصي وإثبات الأدلة الافتراضية والمادية المحيطة بسقوط الحجارة على ليغل في أبريل ١٨٠٣. وقد انطوت الأدلة الافتراضية على استجواب أفراد من مختلف الطبقات والفئات العمرية، وبالرغم من "تباين مهنهم وخلقهم وآرائهم، وإن لم يوجد رابط بينهم إلا القليل هذا إن وجد، يتفقون جميعاً على الشهادة على ذات الحدث الذي لا مصلحة لهم في افتراضه". أما الأدلة المادية، فاستندت إلى فحص الحجارة التي عثر عليها في المنطقة فحصاً متأنياً، ومقارنتها بتلك التي سقطت سابقاً من السماء، فضلاً عن البحث (غير المثمر) عن أدلة نشاط بركاني أو أنشطة صناعية من شأنها تفسير سقوط الحجارة. وقد تبيّن بوضوح أنه لا علاقة للحجارة التي ظهرت بليغل في ٢٦ أبريل ١٨٠٣ بحجارة المنطقة، لكنها ظهرت شبيهة بتلك التي يُفترض أنها سقطت من السماء. عاد بيو إلى باريس في الخامس من يوليو ١٨٠٣، ليلقي تقريره بعد ثلاثة عشر يوماً على أعضاء المعهد، مستنتجاً أن "حجارة سقطت على مشارف ليغل في السادس من أبريل العام الحادي عشر".

قُضي الجدل الدائر حول أصل النيازك في أغسطس ١٨٠٣، لدى نشر تقرير بيو. وقد كتب عالم الفيزياء السويسري بيير بريفوست Pierre Prévost (١٧٥١-١٨٣٩)، في دورية "المكتبة البريطانية» Bibliothèque britannique السويسرية: "قلة هي الحقائق المثبتة في الفيزياء على نحو أفضل من إثبات سقوط الحجارة النيزكية. خلال بضعة شهور، انتقلنا من الشك إلى اليقين. فقد حقق تقرير سي. بيو بشأن نيزك السادس من أبريل عام ١١، والحجارة التي انهمرت على شمال ليغل (كذا)، كل توقعاتنا بهذا الخصوص."

كان لتقرير بيو أثر بالغ في قبول حقيقة سقوط الحجارة، ولاسيما أن بيو كان أول عالم يقصد مواضع سقوط الحجارة النيزكية. صاغ تشلادني

فرضيته انطلاقاً من مؤلفات قديمة، وحديثة آنذاك، أحصت سقوط الحجارة، واكتشاف الحديد الخالص، ورصد النيازك. وذهب بيو إلى ليغل، فتقصى وسأل وبحث وقارن، مساهماً إلى جانب غيره من علماء عصر بونابارت في ابتكار مفهوم الرحلة العلمية. وكان السبب وراء قيام بيو بهذه الرحلة شديد الارتباط بتطوير الشبكة السياسية والإدارية من قبل بونابرت، الذي كان وقتئذ قنصلاً مدى الحياة يتأهب لاعتلاء عرش الإمبراطورية. لم يكن لأي ظاهرة اقتصادية واجتماعية أن تغيب عن انتباه الحاكم وولاته، وكذلك كان الأمر لأي ظاهرة فيزيائية فما ينبغي لها أن تغيب عن إدراك العلماء القنصليين، ولا سيما في سياق المنافسة المحتدمة مع الإنكليز.

لذا كان جان-أنطوان شابتال Jean-Antoine Chaptal (١٧٥٦-١٨٣٢)، وزير الداخلية والعالم، هو من أرسل بيو إلى ليغل "لجمع معلومات دقيقة عن النيزك الذي ظهَر في ليغل في السادس من أبريل الماضي". ولم يغب عن ذهن بيو قبل وصوله إلى ليغل أن يلتقي في موقع السقوط ذاته بمهندسي رابطة الجسور والمياه والغابات، وأساتذة الكلية المركزية، ومراسل المعهد القومي في ليغل، فضلاً عن محافظ ألانسون Alençon ذاته. كان الهيكل الإداري والسياسي البونابرتي يهتم باستغلال ميدان العلوم ولذا تحولت الأحجار النيزكية إلى كائنات علمية.

كان لجمال أسلوب بيو أيضاً دور محوري في رواج النص واستيعابه. يبدو لي من الأهمية بمكان هنا، ودون الخوض في اعتبارات أدبية غير لائقة، أن أشير إلى قدرات بيو الأدبية، حيث ناشد في خطاب قبوله في الأكاديمية الفرنسية، وبعد ثلاثة وخمسين عاماً من ذلك التاريخ، العلماء الشباب على "تدريب وتطويع مدارك فكرهم والارتقاء بها بدراسة العلوم الإنسانية"، مضيفاً "لا تنصتوا لمن يزدريها. فلم يحدث قط أن لاحظنا أنهم أكثر حكمة لأنهم أقل اهتماماً بالقراءة والكتابة. (العلوم الإنسانية) هي الوحيدة التي تستطيع أن تعلمكم دقة الفكر وتمايز الأسلوب فتتمكنوا

تماماً من الإحاطة بالأفكار التي تولد لديكم، وهي التي تلقنكم فن التعبير الواضح، بالمصطلح المناسب. وبعد هذا الإعداد، يغدو اطلاعكم الأول على أسرار العلوم أمراً هيّناً".

### ٣. القرن التاسع عشر: أولى الدراسات المنهجية

إثر قبول فكرة انحدار النيازك من خارج الأرض، شهد القرن التاسع عشر تطوّر الدراسة المنهجية للحجارة النيزكية، مع عكوف خبراء الكيمياء والمعادن والبلورات والجيولوجيا على الخمسمائة وخمسين حجراً نيزكياً (الساقطة والمشاهَدة) التي تم تمييزها في القرن التاسع عشر، مدخلين بذلك وبشكل مباشر دراسة النيازك في سياق تداخل التخصصات.

تمثلت المرحلة الأولى في وضع معايير لتمييز الأحجار النيزكية عن صخور الأرض. زاد سقوط رجوم أليه Alais (فرنسا، ١٨٠٦)، وستانرن Stannern (مورافيا، جمهورية التشيك، ١٨٠٨) وشاسينييي Chassigny (فرنسا، ١٨١٥) الأمور تعقيداً لأن النيازك الثلاثة (نيزك كوندريتي كربوني، ونيزك لاكوندريتي متمايز، ونيزك مريخي، انظر العنوان الفرعي السابع "تصنيف النيازك" ضمن الفصل الأول) لا يحتوي أيّ منها على النيكل، وهو العنصر الكيميائي الذي تمكّن به هاورد من تمييز الأحجار النيزكية عن الصخور الأرضية. فباتت قشرة الانصهار التي تتكوّن لدى اختراق النيزك للغلاف الجوي معياراً لتمييز النيازك (انظر العنوان الفرعي الأول "عبور الغلاف الجوي/النيازك" ضمن الفصل الثالث). تجدر الإشارة هنا إلى أن الاعتراف بانحدار النيازك من خارج الأرض وزيادة تنوع أصناف النيازك، أصبحت مسألة تمييزها أقل عسراً، حيث طرحت بنفس الصيغة المستخدمة اليوم (انظر مطلع الفصل الرابع).

يعد تحديد التركيب الكيميائي الخاص بالحجر النيزكي موضوع بحث عظيم الشأن يرتبط بمستجدات الكيمياء التحليلية والعضوية وغيرالعضوية. إذ إن نسبة القلويات (البوتاسيوم، الصوديوم)، وفصل النيكل والكوبالت، ومراعاة حالات الأكسدة المختلفة جميعها صعوبات

واجهت محللين مثل فوكلين Vauquelin (١٧٦٣-١٨٢٩)، أو برزيليوس Berzelius (١٧٧٩-١٨٤٨) أو برثيلو Berthelot (١٨٢٧-١٩٠٧). ففي عام ١٨٣٤، كان برزليوس أول من جمع دراسة الكيمياء والمعادن، مُتيحًا بذلك في السنوات اللاحقة تطور تصنيف منطقي للنيازك لا غنى عنه أمام عددها المتنامي.

اقتُرح عام ١٨٤٠ أول تصنيف للنيازك من قبل بول باترتش Paul Partsch (١٧٩١-١٨٥٦)، أمين مجموعة الأحجار النيزكية لدى متحف التاريخ الطبيعي في فيينا (النمسا)، إذ ميّز أصناف حديد الحجارة. فضمن مجموعة الأحجار، عزل بارتش مجموعة فرعية عادية، وأخرى غريبة متضمنة نيزك شاسينييي Chassigny (الذي سنكشف عن أصله المريخي بعد مائة وأربعين عاماً)، وحجرَين نيزكيين كوندريتيين كربونيين كَانَا معلومين آنذاك، هما نيزك أليه Alais (فرنسا ١٨٠٦) وكولد بوكيفلد Cold Bokkeveld (جنوب أفريقيا، ١٨٣٨). وفي عام ١٨٦٣، طرح غوستاف روز Gustav Rose (١٧٩٨-١٨٧٣) تصنيفاً أكثر تفصيلاً استند إلى مجموعة النيازك الخاصة بمتحف المعادن في جامعة برلين (تضمنت ١٥٣ عينة). ميّز روز أصناف حديد الصخور، مقترحاً ثلاث مجموعات فرعية لأنواع الحديد وسبعة أخرى للحجارة، علماً بأنه قدم بعض المجموعات الحديثة على غرار البلازيت والهاورديت أو الميزوسيديريت (انظر العنوان الفرعي السابع "تصنيف النيازك" ضمن الفصل الأول). كما أطلق اسم chondre (وهو مصطلح من اللغة اليونانية ويقصد به ذرة صغيرة من الرمل أو البخور) على كريات السليكات الصغيرة التي اكتشفها بورنون Bournon، إضافة إلى اقتراح مجموعة النيازك الكوندريتية، وهي النيازك الغنية بحبيبات السليكات.

كما عرض غابرييل-أوغوست دوبريه Gabriel-Auguste Daubrée (١٨١٤-١٨٩٦)، رئيس قسم الجيولوجيا في متحف التاريخ الطبيعي بباريس من عام ١٨٦١ إلى ١٨٨٤، تصنيفاً للنيازك عام ١٨٦٧، استند

إلى نسبة وتوزيع مكوّن الحديد الفلزي. لم يدم تصنيف دوبريه –وهو شديد الشبه بتصنيف روز– بعد رحيل مؤلفه، ربما لِما حمل من إفراط في استخدام المصطلحات الهلنستية (على غرار مجموعة "الكربتوسيدير" kryptosidères المنحدرة من مجموعة "السبورادوسيدير" sporadosidères). إلا أن التاريخ كان أكثر وفاء لبحوث دوبريه التجريبية بشأن الأحجار النيزكية، حيث يمكن عده أحد مؤسسي علم الكيمياء الكونية التجريبية، التي لا تزال حية في فرنسا، كما هو الحال في معهد أبحاث الصخور وكيمياء الأرض في نانسي Nancy (فرنسا).

ما زال علماء المعادن والصخور والبلوريات يميزون أنواعاً جديدة من المعادن، ويدرسون بأسلوب منهجي مكونات الرجوم. ويعينهم على ذلك المجهر الصخري المستخدم بشكل منهجي في مجال الجيولوجيا منذ منتصف القرن التاسع عشر، والذي يتيح دراسة بنية الصخور الدقيقة. وقد تميز هنري كلفتون سوربي Henry Clifton Sorby (١٨٢٦–١٩٠٨) بشكل خاص في هذا المجال، معرفاً الكريات الكوندريولية على أنها مكون خاص بالنيازك (تفتقر إليه الصخور الأرضية) حيث قارن الكريات الكوندريولية بقطرات النار المتجمدة، عارضاً في مقالاته من ١٨٦٦ إلى ١٨٧٧ فرضية تكوّنها في السديم الشمسي على مقربة من الشمس (انظر مطلع الفصل السادس).

## ٤. القرن العشرون: عصر الفضاء

منذ عام ١٩٣٣، وجمعية أبحاث الأحجار النيزكية، التي أصبحت عام ١٩٤٦ جمعية علم النيازك، تجمع العلماء المهتمين بدراسة النيازك. وقد حشد أول مؤتمر لهذه الجمعية العلمية ١٥ شخصاً في أغسطس من عام ١٩٣٣ في متحف فيلد Field Museum بمدينة شيكاغو. وقد كان للأحجار النيزكية دور كبير في اثنين من أبرز اكتشافات القرن العشرين، حيث أتاحت لنا تحديد عمر الكرة الأرضية (١٩٥٦)، وفهم آليات الاصطناع

النووي النجمي (١٩٥٧).

اتسم النصف الثاني من القرن العشرين بالرحلات الفضائية التابعة للإدارة الوطنية للملاحة الفضائية والفضاء "ناسا" NASA. فقد سنحت الرحلات الفضائية لجمع العينات أبولو (١٩٦٩-١٩٧٢) بتشكيل أسرة دولية للكيمياء الكونية، وحفز تطوير وسائل تحليلية مبتكرة، وطرح مفاهيم جديدة لا تزال خصبة. فعلماء الكيمياء الكونية في الوقت الراهن هم إلى حد ما ورثة أولئك الباحثين الذي أحيوا دراسة العينات القمرية في السبعينيات. كما أتاحت بعث استكشاف المنظومة الشمسية في السبعينيات والثمانينيات الميلادية إعادة وضع دراسة النيازك في إطار دراسة نظام كوكبنا الأكثر عالمية.

إن إقامة علاقات وثيقة بين خبراء الفيزياء الفلكية المتخصصين في مناطق تكوين النجوم وعلماء الكيمياء الكونية، علامة بالغة الأهمية تميّز بها تطور علمنا هذا خلال العشرين عاماً المنصرمة. ذلك أن هذا الانفتاح يسمح بتخفيف الطابع الانزوائي لهذا المجتمع العلمي المتميّز بصغر حجمه (بمعدل بضع مئات يشاركون في المؤتمر السنوي لجمعية علم النيازك في أوائل القرن الحادي والعشرين). والأهم من ذلك أنها نقلت مسألة تكوين منظومتنا الشمسية إلى إطار أوسع، إطار تكوين النجوم المصحوبة بمواكب كوكبية.

# النيازك على الأرض

## ١. عبور الغلاف الجوي

نسمي الأحجار النيزكية التي لم تعبر الغلاف الجوي بعد بالنيازك، أما الشهاب فهو الظاهرة الضوئية التي يحدثها عبور النيزك للغلاف الجوي.

**١. النيازك-** «في الرابع عشر من مايو المنصرم، وفي الثامنة مساء، عبَر شهابٌ الغلاف الجوي من الغرب إلى الشرق، مقترباً من سمت مونتوبان Montauban، شهاب يصفه سكان هذه المدينة بكتلة ضوئية مستديرة الشكل أكثر عرضاً في مقدمتها من مؤخرتها، وذات حجم يبدو قريباً من حجم القمر عند اكتماله، أضاء البلاد بسَنا ساطع. كان الغَيْم الذي خلّفه مضيئاً شاسعاً إلى حد ما في بادئ الأمر، ثم تحوّل بعد ذلك إلى سديم داكن استمر عدة دقائق. لم يكن هذا الشهاب سوى رجم كروي انفجر على بعد ثلاث فراسيخ جنوب الجنوب الشرقي، فوق بلدة أورغوي Orgueil، بدوي أعقب تفتت وسقوط النيزك كان أشبه بصوت رعد بعيد، متحطماً في شظايا كانت مضيئة أول الأمر وسرعان ما هوت أرضاً على شكل وابل من الأحجار. لم يبق في السماء أثر لوجوده باستثناء غيمة بيضاء رمادية سرعان ما تبددت بعد بضع دقائق.» هكذا وصف أنطوان لوميري Antoine Lemeyrie (١٨٠١-١٨٧٨)، الأستاذ في جامعة تولوز Toulouse، سقوط الحجر النيزكي في أورغوي. (خطاب موجه لغابرييل-أوغوست دوبريه Gabriel-Auguste Daubrée (١٨١٤-١٨٩٦) نشر في تقارير أكاديمية العلوم في باريس عام ١٨٦٤).

تخترق النيازك الغلاف الجوي بسرعة تتراوح بين ١١ و ٧٢ كم/ث، تعرف بالسرعة الكونية. تمثل هذه السرعة الفرق بين سرعتيّ دوران

النيزك والأرض حول الشمس. تجدر الإشارة هنا إلى ندرة ارتفاع معدلات هذه السرعة على نحو فائق، فهي تعود لنيازك متحركة في مدارات متراجعة، أي ذات اتجاه دوران معاكس لاتجاه دوران معظم أجرام المنظومة الشمسية (مدارات متقدمة). وتبلغ قيم السرعة الكونية عادة ١٥ إلى ٣٠ كم/ث.

إن سقوط حجر نيزكي على الأرض ظاهرة مذهلة، تصاحبها ظواهر صوتية وضوئية بالغة كما يبيّنه المقطع المقتبس أعلاه. تساوي الطاقة المحررة من قبل حجر نيزكي وزنه ١٠٠ كلغ (ويساوي قطره ٤٠ سم على افتراض كثافة قدرها ٣غ/سم٣ ومسامية تعادل ٠) ويبلغ الأرض بسرعة ١٢ كم/ث، عشرين مليار جول أو ٤٧٦ كلغ من مادة التي إن تي (أي ما يعادل ٣٠٪ من الطاقة المحررة من القنبلة التي أُسقطت على هيروشيما). تتبدد هذه الطاقة على شكل حرارة (بذوبان الجزء الخارجي من الحجر النيزكي) وضوء (مولداً الشهاب) وموجات صوتية (دويها فوق صوتي).

يتمثل عبور الحجر النيزكي الغلاف الجوي أولاً بظاهرة ضوئية شديدة هي الشهاب، الذي يظهر على ارتفاع قدره حوالي ٨٠ كم. ويمكن مقارنة لمعان الشُهُب في ذروته بلمعان الشمس، علماً بأنه يناهز لمعان البدر في معظم الأحيان. وقد يُرصد وهجٌ مثل هذه الشهب على بعد مسافات تصل إلى آلاف الكيلومترات، علماً بأنه وهج متغيّر اللون، فهو وهج أبيض اللون في معظم الأحيان، لكنه قد يكون بلون أصفر أو أخضر أو أحمر حسب تكوينه ودرجة هيجه. تمكننا الشهب إذن من الكشف عن سقوط حجر نيزكي وتحديد مداره بواسطة شبكات التصوير أو بمحض صدفة المشاهدة (انظر العنوان الفرعي الأول «مصدر الأحجار النيزكية/ الأحجار النيزكية المنبثقة من كويكبات» ضمن الفصل الخامس).

ثمة ظاهرة صوتية تصاحب أيضاً اجتياز النيزك للغلاف الجوي، كثيراً ما يشبّه بقصف المدافع أو الرعد، وهو الصوت الذي يحدثه اختراق النيزك لجدار الصوت (دوي فوق صوتي) بسرعة تساوي ١٠٠ إلى ١٠٠٠

ضعف سرعة الصوت في الغلاف الجوي (حوالي ٣٠٠ م/ث، حسب الارتفاع). وقد يولد تحطم النيزك وارتداد الأمواج الصوتية على الأرض أنماطاً صوتية معقدة، لذا بوسعنا تقدير كتلة النيزك استناداً إلى تحليل الموجات الصوتية.

يسفر احترار سطح النيزك -بفعل جزيئات الهواء التي يصطدم بها بسرعة فائقة- عن انصهارها، ومن ثم يتبخر السطح المنصهر ويضمحل مع هبوط النيزك في الغلاف الجوي. يفقد النيزك عندئذ سرعته الكونية، ويبرّد سطحه وتضمحل ظاهرة الانصهار/التبخر. للأحجار النيزكية الساقطة من السماء قشرة انصهار تمثل آخر سطح ذاب، ومن ثمّ تُزَجَّج (يتزجّج المعدن المذاب لدى تبريده بسرعة بالغة). هذا ويبلغ سمك قشرة انصهار الأحجار النيزكية عدة ميليمترات. وفي بعض الحالات يولد اضطراب الهواء المحيط بالحجر النيزكي في سطحه منخفضات أشبه ببصمات البنان، تعرف بـ «الرغماغليبت» regmaglypt (أصل الكلمة يوناني)، علماً بأن الرغماغليبت وقشرة الانصهار تسمحان بتمييز الأحجار النيزكية عن الصخور الأرضية (انظر الفصل الرابع).

تفقد النيازك سرعتها الكونية تماماً لحظة اصطدامها بكتلة هواء قريبة من كتلتها، ذلك ما يحدث تقريباً على ارتفاع ٢٠ كم بالنسبة لنيزك كتلته ١٠٠ كلغ. وكلما صغر الحجر النيزكي، كُبح على ارتفاع أعلى. كما يتوقف هذا الارتفاع على زاوية عبور الغلاف الجوي، وسرعة النيزك الابتدائية. تسقط النيازك سقوطاً حراً بعد تخلّيها عن سرعتها الكونية، بسرعة تعادل عدة أمتار/ثانية.

يستمر هذا السقوط الحر عدة ثوانٍ، ويحدث الارتطام بالأرض ثقب الاختراق (يعرف بالفوهة، نظراً للبنى التي تحدثها النيازك الثقيلة كما هو مبين أدناه)، علماً بأن قطر هذا الثقب يعادل عدة أضعاف قطر الحجر النيزكي. هذا وتتضارب الشواهد الخاصة بدرجة حرارة الأحجار النيزكية التي يتم العثور عليها على الأرض. فقد تكون الأحجار باردة أحياناً (أي أن

داخلها احتفظ بدرجة حرارة وسط ما بين الكواكب، أي حوالي -١٠٠°مئوية) أو ساخنة ( تعرضت قشرة الانصهار لدرجة حرارة بلغت حوالي ١٥٠٠°مئوية).

ذكرت العديد من شواهد القرن التاسع عشر صدور رائحة كبريت شديدة من الأحجار النيزكية حديثة السقوط. بيد أن الشواهد الحديثة على سقوطها لا تذكر مثل هذه الرائحة التي يسهل تمييزها. ففي بداية القرن الحادي والعشرين، لا شك في أن تمييز رائحة في الأحجار النيزكية يذكّر بسبت المشعوذات الذي يعدّ دلالة على الجهل أو الظلامية. في حين أنه من المرجح أن تكون رائحة الكبريت حقيقية، وناجمة عن تبخر المكونات الكبريتية مثل كبريت الحديد، وتكوّن ثاني أكسيد الكبريت.

كثيراً ما تنشطر النيازك في الغلاف الجوي، إذ يحدث ذلك عند درجات عالية من الارتفاع (٢٠-٣٠ كم) قبل فقدان النيزك سرعته الكونية، الأمر الذي يبيّنه وجود قشرة انصهار لكل حجرة من الحطام الساقط. يتناثر مجموع الحجارة الهاوية على ما يسمى بإهليج السقوط، حيث تلتقي الأحجار الأعظم حجماً على طرف الإهليج الأكثر بعداً. وقد عثر الشهود في النيزك الساقط على ليغل (فرنسا، ١٨٠٣) على آلاف الشظايا.

ونظراً لكثرة انشطارات الأحجار النيزكية، يندر العثور في منطقة واحدة على حجرين نيزكيين أو أكثر واردين من حادثة سقوط واحدة، وهو ما يعرف بالأحجار النيزكية غير المتزاوجة. ولا دلالة لهذا المفهوم إلا في سياق العثور على الأحجار النيزكية، لا سيما وأنه فيما يتعلق بحادثة سقوط ما، يتم ربط الحجارة النيزكية المجتمعة فوراً، فلا يسهل دوماً تمييز الأحجار النيزكية غير المتزاوجة، إذ ينبغي إظهار تماثل مواصفاتها المعدنية والكيميائية والنظائرية، فضلاً عن عمرها الأرضي (انظر العنوان الفرعي الخامس «مكوث الأحجار النيزكية على الأرض» أدناه في هذا الفصل).

**٢. الشهب المتفجرة والفوهة الصدمية-** لا تفقد الأجسام الأكبر حجماً، التي تعرف بالشهب المتفجرة bolides سرعتها الكونية، بل تبلغ سطح الكرة الأرضية بسرعات فائقة، وهذا ما يسمى بالاصطدام عند سرعة مفرطة. وتتوقف كمية الكتلة اللازمة لحدوث اصطدام بسرعة مفرطة على زاوية وصول الحجر النيزكي وسرعته وطبيعته، علماً بأن العامل الأخير ذو أهمية بالغة. ذلك لأن صخور النيازك الحجرية -وهي الأكثر مسامية وتصدعاً- تتفتت في الغلاف الجوي بشكل أيسر من النيازك الحديدية الأكثر تراصاً، ومن ثمّ يكون اصطدامها أقل شدة. يمكن القول إنه لحظة بلوغ الكتلة ١٠٠٠ طن (نيزك ذو قطر يتراوح بين ٦ و ١٠ أمتار بحسب تكوّنه من الحديد أو من الحجر)، يدخل النيزك حيز الاصطدامات المفرطة السرعة.

يُحدث الاصطدام بسرعة فائقة حفرة، تسمى فوهة الانفجار، حيث يكاد الشهاب المتفجر أن يتبخر تماماً في حين تتبخر الصخرة المستهدفة بشكل جزئي. توقع موجة الصدمة الناجمة عن سقوط الشهاب المتفجر بسرعة مفرطة، صدمة في معادن الصخرة المصابة عند السقوط التي لم يحطمها الاصطدام. ويُعدُّ هذا الكوارتز المصدوم طريقة شائعة لإبراز فوهات التصادم. ومن ثم تتكوّن ثغرات الاصطدام، أي صخور جديدة ناجمة عن التحول الحراري والميكانيكي الذي تعرضت له الصخرة المصابة. وتُعد ثغرات الاصطدام في روشيشوار Rochechouart (أوت فيين Haute-Vienne، فرنسا) نموذجاً لهذا النوع من الصخور التي تتكوّن نتيجة صدمة الشهاب المتفجر. وبالرغم من تحات فوهة روشيشوار حتى الاضمحلال، فقد أتاحت مواصفات الثغرات إبرازه وتحديد عمره (٢١٠ ملايين عام). والملاحظ أن قطر فوهات التصادم أكبر -بنحو عشرة أضعاف- من قطر المُصطدم، في حين يعادل عمقها حوالي ثلث قطره.

تُحدِث حالات الاصطدام الأكثر عنفاً ما يسمى بالتكتيت tektite، وهي أجسام صغيرة زجاجية لا يتجاوز حجمها بضعة سنتيمترات. ويتشكل التكتيت لدى تصلب كريات الصخر المذابة الناجمة عن الاصطدام والمقذوفة في الغلاف الجوي بسرعات عالية. أما شكل التكتيت فهو مثل الزرّ الصغير أو الدمعة، ويوجد على امتداد آلاف الكيلومترات، كشاهد على ارتطام بالغ العنف. ويتكوّن التكتيت من مادة أرضية فضلاً عن مكوّن ضئيل من خارج الأرض. الجدير بالذكر أن ثمة أربعة حقول تكتيت كبيرة يعود كل منها لحادثة اصطدام مختلفة. لم يتم تحديد الفوهة التي أوجدت التكتيتات الاسترالية. أما تكتيتات ساحل العاج فتعود لفوهة بحيرة بسومتوي Bosumtwi (غانا)، كما تعود التكتيتات مولدافيا فتنتسب لفوهة نوردلينغر ريس Nordlinger Ries (ألمانيا)، في حين تعود تكتيتات تكساس لفوهة خليج شيسابيك Chesapeake Bay (ولاية مريلاند في الولايات المتحدة).

كانت "فوهة الشهاب" Meteor Crater (في أريزونا، الولايات المتحدة) أول فوهة اصطدام تم تحديدها حيث يُقدَّر أنه (بقطره البالغ ١,٢ كم) قد تشكل من قبل شهاب متفجر يبلغ حوالي ٥٠ متراً (٤ ملايين طن) متحرك بسرعة ١٢ كم/ث منذ ٢٥٠٠٠ إلى ٥٠٠٠٠ عام. أما الطاقة المحررة من قبل حادثة الارتطام فتقدر بـ ٢,٥ مليون طن من التي إن تي (ما يعادل ١٧٠ ضعفاً لطاقة قنبلة هيروشيما). وقد عُثر على عشرات شظايا الحجر النيزكي الذي سبب الارتطام على مقربة من الفوهة، سُميت كانيون ديابلو Canyon Diablo كنية عن واد ضيق مجاور. تجدر الإشارة إلى كون الأحجار النيزكية في كانيون ديابلو منبثقة من نيازك حديدية.

يحدث أن تتفجر الشهب المتفجرة في الغلاف الجوي قبل بلوغها الأرض، كما هو الحال في حادثة تونغوسكا Tungunska الشهيرة التي وقعت في سيبيريا الشرقية صباح الثلاثين من شهر يونيو ١٩٠٨. فقد رُصد الشهاب على بعد آلاف الكيلومترات، ورُصدت أجهزة تسجيل

الزلازل في بينا Jena بألمانيا الانفجار آنذاك، وانشوت الأشجار الواقعة في نصف قطر طوله ٢٠ كم من مركز الانفجار، في حين طُرحت أرضاً تلك الأشجار الواقعة في نصف قطر طوله ٤٠ كم من مركز الانفجار. ونظراً للاضطرابات السياسية في روسيا آنذاك (ثمّ في الاتحاد السوفييتي) وبعد هذه المنطقة، لم تنظم أي رحلة علمية إليها حتى عام ١٩٢٧، ولم يُعثر على أي فوهة أو شظية من شظايا الحجر النيزكي. وقد ذهبت الفرضية الأكثر رواجاً إلى أن نواة مذنب حجمها عشرات الأمتار انفجرت على ارتفاع ١٠ كم.

تعرضت معظم فوهات التصادم إما للتآكل أو للامتلاء بالرواسب، وبذلك يصعب تمييزها. وقد تبدد أكثرها قدماً واختفى من سطح الأرض المتجدد على الدوام بفعل تكتونية الصفائح. وتسمى الفوهات العتيقة المتآكلة «فوهات أرضية» أو «أستروبليم» astrobleme (أصل المصطلح يوناني astro- أي نجم و-blème أي ندبة). وعلى الأرض ما يناهز الـ١١٠ فوهة تصادم بحجم يتراوح بين ١٠٠م و٢٠٠ كم. وقد وجدت مواد نيزكية ذات صلة حول ١٥ منها، وتم تمييز فوهات أخرى بدراسة تشكّل وطبيعة صخورها.

**٣. الأحجار النيزكية المجهرية والنجوم الهاوية-** تُكبح حركة الأحجار النيزكية المجهرية في الغلاف الجوي العلوي (بين ٨٠ و١٢٠ كم من الارتفاع)، ولا تحدث دوياً نظراً لصغر حجمها وعلو الارتفاع الذي تفقد عنده سرعتها الكونية. بيد أنها تُحدث شهباً تسمى (عند الفرنسيين) étoile filante (النجوم هاوية). وتتبخر الأحجار النيزكية المجهرية الدقيقة الأكثر حرارة بشكل كامل، ومنها ما يبقى مذاباً تماماً (نتحدث حينئذ عن كريَّات كونية). ويتعرض القسط الأكبر من الأحجار النيزكية المجهرية -وإن لم ينصهر- لتغييرات معدنية أو بنيوية.

بعد تباطؤها في الغلاف الجوي العلوي، تسقط الأحجار النيزكية المجهرية سقوطاً حراً، حيث تتوقف مدة السقوط -أي مدة وجودها في

الغلاف الجوي- على حجمها، فتبقى الأصغر حجماً (١ مايكرومتر، أي جزء من مليون من المتر) في الغلاف الجوي مقدار عدة أسابيع. وتسمح مدة البقاء الأطول في الغلاف الجوي بتجمع الأحجار النيزكية المجهرية في الغلاف الطبقي (انظر أدناه العنوان الفرعي الثاني "تجمعات المادة الناشئة خارج الأرض/ تجمع الأحجار النيزكية المجهرية» ضمن هذا الفصل). أما الأحجار النيزكية المجهرية التي يبلغ حجمها عدة ميليمترات، فلا تزيد مدة بقائها على عدة دقائق.

## ٢. تجمعات المادة الناشئة خارج الأرض

**١. تجمعات الأحجار النيزكية-**. تتساقط الأحجار النيزكية والنيزكية المجهرية بشكل عشوائي على شتى أنحاء الأرض، إلا أن عدد حالات السقوط السنوية محدود، حوالي ٤٤٠٠ حجر نيزكي ذي كتلة تناهز الكيلوغرام. وقد يبدو هذا العدد كبيراً، إلا أن من الأهمية بمكان أن ندرك بأن معظم هذه الأحجار النيزكية يسقط إما في المحيطات (٧١٪ من المساحة الأرضية) أو في مناطق غير مأهولة بأعداد كبيرة. أما عدد حالات السقوط المشهودة فبضعة حالات لا تتجاوز الـ١٢ حالة في العام.

نحن نُقْدم على رحلات جمع منهجي في مواقع تراكم المادة الناشئة خارج الأرض الأكثر مقاومة لتأثير البيئة الأرضية، أي الصحاري، وذلك بهدف إثراء مجموعات الأحجار النيزكية.. فالصحاري هي تعريفاً أماكن جافة ذات مناخ مستقر على مدار عشرات الآلاف من السنين. إن الأحجار النيزكية الساقطة في الصحاري قادرة على مقاومة أثر الأمطار ورطوبة المحيط الجوي المنهك على مدار مئات القرون (حتى ٥٠ ألف عام).

يتم إذن جمع الأحجار النيزكية بأسلوب منهجي في الصحراء الكبرى وفي صحراء اليمن وعُمان وحتى أتاكاما Atacama (شمال تشيلي). ويقدّر عدد الأحجار النيزكية المجموعة في الصحراء الكبرى بحوالي ٦٠٠٠ عينة. ومن دواعي الأسف أنه قد تم الاستيلاء على معظم الأحجار النيزكية

الخاصة بالصحراء الكبرى، وأن الدول المعنية (الجزائر، المغرب، ليبيا) لم تتمكن من الاستفادة من هذا المورد الطبيعي١، الذي قام باستغلاله بوجه خاص من قبل التجار أو الباحثين الأوروبيين.

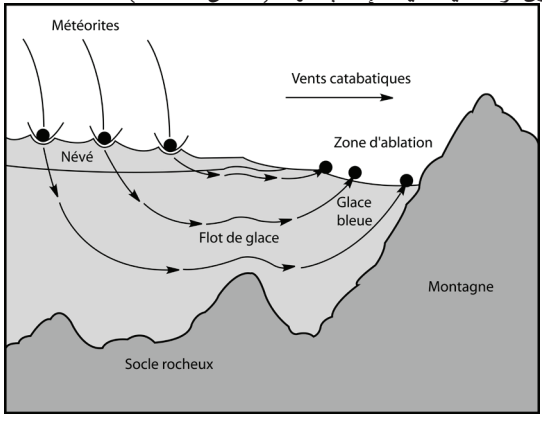
والجدير بالذكر أن للقارة القطبية الجنوبية مكانة خاصة في عمليات جمع الأحجار النيزكية (الشكل ١، الفصل الأول)، إذ يكسو غطاء جليدي القاعدة الصخرية في هذه القارة ذات الـ١٢,٥ مليون كيلومتر مربع. وتتكون الطبقة السطحية لهذا الغطاء الجليدي من ثلج معمر (خشيف). ذلك أن تدني درجات الحرارة والرطوبة يسمح بصيانة الأحجار النيزكية لملايين السنين (الحفظ المبرد). وفضلاً عن ذلك، تم بالصدفة في مطلع السبعينيات، اكتشاف نظام تراكم للأحجار النيزكية (الشكل ٤).

في ديسمبر ١٩٦٩، اكتشفت مجموعة من علماء الجليد اليابانيين بمحض الصدفة ثمانية أحجار نيزكية على الجليد الأزرق قرب جبال ياماتو Yamato (الشكل ١، الفصل الأول). وقد حمل اكتشاف هذه النيازك المحتشدة على مساحة خمسين كم٢ على الاعتقاد بأنها نتاج حادثة سقوط واحدة (حادثة سقوط متعددة، انظر نهاية العنوان الفرعي الأول «عبور الغلاف الجوي/ النيازك» في هذا الفصل). لكنه تبين لدى تحليلها أنها تنتمي في الواقع إلى مراتب مختلفة، وهو ما يرجح تراكمها.

وقد تم تحديد آلية تراكم الأحجار النيزكية في القارة القطبية الجنوبية في حقبة السبعينيات، إذ تتهاوى الرجوم على الثلج المعمر الذي يتحول تدريجياً إلى جليد، قبل أن يتحرك على مدى فترات زمنية طويلة (تتراوح بين نصف مليون ومليون عام) نحو السواحل، لتنجرف الأحجار النيزكية بفعل هذه الحركة. وحين يعترض الجليد المحتوي على الأحجار النيزكية عائقٌ صخريٌّ ما (على غرار الجبال العابرة لهذه القارة)، تتعطل حركته باتجاه السواحل. تتسارع حينئذ الرياح الهـ

١ ثمة أحجار نيزكية –كالنيازك المريخية أو القمرية– تعرض للبيع تجارياً بأسعار باهظة.

(أصل المصطلح يوناني، ويعني النازل مع المنحدر) بفعل اندفاع الانحدار بين المركز والساحل القطبي الجنوبي. ولدى بلوغها سرعة تصل إلى ٣٠٠كم/س قرب السواحل، تذري هذه الرياح الجليد (ذا اللون الأزرق نظراً لنقائه)، فتنكشف الأحجار النيزكية عندئذ على سطح الجليد الأزرق. وما علينا حينئذ إلا تجمعها. (الشكل ٤. أدناه).




**الشكل ٤- آلية تراكم النيازك في القارة القطبية الجنوبية. (الرسم من ماكسوين McSween)**

ومنذ اكتشاف هذه الآلية، تم العثور على حوالي ٢٥٠٠٠ حجر نيزكي في القارة القطبية الجنوبية (عثر اليابانيون على ١٥٧٠٠ منها). وتقوم الولايات المتحدة واليابان، إضافة إلى الصين منذ عدة سنوات، بإعداد حملات على نحو منتظم. كما نظم الأوروبيون، وبخاصة وكالة «بي إن أر إيه» PNRA الإيطالية (البرنامج القومي لبحوث القارة القطبية الجنوبية)، بعض حملات البحث عن أحجار نيزكية.

**٢. جمع الأحجار النيزكية المجهرية.-** كانت أوائل العمليات المنهجية لجمع الأحجار النيزكية المجهرية أثناء حملة سفينة تشالنجر بين ١٨٧٢

و١٨٧٦ للمحيطات، حيث جرفت ألوف الكريات الفلكية بواسطة مغناطيس ضخم كاشط لقاع البحار.

وقد جمع دون براونلي Don Brownlee، وبعدها الناسا منذ ١٩٧٤، ألوف الأحجار النيزكية المجهرية من الغلاف الطبقي، تعرف بالغبار الكونيInterplanetary dust particles في الكتابات العلمية. تُثّبت صفائح مطلية بزيت السليكون تحت أجنحة طائرات الغلاف الطبقي (WB57F، U2، ER2) ويتم تعريضها لدفق الأحجار النيزكية المجهرية المعلقة في الغلاف الطبقي عند ارتفاع ٢٠ كم. ولا تجمع إلا الأحجار النيزكية المجهرية الصغيرة (الأصغر من ٤٠ مايكرومتر)، فمدة بقاء ذوات الكتلة الأكبر في الغلاف الجوي أقصر من أن تسمح بتوافر هذه الرجوم المجهرية بكميات كافية. وتجري في الوقت الراهن حوالي خمس عشرة رحلة سنوياً تحمل كل منها عشرة أجهزة لجمع الأحجار النيزكية المجهرية.

كما يتم جمع الأحجار النيزكية المجهرية في الغطاء الجليدي منذ ١٩٨٤، حيث قام ميشيل موريت Michel Maurette (المركز القومي للبحث العلمي CNRSالفرنسي، بأورسيه Orsay) بتطوير وسائل الجمع في غرينلاند Groenland أولاً، ثم في المناطق الساحلية من القارة القطبية الجنوبية، في كيب برودوم Cap Prudhomme (أديلي Adélie). وبفضل الحملات الأربع إلى أديلي (١٩٨٧، ١٩٩١، ١٩٩٤، ١٩٩٨) "الممولة من قبل المعهد القطبي"، أمكن جمع أكثر من ١٠٠ ألف حجر نيزكي مجهري غير منصهر، وما يقارب ذلك من الكريات الكونية. ويعمل فريق أورسيه Orsay منذ عام ٢٠٠٠ على جمع أحجار نيزكية مجهرية في المناطق الوسطى من القارة القطبية الجنوبية (وهي دوم شارلي Dôme C، الواقعة جنوب خط العرض ٧٥° ٠٦،٠٦، وشرق خط الطول ١٢٣° ٢٠، ٧٤). وتنطوي طريقة الجمع التي طورها جان دوبرا Jean Duprat على جرف الثلج وإذابته في جهاز للغليان (سعته ١م٣) وترشيحه. وتم تجميع نحو ١٠٠ حجر نيزكي مجهري و ٤٠ كريّة في كل متر مكعب من الثلج المذاب

(حملة ٢٠٠٥-٢٠٠٦).

تتميز هذه الطريقة بميزتين. أولاً، لا تتعرض الأحجار النيزكية المجهرية للماء السائل إلا لمدة وجيزة جداً، ومن ثمّ تحتفظ بخصائصها الأصلية. كما أن تجنب استخدام المضخات يحمي الأحجار النيزكية المجهرية الأكثر هشاشة من تجوية ميكانيكية كارثية. وقد استطعنا بفضل ثلاث رحلات (٢٠٠٢، ٢٠٠٢، ٢٠٠٥) إلى المناطق الوسطى جمع حوالي ٣٠٠٠ حجر نيزكي مجهري، منها أنواع لم يسبق أن جُمع منها مثيل.

ومنذ هذه الحملات الرائدة، قامت مجموعات بحثية أخرى بتطوير برامج لجمع الأحجار النيزكية المجهرية، فقد جمع فريق أمريكي أحجاراً نيزكية مجهرية من آبار مياه الشرب في محطة القطب الجنوبي، كما جمعت فرق بحثية يابانية مختلفة أحجاراً نيزكية مجهرية من قبة فوجي Fuji وجبال ياماتو (الشكل١. الفصل الأول).

كما عثر فريق فرنسي-إيطالي (من جامعتي إيكس-مارسيليا Marseille وسيينا Siena) مؤخراً على أحجار نيزكية مجهرية عند قمة الجبال العابرة للقارة القطبية الجنوبية ذات السطح المكشوف منذ ملايين السنين. وقد سمح هذا الحصاد الأخير بجمع عدد هائل من الأحجار النيزكية المجهرية ذات حجم يزيد على مم واحد، لم تتوافر تقريباً حتى الآن في المجموعات السابقة.

**٣. دفق المادة الناشئة خارج الأرض:**

دفق المادة الناشئة خارج الأرض هو كمية المادة الناشئة خارج الأرض التي تسقط على وحدة مساحة من سطح الأرض خلال وحدة زمنية. يقدّر هذا الدفق عادة بالأطنان الساقطة على كامل سطح الأرض، التي تعادل مساحتها ٥١٠ مليون كم٢. نفرّق هنا بين دفق الأحجار النيزكية، ودفق الأحجار النيزكية المجهرية، ودفق الرجوم الكروية الثقيلة (الكويكبات والمذنبات). وتجدر الإشارة في هذا السياق إلى تناقص هذا الدفق مع الحجم، أي أن الأحجار النيزكية المجهرية التي تسقط على الأرض أكثر

بكثير من الأحجار النيزكية. كما أن عدد الأحجار النيزكية التي تسقط على الأرض بدوره أكبر بكثير من عدد الرجوم الكروية الثقيلة.

وقد استُخدم القمر الصناعي الخاص «ل د إ ف» LDEF ( Long Duration Exposure Facility "مرفق التعرض الطويل الأجل") الذي أطلقه المكوك الفضائي تشالنجر في أبريل ١٩٨٤، لقياس دفق الأحجار النيزكية المجهرية. وقد عرضت ألواح الألومنيوم على مدار ستة أعوام على دفق الأحجار النيزكية المجهرية، قبل استردادها من قبل المكوك الفضائي كولومبيا Columbia والعودة بها إلى الأرض. ويمكن، استناداً إلى توزيع حجم الفوهات، التوصل إلى توزيع أماكن اصطدام الأحجار النيزكية المجهرية من حيث الكتلة، والدفق الإجمالي، الذي قدرت قيمته بحوالي ٣٠،٠٠٠ طن/سنوياً على نطاق الكرة الأرضية. كما تم قياس دفق الأحجار النيزكية المجهرية (التي يقل حجمها عن ١سم) على الأرض بإحصاء الأحجار النيزكية المجهرية التي جمعت في قبة شارلي Dôme C. وكانت القيمة المستنتجة من التقدير الاستقرائي على نطاق الأرض بحدود ٦٠٠٠ طن/سنوياً على الأرض. ويعود الفرق بين القيمة التي تم قياسها خارج الغلاف الجوي، وتلك التي تم قياسها على الأرض، للتطبير الجزئي الذي تتعرض له الأحجار النيزكية المجهرية عند عبورها الغلاف الجوي (انظر نهاية العنوان الفرعي الأول في هذا الفصل).

هذا ويتم قياس دفق النيازك على سطح الأرض عن طريق الرصد المنهجي للشُهب، وإحصاء عدد الأحجار النيزكية في الصحاري الحارة. ومن عام١٩٧٤ إلى ١٩٨٥، راقب «برنامج مراقبة واسترجاع الأحجار النيزكية» الكندي Meteorite observation and recovery program جزءاً من السماء يقدر بنحو ١,٣ مليون كم٢. ويعادل الدفق المقاس ٧ أطنان/سنوياً لكتلة [١٠غ-١كلغ]، و ٥٤ طناً/سنوياً لكتلة [١٠غ-١٠٠كلغ]. ما يوافق ٤٤٥٠ حجراً نيزكياً ذا كتلة تزيد على كلغ واحد سنوياً على نطاق الأرض بأكملها.

أما في الصحاري الحارة، فنحسب عدد الأحجار النيزكية التي تراكمت على سطح صحراوي خلال فترة زمنية طويلة (حوالي ٥٠ ألف عام). ويمكن بمعرفة عمر السطح الصحراوي ومعدل اختفاء الأحجار النيزكية (نتيجة التغير الأرضي، انظر نهاية العنوان الفرعي الخامس من هذا الفصل) حساب دفق الأحجار النيزكية على الأرض. تسفر هذه الطريقة عن قيمة تتراوح بين ٣ و ٧ أطنان في العام لنطاق كتلة [١٠ غ- ١ كلغ]. تجدر الإشارة هنا إلى أن قيمة الدفق الأخيرة تتضمن الـ ٥٠ ألف سنة الماضية، وليس دفق الوقت الراهن. ويوحي توافق القيمتين المقدرتين بعدم تغيّر دفق النيازك على الأرض على مدار الخمسين ألف عام الأخيرة.

تحديد قيمة الكتلة السنوية الساقطة على الأرض بالنسبة للأجسام الأكبر حجماً ليس ذا أهمية، نظراً لقلة ما يسقط من هذه الأجسام، وإنما يحدد في العادة تواتر الصدمات أو الفاصل الزمني المتوسط بين حوادث السقوط. ثمة عدة طرق لتحديد تواتر صدمات الأجسام التي تزيد كتلتها على ١٠٠ كلغ: حساب عدد فوهات التصادم على الأرض والقمر، وتوزيع الكويكبات القريبة من الأرض وفق أحجامها، والبيانات التي تولدها الأقمار الصناعية... يوضح الجدول أدناه تواتر صدمات الأجسام حسب حجمها وكتلتها، وحجم الفوهة، والطاقة المحررة لدى وقوع التصادم.

| الكتلة (كلغ) | قطر الفوهة (كم) | تواتر (m<N عام$^{-1}$) | متوسط الفاصل الزمني (عام) |
|---|---|---|---|
| 0,1 | | 13 710 | |
| 1 | | 4 422 | |
| 10 | | 674 | |
| 100 | | 40 | |
| 1 000 | | 2,2 | |
| 10 000 | | $1 \times 10^{-1}$ | 10 |
| 100 000 | 0,08 | $1 \times 10^{-2}$ | 99 |
| 1 000 000 | 0,2 | $1 \times 10^{-3}$ | 981 |
| $1 \times 10^{7}$ | 0,5 | $1 \times 10^{-4}$ | 5 363 |
| $1 \times 10^{8}$ | 1,1 | $6,1 \times 10^{-5}$ | 16 410 |
| $1 \times 10^{9}$ | 2 | $2,5 \times 10^{-5}$ | 40 400 |
| $1 \times 10^{10}$ | 3,6 | $1,4 \times 10^{-5}$ | 72 420 |
| $1 \times 10^{11}$ | 6,5 | $7,7 \times 10^{-6}$ | 129 800 |
| $1 \times 10^{12}$ | 11,7 | $4 \times 10^{-6}$ | 251 000 |
| $1 \times 10^{13}$ | 21,3 | $1,5 \times 10^{-6}$ | 647 400 |
| $1 \times 10^{14}$ | 38,8 | $5,4 \times 10^{-7}$ | 1 840 000 |
| $1 \times 10^{15}$ | 70,5 | $1,8 \times 10^{-7}$ | 5 434 000 |
| $1 \times 10^{16}$ | 128 | $3,9 \times 10^{-8}$ | 25 560 000 |
| $1 \times 10^{17}$ | 234 | $8,3 \times 10^{-9}$ | 120 200 000 |

**جدول ١.- جدول قيم تواتر الصدمات**

إنها تقديرات إحصائية بلا شك، بمعنى أن سقوط كويكب يزن ١٦١٠ كلغ لا يحدث كل ٥٦ , ٢٥ مليون عام تحديداً، إلا أن متوسط الفاصل الزمني بين مثل هذه الأحداث يعادل حوالي ٢٦ مليون عام. من ناحية أخرى، تبقى هذه الأرقام موضع شك بالغ. فحدث كحدث تونغونسكا Tungunska (قطر فوهة التصادم ٢٥ م، وكتلة بلغت ١٣ مليون طن من التي إن تي أو ما يعادل ٨٤٠٠ ضعف قنبلة هيروشيما على افتراض سرعة تساوي ١٢ كم/ث) يطرأ حوالي مرة كل ٤٠٠٠ عام.

### ٤. الصدمات والغلاف الحيوي:

قد يُسفر وصول شهاب متفجّر إلى الأرض عن آثار كارثية على الغلاف الحيوي، إذ يتوقع تسبب تصادم كويكب أو مذنب في تغييرات مناخية عالمية بدءاً من جسم مصطدم يبلغ حجمه ١ كم، ما يوافق فوهة تصل إلى ١٠ كم. إلا أن شهباً متفجرة كهذه تطرأ مرة واحدة كل ٢٠ ألف عام تقريباً (انظر الجدول ١ أعلاه)، وبطبيعة الحال فليس هذا سوى تقدير إحصائي. قد تتسبب مثل هذه الشهب إذا ما كان حجمها أكبر (١٠ كم فأكثر) في انقراض واسع النطاق للأنواع، وهي حالات تحدث كل ١٠٠ مليون عام تقريباً.

كانت حادثة الانقراض الأكثر شهرة تلك الموافقة للانتقال من العصر الجيولوجي الطباشيري إلى العصر الثلثي منذ ٦٥ مليون عام، حيث يقدر اختفاء ٩٥٪ من الأنواع الحيوانية في تلك الفترة، بما في ذلك الديناصورات. وقد اكتشف عام ١٩٨٢ عالم كيمياء الأرض لويس ألفاريز Luis Alvarez وفريقه، فرطاً في تركيز الإريديوم في الطبقة الرسوبية الموافقة للحد الطباشيري-الثالث ( باللغة الألمانية K-T أي Kreide-Tertiär)، نسبة إلى الطبقات الرسوبية المجاورة. اعتبر ألفاريز في هذا الفرط دليلاً على صدمة نيزكية. فالإريديوم، شأنه شأن غيره من عناصر مجموعة البلاتين، قليل جداً في القشرة الأرضية مقارنة بالتركيب الكوندريتي.

ومنذ ذلك الحين، اكْتشِفت عام ١٩٨٩ فوهة تشيكشالوب Chixculub (الممتدة على البحر الكاريبي وشبه جزيرة يوكاتان Yucatan في المكسيك) التي يوحي عمرها وحجمها (حوالي ٢٠٠ كم) بأنها نجمت عن الصدمة الهائلة التي انتهت بانقراض الطباشيري-الثالث. كما عُثر على حجر نيزكي أحفوري لا يتعدى حجمه سنتيمترات بين رسوب تعود للفترة الانتقالية الطباشيرية-الثالثية، ويتعلق الأمر بحجر نيزكي بدائي -نيزك كوندريتي كربوني وارد من كويكب أو مذنب (انظر نهاية الفصل

الأول). وقد تم تحديد الكويكب الذي يُفترض أن تكون تذريته قد أدت منذ ٢٠٠ مليون عام إلى تحرير الجسم المسؤول عن انقراض الديناصورات من خلال دراسات ديناميكية: إذ يُرجَّح أنه الكويكب باتستينا Batistina. وبالرغم من قبول معظم العلماء فرضية النيزك، فثمة احتمالات أخرى طُرحت لتفسير انقراض الديناصورات، منها تدفق سيول البراكين على نطاق واسع (إقليم ديكان البركاني في الهند Deccan Traps) بما نجم عن تحرير قدر هائل من الغازات البركانية، وعن أسر الكائنات الحية آنذاك.

من المفترض إذن أن تكون صدمة الحد الطباشيري-الثالث قد أحدثت حرائق هائلة أطلقت ٥X١٦١٠ غرام من سواد الدخان. ويُعتقد أن هذا السواد قد تسبب -مع حبيبات الغبار المقذوفة في الغلاف الجوي إثر الصدمة، والغازات الناجمة عن تبخر الكربونات والكبريتات في مقر تشيكشالوب- في حجب إشعاع الشمس، مما أدى بدوره إلى الحيلولة دون استمرار التركيب الضوئي، مبرداً المناخ من عام إلى عشرة أعوام. يضاف إلى جميع هذه الآثار هطول الأمطار الحمضية، وتسخين المناخ بعد ذلك نتيجة بث كميات هائلة من غاز ثاني أكسيد الكربون. ووفق هذا السيناريو، استمرت هذه الآثار لدورات كيميائية أرضية أحيائية على مدى مئات الملايين من السنين.

ولما كان معدل تواتر الصدمات مفهوماً إحصائياً، فلا يستبعد وقوع صدمات من شأنها تهديد الغلاف الحيوي، أو على الأقل تهديد منطقة ما على الكرة الأرضية في أي لحظة (بغض النظر عن مراعاتنا لنسب الاحتمالات الموضحة أعلاه). ومن المتوقع اكتشاف ٩٠٪ من الكويكبات القريبة من الأرض التي يزيد حجمها على كيلومتر واحد بين ٢٠١٠ و٢٠١٥، أي القادرة على إحداث انقراض واسع النطاق. أما الكويكبات الأصغر حجماً، فتعيينها أمر أكثر صعوبة. ويقدر الفاصل الزمني بين تعيين كويكب يتهدد الأرض والاصطدام بأنه يساوي عاماً إلى ١٠ أعوام.

وقد يكون هذا الفاصل أقصر بالنسبة للمذنبات.

وقد طُورت طرق عدة، منها عملية قطر فضائي، واحتمال إحداث تفجير نووي على مقربة من الكويكب أو طلائه باللون الأسود (لتغيير عاكسيته، ومن ثمّ مداره بفعل عامل ياركوفسكي Yarkovsky، انظر بداية العنوان الفرعي الثالث "انتقال النيازك إلى الأرض" في الفصل الخامس) لتجنب حدوث تصادم من هذا القبيل.

## ٥. مكوث الأحجار النيزكية على الأرض

يسفر تفاعل الأحجار النيزكية مع الغلاف الجوي الأرضي عن تبديل تركيبها المعدني والكيميائي والبتروغرافي، وهي الظاهرة التي تعرف بالتغيّر الأرضي. ويزداد حجم التغيّر الأرضي كلما طال مكوث الحجارة النيزكية على الأرض (انظر أدناه) وبقدر وجودها في الأوساط الرطبة. ولا شك في أن الأحجار النيزكية الساقطة تحفظ بشكل أفضل من تلك المكتشفة، نظراً لقصر مدة مكوثها الأرضي. وقد ثبت تطور المستعمرات الجرثومية في الحجر النيزكي بولاية تطاوين (تونس، ١٩٣١). لعل التغير الأرضي الذي تعرض له الحجر النيزكي أوركوي Orgueil (فرنسا، ١٨٦٤) هو الأكثر هولاً: فبعد مائة وخمسين عاماً من سقوط هذا النيزك، غطت عروق بيضاء اللون (كبريتات) هذا الحجر النيزكي الداكن الذي تحلل تماماً.

تقاوم الأحجار النيزكية تفاعلها مع الغلاف الجوي بشكل أفضل في أجواء أقرب إلى الجفاف من الرطوبة. وهذا أحد أسباب بحثنا عنها في المناطق الجافة، أي الصحاري (انظر بداية العنوان الفرعي الثاني "جمع المادة الناشئة خارج الأرض" في هذا الفصل). إلا أن طول البقاء في الصحاري يسفر عن تفتح الصدوع وملئها بالمعادن الأرضية، وتأكسد المعدن، وارتكاس المادة العضوية، وتغير التركيب النظائري والخصائص المغناطيسية...

وبطبيعة الحال فمن الأفضل دراسة الأحجار النيزكية الساقطة التي لم تتبدل فيها الخصائص الفيزيائية والكيميائية إثر وجودها على الأرض. إلا أن هذا الأمر ليس دائما ممكناً لا سيما وأن ثمة مجموعات من الأحجار النيزكية غير الممثلة في ما تم اكتشافه (كالأحجار النيزكية الكوندريتية الكربونية CH أو القمرية، انظر الشكل ٣ من الفصل الأول). لذا لا بد من تقدير حجم آثار التغيّر الأرضي على الحجارة النيزكية، لتفادي الخلط ما بين خصائص الحجارة النيزكية العائدة إلى نشأتها خارج الأرض، وهي محل البحث، وتلك المكتسبة نتيجة وجودها على الأرض.

ومن الحجارة النيزكية التي تم اكتشافها ما قضى سنوات طويلة على الأرض، ويمكن قياس عمر وجودها على الأرض باستخدام سبل القياسات الإشعاعية. إذ تتعرض الأحجار النيزكية خلال مسارها عبر الفضاء للإشعاع الكوني (انظر بداية العنوان الفرعي الثاني «أعمار تعرض الحجارة النيزكية» ضمن الفصل الخامس) فيؤدي ذلك إلى ظهور عناصر إشعاعية. من هذه العناصر ما يُنتج إلى درجة الإشباع، أي أن معدل إنتاجها يساوي معدل تحللها. بذلك تكون وفرتها لا متغايرة ومعروفة عند وصول الحجارة النيزكية إلى الأرَض. ولدى وصولها إلى الأرض، يحمي الغلاف الجوي الأحجار النيزكية من الإشعاع الكوني فتبدأ العناصر الإشعاعية بالنقصان، بحيث تتوقف كمياتها عند قياسها حصرياً على عمر وجودها على الأرض. من هنا فإن قياس وفرة هذه العناصر الإشعاعية يمكّننا من معرفة عمر وجودها على الأرض، علماً بأن هذه الطريقة مماثلة لطريقة الكربون المشع (الكربون ١٤) المستخدمة في علم الآثار.

من المحتمل أن يصل عمر الأحجار النيزكية التي يتم العثور عليها في الصحاري الحارة (انظر أعلاه بداية العنوان الفرعي الأول «جمع المادة الناشئة خارج الأرض» ضمن هذا الفصل) إلى حوالي ٥٠ ألف سنة على الأرض. وقد وجد حجر نيزكي مريخي وآخر قمري بأعمار أرضية تساوي بضع مئات آلاف السنين في صحراء ظفار (في سلطنة عمان).

وتبيّن أن عمر الأحجار النيزكية القطبية الجنوبية على الأرض أطول، حيث يتراوح حسب الأماكن من ١٥٠ ألف عام (على سبيل المثال في منطقة ألن هيل Alan Hills) و ٤٠٠ ألف عام في منطقة لويس كليف Lewis Cliff (الشكل ١). وبصفة عامة، تقاوم الأحجار النيزكية الحديدية التغير الأرضي بشكل أفضل من النيازك الحجرية. إذ يبلغ أقدم حجر نيزكي حديدي عمراً أرضياً يساوي حوالي ٢,٧ مليون عام. ومن المفارقات أن يكون أقدم حجر نيزكي على الأرض (حوالي ٣ ملايين عام) هو النيزك حجري الكوندريتي (H4) المعروف بـ FRO ٠١١٤٩.

**٦. أحجار نيزكية من هنا وهناك**

١. الأحجار النيزكية الفرنسية.- حتى الأول من مايو ٢٠٠٩، أُحصي واحد وسبعون حجراً نيزكياً فرنسياً، علماً بأن معظمها (٦٢) أحجار نيزكية ساقطة؛ إذ لا توجد صحراء مواتية لتراكم الأحجار النيزكية. وتعدّ فرنسا من أكثر الدول وفرة في الأحجار النيزكية من حيث عدد حالات السقوط لكل كيلومتر مربع. بالمقارنة، فلا تحصي كل من ألمانيا أو انكلترا على التوالي إلا ٤٩ (منها ٣٢ ساقطة) و٢١ (منها ١٨ ساقطة). بل إن فرنسا تفتخر بسقوط حجرين نيزكيين كوندريتيين كربونيين من نوع CI1 (انظر العنوان الفرعي الأول "التركيب الكيميائي والنظائري في النيازك الكوندريتية" ضمن الفصل السادس): نيزك آليه Alais الذي هوى على لوغار le Gard في الخامس عشر من مارس عام ١٨٠٦، وأوركوي Orgueil الذي سقط على تارن-إيه-غارون Tarn-et-Garonne في الرابع عشر من مايو ١٨٦٤ (لم تسجل إلا خمس حالات سقوط نيازك كوندريتية من نوع CI1).

ومع الحجر النيزكي شاسينييي Chassigny -وهو النيزك المريخي الذي سقط في الثالث من أكتوبر ١٨١٥- يشكل هذان الحجران النيزكيان صدارة مجموعة الأحجار النيزكية في المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي

في باريس. وفضلاً عن هذه العينات الاستثنائية، سُجل حجران نيزكيان كوندريتيان كربونيان، وآخر ذو إنستاتيت enstatite، وثلاثة أوكريت eucrites، فضلاً عن الحجر النيزكي أوبر Aubres الذي اشتق منه اسم مجموعة الأوبريت aubrites (انظر العنوان الفرعي الثالث "التمايز" ضمن الفصل السابع). وثمة ٣٣٨٥ عينة في المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي تمثل ١٣٤٣ حجراً نيزكياً مختلفاً، منها ٥١٢ عينة واردة من نيازك ساقطة. والجدير بالذكر أن قسطاً كبيراً من هذه العينات وارد بطبيعة الحال من خارج فرنسا، وقد تنامت المجموعة إما عن طريق عمليات التبادل أو الشراء أو الاحتلال الاستعماري. ويتم تلبية ١٣٠ طلب إعارة سنوياً من قبل العلماء أو المتاحف، بما يتفق مع مهام المتحف الخاصة بإدارة وتعزيز هذا الإرث.

٢. مجموعات الأحجار النيزكية في العالم.- توجد كبرى مجموعات الأحجار النيزكية في متاحف التاريخ الطبيعي لدى الدول الصناعية، وذلك لعدة أسباب. أولاً، بدأ حشد هذه المجموعات في القرن الثامن عشر أثناء موجة إقامة معارض الغرائب من قبل حكام الأمم الأوروبية السائدة آنذاك (فرنسا، روسيا، إنكلترا، النمسا...). وفي القرن التاسع عشر، بعد إثبات نشأة الأحجار النيزكية خارج الأرض، استفادت بعض هذه القوى من إمبراطورياتها الاستعمارية لإثراء هذه المجموعات (فرنسا، إنكلترا). أخيراً، تعدّ البحوث الكيميائية الكونية من البحوث الأساسية المكلفة، لذا فلا غرابة في تطورها في الدول الأكثر ثراءً. وتعد الولايات المتحدة، واليابان، وألمانيا، وفرنسا، وبريطانيا وكندا الدول الست الأكثرنشاطاً في مجال الكيمياء الكونية.

| المؤسسة | عدد العينات | عدد الأحجار النيزكية | عدد حالات السقوط |
|---|---|---|---|
| فيينا | ٨٥٠٠ | ٢٣٤١ | ٤١٦ |
| برلين | ٨٠٠٠ | ٢٢٨١ | ٣٥٣ |
| لندن | ٤٨٠٦ | ١٩٣٨ | ٦٧٣ |
| باريس | ٣٣٨٥ | ١٣٤٣ | ٥١٢ |
| الفاتيكان | ١١٧٠ | ٥١٠ | ٢٤٩ |
| موسكو | ٢٥٠٠٠ | ١٢٣٠ | |
| واشنطن | ٣٧٣١٤ | ١٢٥٤٦ | ٧٣٨ |
| نيويورك | ٥٠٠٠ | ١٢٨٨ | ٤٥١ |
| طوكيو | ١٦٢٠١ | | ٠ |
| بيرث Perth | أكبر من ١٠,٠٠٠ | ٤٠٨ | ٤ |
| سيينا | | ١٢٠١ | ٤١ |

**جدول ٢.- مجموعات الأحجار النيزكية في مختلف المتاحف**

هذا ويتضمن متحف التاريخ الطبيعي في لندن أكبر مجموعة من الأحجار النيزكية من حيث حالات السقوط المرصودة (الجدول ٢)، أي أنها شوهدت وهي تسقط ومن ثم جمعت، يليه معهد سميثونيان Smithsonian في واشنطن والمتحف الوطني للتاريخ الطبيعي في باريس. وقد تبدو بعض المجموعات لافتة للاهتمام من حيث إجمالي عدد الأحجار النيزكية، إلا أن النيازك القطبية الجنوبية أو الصحراوية هي السائدة فيها، ولذا فهي ذات فائدة علمية أقل (مقارنة بحالات السقوط التاريخية) نظراً لتعرضها لتغير أرضي أعظم (انظر العنوان الفرعي الخامس "مكوث الأحجار النيزكية على الأرض" ضمن هذا الفصل).

٣. الأحجار النيزكية الأحفورية في إسكندينافيا.- عُثر مؤخرا على أحجار نيزكية متحجرة في المحاجر الفنلندية. وبالرغم من كونها قد تغيرت بشدة، إلا فإنها عُدت أحجاراً نيزكية أحفوريه نظراً لوجود كريات كوندريولية أحفورية. فهي تنتمي إلى مجموعة النيازك الكوندريتية العادية من نوع LL، وقد تهاوت في العصر الأوردوفيكي منذ ٤٢٠ مليون عام، ما يتفق تماماً مع العمر المحسوب لانشقاق النيازك الكوندريتية من نوع LL عن جسمها الأم (حوالي ٤٢٠ مليون عام). وانطلاقاً من عدد

الأحجار النيزكية (٤٠) التي تم العثور عليها، وحجم المادة المستخرجة، ومعدل الترسب، قُدّر دفق النيازك الكوندريتية من نوع LL خلال العصر الأوردوفيكي بأنه يزيد ثلاثة أضعاف على دفقها الراهن. ولا غرابة في تنامي عدد الأحجار النيزكية الكوندريتية من نوع LL الساقطة على الأرض بشكل لافت بعد مدة قليلة من انشقاقها عن الكويكب الأم.

٤. أحجار نيزكية على القمر والمريخ.- عادت حملات أبولّو لاستكشاف القمر بـ ٣٨٢ كلغ من الصخور القمرية. وقد وجد من بينها حجران نيزكيان. ومُيّز الحجر النيزكي في فوهة بنش Bench (٣ مم في أقصى تقدير) في عينات المجموعة القمرية التي عاد بها أبولّو ١٢ (١٩٦٩)، حيث تم تحديده على أنه حجر نيزكي كوندريتي كربوني من نوع CM (انظر العنوان الفرعي السابع "تصنيف النيازك" ضمن الفصل الأول). كما تم تعيين الحجر النيزكي هيدلي ريلي Hadley Rille ضمن العينات التي عاد بها أبولّو ١٥ (١٩٧١)، الذي يزن ٣ ملغ، الذي صنف حجراً نيزكياً كوندريتياً ذا انستاتيت (انظر العنوان الفرعي السابع "تصنيف النيازك" ضمن الفصل الأول).

في يناير ٢٠٠٥، كشف إنسالي (روبوت) استكشاف المريخ «أوبورتيونيتي» Opportunity بواسطة مطيافه السيني حجراً نيزكياً من الحديد-النيكل بحجم كرة الروغبي. وقد أبدت جمعية علم النيازك (في العدد ٩٠ من النشرية Meteoritical Bulletin) موافقتها الرسمية على هذا النيزك الأخير بالرغم من عدم توافر عينات في مجموعة أرضية (انظر العنوان الفرعي الأول "بعض مفاهيم علم الكواكب" ضمن الفصل الأول). وأطلق عليه اسم مريداني بلانوم Meridiani Planum، وهو اسم المكان الذي عثر عليه فيه على سطح المريخ (١٠°٠٠′ شمالاً- ٣٠°٠٢′ غرباً). على سطح المريخ، عثرت مركبات "روفر rovers" التابعة لناسا على أحجار نيزكية أخرى، إلا أنها لم تنل اعترافاً رسمياً من قبل جمعية علم النيازك.

٥. أحجار نيزكية أرضية- يتعذر انتزاع صخور من كوكب الأرض، وذلك لكبر حجمها (انظر العنوان الفرعي الأول «البلياردو الكونية» ضمن الفصل الأول). ولم يُعثر إلى الآن على أي حجر نيزكي أرضي، لا على الأرض نفسها، حيث كان يمكن أن تسقط بعض الأحجار النيزكية التي تكونت إثر الصدمة الكارثية، ولا على أي كوكب آخر كالقمر أو المريخ. ويدل عدد الأحجار النيزكية المريخية (تسعة وسبعون دون حسبان أوجه المطابقة الممكنة) أو القمرية (مائة وأربعة وعشرون) على فعالية انتقال الأحجار النيزكية من كوكب إلى آخر. إلا أن بث أحجار نيزكية إلى القمر أو المريخ أمر أكثر صعوبة بالنسبة للأرض نظراً لكبر حجمها (انظر العنوان الفرعي الأول «البلياردو الكونية» ضمن الفصل الأول). ولعل القمر هو المكان الأنسب للعثور على حجارة نيزكية أرضية نظراً لقرب جواره وكتلته الأصغر من كتلة المريخ. لكن انعدام غلاف جوي قمري يسفر عن تقليل عدد الحجارة النيزكية المحمولة إلى أرضه.

يعد عصر القصف الشديد المتأخر، الذي طرأ قبل ٣,٨ مليار عام، هو الأنسب لانتقال الحجارة النيزكية من الأرض إلى القمر، حيث قدر هبوط ٢٠ ألف كلغ من الحجارة النيزكية الأرضية حينئذ على مساحة مائة كم٢ من القمر. وبالرغم من غياب أي نشاط جيولوجي على القمر قادر على تحطيم هذه الحجارة النيزكية فإن سطح القمر يُقذف باستمرار بالحجارة النيزكية المجهرية والحجارة النيزكية. نلاحظ أن ورود المادة الناشئة خارج القمر بشكل مستمر إليه يعود لتصدع الصخور الموجودة على سطحه. وقد قُدّرت مدة بقاء صخرة تزن كيلوغراماً واحداً بمليون عام. وفي حال عاود الإنسان المغامرة ووطأ القمر فمن غير المرجح أن يعود منه محملاً بحجر نيزكي أرضي.

# كيف نميّز الحجر النيزكي؟

تتميز الأحجار النيزكية عن الصخور الأرضية بقشرة الانصهار الخاصة بها (انظر العنوان الفرعي الأول «عبور الغلاف الجوي» ضمن الفصل الثالث)، علماً بأن قشرة مختلف أنواع الحجارة النيزكية لا تتطابق. فقشرة انصهار الأحجار النيزكية الكوندريتية خافتة اللون خلافاً لتلك اللاكوندريتية الأكثر لمعاناً. كما تتخذ النيازك الحديدية لمعاناً معدنياً طفيفاً. وبمرور الزمن، تتأكسد (تصدأ) المعادن المكوّنة للقشرة فتتخذ هذه الأخيرة لوناً بُنّياً. إلا أنه يندر أن تصدأ القشرة كاملة وألا نتمكن من التعرف عليها، وإن كان يمكن لقشرة الانصهار أن تضمحل بفعل التجوية.

من الأهمية بمكان التذكر بأن الحجارة النيزكية، من حيث تشكلها، غالباً ما تكون أجساماً متماسكة، وذلك خلافاً للفكرة السائدة، فهي لا تتسم بأي مسامية ظاهرة. ويعدّ سطحها منتظماً إلى حد ما، ومجرداً من التضاريس الخشنة (على شكل عرف الديك)، على غرار عقيدات الماركازيت ($FeS_2$). ونظراً لطيرانها في الغلاف الجوي، فقد تتخذ شكلاً هرمياً ذا أطراف مدورة أو "الرغماغليبت" (انظر نهاية العنوان الفرعي الأول "عبور الغلاف الجوي" ضمن الفصل الثالث)، وإن لم تكن هذه هي القاعدة السائدة.

في حال تصدع الجسم واستطعنا النفاذ إلى داخله، يمكن تمييز الفلز الذي يكوّنه (على شكل حبيبات صغيرة ذات بريق معدني)، والموجود في معظم مجموعات الحجارة النيزكية باستثناء النيازك اللاكوندريتية المتمايزة، والنيازك الكوندريتية الروموروتية (chondrites rumurutites) وبعض المجموعات النادرة من النيازك الكوندريتية الكربونية. كما يمكن تعيين الكريات الكوندريولية (وهي كريات السليكات ذات حجم يعادل

حوالي ١ مم، (انظر بداية العنوان الفرعي الثالث "تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية mafic" ضمن الفصل السادس) في النيازك الكوندريتية. يعد الفلز والكريات الكوندريولية من الكواشف الجيدة عن المادة الناشئة من خارج الأرض، وهذا نظراً لافتقاد الصخور الأرضية لها. وقد وُجدت حبيبات فلزية نادرة جداً في صخور بألمانيا أو بغرينلاند بالغة الخصوصية، في حين يسهل تمييز البنى الدائرية القائمة في الصخور الأرضية عن الكريات الكوندريولية.

يجعل وجود الفلز الحجارة النيزكية أكثر كثافة (متوسط نحو ٣,٣غ/سم٣) من معظم الصخور الأرضية (٢,٧غ/سم٣ في المتوسط)، علماً أن كثافة عدد من أكاسيد الحديد الشائعة كالهيماتيت (الشاذنجات) hematite أو الماغنينيت (أكسيد الحديد الأسود) magnetite أو منتجات العدانة قريبة من كثافة الحجارة النيزكية. ولا يستحسن تقدير كثافة الأحجار النيزكية بغمرها في الماء أو أي سائل آخر، وذلك لتجنب إتلاف المعادن سريعة الذوبان. وبالمثل، وبالرغم من كون معظم الأحجار النيزكية مغناطيسية (نظراً لارتفاع نسبة المعدن فيها) فإنه يُفضل النأي بها عن المغناطيس الذي من شأنه التأثير على خصائص هذه الأحجار النيزكية المغناطيسية.

كما يمكن تمييز الحجر النيزكي عن الصخور الأرضية بإجراء اختبار النيكل على المعدن معزولاً عن سائر الصخرة. وتنطلق فكرة هذا الاختبار من مبدأ احتواء المعدن النيزكي دوماً على النيكل، ما لا ينطبق على الفلز الأرضي أو حتى المعادن الأرضية التي يمكن الاعتقاد بأنها فلز. ويحاكي هذا الاختبار النهج الذي اتبعه هاورد Howard في بداية القرن التاسع عشر (انظر نهاية العنوان الفرعي الثاني "منعطف نهاية القرن الثامن عشر" ضمن الفصل الثاني). ويتطلب اختبار النيكل توافر بعض المعدات الكيميائية المفصلة في بعض المؤلفات المعروضة في قائمة المراجع.

يمكن أيضاً تمييز الأحجار النيزكية الحديدية بفضل أشكال فيدمنستاتن Widmanstätten، التي تَظهر إثر تعرض سطوحها المصقولة للحامض (الشكل ٥). ولا يمكن استخدام هذه الطريقة إلا على الأحجار النيزكية الحديدية، فأشكال فيدمنستاتن لا تظهر إلا في الفلز الذي لا يبرد إلا ببطء شديد (انظر العنوان الفرعي الثالث "التمايز" ضمن الفصل السابع).

من أكثر الأجسام التي يعتقد خطأ أنها أحجار نيزكية، عقيدات الماركازيت أو المنتجات الفولاذية الغنية بالحديد. ويستطيع الخبراء في معظم الحالات تمييز الحجر النيزكي عن الصخر الأرضي أو المنتجات الصنعية بواسطة فحص نظري بسيط، فلا داعي في الغالب للجوء إلى الدراسات التحليلية المعقدة.

**الشكل ٥.- اشكال فيدنستاتن في النيزك الحديدي الذي في سام**

**فالي** Sam's Valley (المصدر: المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي). تبدو الكاماسيت kamacite أدكن لوناً من التانيت taenite

لذا ندعو القارئ في حال عثوره على عينة نيزكية لعرضه على الخبراء في مختبر علوم المعادن والكيمياء الكونية في المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي (الفرنسي) في العنوان التالي : ، rue Buffon. Paris ٥٦١، كما يمكن الاطلاع على عنوان الموقع الإلكتروني للمختبر في ملحق الكتاب.

أما إذا رصد القارئ يوماً شهاباً في السماء فيرجى أن يُسجل الخصائص التالية لنقلها للمتحف الوطني للتاريخ الطبيعي، إذ لا غنى عن هذه المعلومات لإعادة رسم مدار هذا الجسم ومن ثم ربما اكتشاف الحجر النيزكي ذي الصلة[1] به. تجدر الإشارة هنا إلى أن الشواهد الأكثر إثارة للاهتمام هي تلك التي نحصل عليها من أجهزة المراقبة، وهو ما يبرر وجود هذه الأجهزة.

---

١ صدرت هذه التعليمات عن د. بافيل سبرني Pavel Spurny، المسؤول في الشبكة الأوروبية لرصد الشهب، (مرصد أوندريوف Ondrejov في جمهورية التشيك)

# الأحجار النيزكية: من الجسم الأم إلى الأرض

## ١. مصدر الأحجار النيزكية

كان تشلادني Chladni يفترض أن الأحجار النيزكية ناشئة من خارج المجموعة الشمسية. وقد طرح سيمون دونيس بواسون (١٧٨١-١٨٤٠) Poisson Siméon Denis -بناء على رأي بيير-سيمون لابلاس (١٧٤٩-١٨٢٧) Pierre-Simon Laplace- عام ١٨٠٣ في مقال صدر في نشرة جمعية محبي العلوم

( Bulletin de la Société philomatique) أن تكون الحجارة النيزكية قادمة من براكين القمر، حيث استند إلى حسابات بالستية. وانتظرنا حتى عام ١٨٥٤ حين اقترح العالم الفلكي روبرت البريطاني بي. غريغ (١٨٢٦-١٩٠٦) Robert P. Greg أن مصدر نشأة الأحجار النيزكية هي الكويكبات، وذلك بعد ثلاثة وخمسين عاماً من اكتشاف العالم الفلكي الإيطالي (من باليرمو Palermo) جيوسيبي بيازي Giuseppe Piazzi (١٧٤٦-١٨٢٦) أول كويكب-سيريس Ceres.

بتنا ندرك اليوم أن الكويكبات الواقعة بين المريخ والمشتري هي منشأ معظم الحجارة النيزكية. إلا أن ثمة أحجار نيزكية نادرة منحدرة من المريخ أو القمر، كما يمكن أن تكون بعض الأحجار النيزكية قادمة من مذنبات تتحرك في مدارات نائية عن المشتري. ولم يثبت بعد وجود أي حجر نيزكي قادم من الزهرة أو المريخ.

**١. حجارة نيزكية قمرية ومريخية-** ثمة مائة وأربعة وعشرون حجراً نيزكياً قمرياً، وثمانون حجراً نيزكياً يفترض انحدارها من المريخ. وقد ناقشنا في العنوان الفرعي الثالث «التمايز/ المريخ والقمر» ضمن الفصل السابع، علاقتها بهذه الأجسام. فالأحجار النيزكية القمرية هي

الوحيدة التي تأكدنا من جسمها الأم.

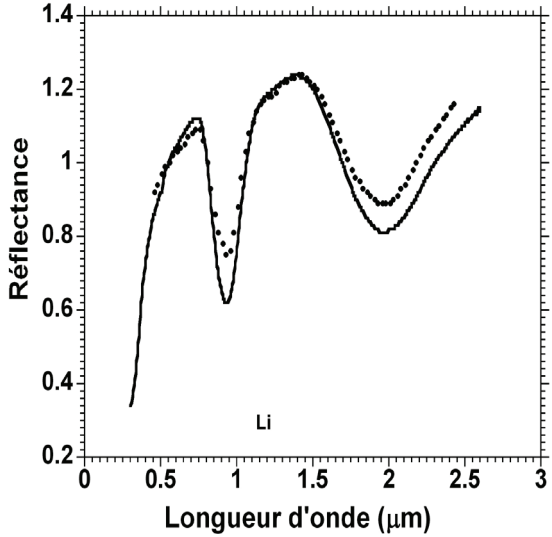
**٢. الأحجار النيزكية المنبثقة من كويكبات-** بقي تعيين منشأ الـ ٣٥،٩٢٠ حجراً نيزكياً المفهرسة وغير المنتمية إلى أيّ من مجموعة الأحجار النيزكية القمرية أو المريخية، والتي تنطوي على ١٣٥ مجموعة مختلفة. والجدير بالذكر أن الكواكب والكواكب القزمة والأقمار محدودة العدد، لذا من الواضح أن معظم هذه الأحجار النيزكية ناشئة من أجسام صغيرة تابعة للمجموعة الشمسية والكويكبات والمذنبات. كما أن طبيعة معظم الأحجار النيزكية والنيازك الكوندريتية البدائية (غير المتمايزة) يعزز الحجة القائلة بانحدار الحجارة النيزكية من الكويكبات (المذنبات).

لقد ثبت أن معظم النيازك الكوندريتية آتية من كويكبات، وذلك من خلال تحديد مدار عدد من الصخور النيزكية. ذلك أنه أمكن تحديد مدار ثمانية أحجار نيزكية ببالغ الدقة، باستخدام إما برامج مراقبة متخصصة أو معطيات الأقمار الصناعية أو تسجيلات أجهزة المراقبة. وهكذا فجميعها منحدر من حزام الكويكبات الواقع بين المريخ والمشتري (الشكل ٢، الفصل الأول). وبالرغم من دلالة هذه المدارات على انبعاثها من حزام الكويكبات فإنه يتعذر ربطها بشكل مؤكد بكويكب محدد.

يمكن الاستعلام عن خصائص الكويكبات بواسطة علم الطيف المرئي والأشعة تحت الحمراء. فهي أداة تسمح بتحليل الضوء الصادر عن جسم ما أو المنعكس عنه حسب طول الموجة (اللون). تقوم قطرات المطر على سبيل المثال بدور المطياف، حيث تحلّل أشعة الشمس لدى ظهور قوس قزح. وفي حالة الكويكبات، نقوم بتحليل ضوء الشمس الذي يعكسه السطح (أوائل الميكرونات microns) للحصول على طيف الانعكاس. ويتوقف شكل أطياف هذه الكويكبات بشكل رئيسي على طبيعة وحجم المعادن المكوّنة لها، فهو يسمح بترتيبها في أنواع تصنيفية، علماً بأن الأنواع التصنيفية الأكثر شيوعاً هي الأنواع إس S والأنواع سي C. والجدير بالذكر أن هناك عشرات الأنواع والأنواع الفرعية التي سنعفي القارئ من تعدادها.

والملاحظ أن طيف الكويكب فيستا Vesta الذي يبلغ قطره حوالي ٥٠٠ كم (ثاني كويكب من حيث الحجم بعد سيريس البالغ قطره ٩٥٠ كم) يطابق تماماً (انظر الشكل ٦ أدناه) طيف مجموعة النيازك الكوندريتية المتمايزة "إتش إي دي" HED (انظر العنوان الفرعي الثالث «التمايز» ضمن الفصل السابع)، مما يوحي بترجيح احتمال انحدار هذه النيازك من هذا الكويكب. وعلى صعيد آخر، يوافق كبر حجم فيستا طبيعة النيازك «إتش إي دي» المتمايزة.

من النادر أن تتطابق أطياف الكويكبات إلى هذا الحد مع أطياف مجموعة ما من الأحجار النيزكية. فطيف كويكبات النوع إس S على سبيل المثال لا يوافق طيف النيازك الكوندريتية العادية إلا بشكل تقريبي. ويمكن تحقيق تطابق أفضل لدى مراعاة تغيّر سطح الكويكبات من نوع إس S نتيجة تعرضها للحيز الذي بين الكواكب. فعلى مدار ملايين السنين، تتعرض أسطح الكويكبات لدفق الأحجار النيزكية المجهرية والإشعاعات الصادرة عن الشمس، فيسفر هذا الوابل النيزكي المجهري والضوئي عن تغيير سطح الكويكبات (حجم المعادن والتركيب البلوري)، ومن ثم أطياف الانعكاس. وبمراعاة آثار التغيّر الفضائي نستطيع التوفيق بين طيف الكويكبات إس وطيف النيازك الكوندريتية العادية. ويعد هذا الربط موفقاً نظراً لوفرة هذه الأجسام في حزام الكويكبات الداخلي، وكون النيازك الكوندريتية هي الأكثر شيوعاً. كما أن أطياف النيازك الكوندريتية الكربونية تماثل أطياف الكويكبات من نوع سي C، ودي D، وبي B. وقد تكون الأحجار النيزكية المعدنية منشقة عن كويكبات من نوع إم M.




**الشكل ٦.- طيف متوسط انعكاس النيازك الهاورديت howardites (بالخط المتواصل) مقارنة بطيف انعكاس الكويكب فيستا (دوائر)**

**٣. الحجارة النيزكية المنبثقة من مذنبات-** منذ الخمسينيات من القرن العشرين ونحن ننظر إلى المذنبات على أنها أجسام مفعمة بالماء وحبيبات الغبار المجهرية، معتبرين المكوّن الصخري من المذنبات ضيئلاً لا يستحق الذكر. ومن جهة أخرى، تبلغ شظايا المذنبات المترية الكرة الأرضية في العادة بسرعة مرتفعة، وهذا يتعارض بطبيعة الحال مع تصور مبدأ الحفظ نظراً للإتلاف الميكانيكي الذي يحدث لدى اختراق الغلاف الجوي. ويتعذر إثر هذه العوامل تصور المذنبات منشأً لبعض هذه الأحجار النيزكية.

في ٢٠٠٦، وانطلاقاً من مشاهدات دُوّنت عام ١٨٦٤ ونشرت في

تقارير أكاديمية العلوم (الفرنسية)، أمكن إعادة رسم مدار نيزك أوركوي Orgueil (CI1) في الحيز الفضائي ما بين الكواكب، وهو المدار الذي بدا متفقاً مع مدار شظية مذنب، لا شظية كويكب. ولم يتم تحديد هذا المدار بطبيعة الحال بنفس الدقة التي أشرنا إليها في الفقرة السابقة، حيث تم استخدام وسائل الرصد الحديثة بدلاً من الرصد المرئي. ومع ذلك، تعدّ شواهد نيزك أوركوي بالغة التفصيل ذلك أنها استفادت من التقدير البالغ الذي كان يكنّه الجمهور المتعلم للعلوم في ذلك العصر. وفي ظل غياب اليقين، ما زال احتمال انحدار نيزك أوركوي وغيره من مجموعة CI1 احتمالاً قائماً وقوياً.

وقد اقترح خبراء علم الحركة احتمال كون الكويكبات من نوع دي D مذنبات غُرست في حزام الكويكبات خلال القصف الشديد المتأخر. وإن ثبتت هذه الفرضية أمام المستجدات فستتعزز فكرة ورود بعض النيازك الكوندريتية من المذنبات.

**٤. الحجارة النيزكية الواردة من الزهرة وعطارد وفوبوس.-** من غير المرجح أن تكون الزهرة منشأً للنيازك، فحجم هذا الكوكب قريب من حجم الكرة الأرضية. وحتى تفلت بعض الأجزاء من تجاذبها التثاقلي، فلا بد من استقبالها لقدر هائل من الطاقة. وهذا لا يمكن أن يحصل إلا في حالات التصادم العنيفة – التي تعدّ نادرة نسبياً. ومن جهة أخرى فإن الغلاف الجوي السميك الخاص بكوكب الزهرة (٩٠ باراً مقارنة ببار واحد للغلاف الجوي الأرضي) يضائل سرعة النيازك الثقيلة، ما يقلّص قدرتها على التصدع في أجزاء ذات طاقة كافية للإفلات من جاذبية كوكب الزهرة.

يدافع بعض الباحثين عن الفكرة القائلة إن عطارد منشأ بعض النيازك اللاكوندريتية المتمايزة. فحجم عطارد صغير بما يكفي لإفلات بعض الأجزاء بمقادير من السرعة تناهز سرعة الإفلات. كما أن عطارد مجرد من أي غلاف جوي. وقد أظهر خبراء علم الحركة عام ٢٠٠٨

إمكانية بلوغ نيازك قادمة من عطارد الكرة الأرضية. وبالرغم من أنه لم يثبت إلى الآن بشكل قطعي نشوء أي حجر نيزكي من عطارد، إلا فإنه يحتمل احتواء مجموعاتنا على نيازك ناشئة من عطارد دون علمنا.

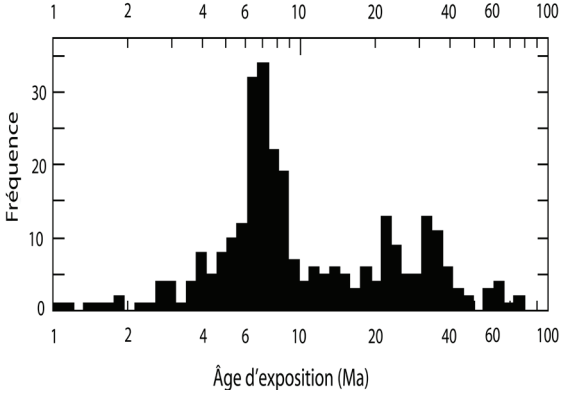
لقد هوى نيزك قرية قيدون Kaidun بجمهورية اليمن الديمقراطية (سابقاً) في ديسمبر من عام ١٩٨٠، وهو يعد حجراً نيزكياً بالغ الأهمية لأنه تكتل من أجزاء ميليمترية متكوّن من حجارة نيزكية متباينة تماماً عن بعضها البعض. وكنا أحصينا أنواعاً مختلفة كثيرة من الحجارة النيزكية في ضواحي قيدون، بدءاً بأجسام متمايزة ووصولاً إلى نيازك كوندريتية كربونية. وقد اقترح العالم الروسي أندري إفانوف Andreï Ivanov أن يكون نيزك قيدون وارداً من فوبوس –وهو من أقمار المريخ، وذا الصلة بالكويكبات من نوع سي C– وأن الشظايا الصخرية المتمايزة قادمة من المريخ. والجدير بالذكر أن مجمل المجتمع العلمي بعيد كل البعد عن إقرار هذه الفرضية المثيرة للجدل.

## ٢. أعمار تعرض الحجارة النيزكية

تنجم الأحجار النيزكية عن ارتطام كويكب بالكويكب المستهدف. خلال هذا المسار البادئ من الجسم الأم والمنتهي في الأرض، تتعرض النيازك لإشعاع المجرّة الكوني، وهي أشعة فائقة الطاقة تُوَلد في النيازك تفاعلات نووية تُنتج بدورها عناصر مشعة. ويمكن باستخدام النمذجة تقدير تغيّر نسبة هذه العناصر المشعة بمرور الزمن، علماً بأن نسبة هذه العناصر المشعة تتوقف بشكل رئيسي على طبيعة الصخرة المعرضة للإشعاع الكوني، وعلى قدر هذا الإشعاع، وعلى احتمال حدوث تفاعل نووي، وعلى مدة التعرض للإشعاع، وعلى سرعة اضمحلال العنصر المعني. وعند وصول النيزك إلى الأرض، يمكن من خلال قياس نسبة العناصر المشعة، مثل ٣٦ Cl ذي دور يساوي ٣٠ ألف عام، تقدير الزمن الذي استغرقه النيزك في الفضاء.

تعد فترات أو أعمار التعرض (للإشعاع الكوني) بمثابة مدة مرور النيزك عبر الفضاء الذي يفصل الأرض عن الجسم الأم الذي نشأ منه. وتختلف هذه المدة الزمنية باختلاف مجموعات الأحجار النيزكية، وهي تتراوح بين عشرات آلاف السنين (بالنسبة للأحجار النيزكية القمرية) وبين نحو المليار عام (للأحجار النيزكية الحديدية)، ما يتيح لنا تأريخ الصدمات التي خلفت الشظايا النيزكية التي نحن بصدد دراستنا.

للنيازك الكوندريتية العادية، ذات الإنستاتيت enstatite والروموروتيت rumurutite أعمار تعرّض تتراوح بين بضعة آلاف وحوالي ستين مليون عام. نلاحظ في توزيع قيم الأعمار بعض الذروات، وما عدا ذلك فهي قيم بالغة التباين (على سبيل المثال، أعمار النيازك الكوندريتية إتش H في الشكل ٧ أدناه). وتشير هذه الذروات إلى حوادث تصادم متقطعة على الأجسام الأم. فالذروة الأعلى قيمة في الشكل ٧ تبيّن انتزاع صدمة هائلة منذ سبعة ملايين عام لأعداد هائلة من النيازك الكوندريتية إتش H من الجسم الأم، باتت تسقط الآن على الأرض.




**الشكل ٧.- عمر تعرض (بملايين السنين) النيازك الكوندريتية العادية من نوع إتش H**

وللنيازك اللاكنودريتية البدائية والمتمايزة أعمار تعرض تتراوح من بضعة ملايين السنين إلى نحو ستين مليون عام. وقد خصص لها بحث مفصل في الفصل السابع المكرس لهذه الصخور. ويتميز عدد كبير من الأحجار النيزكية الكربونية من نوع سي إم CM و سي أي CIعن الحجارة النيزكية الأخرى بأعمار تعرض للإشعاع الكوني تقلّ عن مليون عام.

### ٣. انتقال النيازك إلى الأرض

تصل معظم الأحجار النيزكية إلى الأرض انطلاقاً من حزام الكويكبات الرئيسي (انظر الشكل ٢ في الفصل الأول). وتتكون الحجارة النيزكية إثر تصدع الكويكبات بفعل الاصطدام. تنجرف هذه النيازك نحو الشمس بفعل قوى لا تثاقلية تصبح مؤثرة على الأجسام ذات أقطار تقل عن ١٠٠ متر، علماً بأن هذه القوى (عامل ياركوفسكي Yarkovsky) ناجمة عن إعادة إصدار لامتناظر لضوء الشمس من قبل الأجسام محل الدراسة، كما أنها تعتمد على سرعة دوران الجسم وحجمه وعاكسيته... ولا يكفي عامل ياركوفسكي وحده لجلب الأحجار النيزكية إلى الأرض خلال الفترات الزمنية القصيرة نسبياً (١٠ ملايين عام) التي تمكنَا من تحديدها بمعرفة أعمار التعرض (انظر أعلاه العنوان الفرعي الثاني "أعمار تعرض الحجارة النيزكية" من هذا الفصل). ذلك أن سرعة الانجراف تتراوح في الواقع بفعل عامل ياركوفسكي من عشرة أجزاء من الألف إلى جزء من المائة من الوحدة الفلكية لكل مليون عام. وهذا يعني أن حجراً نيزكياً يقع على بعد ثلاث وحدات فلكية سيصل إلى الأرض (الواقعة على بعد وحدة فلكية واحدة) بعد مائتي مليون عام في أفضل الأحوال.

وقد تدخل الأحجار النيزكية أثناء طريقها إلى الأرض في مناطق رنين مع كواكب عملاقة على غرار المشتري وزُحل، فمناطق الرنين هي مناطق من حزام الكويكبات يشتد فيها أثر قوى جاذبية الكواكب العملاقة (يُتِم

جسم واقع في هذه المنطقة على سبيل المثال دورة حول الشمس خلال المدة التي يُتِم فيها المشتري ثلاث دورات كاملة). وتحدِث الطاقة التي تمدّ بها الكواكب العملاقة الكويكبات أثناء مرورها في منطقة رنين اضطراباً في مداراتها قد يودي بها إلى الأرض في مقادير زمنية تعادل مليون عام.

تتوقف إذن مدة بقاء الأحجار النيزكية على العلاقة بين مدة الانجراف بفعل عامل ياركوفسكي، وعلى المدة التي يستغرقها الوصول إلى الأرض بفعل آليات الرنين. ويفسر اجتماع هاتين الآليتين الفيزيائيتين تراوح فترات البقاء في الفضاء من عدة مئات آلاف السنين إلى مليار عام (انظر أعلاه العنوان الفرعي الثاني «أعمار تعرض الحجارة النيزكية» من هذا الفصل).

ثمة جزء صغير من الأحجار النيزكية (حوالي ١٠٪) آت من الكويكبات القريبة من الأرض (انظر مطلع الفصل الأول) وهو ما يرجح أن يكون حال النيازك الكوندريتية الكربونية ذات أعمار تعرّض تقل عن مليون عام. ولا أثر يذكر لهذا التمييز على طبيعة الأحجار النيزكية على الأرض نظراً لانحدار الكويكبات القريبة من الأرض من حزام الكويكبات الرئيسي.

الفصل السادس

# النيازك الكوندريتية وتكوين منظومتنا الشمسية

كان كل من سويدنبورغ Swedenborg (١٦٨٨-١١٧٧٢) في مؤلفه «أعمال فلسفية ومنطقية» (١٧٣٤)، وإمانويل كانت Emmanuel Kant في مؤلفه «التاريخ الطبيعي العام ونظرية السماء» (١٧٥٥) من أوائل فلاسفة الطبيعة الذين تصوروا أن كواكب المنظومة الشمسية نشأت ضمن قرص في حالة دوران حول نجم الشمس الأولي. ومن ثم عاد لابلاس Laplace لهذه الفكرة في مؤلفه "عرض نظام العالم" Exposition du système du monde (١٧٩٦)، مطلقاً عليها اسم «الفرضية السديمية». وكثيراً ما يوصف هذا القرص بالقرص الشمسي السديمي. إلا أنه يفضل الحديث عن قرص الكوكب الأولي أو القرص المُزَوِّد accretion. (انظر أدناه).

أتاح الرصد الفلكي لمناطق تكوّن النجوم، بالموازاة مع دراسة الأحجار النيزكية مخبرياً، توضيح سلسلة الأحداث التي تنتهي بولادة نجم مصحوب بركب من الكواكب. فالأمر يبدأ بغيمة جزَيْئية -هي عبارة عن حشد هائل (مئات آلاف مليارات الكيلومترات)- من الغاز (الهيدروجين والهيليوم بشكل رئيسي) المحتوي على حوالي ١٪ من حبيبات الغبار المجهرية الحجم.

تتقلص بعض المناطق الأكثر كثافة من هذه السحب الجزيْئية - التي تعرف بالقلوب الجزيْئية- وتنهار على نفسها، علماً بأن هذا التقلص هو نتيجة ظواهر معقدة يتداخل فيها التثاقل والاضطراب، وأنه قد يبدأ في

١ توفي سويدنبورغ عام ١٧٧٢ وليس عام ١٨٧٢ كما ورد في النص الفرنسي (المترجم).

أي لحظة في حياة السحابة الجزيئية، المقدرة مدتها بنحو خمسة ملايين عام. ولحظة تكوّن القلب الجزيئي، ينعزل عن السحابة الجزيئية. وبعد بضعة آلاف السنين يتشكل في قلب هذه البنى نجم أولي وقرص، علماً بأن النجم الأولي لا يكون قد بلغ بعد حجمه النهائي، وأنه يتلقى المادة من القلب الجزيئي المحيط به. وهذا ما يعرف بالقرص المُزَوِّد.

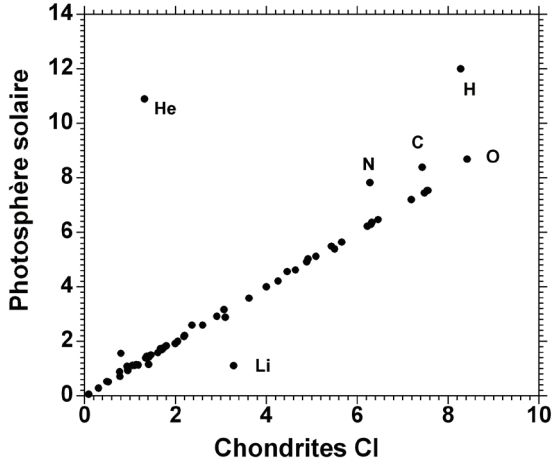
من ثمّ تتشكل في القرص المُزَوِّد مكوّنات النيازك الكوندريتية (بما في ذلك من محتبسات الألومنيوم الكلسي، والكريات الكوندريولية ذات الحديد والمغنيسيوم، ومادة الترابط الدقيقة)، قبل أن تتكتل على هيئة كويكبات صغيرة متميزة بحجمها الذي يعادل ١ كم. ويسفر التصادم البنّاء الذي يحدث بين هذه الكويكبات الصغيرة عن ولادة أجنة كوكبية يبلغ قطرها مئات الكيلومترات. وتتلاحق نشأة الأجسام الأكبر حجماً والأجنة الكوكبية والكواكب، ومن ثم تتطور إثر اضمحلال القرص بعد ملايين السنين من تشكلها. إن ترافق تنامي المادة على الشمس وتكوّن أولى اللَّبِنات الكوكبية يبرران التسميتين : القرص المزوّد والقرص الكوكبي الأولي.

يمكن تمييز ثلاث مراحل أساسية لدى ولادة نجم وركبه من الكواكب، إذ توافق المرحلة البَيْنَجمية فترة السحابة الجزيئية والتاريخ السالف للمادة المكونة للسحابة الجزيئية. أما المرحلة الثانية فمرحلة القرص التي تدوم ملايين السنين. وتوافق المرحلة الأخيرة التي تسمى المرحلة الكوكبية تشكل الأجنة والكواكب عقب تبدد قرص الغاز. أما المرحلة الخاصة بالقلب الجزيئي فبالغة الإيجاز (بضع مئات ملايين السنين)، لذا يمكن اعتبارها مرحلة انتقالية. وتتيح الدراسة المخبرية للأحجار النيزكية والرصد الفلكي لمناطق تكوّن النجوم سبر أسرار العمليات الكيميائية الفيزيائية المعنية بمختلف المراحل، وتحديد مدة كل منها.

### التركيب الكيميائي والنظائري في النيازك الكوندريتية

يعدّ التركيب الكيميائي للنيازك الكوندريتية من نوع CI١ شديد الشبه

بالتركيب الكيميائي للكرة الضوئية الشمسية، وهي المنطقة الخارجية في هذا النجم، والوحيدة المتاحة للمقاييس الطيفية. ويبيّن الشكل ٨ توافق التركيب الكيميائي للنيازك الكوندريتية من نوع CI١ مع تركيب الشمس حتى اثني عشر مقداراً، بدءاً بالعناصر الأوفر (مغنيسيوم، سليكون، أكسجين) وحتى تلك الضئيلة (يورانيوم، رصاص...)، مما يدل على أن النيازك الكوندريتية من نوع CI١ هي ناتج تكثف غاز يتمتع بتركيب كيميائي مماثل لتركيب الشمس. ويعود تدني نسبة عناصر الهيدروجين والهيليوم والكربون والنيتروجين في النيازك الكوندريتية من نوع CI١ مقارنة بالشمس إلى حقيقة وجود هذه العناصر في حالتها الغازية أو الجليدية في القرص الكوكبي الأولي، وأنها لم تُضَف إلى النيازك CI١ لدى تكثّف الغاز المكوّن لها ذي التركيب المماثل لتركيب الشمس. وتفتقر الكرة الضوئية الشمسية لليثيوم -مقارنة بالنيازك CI١- نظراً لاستهلاك هذا العنصر بشكل جزئي إثر التفاعلات النووية الحرارية داخل الشمس.




**الشكل ١٠- التركيب الكيميائي للنيازك الكوندريتية CI وللكرة**

**الضوئية الشمسية (مقياس لوغاريتمي معياري ١٠ ٦ للسليكون)**

يستخدم التركيب الكيميائي الخاص بالنيازك الكوندريتية CI1 كمرجع في علم الفلك، فالشمس مرجع للتركيب الكيميائي الخاص بالنجوم والمجرات. والجدير بالذكر أن إلمامنا بالتركيب الكيميائي الخاص بالنيازك الكوندريتية CI1 أكثر دقة من إلمامنا بتركيب الشمس، ذلك أن القياسات المخبرية أكثر دقة من القياسات الطيفية. من هنا فإن التركيب الكيميائي الخاص بالنيازك الكوندريتية CI1 يحدد الوفرة الكونية لهذه العناصر. هذا التركيب الكوني هو ناتج التطور الكيميائي للمجرة على مدى العشرة ملايين سنة الأخيرة. وإذا كان الهيدروجين والهيليوم وبعض الليثيوم قد أنتجوا خلال الانفجار العظيم فإن سائر العناصر (باستثناء بقية الليثيوم والبورون والبيريليوم) هي نتاج النجوم.

تتمتع سائر النيازك الكوندريتية، مقارنة بالنيازك الكوندريتية CI1 بتركيب كيميائي مجزأ، بمعنى أن ثمة عناصر تزيد أو تنقص قياساً بهذا التركيب الكيميائي المرجعي. ولا يزال أصل التجزئة الكيميائية في القرص المزوِّد محلّ تساؤل. فقد تعود إلى تكثف العناصر الأكثر تطايراً بشكل غير مكتمل، أو إلى تشكل الكريات الكوندريولية، علماً بأن هذه الفرضية هي المفضلة في الوقت الراهن. وكما سبق أن لاحظنا (انظر العنوان الفرعي السابع « تصنيف النيازك» ضمن الفصل الأول) فأوجه تباين التركيب الكيميائي بين مجموعات النيازك الكوندريتية هي الأساس المستخدم لتصنيفها.

هذا ويعد التركيب النظائري للمادة الناشئة خارج الأرض منسجماً على نحو لافت بالنسبة لمعظم العناصر، باستثناء الأكسجين والعناصر المتطايرة (الهيدروجين، الكربون، النيتروجين). ففي معظم العناصر، لا نجد أي شذوذ نظائري قياساً بالتركيب الأرضي. وقد وجدت حالات شذوذ نظائرية نادرة في محتبسات الألومنيوم الكلسي. ويوضح هذا الانسجام

اندماج مادة التكوين البدائية في السحابة الجزيئية، والناجمة عن أجيال لا حصر لها من النجوم السابقة لشمسنا، على نحو لافت.

**عمر النيازك الكوندريتية ومكوّناتها**

تعدّ القدرة على تأريخ الصخور الأرضية والناشئة خارج الأرض من أوجه التقدم البارز الذي أحرزه العلم في القرن العشرين، إذ نستخدم لهذه الغاية عناصر مشعة ذات دور طويل، على غرار $U_{٢٣٥}$ (الذي يتفكك إلى Pb207 بدور يعادل 0.703 =T1/2 مليار سنة)، أو 238U (الذي يتفكك إلى Pb206 بدور يعادل 4.5 = T1/2 مليار سنة) ، أو 87Rb (الذي يتفكك إلى $Sb_{٨٧}$ بدور يعادل ٤٨ = ١/T٢مليار سنة). ويسمى منتج هذا التفكك (Pb207. Pb 206.87Sr ) بالنواة الوليدة أو النظير. ونتحدث هنا عن العمر المطلق لأنه يحسب استناداً إلى الوقت الراهن، وليس قياساً بمرجع ما كما هو حال الأعمار النسبية (انظر العنوان الفرعي الخامس «العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير» من هذا الفصل).

تقدَّر أعمار النيازك على نحو أكثر دقة بجمع المعلومات الواردة من تفكك النظيرين المشعين لدى اليورانيوم، حيث يمكن ربط الوفرة النسبية لنظيري الرصاص في المادة النيزكية بزمن التكوين (أعمار الرصاص-رصاص). والجدير بالذكر أن قياس التكوين النظائري الخاص بالرصاص مسألة بالغة التعقيد، وهناك قلة من مختبرات العالم قادرة على إجراء هذه القياسات على الصخور النيزكية. بيد أن الدقة التي تتسم بها حسابات هذه القياسات جديرة بالإعجاب: بضع مئات آلاف السنين لأعمار بمقياس ٤٥٦٧ مليون عام.

تعد محتبسات الألومنيوم الكلسي (في الصخور النيزكية) أقدم ما في المنظومة الشمسية من أشياء، حيث يتراوح عمرها بين ٤٥٦٧ و ٤٥٦٩ مليون عام، وهو العمر الذي بات يعد في الوقت الراهن عمر المنظومة الشمسية. تبدو الكريات الكوندريولية المافية (التي يدخل في تركيبها الحديد والمغنيسيوم) أحدث سناً بأعمار تتراوح بين ٤٥٦٤ و ٤٥٦٦ مليون

عام. ويتعذر في الوقت الراهن تحديد عمر مادة الترابط الدقيقة نظراً لدقة حجم مكوناتها.

إذا كانت محتبسات الألومنيوم الكلسي قد تشكلت قبل مليوني عام من الكريات الكوندريولية، فهذا يعني أنها استطاعت البقاء طوال مليون عام في القرص المزوِّد، قبل الارتباط بالكريات الكوندريولية. إلا أنه يتعذر عليها البقاء مدة طولية بهذا الشكل في قرص مزوِّد، ولا سيما أنها تقترب بشكل حلزوني بطيء من الشمس بفعل قوة الغاز. وتذهب التقديرات إلى أنه بعد عدة مئات آلاف السنين، دُفعت الأجسام الصلبة بحجم الميليمتر نحو الشمس بفعل السحب. وقد رأى بعض العلماء أن من شأن الاضطراب في القرص المزوِّد أن يسفر عن تحرك جزء من محتبسات الألومنيوم الكلسي عكس التيار وتفادي السقوط في نجم الشمس الأولي لمليوني عام.

تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية mafic

إن سبر أسرار تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية هو من أبرز أهداف علم الكيمياء الكونية. فالكريات الكوندريولية هي أكثر المكونات وفرة في النيازك الكوندريتية، ويتيح فهم آلية تكوينها الكشف عن الآليات الفيزيائية الأكثر شيوعاً في قرص الكوكب الأولي. ولا شك في أن محتبسات الألومنيوم الكلسي استثنائية في مواطن كثيرة (كما هو مبين أدناه)، إذ يعتقد أنها تشكلت في مرحلة مبكرة جداً في القرص المزوِّد.

ثمة أسئلة ثلاثة تطرح حين يتعلق الأمر بمحتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية: متى، أين، وكيف؟ ويوحي استخدام قياس التسلسل الزمني الإشعاعي بتكون إضافات الألومنيوم الكلسي قبل نحو مليوني عام من الكريات الكوندريولية (انظر العنوان الفرعي السابق). ورغم ذلك يستحسن إسناد تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي أو الكريات الكوندريولية إلى السلم الزمني الخاص بالتطور الفلكي

للأقراص، فكلاهما تشكل في قرص الكوكب الأولي، والسؤال الذي يبقى مطروحاً هو تعيين مناطق التكوين في هذا القرص. أخيراً، نلاحظ أن العمليات ومصادر الطاقة اللازمة لتشكل هذه الأجسام أمر ما زال يراوغ العلماء ويثير حيرتهم.

تتميز محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية، أولاً وقبل كل شيء، بتكوينها المعدني والكيميائي، كما يوحي به اسمها؛ إذ تسود في محتبسات الألومنيوم الكلسي المعادن المفعمة بالألومنيوم والكالسيوم، مثل معدن الديوبسيد (CaMbSi2O6 diopside) ، أو المليليت (CaAl2xMg1 − xSi2 – xO7 melilite)، حيث يتغير X بشكل مستمر من ٠ إلى ١) أو السبينيل (اللعْل Mg2AlO4 spinel)، والغنية بعناصر مقاومة للحرارة بالنسبة للنيازك الكوندريتية CI1 بعامل يتراوح من ١٠ إلى ١٠٠. أما السريوم والأوروبيوم فأقل من العناصر الأخرى في محتبسات الألومنيوم الكلسي. ويسود الأوليفين olivine على الكريات الكوندريولية (Mg, Fe)2SiO4) والبروكسين (Mg, Fe)SiO3 pyroxene). كما تتضمن أيضاً الزجاج الغني بالسليكا (SiO2 silica) والعناصر القلوية (الصوديوم والبوتاسيوم)، والحديد الفلزي المفعم بالنيكل (بعض الأجزاء من المائة) والكبريتيدات (FeS). والجدير بالذكر أن للكريات الكوندريولية تركيباً كيميائياً قريباً من تركيب النيازك الكوندريتية.

يختلف تشكل ونسيج الكريات الكوندريولية عن محتبسات الألومنيوم الكلسي: فالكريات الكوندريولية كروية الشكل، في الوقت الذي قد تتخذ محتبسات الألومنيوم الكلسي أشكالاً غير منتظمة؛ وتتسم الكريات الكوندريولية ببنية الصخور النارية التي لا توجد بالضرورة في العناصر المقاومة للحرارة.

وتتميّز الكريات الكوندريولية أيضاً عن محتبسات الألومنيوم الكلسي بتركيبها النظائري، ذلك أن الأولى غنية بـ 16O بقدر يزيد بعض الأجزاء في المائة على الأخيرة. كما تزيد عليها بقدر يتوقف على كتلة نظائر

المغنيسيوم الثقيلة. وتُظهر بعض العناصر، على غرار الكروم أو التيتانيوم أو الكالسيوم، أحياناً أوجه شذوذ نظائري لا صلة لها بالكتلة. أخيراً، تجدر الإشارة إلى تضمن العناصر المقاومة للحرارة لحظة تكوينها قدراً من مكونات النشاط الإشعاعي الخامد يقل عن الكمية الموجودة في الكريات الكوندريولية (انظر العنوان الفرعي الخامس أدناه).

ثمة توافق بين عناصر الألومنيوم الكلسي والتكوين المعدني لغاز ذي تكوين شمسي تَكَثَّفَ عند درجات حرارة تتراوح بين ١١١٠ و١٥٠٠ درجة مئوية. ومما يترتب على هذا الاكتشاف- الذي توصل إليه فريق شيكاغو في مطلع السبعينيات- أن محتبسات الألومنيوم الكلسي هي أولى المكونات الصلبة التي تكونت بفعل التكثف في قرص الكوكب الأولي. وإثر تكاثفها، انصهرت بعض هذه العناصر فاتخذت شكلاً كروياً وقوام الصخور النارية. وقد صاحب هذا الانصهار تبخر في وسط متخلخل، مما يتضح من زيادة نظائر المغنيسيوم الثقيلة. ويوحي تناقص السريوم والأوروبيوم بتشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي في وسط أكثر تخفيفاً من الوسط الذي تشكلت فيه الكريات الكوندريولية.

كما تفسر أوجه الشذوذ النظائري المشاهدة في عناصر الألومنيوم الكلسي بأنها دليل على تكوين سابق لأوانه، أي سالف لعملية المجانسة النظائرية لقرص الكوكب الأولي، بحيث تكون أوجه الشذوذ النظائري قد احتفظت بذاكرة المواقع الفيزيائية الفلكية التي تكونت فيها- أي أنها تتيح بذلك نمذجة ظواهر الاصطناع النووي النجمي.

وما زال مقرّ تكوّن محتبسات الألومنيوم الكلسي غير معلوم على نحو دقيق، إذ يفترض أنها قد تشكلت على مقربة من الشمس، على بعد أعشار من الوحدات الفلكية حيث تكون درجات الحرارة مرتفعة في القرص. كما يفترض أنها نُقلت من المناطق الداخلية في القرص، إلى المسافات الكويكبية، حيث تكتلت النيازك الكوندريتية إما بفعل الاضطراب أو بفعل الرياح الوليدة بين القرص والنجم الأولي. وفي الآثار الإشعاعية التي عثر

عليها في محتبسات الألومنيوم الكلسي ما يبدو فيه تأكيد لتشكلها قرب الشمس.

يصعب في الوقت الراهن إضافة محتبسات الألومنيوم الكلسي للسلم الزمني الخاص بتطور الأقراص، وإن كنا نعتقد أنها تكونت في الأطوار البدائية من القرص، ربما في الطور الذي يشير إليه الفلكيون بالصنف ١، وهو ثاني أربعة أطوار تمثل تطور أنظمة النجوم الأولية-الأقراص. ويتميز هذا الطور بإضافة لافتة لكمّ من المادة المستمدةً من الغلاف – وهي من بقايا القلب الجزيْئي- إلى القرص. كما يتميّز بتطايرات واسعة النطاق، تولد على حافة قرص الكوكب الأولي.

تكونت الكريات الكوندريولية في وسط أكثر تأكسداً من العناصر المقاومة للحرارة، وتظهر بنيتها انصهارها بشكل كامل. وبالرغم من دلائل تفاعلها مع الغاز المحيط فإنها لا تبدي زيادة في نظائر المغنيسيوم الثقيلة، مما يوحي بتشكلها في منطقة تتسم فيها الأجسام الصلبة بكثافة عالية. ويقَدَّر أن انتقال الكريات الكوندريولية قد تمّ لحظة انصهارها عند درجات حرارة تراوحت بين ١٠٠٠ و١٧٠٠ درجة مئوية.

لقد أظهرت تجارب رامية إلى إعادة تكوين بنية الكريات الكوندريولية أن هذه الأخيرة عرضت بشكل شبه آني لدرجات حرارة مرتفعة. ومن ثم بردت بسرعة كبيرة -بسرعات تبريد ربما تكون بلغت ١٠٠ درجة مئوية بالساعة- وهو ما يعرف بالتسخين الخاطف. وتجدر الإشارة إلى أنه يتم تقدير معدلات سرعة التبريد بافتراض عدم تفاعل الكريات الكوندريولية مع الغاز المحيط. وقد أصبحت هذه الفرضية في الوقت الراهن موضع شكوك من قبل بعض الباحثين الذين يؤيدون سيناريو تكوّن الكريات الكوندريولية في نظام مفتوح، أي بالتفاعل مع غاز قرص الكوكب الأولي.

هناك عدة نماذج تسعى إلى شرح خصائص الكريات الكوندريولية، وبخاصة التسخين الخاطف، إذ يذهب بعض المؤلفين إلى الاعتقاد بأن تكوّن الكريات الكوندريولية إثر تصادمات قد طرأت بين الكويكبات

والأجنة الكوكبية والأجسام الكوكبية، بيد أن في هذا النموذج وجه قصور كبير: فمن شأن الاصطدام أن يكسر الصخور، بدلاً من صهرها. وقد ذهب البعض الآخر إلى القول بأن انصهار الكريات الكوندريولية قرب نجم الشمس الأولي قد تم بفعل أشعة سينية صادرة بغزارة أثناء الأطوار البدائية.

إن النموذج المسلَّم به حالياً هو نموذج موجة الصدمة: أي أن تكون موجات صدمة ذات سرعة بلغت مقدار ٢٥كم/ث عبرت القرص، محدثة انصهار حبيبات غبار صغيرة، وهي تُعَدّ سلائف الكريات الكوندريولية. ويكرر هذا النموذج مشهد درجات حرارة الكريات الكوندريولية. ولا يزال مصدر موجات الصدمة محلّ نقاش، فقد تكون واردة من صدمات الواجهة الناجمة عن تحرك كويكبات صغيرة بسرعة عالية داخل قرص الغاز، أو صدمات ناجمة عن نشوء أذرع حلزونية (كتلك التي رصدت في المجرات) في القرص.

## تطور التكوين النظائري للأكسجين

تبدو المادة الناشئة خارج الأرض منسجمة بشكل لافت من وجهة النظر النظائرية. إلا أن الأكسجين يخالف هذه القاعدة العامة. فقد بيّن روبرت كلايتون Robert Clayton المنتسب لجامعة شيكاغو عام ١٩٧٣ احتواء محتبسات الألومنيوم الكلسي على 16O بما يعادل عدة أجزاء من المائة، مقارنة بالكريات الكوندريولية.

ثمة اعتقاد الآن بأن أوجه التباين ناجمة عن ظواهر الاختبار الذاتي في جزيء أكسيد الكربون CO إما في السحابة الجزيئية السالفة لمنظومتنا الشمسية أو في المناطق الخارجية من قرص الكوكب الأولي. ووفق هذا النموذج، تطور التركيب النظائري للأكسجين في المنظومة الشمسية من تركيب يتسم بوفرة من$O^{16}$ (تركيب محتبسات الألومنيوم الكلسي) إلى تركيب يفتقر إلى $O^{16}$ (تركيب الكريات الكوندريولية)، وذلك نتيجة

التفكك الضوئي الانتقائي لمختلف المتماكبات النظائرية isotopomers 12C16O و 12C17O و 12C18O عند أطوال مختلفة من موجات فوق البنفسجية. ونظراً لكون 12C16O أوفر بكثير من الإيزوتوبولغات isotopologues الأخرى، فسرعان ما تتشبع الموجات فوق البنفسجية. لذا لا يطلق إلا قدر محدود من 16O قياساً بتركيب الجزيء عند البداية وبنظيري الأكسيجين الآخرين. ومن ثم يزداد الغاز من ذرات 17O و 18O، التي تتفاعل بدورها مع ذرات الهيدروجين H2 لتكوين الماء. تُحمل جزيئات الماء بعد ذلك إلى مناطق تكوين الكريات الكوندريولية، التي يتغير فيها التركيب النظائري للأكسجين.

## العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير

اكتشف رينولدز Reynolds عام ١٩٦٢ فائضاً من ١٢٩X قياساً بتركيب النيازك الكوندريتية في النيزك الكوندريتي العادي ريتشاردسون Richardton (١٩١٨، الولايات المتحدة)، مبيناً أنه عائد إلى اضمحلال النشاط الإشعاعي الخاص بـ ١٢٩I ذي دور ١٦ مليون عام. وقد أظهر هذا القياس للمرة الأولى وجود نشاط إشعاعي قصير الدور في قرص الكوكب الأولي. ومنذ ذلك الحين، تم اكتشاف العديد من العناصر المشعة الخامدة الأخرى (الجدول ٣). كما يدور الحديث الآن حول العناصر المشعة الخامدة نظراً لكون دور هذه العناصر المشعة أقل بكثير من عمر المنظومة الشمسية (انظر العنوان الفرعي الثاني في هذا الفصل) فضلاً عن اختفائها من المادة الناشئة خارج الأرض على خلاف المواد ذات النشاط الإشعاعي ذي الدور الطويل (انظر العنوان الفرعي الثاني في هذا الفصل). وكما هو حال ١٢٩ I، تُعدّ وفرة النظائر الوليدة المفرطة مقارنة بتركيب النيازك الكوندريتية دليلاً على وجود العناصر المشعة الخامدة بشكل عابر. وقد باتت دراسة العناصر المشعة الخامدة موضع اهتمام كبير في الوقت الراهن: إذ إنها تتيح لنا، وللمرة الأولى، تحديد الظروف الكيميائية الفيزيائية في السحابة الجزيئية وقرص الكوكب الأولي، فضلاً عن أنها

تمكننا من تحديد تسلسل زمني (نسبي) لتاريخ المنظومة الشمسية، منذ

| العنصر المشع | النواة الوليدة | الدور (ملايين السنين) |
|---|---|---|
| $^{7}Be$ | $^{7}Li$ | 52 يوماً |
| $^{41}Ca$ | $^{41}K$ | 0,1 |
| $^{36}Cl$ | $^{36}S$ | 0,3 |
| $^{26}Al$ | $^{26}Mg$ | 0,74 |
| $^{10}Be$ | $^{10}B$ | 1,5 |
| $^{60}Fe$ | $^{60}Ni$ | 2,6 |
| $^{53}Mn$ | $^{53}Cr$ | 3,7 |
| $^{107}Pd$ | $^{107}Ag$ | 6,5 |
| $^{182}Hf$ | $^{182}W$ | 9 |
| $^{129}I$ | $^{129}Xe$ | 16 |
| $^{92}Nb$ | $^{92}Zr$ | 36 |
| $^{244}Pu$ | نواتج الانشطار | 81 |
| $^{146}Sm$ | $^{142}Nd$ | 103 |

مرحلة القرص إلى مرحلة الكوكب.

## جدول ١ - العناصر المشعة الخامدة التي كُشف عنها في الأحجار النيزكية

١. منشأ العناصر المشعة الخامدة.- كانت أجيال سالفة من النجوم قد ولّفت العناصر المشعة الخامدة ذات الدور الأطول، شأنها في ذلك شأن القسط الأعظم من النظائر التي تشكل المجموعة الشمسية، وهو ما يُعرف بإرث المجرة. ولا تزال التفاصيل موضع نقاش، إلا أنه يمكن الذهاب إلى تعميم ذلك على كل النظائر ذات دور أطول من بضعة ملاين السنين (حتى Fe 60). في المقابل، تتطلب العناصر المشعة الخامدة ذات دور أقصر تكويناً في اللحظة الأخيرة، فلولاه لاضمحلت قبل اندماجها في المنظومة الشمسية الوليدة.

هناك احتمالان لتفسير هذا الإنشاء في اللحظة الأخيرة. إما أن تكون العناصر المشعة الخامدة قد أولجت في المنظومة الشمسية الناشئة من قبل

نجم في الجوار، شارف على النهاية -كمستعر أعظم (نجم فوق المستعر supernova- وإما أنها تكونت في المنظومة الشمسية ذاتها إثر تشعيع غاز وغبار قرص الكوكب الأولي بفعل الإشعاع الكوني الشمسي.

بالنظر إلى العناصر المشعة الخامدة، لا بد أن يكون $^{10}Be$ قد نشأ بالتشعيع، فالنجوم تتلف ولا تنتج هذا النظير. ويُعتقد أنه لإنتاج كمية العنصر التي تمت ملاحظتها، كان من الضروري أن يتم تفاعل تدفقات من البروتونات تقدّر بـ ١٠١٠ سم-٢ ث-١ مع الأجسام الصلبة التي في الحافة الداخلية للقرص على مدى سنوات. والجدير بالذكر أنه من الصعوبة بمكان (وإن كان من الممكن في ظل ظروف خاصة) توليف العناصر المشعة الخامدة الأخرى ذات دور قصير بالتشعيع (26Al. Cl36. Ca41).

تعدّ سيناريوهات الحقن بفعل مستعر أعظم غير محتملة من منظور الفيزياء الفلكية. ففي مناطق ولادة النجوم، من النادر رؤية نجم ضئيل الكتلة محاطاً بقرص على مسافة قريبة من مستعر أعظم كافية لتلقي كمية من العناصر المشعة، يمكن مقارنتها بما يلاحظ وجوده في المنظومة الشمسية.

يعد وجود مستعر أعظم بالقرب من المنظومة الشمسية، أو عدمه، محل نقاش محتدم. ويمكن تفسير مجمل العناصر المشعة الخامدة إما بإرث المجرة (الذي يتضمن العديد من المستعرات العظمى البعيدة) أو بالإشعاع.

٢. التسلسل الزمني النسبي.- من العناصر المشعة الخامدة ما يعيننا على رسم تسلسل زمني نسبي للمجموعة الشمسية، وبخاصة العناصر التالية: $^{26}Al$ و$^{53}Mn$ و$^{182}Hf$. إنه يعد تسلسلاً زمنياً نسبياً لأننا نستطيع تأريخ جسم ما نسبة إلى آخر. ويمكن تحديد المدة الزمنية $\Delta\Delta$ - tA B التي تفصل تكوين الجسم A عن الجسم B بمقادير RA و RB على التوالي من الإشعاع الخامد بواسطة المعادلة التالية:

$$\Delta t_{A-B} = 1{,}44 \times T_{1/2} \times \ln \frac{R_A}{R_B}$$

حيث يمثل$T1/2$ دور الإشعاع الخامد المقصود. وتقوم هذه المعادلة على افتراض أن العنصر المشع الخامد محل البحث، موزع على نحو متجانس في قرص الكوكب الأولي- وهي الفرضية التي لم تثبت إلى الآن. هذا ويمكن ربط هذا التسلسل الزمني بسلم زمني مطلق، وذلك باتخاذ جسم عمره الرصاص-الرصاص معلوم (انظر أعلاه العنوان الفرعي الثاني ضمن هذا الفصل).

كانت محتبسات الألومنيوم الكلسي لدى تشكلها تحتوي خمسة أضعاف ما تحتويه الكريات الكوندريولية من 26Al. وإذا علمنا أن الدور يساوي حوالي ٠,٧٤ مليون عام، وافترضنا أن 26Al موزع بشكل متجانس في القرص المزوِّد فإن هذا يعني أن محتبسات الألومنيوم الكلسي تشكلت قبل ١,٧ مليون عام من الكريات الكوندريولية، وهي النتيجة التي تؤكد تلك التي حصلنا عليها مع أعمار الرصاص-الرصاص. أما الكميات الأصلية من 53Mn في محتبسات الألومنيوم الكلسي، ومن Hf182 في الكريات الكوندريولية ففير معلومة. لذا فلا يمكن استخدام هذه المواقيت للتأكد من فارق العمر بين محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية (ذات الحديد والمغنيسيوم).

وقد سمحت العناصر المشعة الخامدة برسم تسلسل زمني نسبي لتَشكل المنظومة الشمسية. وربما يكون النشاط المائي الحراري والتحول قد بدآ في فترة مبكرة جداً، منذ تكتل الأجسام الكوندريتية. ذلك أيضاً هو حال التمايز الذي ربما يكون راهناً في تكوين محتبسات الألومنيوم الكلسي (انظر أعلاه العنوان الفرعي الثاني ضمن هذا الفصل). وتقدر مدة تنامي كوكب، ككوكب الأرض، انطلاقاً من كميات Hf182 الموجودة في

الأحجار النيزكية والعينات الأرضية بمائة مليون عام، علماً بأن المرحلة الأطول هي مرحلة الأجنة.

## مادة الترابط الدقيقة

تناولنا حتى الآن بشكل رئيسي محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية، مهملين المكوّن الثالث للحجارة الكوندريتية، ألا وهو مادة الترابط، وهي تجمع غير متناسق من معادن يقلّ حجمها عن المايكرومتر. وقد تغيرت مادة الترابط تغيراً جذرياً في معظم النيازك الكوندريتية إثر التحول الحراري أو التغير المائي الحراري. فدقة مكوناتها المعدنية تجعلها في الواقع أكثر حساسية لهذه التغيرات من الكريات الكوندريولية أو محتبسات الألومنيوم الكلسي. وقد حُفظت مادة الترابط الأصلية في أحجار نيزكية بدائية نادرة لم تتعرض إلا لقدر محدود (إن كان هناك تعرض) من التحول الحراري أو التغير المائي الحراري (على غرار الحجر النيزكي الكربوني "أسفر" Acfer ٠٩٤ على سبيل المثال). تحتوي مادة الترابط على السليكات والكبريتات. ومن المعلوم أن هناك من السليكات ما هو غير متبلور لأنه لم يُعرض على الأرجح لدرجات حرارة مرتفعة. وتُدرس مادة الترابط بشكل رئيسي لهذين المكونين، أي الحبيبات قبل الشمسية والمادة العضوية التي تمثّل مواد نشأة منظومتنا الشمسية التي نفذت من الأحداث التي شكلت الكريات الكوندريولية ومحتبسات الألومنيوم الكلسي.

١. الحبيبات قبل الشمسية.- شهدت جامعة شيكاغو عام ١٩٨٧ اكتشافاً بالغ الأهمية حيث عُثر على حبيبات فردية من الألماس ومن كربيد السيليكون (SiC) ذات تركيب نظائري غير مألوف في الأحجار الكوندريتية البدائية. ويشير التركيب النظائري لهذه الحبيبات، والمختلف جذرياً عن تركيب المنظومة الشمسية، إلى تكوّن هذه المعادن بالقرب من نجوم وُجدت قبل منظومتنا الشمسية، ومن هنا كانت تسميتها بالحبيبات قبل الشمسية.

يدل بقاء هذه الحبيبات الصلبة مصونة في الأحجار النيزكية على أن

التجانس النظائري الذي تتسم به المادة في المجموعة الشمسية لم يتلف تماماً. وتقدر كميات الحبيبات قبل الشمسية في النيازك الكوندريتية البدائية ببضعة الأجزاء من المائة في المائة، مع العلم بأن عزلها في الأحجار النيزكية البدائية كان أمراً شاقاً. فغالباً ما تكون الحبيبات قبل الشمسية أصغر من مايكرومتر واحد. وبالرغم من توقع وجودها منذ السبعينيات فإننا لم نكن نملك في ذلك الوقت أي وسيلة لتمييزها (من حيث تركيبها النظائري الشاذ) عن المادة المعدلة في المنظومة الشمسية. ذلك أنه كان يمكن توقع اتسامها بمقاومة عالية ولاسيما أنها استطاعت مقاومة المجانسة النظائرية الخاصة بالمنظومة الشمسية. وفي عام ١٩٨٧، وبعد عقدين من الأبحاث غير المثمرة، تبيّن احتواء بقايا العصف الحمضي على الحبيبات قبل الشمسية.

لقد اكتُشف العديد من الحبيبات قبل الشمسية منذ ذلك الحين حيث سمحت تقنيات جديدة، على غرار "مطياف الكتلة الأيونية الثانوية" (Secondary ion mass spectrometry "SIMS") عالي الدقة المكانية بالكشف عن السليكات قبل الشمسية. ولم يكن من المستطاع الكشف عن الحبيبات قبل الشمسية بواسطة الوسائل المنطوية على العصف الكيميائي، نظراً لوهنها إزاء مثل هذه المعالجة. وتتوافر لدينا داخل المختبرات في الوقت الراهن سليكات وسيليسيد (الكربون والنيتروجين) وغرافيت وأكاسيد (السبينيل، الهيبونيت hibonite والكورندوم Corundum) تشكلت حول نجوم أخرى. ولا يزال عُمر هذه الحبيبات قبل الشمسية مجهولاً. وتقدر مدة بقائها في الوسط البَيْنَجمي بأنها تتراوح بين بضعة ملايين ومليار سنة.

تمكننا دراسة التركيب النظائري الخاص بهذه الحبيبات من فهم الاصطناع النووي النجمي، أي الآليات التي تقوم بتوليف مجمل النظائر في النجوم بفضل تفاعلات نووية. والجدير بالذكر أن عمليات الاصطناع النووي النجمية كانت محصورة في الإطار النظري، أو في سياق المشاهدات

الطيفية المنحرفة والبعيدة عن الدقة، حتى اكتشاف الحبيبات قبل الشمسية.

٢. المادة العضوية.- تحتوي بعض النيازك الكوندريتية الكربونية على قدر ضئيل من المادة العضوية، المكونة من مادة عضوية قابلة للذوبان (كالأحماض الأمينية على سبيل المثال، انظر العنوان الفرعي الثاني «الجزيئات ما قبل الحياتية في الأحجار النيزكية» ضمن الفصل الثامن) ومادة عضوية غير قابلة للذوبان. إن التركيب الكيميائي المتوسط للمادة العضوية غير القابلة للذوبان الخاص بأوركوي Orgueil- وهو حجر النيزك الكوندريتي الأغنى بالمادة العضوية هو: $C_{١٠٠}H_{٧٢}O_{١٨}N_{٣،٥}S_{٢}$، علماً بأن المادة الأرضية الأقرب لهذه المادة العضوية الناشئة خارج الأرض هي الكيروجين kerogen.

تتميز المادة العضوية غير القابلة للذوبان باحتوائها على العديد من أوجه الشذوذ النظائري، مقارنة بتركيب الأحجار النيزكية الكوندريتية، وهي كثيراً ما تكون غنية بالدوتريوم ($H_{٢}$) و$N_{١٥}$، وإن كان أصل هذه النظائر الثقيلة مجهولاً. من شأن بعض التفاعلات الكيميائية الجارية في وسط شديد البرودة، مثل السحب الجزيئية، أن تنتج هذا النوع من الشذوذات. وقد لوحظ بالفعل وجود كميات من الدوتريوم في بعض القلوب الجزيئية. بيد أن توليد هذه الشذوذات النظائرية في مرحلة القرص ضرب من المستحيل. ويعدّ فهم الاصطناع العضوي Organic synthesis من أبرز التحديات التي تواجه الكيمياء الكونية في القرن الحادي والعشرين (الفصل الثامن).

بريق المعدن المبدد

لم نتناول الفلز في هذا الفصل نظراً لندرة حبيبات الفلز البدائية، بل افتقادها، في أحجار النيازك الكوندريتية. فالفلز بالغ الحساسية للتحول الحراري. وقد تحوّل تركيب الفلز حتى في أحجار النيازك الكوندريتية البدائية، مثل النيزك الكوندريتي العادي سيماركونا $LL_{٣،٠}$

Semarkona (الهند، ١٩٤٠) في الجسم الأم عبر عمليات ثانوية مثل التحول metamorphism (انظر العنوان الفرعي الثاني "التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية" ضمن الفصل السابع). وتم العثور مؤخراً على ذرات فلز توجد في النيازك الكوندريتية CH. كان الاعتقاد السائد في بادئ الأمر أنها تشكلت في وقت مبكر جداً، في قرص الكوكب الأولي. إلا أن أصحاب هذه الفكرة أنفسهم اقترحوا بعد ذلك تكاثفها في سحابة بخارية نجمت عن اصطدام كوكبين جنينين (انظر نهاية العنوان الفرعي الأول "آثار وصدمات" ضمن الفصل السابع). في الوقت الراهن، تندر خصائص الفلز الكوندريتي التي يمكن بواسطتها تحديد الظروف الكيميائية الفيزيائية السائدة في القرص المزوِّد.

الفصل السابع

# التطور الجيولوجي للأجسام السماوية

## ١- آثار وصدمات

حوادث اصطدام الأجرام السماوية شائعة إلى حد كبير في المنظومة الشمسية ضمن سياق الأزمنة الجيولوجية. فبالإضافة إلى الآثار الجيومورفولوجية، كالفوهات التي سبق وصفها (انظر العنوان الفرعي الرابع "الصدمات والغلاف الحيوي" ضمن الفصل الثالث)، من شأن حوادث التصادم أن تغيّر الصخور على الصعيد المعدني، وهو ما يعرف بالتحول الناجم عن الصدمة. ومن المعادن الماثلة في الأحجار النيزكية ما يتعذر تشكله لولا الصدمات، وهو مثلاً حال كل من الستيشوفيت stishovite والماسكلينيت maskelynite، اللذين يُعدان (على التوالي) شكلاً من الكوارتز والبلاغيوكلاز plagioclase إثر تعرض لصدمة عنيفة ($(Ca, Na, K)(Al, Si)_3 8O$). كما يعدّ تشوه الشبكات البلورية وفسيفساء المعادن من الدلالات الأخرى على الصدمات. لقد بلغت بعض الصدمات من العنف ما أسفر عن صهر أجزاء من الصخرة. يتم تصنيف هذه الأحجار النيزكية في سلم زمني يتراوح من S١ (وهو حجر نيزكي قليل أو عديم التعرض لصدمة، بضغط صدمة يقل عن ٥ جيغا باسكال)[١] إلى S٦ (وهو حجر نيزكي تعرض لصدمة شديدة تعادل حوالي ٨٠ جيغا باسكال).

وقد طرح مؤخراً احتمال تكوّن بعض أحجار النيازك الكوندريتية في سحابة البخار الناجمة عن التصادم. وبوجه خاص، تستند هذه النظرية -التي لا تزال محل نقاش محتدم- إلى الخصائص غير المألوفة التي تتسم

١ضغط قدره ١٠١٣٢٥ باسكال يعادل ضغط ١ بار. ١ جيغا باسكال يساوي حوالي ١٠٠٠٠ بار.

بها الكريات الكوندريولية في أحجار النيازك الكوندريتية CB. وبغض النظر عن معضلة منشأ الأحجار الكوندريتية النيزكية CH و CB، فلا شك في وقوع هذه الاصطدامات، وفي كونها تركت آثاراً في المادة النيزكية. وستكون دراسة آثار اصطدام الأجسام السماوية أحد أبرز محاور علم الكيمياء الكونية خلال السنوات القادمة.

يجسد قمرنا دور الاصطدامات في المنظومة الشمسية أفضل تجسيد. فقد بات تشكّل القمر، إثر اصطدام عظيم بين كوكب الأرض الأولي وجنين كوكب بحجم المريخ، أمراً مسلماً به. ويُعتقد حدوث هذا التصادم بين ٦٠ و١٠٠ مليون عام بعد تكون المنظومة الشمسية، وذلك بعد الدراسات التي أجريت على العنصر المشعّ الخامد Hf182 (انظر نهاية العنوان الفرعي الرابع «العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير» ضمن الفصل السادس). وتبيّن الفوهات التي تتخلّل سطح القمر تعرضّه، على مدى تاريخه، لقصف هائل من الكويكبات والمذنبات. من ناحية أخرى، فقد مكّننا تأريخ الصخور القمرية التي عاد بها رواد الفضاء على متن أبولّو من إثبات وقوع القصف الشديد المتأخر (انظر العنوان الفرعي السابع «تصنيف النيازك» ضمن الفصل الأول). كما أظهر فريق فرنسي-أمريكي من خبراء علم الحركة، يشرف عليه أليساندرو موربيديلي Alessandro Morbidelli، المنتسب للمرصد الفلكي بنيس Nice (فرنسا)، ارتباط نشأة القصف الشديد باضطراب القرص البدائي لدى الكويكبات الصغيرة إثر هجرة كوكبي المشتري وزُحل.

التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية.

هناك مصدران للحرارة قد يفسران التحول الحراري: اضمحلال النشاط الإشعاعي أو الدفق الضوئي الكثيف النابع عن نجم الشمس الأولي. والنظرية الأولى هي الأرجح في الوقت الراهن، ذلك أن عنصريّ 26Al و 60Fe هما العنصران المشعان الخامدان اللذان يبثان القدر

الأعظم من الطاقة لوحدة الحجم في الصخرة المستقبِلة. وتتوقف درجة الحرارة الداخلية للجسم على كميات 26Al و 60Fe (التي يحتويها عند تعاظمه) وعلى حجمه. تتحول الصخور عند درجات الحرارة التي دون الـ ١٠٠٠° درجة مئوية، في حين تنصهر عند زيادة الحرارة عن هذا الحد. الأكابولكوات acapulcoite واللودرانيت lodranite صخور غنية بالأوليفين والبروكسين والفلز، وهي تتميّز بكونها ذات نسيج كوندريتي وتركيب لا كوندريتي، ويرجّح أنها تكوّنت إثر الانصهار الأولي لصخرة نيزك كوندريتي.

تذهب التقديرات إلى أن عملية التحول قد بدأت في وقت مبكر جداً، بعد بضعة ملايين السنين من تكوين المنظومة الشمسية، وأنها دامت حوالي ٢٠٠ مليون عام. يستحق التحول الحراري الدراسة في حد ذاته لأن ذلك يسمح بتحديد خصائص المراحل المبكرة من تطور الأجسام السماوية. كما يفيد توصيف آثار التحول الحراري في الصخور في تمييز أحجار النيازك البدائية التي تحمل لنا معلومات خاصة بالمراحل السابقة للمرحلة الكوكبية من المنظومة الشمسية (الفصل السادس). وأخيراً، تجدر الإشارة إلى كون التحول الحراري أساس تصنيف أحجار النيازك الكوندريتية في علم الصخور.

تأتي كل مجموعة كيميائية من النيازك الكوندريتية العادية في مجموعات صخرية فرعية. وتُظهر هذه المجموعات الفرعية الثانوية نسيج أحجار النيازك الكوندريتية العادية. والملاحظ أن التحول الحراري يسفر عن تغيير نسيج الصخور واستنفار العناصر مجدداً. فكلما تم تسخين صخرة كوندريتية، تعذر تمييز حدود الكريات الكوندريولية التي تنصهر في الصخرة. كما تستنفر ذرات الحديد مجدداً، ويتنامى حجم حبيبات الفلز، في حين يفقد زجاج الكريات الكوندريولية تزججه. هذا وتتراوح المجموعات الفرعية الصخرية لأحجار النيازك الكوندريتية العادية بين ٣ (تحول حراري محدود) و٧ (أقصى تحول حراري، حيث درجة الحرارة

تزيد على ١٠٠٠ درجة مئوية). والجدير بالذكر أن جميع الكريات الكوندريولية في أحجار النيازك الكوندريتية من نوع ٧، تكون ممحية. وبهذا ربما يظهر حجر نيزك كوندريتي عادي بأنه L6 (أي أنه حجر نيزك كوندريتي عادي ينتمي للمجموعة L، وقد خضع لتحوّل حراري بمقياس ٦) أو H3 أو LL4. وفي هذا السياق يعدّ سماركونا Semarkona LL3 حجراً نيزكياً كوندريتياً يعتقد أنه تعرض لأقل قدر من التحول الحراري.

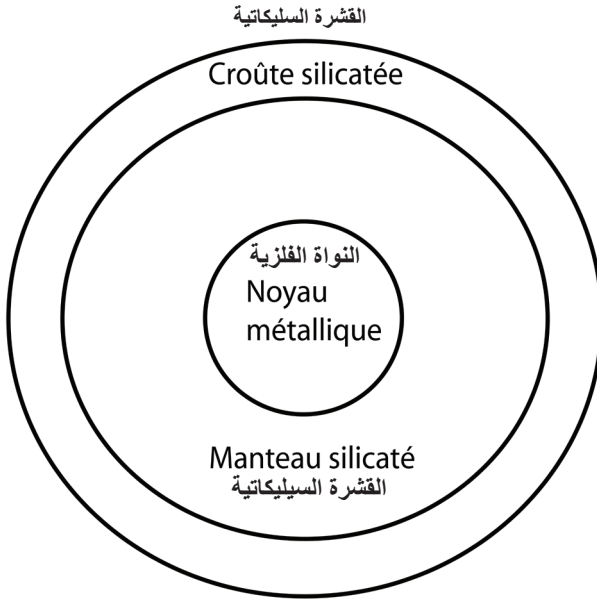
من شأن جريان السوائل (الماء والغاز الكربوني) إحداث تغيير جذري في التكوين المعدني للصخور النيزكية الكوندريتية، إذ تتحول المعادن الأولية التي تتضمنها الأحجار النيزكية الكوندريتية (الأوليفين والبروكسين والفلز والزجاج...) والمكونات المقاومة للحرارة إلى معادن ثانوية (مثل الغضار والماغنيتيت وكبريتات الحديد...). ونقول عن أحجار النيازك الكوندريتية الأكثر تغيراً بفعل التغيير المائي الحراري إنها من النوع ١، وهي تتضمن أحجار النيازك الكوندريتية CI1 و CM1، حيث تكاد معظم المعادن الأولية في هذه الصخور (الأوليفين والبروكسين والفلز...) تكون قد تحولت إلى معادن ثانوية (الغضار والماغنيتيت والكربونات...). ولا تتضمن أحجار النيازك الكوندريتية CI1 في الواقع أي كريات كوندريولية، لأنها أتلفت جميعها بفعل التغيّر المائي الحراري. أما في أحجار النيازك الكوندريتية التي من نوع ٢، فقد تحول حوالي نصف المعادن الأولية إلى معادن ثانوية.

ما زال النقاش دائراً حتى اليوم حول الخصائص الفيزيائية التي تميّز هذه الحركة المائية الحرارية، إذ يبدو أن ثمة تدفقات عارمة حدثت داخل الأجسام السماوية. وتغذى العناصر المشعة ذات الدور القصير بالطاقة اللازمة لإذابة جليد الماء وأكسيد الكربون. ويُعتقد أن النشاط المائي الحراري استمر حوالي ١٠ ملايين عام على الأجسام الأم الخاصة بالنيازك الكوندريتية CI1. ومن اللافت أن تكون النيازك الكوندريتية CI1، الأكثر بدائية من حيث تركيبها الكيميائي (إذ تتسم بنفس بالتركيب الكيميائي نفسه الخاص بالغلاف الضوئي للشمس، انظر العنوان الفرعي

الثاني "عمر النيازك الكوندريتية ومكوناتها" ضمن الفصل السادس)، هي أيضاً الصخور التي تعرضت للقدر الأعظم من التغير الصخري (حيث اضمحلت الكريات الكوندريولية تماماً).

التمايز

يتكوّن الجسم المتمايز (انظر العنوان الفرعي الخامس «من الأجسام البدائية إلى الأجسام المتمايزة» ضمن الفصل الأول) من نواة فلزية ووشاح وقشرة سليكاتية (الشكل ٩). الوشاح صلب، والقشرة -المكوّنة من صخور، وهي الأخف وزناً من الوشاح- تطفو إلى حدّ ما فوقه. وقد يُنتج انصهار مناطق محدودة من الوشاح الجزئي بعض الصهارة. فتتشكل الصخور في هذه الحُجر النارية. أثناء تشكلها تضم هذه الصخور إليها عناصر كيميائية من الحجرة النارية، مغيّرة بدورها تكوين السائل الأم، لذا لا يكون للصخور التي تتكون لاحقاً تركيب الصخور نفسها التي أُنشئت في وقت سابق، وهو ما يسمى بالتبلور المجزأ. تعرف الصهارة أو الصخور النارية المكوّنة في الأعماق بالصخور الدسيسة intrusive، أما التي تتكون تحت السطح أو عليه، فتُعرف بالصخور الطردية extrusive. وهناك الصخور الركامية، وهي الصخور الناجمة عن تكتل البلورات المكونة داخل هذه الحجر النارية، والمستقرة فيها.




**الشكل ٩- مخطط للجسم المتمايز**

نبيّن فيما يلي كيف يمكن الاستفادة من الصخور النيزكية اللاكوندريتية، والصخور النيزكية المختلطة والحديدية للكشف عن أسرار عمليات التمايز، وتطور الأجسام السماوية الأعظم حجماً. بيد أن من الأهمية بمكان قبل ذلك الإشارة إلى أهمية الصخور النيزكية الكوندريتية في دراسة الظواهر الفيزيائية، ولا سيما أننا نفترض اتسام الأجسام المتمايزة في الأصل بتركيب كوندريتي. ومن ثمّ فكل النماذج الجيوكيميائية الخاصة بالأرض يتدخل فيها بشكل ضمني أو صريح التركيب الكوندريتي.

١. تمايز الكويكبات.- تقدم الصخور النيزكية اللاكوندريتية المتمايزة عيّنات لأسطح الكويكبات: الهاورديت- اليوكريت- الديوجينيت، الأوبريت، الأنفريت، الصخور النيزكية المريخية، الصخور النيزكية

القمرية، فضلاً عن بعض الصخور الأخرى المتفرقة. وفي تنوع هذه الصخور النيزكية من حيث التركيب المعدني والكيميائي، دليل جلي على مدى ثراء أسطح الكويكبات من منظور جيولوجي.

أ) الأسطح الكويكبية-اللاكوندريتية.- تتمتع كل من: الهاورديت واليوكريت والديوجينيت بذات التركيب النظائري للأكسجين. ويُعتقد أن منشأها هو الكويكب فيستا Vesta (انظر العنوان الفرعي الأول "مصدر الأحجار النيزكية" ضمن الفصل الخامس)، ويشار إليها بالتسمية العامة: "إتش إي دي" HED. تُعد اليوكريت eucrites أكثر الصخور اللاكوندريتية شيوعاً (٣٤ حالة سقوط)، أهم مكوناتها البروكسين والبلاجيوكلاز plagioclase ، وغالباً ما تكون بيضاء أو رمادية اللون. فهي صخور نارية تكونت على سطح الكويكب فيستا. وقد تكون صخوراً طردية (أي صخوراً بركانية تكوّنت إثر تدفق الحمم البركانية) أو صخوراً دسيسة ) تشكلت تحت السطح)، علماً بأنها تكونت على أي حال إثر انصهار جزئي لوشاح فيستا. وتعد الديوجينيت الخضراء اللون والمكوّنة أساساً من البروكسين صخوراً تراكمية. أما الهاورديت فهي خليط ميكانيكي من شظايا اليوكريت والديوجينيت، وقد تكونت على سطح فيستا إثر سحق اليوكريت والديوجينيت. كما تنطوي الهاورديت أيضاً على قطع من الحجارة النيزكية الكوندريتية الكربونية التي انتهى بها المطاف على سطح فيستا نتيجة قصف الكويكبات والمذنبات على نحو متواصل.

هناك توافق بين تركيب سطح فيستا الكيميائي والمنشأ الكوندريتي، ولذا فمن المحتمل أن فيستا كان ذا طبيعية كوندريتية قبل تمايزه. وتبدو مجموعة الصخور النيزكية الكوندريتية CM2 المادة الأمثل التي تكوّن منها هذا الكويكب عند نشأته. ويدل اكتشاف الألومنيوم-٢٦ في اليوكريت على تمايز فيستا في مرحلة مبكرة من تاريخ المنظومة الشمسية. والملاحظ أن العديد من خصائص "إتش إي دي" تُظهر تحول هذه الصخور على نحو بالغ. وهو تحول ناجم عن الصدمة (فسطح فيستا الذي رُصد بعين

المرقاب الفضائي هابل شديد التحفّر) وعن التحوّل الحراري.

لا بد من الإشارة إلى أن الأحجار النيزكية "إتش إي دي" لا يمكن أن تَعرض عينات شاملة لكل سطح فيستا، إذ يتبين من دراسة عمر تعرضها أن خمس حوادث تصادم كفيلة برسم صورة لكل الأحجار النيزكية "إتش إي دي" التي يقل عمر تعرضها عن خمسين مليون عام. ولا يمكن بطبيعة الأحوال لخمس عينات فقط أن تقدم صورة وافية بجسم يبلغ طول قطره حوالي ٥٠٠ كم. ومن ناحية أخرى، تفتقد مجموعات الأحجار النيزكية التي بحوزتنا إلى الصخور الأم الخاصة باليوكريت في حين كنا نتوقع أن تكون وافرة. ومن المقرر للبعثة الفضائية "دون" Dawn التابعة للناسا أن تزور عام ٢٠١١ الكويكب فيستا، حيث تتيح الأجهزة المُعَدَّة على متنها دراسةَ سطح الكويكب وتجلية العلاقة بين سطح فيستا والأحجار النيزكية "إتش إي دي".

يُعد التركيب النظائري لأكسجين الميزوسيديريت mesosiderites مماثلاً له في الأحجار النيزكية "إتش إي دي"، مما يوحي بأن منشأها هو الكويكب فيستا أيضاً، وهي الفرضية التي يدعمها التشابه الكبير بين الكسر السليكاتي في الميزوسيديريت وبين اليوكريت. ومن السيناريوهات الممكنة لتكوّن الميزوسيديريت اصطدام كويكب فلزي (شبيه بنواة كوكبية، انظر أدناه) بسطح فيستا.

أما الأوبريت فصخور شديدة البياض والاختزال، غنية بالإنستاتيت، يُعتقد أنها نتجت عن انصهار وتمايز جسم كان له تركيب الصخور النيزكية والكوندريتية ذات الإنستاتيت.

مجموعة الأنغريت تمثلها حادثة سقوط هي [أنغرا دوس ريس٢ Angra dos Reis (البرازيل، ١٨٦٩)، ومن ثم جدّد اكتشاف بعض الأحجار

---

٢ الاسم الأنغريت مشتق من «أنغرا» Angra وهو الوارد في اسم المكان المشار إليه في البرازيل (المترجم).

النيزكية الأنغريت في الصحراء الكبرى الاهتمام بهذه الصخور. فهي صخور بازالتية أبرز مكوناتها البروكسين الغني بالألومنيوم والتيتانيوم، فضلاً عن الأوليفين المحفوف بالكالسيوم والبلاجيوكلاز. وتتراوح أزمنة بلورتها بين ٤٥٥٧ مليون و ٤٥٦٤ مليون عام. ويعتقد أنها نشأت عن صهارة مؤكسدة بشكل أكبر من تلك التي ولّدت اليوكريت. كما ذهب بعض المؤلفين في هذا السياق إلى القول إن اليوكريت منبثقة من كوكب عطارد. إلا أنه يتعذر إثبات هذه الفرضية في ضوء ما بحوزتنا من معلومات متفرقة.

وأما اليوريليت فصخور بالغة الغرابة غير مؤكدة الأصل، وتتألف من الأوليفين والبروكسين اللذين تفصلهما تعرّقات من الجرافيت والألماس. وتدل وفرة العناصر الثانوية السليكاتية فيها (انظر العنوان الفرعي الثالث «بعض مفاهيم كيمياء الأرض» ضمن الفصل الأول) على كون هذه الصخور متبقية من عملية انصهار جزئي. كما يدل التركيب النظائري للأكسجين ومقدار الغازات النادرة على ارتباط هذه الصخور بالصخور الكوندريتية الكربونية ارتباطاً وثيقاً. ويبقى سر تطابق الخصائص المميزة للصخور المتطورة والصخور البدائية لغزاً لم يحل بعد. أما وجود الألماس فيبدو ناجماً عن تحول عظيم إثر صدمة، وهو التحول الذي خلخل التركيب النظائري في هذه الصخور التي نجهل عمرها على وجه الدقة.

ب) نواة الكويكبات- الصخور النيزكية الحديدية والمختلطة- ليس بمقدورنا استخراج عينات من داخل الأرض، التي لم يقترب منها سوى أبطال جول فيرن Jules Verne في روايته "رحلة لمركز الأرض" (Voyage au centre de la Terre). إلا أن بعض الصخور النيزكية- كالحديدية والمختلطة- تتيح لنا النفاذ للنواة، وللحد الفاصل بين نواة ووشاح الكويكبات. ويمكن من خلال هذه العينات تصور العمليات الفيزيائية التي جرت أثناء تكوين وتبريد وتبلور النوى الكوكبية. بيد أن الشبه محدود، كما نلاحظ، نظراً لاختلاف الضغط في مركز الأرض (حوالي ٣٥٠ جيغا باسكال) ومركز الكويكبات (٠،١ جيغاباسكال).

تتكون الأحجار النيزكية الحديدية بشكل رئيسي من خليط معدني يشمل الحديد والنيكل، كما تتضمن الكروميت FeCr2O4 ( chromite )، والفوسفات وكبريتيدات الحديد فضلاً عن بعض عناصر السليكات المحتبسة. لقد تعرضت جميع الصخور النيزكية الحديدية للانصهار في لحظة ما من تاريخها، فهي منبثقة من النوى الكويكبية، وإن كان يُحتمل تكوّن عدد صغير منها عند التصادمات (الحديدية غير النارية). ويوافق سلوك العناصر الثانوية في الصخور النيزكية الحديدية تبلوراً مجزَّأ، أي نشأة من صخر ناري. وتدل معدلات تبريد المعادن والسبائك شديدة البطء على أن التبريد حدث في الأعماق.

تصنف الأحجار النيزكية الحديدية على أساس تركيبها الكيميائي (محتواها من الجرمانيوم والإريديوم والنيكل) ونسيجها. والجدير بالذكر أن عند التبريد بعد الانصهار، ينفصل خليط الحديد والنيكل إلى سبيكتين تختلفان بمضمونهما من النيكل: التاينيت taenite (حوالي ٢٠٪ نيكل) والكاماسيت kamacite (حوالي ٥٪ نيكل). وتصنف الأحجار النيزكية الحديدية من حيث نسيجها وفق الوفرة النسبية لهاتين السبيكتين. ونميز عشر مجموعات من الأحجار النيزكية الحديدية، حيث يُشار لمجموعة ما برقم روماني يتبعه حرف أو حرفان (IAB، IIIAB).

يُعد تصنيف الأحجار النيزكية الحديدية تصنيفاً أصلياً: إذ توافق كل مجموعة نواة وحيدة. ويشكل التركيب الكيميائي الداخلي لكل مجموعة سلسلة منسجمة مع التبلور المجزأ، وتتمتع عناصر كل مجموعة ببنية وتركيب معدني مماثل أو متفاوت بشكل مستمر. وإذا أخذنا في الحسبان أنواع الحديد التي لا تنتمي إلى أي مجموعة، يمكن إحصاء عينات تناهز ٥٠ جسمًا أُمًّا مختلفًا.

يمكن ربط أوجه التباين بين مختلف مجموعات الأحجار النيزكية الحديدية بأوجه الاختلاف بين المواد السالفة أو الاختلاف في عملية التمايز: إنها مسألة قيد البحث في الوقت الراهن. في جميع الأحوال،

تعرضت الأجسام الأم التي انبثقت منها الصخور النيزكية الحديدية إلى درجات حرارة ناهزت ١٥٠٠ درجة مئوية. كما يبدو أن السائل الذي تكوّنت منه لا يمتزج بصفة جيدة.

يكشف التلميع والتعريض لبعض حامض النيتريك عن أشكال فيدمنستاتن Widmanstätten (الشكل ٥). توافق النطاقات ذات اللون الداكن التاينيت، في حين توافق تلك الأفتح لوناً الكاماسيت. ويتنامى الكاماسيت عند التبريد على حساب التاينيت: فكلما استغرق التبريد وقتاً أطول، ازدادت نطاقات الكاماسيت سُمْكاً. وبدراسة أشكال فيدمنستاتن دراسة مفصلة، يمكن تقدير معدل التبريد وحجم الأجسام الأم الخاصة بالأحجار النيزكية الحديدية. والجدير بالذكر أن التبريد الشديد البطء (١٠ إلى ١٠٠ درجة مئوية لكل ميلون عام)، وأن الحجم الأدنى لجسم أو لحجر نيزكي حديدي هو حوالي ٢٠ كم.

لقد تم تأريخ الصخور النيزكية الحديدية مؤخراً بواسطة العنصر المشع الخامد 182Hf. وكانت التقديرات قريبة لأعمار محتبسات الألومنيوم الكلسي، مما يدل على أن الأجسام الأم للصخور النيزكية الحديدية تكوّنت في مرحلة مبكرة جداً من تاريخ المنظومة الشمسية. فإن افترضنا أن الأجسام السالفة للكويكبات المتمايزة هي كويكبات كوندريتية، فهذا يعني وجود أجيال من النيازك الكوندريتية السالفة لتلك التي نعرفها، الأمر الذي يعني أيضاً حدوث التمايز في مرحلة مبكرة جداً من تاريخ المنظومة الشمسية، أي منذ مرحلة القرص. إلا أن الاستنتاج الأخير موضع نقاش خبراء الكيمياء الكونية منذ عدة أعوام.

وقد طرح خبراء علم الحركة مؤخراً فرضية مفادها أن الصخور النيزكية الحديدية منحدرة من الكويكبات التي تكوّنت على مسافة أقل بعداً عن الشمس من تلك المنبثقة عن حزام الكويكبات الرئيسي. هذه الولادة التي تحدث على مسافة أقرب من الشمس تعني مدة تنامي أقصر، ومن ثم بالتالي محتوى أعلى من العناصر المشعة الخامدة، وتمايزاً أسرع،

وهو الأمر الذي قد يفسر كون الصخور النيزكية الحديدية من عمر محتبسات الألومنيوم الكلسي. وحسب هذه الفرضية، انتقلت بعد ذلك الأجسام الأم للنيازك الحديدية إلى حزام الكويكبات بواسطة عمليات ديناميكية، قبل أن تُدمر إثر اصطدامات، لتنكشف بذلك نَوَاها الفلزية.

تقدر أعمار تعرض الصخور النيزكية الحديدية والمختلطة (انظر أدناه) بعدة مئات ملايين السنين، مما يفوق بكثير أعمار تعرض صخور النيازك الحجرية. ويعود هذا الفارق إلى ما تتسم به النيازك الحديدية من صلادة بالغة: فالنيازك الحجرية أكثر عرضة للتدمير لدى الانتقال من الجسم الأم إلى الأرض من النيازك الحديدية. هذا الاختلاف في الصلادة يفسر أيضاً غياب الصخور الموافقة لأوشحة الكويكبات التي تمثل النيازكُ الحديدية نواتَها. ويعدّ كويكب فيستا وغيره من الكويكبات البازالتية التي قدمت النيازك اللاكوندريتية لنا عينات منها –أو تلك التي شوهدت بتقنيات علم الطيف– كويكبات ناجية من هذا الدمار.

يُعتقَد أن النيازك البلازيت pallasites، وهي خليط متساوي النسب من الأوليفين والحديد الفلزي، انبثقت من الحد الفاصل بين نواة ووشاح الكويكبات المتمايزة (ثمة أربع مجموعات فرعية منها ما يعود أصلها على الأرجح لأجسام مختلفة). إنها بلا شك أجمل الصخور النيزكية، نظراً لهذا العناق الفريد الذي تبديه بين الحديد الفلزي والأوليفين الذي يعد حجراً كريماً. ويوحي تركيب الأوليفين بأنه نشأ عن الوشاح السفلي، ويرى الباحثون أن الأوليفين من بقايا محيط الصهارة أو الصخور الركامية. وتجدر الملاحظة أن تركيب الفلز قريب من تركيب الصخور النيزكية الحديدية IIIAB، مما يدل على علاقة ممكنة بين هاتين الفئتين من الصخور النيزكية.

تحتوي الصخور النيزكية الميزوسيديريت على سليكات سطحية (الغابرو gabbro، البرُوكسينيت والبازالت). إلا أن معدلات تبريد الفلز الشديدة البطء كما هو الحال بالنسبة للصخور النيزكية الحديدية، مما

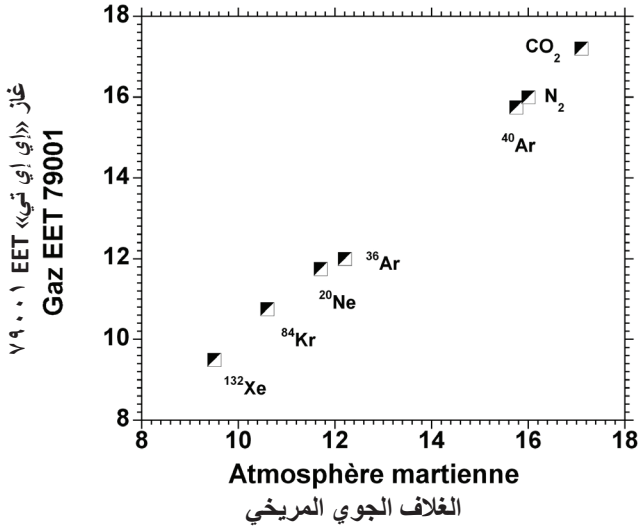
يوحي بأن هذا الفلز برّد في الأعماق. وقد طُرحت فرضيتان بشأن أصل الميزوسيديريت: اصطدام نواة منصهرة بقشرة أو تصدع، ومن ثمّ إعادة تجمع كويكب متمايز.

٢. المريخ والقمر

أ) الصخور النيزكية «إس إن سي» SNC.- من المرجح أن يكون كوكب المريخ هو منشأ ٨٠ صخرة نيزكية من تلك المكتشفة (دون الأخذ بالحسبان الأحجار النيزكية غير المتزاوجة، انظر العنوان الفرعي الأول «عبور الغلاف الجوي» ضمن الفصل الثالث). إنها الصخور النيزكية «إس إن سي» (شيرغوتيت-شاسينييت-نخليت Shergottite-Chassignite-Nakhlite) والحجر النيزكي الفريد الأورثوبروكسينيت orthopyro - enite ALH 84001). والجدير بالذكر أن أربعة أحجار نيزكية مريخية كانت نتيجة حالات سقوط هي: (شاسينيي Chassigny (فرنسا، ١٨١٥)، شيرغوتي Shergotty (الهند، ١٨٦٥)، نخلة (مصر، ١٩١١) وزاغامي Zagami (نيجيريا، ١٩٦٢). ورغم تباين نسيجها فإن هذه الأحجار النيزكية تتمتع بتركيب نظائري أكسجيني متماثل، مما يميل نحو إثبات انتمائها الجسم الأم نفسه (انظر العنوان الفرعي السابع «تصنيف النيازك» ضمن الفصل الأول). كما تدل حداثة سن تبلور النخليت والشاسينييت (١,٣ مليار عام) على أنها تشكلت من جسم عظيم الحجم، أي كوكب بدلاً من كويكب. فكما سبق أن لاحظنا (انظر العنوان الفرعي الخامس «من الأجسام البدائية إلى الأجسام المتمايزة» ضمن الفصل الأول)، كلما عظم حجم الجسم، احتفظ بدرجات حرارة مرتفعة مدة أطول، وكلما طال نشاطه البركاني. من هنا تدل أعمار تبلور حديثة على نشأة هذه الأحجار النيزكية من أحد الكواكب.

بيد أن الدليل الدامغ على الأصل المريخي لهذه الأحجار النيزكية كان بتحديد مقدار الغازات المأسورة في زجاج الاصطدام الموجود في الشيرغوتيت. فقد أثبت دونالد بوغارد Donald Bogard وزملاؤه في

الإدارة القومية للملاحة الفضائية والفضاء (ناسا) عام ١٩٨٢ أن مقادير هذا الغاز النظائري والبدائي في الشيرغوتيت "إي إي تي" EET ٧٩٠٠١ كانت مماثلة لها في الغلاف الجوي المريخي الذي قام مسبار الفضاء الأمريكي فايكينغ Viking بقياسها عام ١٩٧٦ (الشكل ١٠).




**الشكل ١٠- التركيب الكيميائي للغلاف الجوي المريخي، والغاز الأسير في الشيرغوتيت «إي إي تي» ٧٩٠٠١، الوحدات: لوغاريتم عدد الجسيمات لكل سم٣**

لقد بات سطح المريخ أكثر سطح كوكب معروفاً لدينا باستثناء النظام الأرضي القمري، وذلك بفضل الأحجار النيزكية شيرغوتيت-شاسينييت-نخليت. فكل الصخور النيزكية المريخية صخور نارية شاهدة على تاريخ سطح ووشاح ونواة المريخ. والجدير بالذكر أن الشيرغوتيت الغني بالبروكسين والبلاجيوكلاز أكثر الأحجار النيزكية المريخية وفرة، ونميّز

منها الشيرغوتيت البازالتي والشيرغوتيت الهيرزوليت. فالأولى بحجم الحبيبات، وأصغر من الثانية. ويفترض أنها تكوّنت على سطح المريخ أثناء التدفقات البركانية، كما يُفْترض تكوّن الشيرغوتيت الهيرزوليتيك lherzolitique Shergottite في مناطق أكثر عمقاً. أما أحجار النخليت النيزكية فهي بِروكسينيت منطوية على معادن ثانوية، كالغضار أو الكربونات، مما يدل على تدفق الماء السائل على كوكب المريخ خلال المليار الأخير من السنوات. نلاحظ أن الحجر النيزكي ALH ٨٤٠٠١ يعدّ من الأورثوبروكسينيتات. أما الشاسينييت chassignites فصخور دونيت غنية بالأوليفين.

تتيح لنا دراسة التركيب الكيميائي والنظائري لهذه الصخور بشكل مفصل توصيف سطح المريخ، على نحو مكمل لما تبيّنه الأرصاد الفضائية لهذا الكوكب. ويفترض أن تكون النخليت والشاسينييت هي الأحدث عهداً، مقارنة بالشيرغوتيت الأقدم، علماً بأن أعمارها التي تم الحصول عليها بواسطة نظام الرصاص–الرصاص (انظر العنوان الفرعي الثاني «عمر النيازك الكوندريتية ومكوناتها» ضمن الفصل السادس) بلغت مقدار ٤,٢ مليار عام. كما يعتقد أن تكون النخليت والشاسينييت آتية من مناطق بركانية حديثة، مثل منطقة «سيرتيس ميجر» Syrtis Major.

يتسم التركيب النظائري لوشاح المريخ، الذي استطعنا استنتاجه بواسطة القياسات التي أجريت على الأحجار النيزكية المريخية، بتنوع لافت، مما يوحي بأن المريخ لم يشهد تكتونية صفائح قادرة على مجانسة الوشاح. الأمر الذي يدل على أن تفاعل القشرة والوشاح المريخي إنما هو تفاعل محدود.

بالرغم من انبثاق الحجارة النيزكية المريخية من سطح كوكب المريخ فإنه يمكن الاستفادة من تركيبها الكيميائي والنظائري لتحديد طبيعة وزمن تخلق النواة الفلزية. وهذا راجع إلى أننا نقدر بذلك أن نواة المريخ الفلزية تمثل نحو ٢٠٪ من كتلته، وأنها تحمل قدراً كبيراً من الكبريت.

وتشير قياسات التأريخ الإشعاعي إلى أن نواة المريخ تكوّنت بعد حوالي عشرة ملايين عام على الأقل من ولادة المنظومة الشمسية.

كما يمكن استخدام الأحجار النيزكية المريخية لتحديد خواص الغلاف الجوي للكوكب الأحمر. فالتركيب النظائري الخاص بالهيدروجين والنيتروجين غني بالنظائر الثقيلة، مقارنة بالكرة الأرضية، مما يدل على أن الغلاف الجوي المريخي كان أكبر حجماً في السابق. ووفق بعض النماذج، يُعتقد أن ٩٠٪ من الغلاف الجوي المريخي اضمحل خلال الـ٦٠٠ مليون عام الأولى من حياة الكوكب.

وفي حال المريخ، كما هو حال فيستا (انظر أعلاه)، لا تزال العينات التي تمثلها الأحجار النيزكية المريخية غير كافية، إذ توحي أعمار تعرّض الأحجار النيزكية المريخية بأنها تكوّنت إثر عدد محدود من التصادمات. وتحدد الـ ٢٤ حجراً نيزكياً التي تتوفر بخصوصها بعض القياسات، ٧ فئات مختلفة لأعمار تعرّض بقيم قصوى تقدر بـ ٢٠، ١٥، ١١، ٤، ٢،٦، ١,٢ و٠,٧ مليون عام. وهذا يوافق بشكل شبه تام المجموعات الرئيسية والفرعية البتروغرافية المختلفة.

ب) الأحجار النيزكية القمرية.- عاد رواد فضاء الناسا بين ١٩٦٩ (أبولّو ١١) و١٩٧٢ (أبولّو ١٧) بـ ٣٨٢ كلغ من الصخور والأتربة القمرية من ستة مواقع مختلفة، تمثل نحو ٢٢٠٠٠ عينة مختلفة. كما تتلقى الناسا سنوياً حوالي ٤٠٠ طلب عينات قمرية. وقد حملت البعثات الفضائية السوفييتية الآلية لونا Luna ١٦ (١٩٧٠)، ولونا ٢٠ (١٩٧٢) ولونا ٢٤ (١٩٧٦) إلى الأرض ٣٢٦ غ من تربة القمر.

والجدير بالذكر أنه منذ اكتشاف أول حجر نيزكي قمري ALH ٨١٠٠٥ - الذي عثر عليه عند سفح جبال ألن هيلز Allan Hills في القارة القطبية الجنوبية في ١٨ يناير ١٩٨٢- تم التعرف على ١٢٤ حجراً نيزكياً قمرياً (وهذا دون حسبان الأحجار النيزكية غير المتزاوجة، انظر التفاصيل في العنوان الفرعي الأول «عبور الغلاف الجوي» ضمن الفصل الثالث)،

علماً بأنه عثر على معظمها في ظفار (سلطنة عُمان) والقارة القطبية الجنوبية. ولم يرصد سقوط أي منها. نشير هنا إلى كون الأحجار النيزكية القمرية هي الوحيدة المثبتة الأصل بالرغم من الأسباب المعروضة أعلاه، علماً بأن هناك باحثين يشككون في أصل الأحجار النيزكية شيرغوتيت-شاسينييت-نخليت المريخي. فالدراسة الدقيقة للصخور القمرية التي عادت بها رحلات أبولّو ولونا جعلنا نلم بمعارف حول القمر أكثر من أي كائن آخر في المنظومة الشمسية بعد الأرض. فالتركيب المعدني والكيميائي والنظائري للأحجار النيزكية القمرية مطابق لعينات أبولّو ولونا، وهو ما يثبت بما لا يدع مجالاً للشك أن أصلها قمري.

ومن الأحجار النيزكية القمرية صخور بركانية تكوّنت في البحار، وصخور غنية بالبلاجيوكلاز، والأنورثوسايت anorthosites الواردة في أراضٍ قمرية عالية (الواقعة في وجه القمر المحجوب).

للأحجار النيزكية القمرية أعمار تعرّض تتراوح بين بضع عشرات ملايين السنين وعشرة ملايين عام. والملاحظ أن معظم أعمار تعرض العينات أقل من مليون عام، علماً بأن البحث الحثيث في أعمار التعرّض أسفر عن إثبات وقوع ثلاثة تصادمات في أراضي القمر المرتفعة وخمسة في البحار. وتمثل عينات الأراضي القمرية المرتفعة أهم ما في الأحجار النيزكية القمرية، ولا سيما أن رحلات أبولّو ولونا لم تجلب عينات مباشرة من هذه المناطق.

الفصل الثامن

# الأحجار النيزكية ونشأة الحياة

شوهد أول سقوط لنيزك كوندريتي كربوني في مارس عام ١٨٠٦ في سلسلة جبال سيفين les Cévennes قرب أليس Alès (فرنسا)، التي كانت تكتب Alais. وبعد عدة أسابيع من سقوطه، لاحظ خبير الكيمياء تينارد Thénard أن الحجر النيزكي غني بمادة عضوية شبيهة بالخث، وهو المادة الناجمة عن تحلل النباتات. وقد أكد عالم الكيمياء الشهير السويدي برزيليوس Berzelius (١٧٧٩-١٨٤٨) هذه الملاحظة التي لم تحظ بأي اهتمام في حينها. وبعد مرور نحو شهر على سقوط الحجر النيزكي الكوندريتي أوركوي Orgueil في مايو ١٨٦٤، نشر الكيميائي مارسلين بيرتولو (١٨٢٧-١٩٠٧) Marcelin Berthelot تحليل الحجر الجديد، مؤكداً على "التشابه بين المادة الفحمية الخاصة بالأحجار النيزكية والمواد الفحمية ذات الأصل العضوي، التي تجتمع على سطح الكرة الأرضية". لقد أرست هذه التحاليل الرائدة مجال علم الأحياء الخارجي[1]، وإن لم يوجد المصطلح بعد حينذاك. يهتم علم الأحياء الخارجي، وهو مجال علمي تلتقي فيه عدة تخصصات، بالنواحي المختلفة الخاصة بظروف نشأة الحياة على الأرض وكواكب أخرى.

### ١. الحياة الناشئة خارج الأرض في الأحجار النيزكية

نشر بارتولوميو نايجي Bartolemew Nagy (من جامعة شيكاغو) وزملاؤه عام ١٩٦٢ عدداً من النتائج المذهلة في مجلة نيتشر Nature؛ إذ أعلنوا عن اعتقادهم بأنهم قد رصدوا بعدسة المجهر "عناصر منظمة" في الحجر النيزكي أوركوي Orgueil. وعلى الرغم من أن معدّي البحث

١ يفضل الأنجلو سكسون استخدام مصطلح Astrobiology، أي علم أحياء الفضاء أو بيولوجيا الفضاء.

لم يوردوا ذكر "الحياة الناشئة خارج الأرض"، فإن الصحافيين جعلوا من هذا الاكتشاف خبراً بلغ دويّه أرجاء المعمورة. ومن ذلك ما ورد عام ١٩٦٣ في مجلة بلانيت Planète الشهيرة: "إن الحياة الناشئة خارج الأرض حقيقة مثبتة"، و"نعم، توجد الحياة في مكان آخر!". وبحلول نهاية الستينيات، ثبت أن العناصر المنظمة التي اكتشفها نايجي لم تكن سوى حبوب غبار الطلع الأرضية التي شابت الحجر النيزكي عند سقوطه.

امتنع العلماء مدة أربعين عاماً عن الإعلان عن اكتشاف أي أثر للحياة في الأحجار النيزكية، متأثرين بحادثة حجر نايجي الذي تضررت سمعته العلمية مدة طويلة وعلى غير حق إثر هذا الأمر المؤلم. بيد أن الأمر عاد إلى الظهور قرب نهاية القرن العشرين، هذه المرة بأحجار نيزكية ناشئة من المريخ. فهذه الأحجار ناشئة من كوكب لطالما ربطته الثقافة الشعبية بالحياة الناشئة خارج الأرض، وإن لم تضمر ما في النيازك الكربونية من مادة عضوية وماء. ثم أعلن عام ١٨٧٧ عالم الفلك الإيطالي سكياباريلي Schiaparelli (١٨٣٥-١٩١٠) عن رصده على وجه المريخ تضاريس خطية سماها "قنوات". وفي عام ١٩٣٨، أحدث أورسن ويليس Orson Welles (١٩١٥-١٩٨٥) الذُعر في الولايات المتحدة قارئاً على الإذاعة رواية هيربرت جورج ويليس Herbert George Wells (١٨٦٦-١٩٤٦)، «حرب العوالم» The War of the Worlds، التي تسرد غزو الكائنات المريخية للكرة الأرضية.

وكان عام ١٩٩٦ إعلان ديفيد ماكيه David McKay وفريقه لدى الناسا عن عثورهم على أدلة متوافقة تشير إلى وجود حياة على المريخ، حيث أعلنوا عن اكتشافهم أشكالاً أحفوريه ذات صلة بالكربونات والماغنينيت والمادة العضوية (الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات). والجدير بالذكر أن الكربونات تتخلق عادة على الأرض بوجود الماء، وأن البكتيريا يمكن أن تقوم بتحليل الهيدروكربونات، وأن الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات هي نتاج انحطاط المادة الحية. ووفقاً لماكيه، تشكل هذه

الأمور مجتمعة دليلاً على اكتشاف حياة أحفورية على كوكب المريخ.

إلا أن جميع هذه الملاحظات لم تثبت طويلاً أمام المجتمع العلمي الناقد، الذي بيّن أنه يمكن تفسير العلاقة بين المعادن والمادة العضوية بعمليات لاحياتية. أما المادة الأحفورية الدقيقة، فقد تبيّن لاحقاً أنها نتاج صنعي تحليلي للمجهر الإلكتروني الذي استخدمه ماكيه وفريقه. والملاحظ أن الاهتمام الإعلامي الذي حظيت به الأحجار النيزكية أسفر عن ارتفاع أسعارها بوتيرة متزايدة. وأدى ذلك إلى خيبة أمل أمناء مجموعات الأحجار النيزكية الذين لم تعد لدى مؤسساتهم القدرة على شراء العينات بأسعار السوق.

ولو اكتُشفت بالفعل أشكال حياة ما ناشئة خارج الأرض في الأحجار النيزكية، لدعم ذلك نظرية التبزر الشامل Panspermia القائلة إن الحياة قادرة على التحرك بحرية في الكون وتهجين مختلف أجسام المنظومة الشمسية، بل وما وراءها. وحتى في حال أثبتت هذه النظرية، يبقى علينا فهم كيف نشأت الحياة، ومتى حدث ذلك.

## ٢. الجزيئات ما قبل الحياتية في الأحجار النيزكية

تعد الأحجار النيزكية الكوندريتية الكربونية، وبخاصة CI1 و CM2، هي الأغنى بالمادة العضوية القابلة وغير القابلة للذوبان.

ومن أبرز التحديات التي نواجهها لدى تحليل المكونات العضوية في الأحجار النيزكية، هو ما يصيبها من شوائب أرضية، نظراً لانتشار الجزيئات العضوية في الغلاف الحيوي. في عام ١٩٦٩، أمكن لدى سقوط ١٠٠ كلغ من حجر نيزكي كوندريتي كربوني من نوع CM2 في مرشيسون Murchison بأستراليا إجراء تحاليل حرة إلى حد بعيد ومحفوظة من أي مصدر تلوث. ومن جهة أخرى، ونظراً لعِظم كتلة هذه الصخرة النيزكية، أمكن تحليل الكسور الداخلية التي لم تمس أياً من تربة الأرض أو وسائل النقل. أخيراً، تجدر الإشارة إلى سقوط هذا النيزك في حين كانت مختبرات العالم بأسرها تتأهب لدراسة العينات القمرية، الأمر الذي أتاح

للمحللين استخدام أحدث المعدّات.

ثمة جزيئات معقدة وُجدت في مرشيسون تعد مكونات ذات أهمية للغلاف الحيوي، كما هو الحال على سبيل المثال بالنسبة للأحماض الأمينية (المكوّنة للبروتينات) أو السكر، وهو جزيء ذو أهمية بالغة في الحمض النووي الريبي منقوص الأكسجين (الدنا). ويثبت تنوع الأحماض الأمينية التي وُجدت في مرشيسون (٧٤ نوعاً) نشأتها خارج الأرض، ولاسيما أن ٢٠ حمضاً نووياً فقط تدخل في تكوين البروتينات. كما يبدو أن الأحماض النووية الموجودة في الأحجار النيزكية تتميز بفائض الشكل المُياسِر٢، الأمر الذي يوحي باحتمال تسبب طغيان الأشكال المياسرة على الجزيئات الحياتية في تعزيز اختلال التوازن القائم منذ ذلك الحين في السلائف غيرالحياتية.

تُنعت الأحماض الأمينية وغيرها من الجزيْئات ذات الدلالة الحياتية باللبنات الأساسية للحياة. فربما آذن وصولها إلى الأرض على متن النيازك ببدء التفاعلات الكيميائية التي أسفرت عن نشأة الحياة. بل إن ما يزيد وصولها أهمية هو ارتباط هذه الجزيْئات في الأحجار النيزكية والأحجار النيزكية المجهرية بمعادن، كالغضار أو الكبريتيدات التي قد تقوم بتحفيز التفاعلات الكيميائية الناجمة بدورها عن جزيئات أكثر تعقيداً. إلا أنه لا يوجد في الوقت الراهن أي دليل تجريبي أو نظري على هذا السيناريو.

### ٣. الكيمياء الكونية وسياق ظهور الحياة

لقد ظهرت، وتطورت، الحياة بشكلها الذي نعرفه على كوكب معيّن يدور حول نجم معيّن. إن إدراك سر نشأة الحياة يعني أيضاً فهم ذلك

---

٢ تأتي الجزئيات العضوية المعقدة على هيئة شكلين متناظرين لو وضعا أمام مرآة: شكل مُياسِر (L كناية عن levorotation) وشكل ميامن(D dextrorotation)، علماً بأن الأحماض الأمينية حياتية الأصل تأتي على شكل L.

السياق -الخاص والفريد لحد الآن- الذي سمح بظهور الحياة وتنوعها؛ وهذا بدءاً بتجمع السحابة الجزيئية- سلف منظومتنا الشمسية- ووصولاً إلى تشكل كوكب أرضي ذي غلاف جوي ومحيطات، محاط بعدد ضخم من الكواكب. ومن شأن دراسة الأحجار النيزكية، إلى جانب الفيزياء الفلكية، والجيولوجية وعلم حركة الأجسام السماوية أن تؤدي إلى الإلمام ببعض مكوّنات الإجابة على هذا السؤال.

أولاً، وكما رأينا في الفصل الرابع، تعيننا النيازك الكوندريتية على استيضاح العمليات ذات الصلة بتكوين الأنظمة الشمسية، راسمة بذلك إطاراً فلكياً لا غنى عنه عند دراسة نشأة الحياة على الأرض. ونظراً لاكتشافنا كواكب جديدة بشكل مستمر حول نجوم أخرى غير الشمس (أي كواكب خارج المنظومة الشمسية)، بات من الضرورة بمكان تحديد الظروف المحيطة بتخلق المنظومة الشمسية. فهل كانت ظروفاً عادية، أم أن الأمر تطلب توافر ظروف خاصة لولادة نجمنا وركْبه من الكواكب؟ من هذا المنطلق فإن تحديد منشأ العناصر المشعّة الخامدة مثل 26Al ضرورة ملحة (انظر العنوان الفرعي الخامس "العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير" ضمن الفصل السادس)، وهذا راجع لدور هذا العنصر المحتمل -وهو مصدر للطاقة- في تمكين حدوث عملية التمايز والتطور الجيولوجي للكواكب الأرضية (انظر العنوان الفرعي الثالث "التمايز" ضمن الفصل السابع). ومن ثم ندرك دوره الحيوي في ظهور الحياة على كوكب الأرض. ونحن لا نعلم حتى اللحظة الراهنة ما إذا كان إطلاق هذا النظير المشعّ في المنظومة الشمسية الوليدة قد تطلب حدثاً استثنائياً، أم أن علينا توقع وفرة 26Al في معظم المجموعات الشمسية (انظر العنوان الفرعي الخامس "العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير" ضمن الفصل السادس).

كما تتيح لنا الأحجار النيزكية الوقوف عند التطور الجيولوجي للأجسام السماوية الأعظم حجماً (الفصل السابع). فقد بات يتجلى

لنا شيئاً فشيئاً الدور العظيم الذي أدته في تاريخ الحياة تفاعلات المادة الحية والمعدنية، وبات من الضرورة رد تاريخ الحياة إلى سياق تاريخ تطور الأرض. وسيكون لمفهوم "الأرض الحيّة" Terre vivante أهمية بالغة في العقود القادمة.

ثمة من يعد وجود الماء السائل ضرورة لتطور الحياة. ويمكن استخدام المقفيات النظائرية، وتاريخ وطبيعة قصف الأجسام الناشئة خارج الأرض (الكويكبات والمذنبات) لتعيين لحظة ظهور المحيطات الأرضية، والظروف المحيطة بذلك. إلا أن هذه المسألة موضوع نقاش حاد منذ عقود، ويبدو، في اللحظة الراهنة، أن ماء المحيطات كان من المكوّنات الأصلية التي زوّدت بها الأرض، وذلك خلافاً للاعتقاد بظهور الماء لاحقاً وفي وقت متأخر، وهو الاعتقاد الذي لطالما ساد. ومن الآراء التي تتداول الآن أن ماء المحيطات ربما يكون منبعثاً من كويكبات الحزام الخارجي الذي ساهم في تكوين الأرض، إلى جانب الكويكبات الصغيرة المنتمية إلى المنطقة الأرضية، التي لم تتضمن أي ماء.

لقد لعبت التصادمات دوراً بالغ الأهمية في تاريخ الحياة على الأرض. وربما يكون أعظمها هولاً قد أسفر عن انقراضات واسعة النطاق (انظر العنوان الفرعي الرابع «الصدمات والغلاف الحيوي» ضمن الفصل الثالث). ومع ذلك، فلعل تصادمات الكويكبات والمذنبات ساهمت في ظهور الحياة على الأرض، إذ أتت بالجزيئات ما قبل الحياتية الضرورية (انظر العنوان الفرعي السابق). أخيراً، ثمة احتمال بأن تكون وطأة هذه التصادمات قد أتاحت تطور الحياة على نحو أسرع. ولربما يعود تصادف ظهور أولى آثار الحياة على الأرض مع نهاية القصف الشديد المتأخر (انظر العنوان الفرعي السابع «تصنيف النيازك» ضمن الفصل الأول) لافتقارنا لرواسب يفوق عمرها ٣,٨ مليار عام. كما أنه يمكن تفسيره أيضاً كدليل على الدور المخصّب أو المحفّز الذي أدّته هذه التصادمات.

# خاتمة

«إنكم لا تتخيلون كل ما تحتويه السماء»- هنري ميشو Henri Michaux

سعينا في هذا الكتاب إلى تقديم علم الكيمياء الكونية كما كان وما زال يتطور في الوقت الراهن. فغاية هذا التخصص تتمثل في تحديد ظروف ولادة منظومتنا الشمسية، فضلاً عن آليات التطور الجيولوجي الخاصة بالأجسام السماوية، ونطاق ظهور الحياة على الأرض. هناك سؤال قديم وحيّ لا يزال يلوح في أفق هذا العلم: هل المنظومة الشمسية فريدة من نوعها؟

ستمتد حدود هذا العلم الذي تلتقي فيه عدة تخصصات حتى تلامس الفيزياء الفلكية والجيولوجية، بل وحتى علم الأحياء الفلكي. وستنقلنا رحلات فضائية، ذات مناسبات نادرة وقيّمة، إلى حيث ولدت الأحجار النيزكية.

وبالرغم من ذلك، ومهما بعدْنا، نستعود بنا الأحجار النيزكية إلى الأرض؛ وستظل السماء تمطر أحجاراً وتدعم من خلال ذلك تقدمنا العلمي والتقني، غداً كما كان الحال بالأمس، حاملة بين ثناياها لغزها وسحرها.

## قائمة المراجع والروابط على شبكة الانترنت

Carion A.. Les météorites et leurs impacts. Paris. Masson. 1997.
Davis A. M.. Holland H. D.. Turekian K. K.. Treatise on Geochemistry. vol. 1 : Meteorites. Comets and Planets. Amsterdam. Elsevier. 2003.
Gargaud M.. Claeys P.. López-García P.. Martin H.. Montmerle T.. Pascal R.. Reisse J.. From Suns to Life. Dordrecht. Springer. 2006.
Heide F.. Wlotzka F.. Meteorites. Messengers from Space. Berlin. Springer.1995.
Lauretta D. S.. McSween Jr H. Y.. Meteorites and early Solar System 2.Tucson. Arizona University Press. 2006.
Maurette M.. Chasseur d'étoiles. Paris. Hachette. 1994.
Maurette M.. Micrometeorites and the Mysteries of our Origins. Berlin. Springer Verlag. 2006.
McCall G. J. H.. Bowden A. J.. Howarth R. J.. The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections : Fireballs. Finds and Falls. London. Geological Society Special Publications. 2006.
McSween H. Y.. Meteorites and their Parent Planets. Cambridge. Cambridge
University Press. 1999.
Pelé P.-M.. Les météorites de France : guide pratique. Paris. Hermann. 2005.
Wasson J. T.. Meteorites : Their Record of early Solar System History. New York. W. H. Freeman. 1985.
Zanda B.. Rotaru M.. Les météorites. Paris. Bordas et Muséum national d'histoire naturelle. 1996.

فيما يلي أهم المجلات التي تقوم بنشر أعمال بحثية خاصة بالأحجار النيزكية :

Meteoritics & Planetary Sciences. Geochimica & Cosmochimica Acta. Earth & Planetary Science Letters. The Astrophysical Journal. Icarus. Planetary & Space Sciences. Nature. Science. Proceedings of the National Academy of Sciences.
Meteoritical Society : http://meteoriticalsociety.org/

The Meteoritical Bulletin Database : http://tin.er.usgs.gov/meteor/metbull.php
Orbites des astéroïdes et des comètes : http://neo.jpl.nasa.gov/orbits/
Matériaux extraterrestres à la NASA : http://curator.jsc.nasa.gov/
Laboratoire de minéralogie et de cosmochimie du Muséum : http://www.mnhn.fr/lmcm/

## المحتويات

**تنويـــه**

**الفصل الأول :** بعض مفاهيم علم الكواكب والكيمياء الكونية

تعريف ببعض المصطلحات التمهيدية

بعض مفاهيم علم الكواكب

بعض مفاهيم كيمياء الأرض

بعض مفاهيم الكيمياء النظائر الكونية

من الأجسام البدائية إلى الأجسام المتمايزة

البلياردو الكونية

تصنيف النيازك

**الفصل الثاني :** نبذة تاريخية

خرافات وانبهار

من عصر النهضة إلى عصر التنوير

منعطف نهاية القرن الثامن عشر

القرن التاسع عشر: أولى الدراسات المنهجية

القرن العشرون: عصر الفضاء

**الفصل الثالث :** النيازك على الأرض

عبور الغلاف الجوي

جمع المادة الناشئة خارج الأرض

دفق المادة الناشئة خارج الأرض

الصدمات والغلاف الحيوي

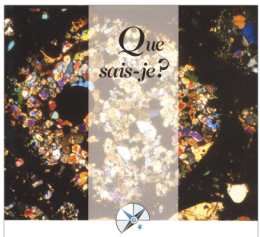
مكوث الأحجار النيزكية على الأرض

أحجار نيزكية من هنا وهناك

**الفصل الرابع :** كيف نميز الحجر النيزكي؟

**الفصل الخامس :** الأحجار النيزكية: من الجسم الأم إلى الأرض

مصدر الأحجار النيزكية
أعمار تعرض الحجارة النيزكية
انتقال النيازك إلى الأرض
**الفصل السادس :** النيازك الكوندريتية وتكوين منظومتنا الشمسية
التركيب الكيميائي والنظائري في النيازك الكوندريتية
عمر النيازك الكوندريتية ومكوناتها
تشكل محتبسات الألومنيوم الكلسي والكريات الكوندريولية المافية mafic
تطور التكوين النظائري للأكسجين
العناصر المشعة الخامدة ذات الدور القصير
مادة الترابط الدقيقة
بريق المعدن المبدد
**الفصل السابع :** التطور الجيولوجي للأجسام السماوية
آثار وصدمات التحول الحراري والنشاط المائي الحراري في أحجار النيازك الكوندريتية التمايز
**الفصل الثامن :** الأحجار النيزكية ونشأة الحياة
الحياة الناشئة خارج الأرض في الأحجار النيزكية
الجزيئات ما قبل الحياتية في الأحجار النيزكية
الكيمياء الكونية وسياق ظهور الحياة
**خاتمة**
قائمة المراجع والروابط ذات الأهمية على شبكة الانترنت




LES MÉTÉORITES

Matthieu Gounelle

puf

## عن الكتاب:

لطالما فُتن الإنسان بالأحجار النيزكية، إلا أن الاهتمام العلمي بهذه الأحجار المتساقطة من السماء تنامى على نحو ملحوظ منذ بضع سنوات. إذ يمكن من خلالها دراسة التطور الجيولوجي للأجرام السماوية. وتعين الأحجار النيزكية أيضاً على فهم آليات تكوين النظم الشمسية. ومنها ، مثل النيازك الكوندريتية الكربونية، الغنية بالجزيئات العضوية المعقدة، ما سمح بإعادة طرح الأسئلة حول بظهور الحياة.

يرسم هذا المؤلف، بدءاً من عصر "الريبة" ووصولاً إلى عصر الأبحاث الأحدث، التاريخ الطبيعي والعلمي لهذه العينات الواردة من الفضاء الخارجي.

## المؤلف:

ماتيو غونيل أستاذ في متحف التاريخ الطبيعي في باريس.

## المترجم:

أ.زينا مغربل

حاصلة على بكالوريوس في إدارة أنظمة المعلومات من جامعة مريلاند الأمريكية. تعمل في تعريب وترجمة العديد من المؤلفات مثل الكتب والمجلات من اللغات الإنجليزية والفرنسية، وبخاصة في مجالات العلوم والتقنية.

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

**تعمل مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية على توفير المعرفة للقارئ العربي. فقامت في هذا الإطار بنشر سلسلة من الكتب والمجلات العلمية وأتاحتها للقراء دون مقابل بصيغتيها الرقمية والورقية. فجميع إصدارات المدينة متاحة على موقعها الإلكتروني ليتمكن المتصفح من تحميلها أو قراءتها على الإنترنت.**

هاتف: ٤٨٨٣٤٤٤ ٠١١ - ٤٨٨٣٥٥٥ ٠١١
فاكس: ٤٨٨٣٧٥٦ ٠١١
ص.ب. ٦٠٨٦ الرياض ١١٤٤٢
المملكة العربية السعودية
مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
رقم الوثيقة: 05P0027_PKT_0001_AR01

الموقع الالكتروني: www.kacst.edu.sa
إصدارات المدينة: publications.kacst.edu.sa
البريد الالكتروني: awareness@kacst.edu.sa

مطابع مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
رقم: ٣٤٠٩٠١
ردمك: ٨-٦٤-٨٠٤٩-٦٠٣-٩٧٨