فى البدء خلق اللّه السماوات والأرض

موثوقية خلق الشمس والأرض فى اليوم الأول



إعداد / هنرى ناجى فوزى

https://coptic-treasures.com/

فى البدء خلق الله السماوات والأرض

موثوقية خلق الشمس والأرض فى اليوم الأول

هنرى ناجى فوزى

سبتمبر 2026

https://coptic-treasures.com/

ليس معنى البحث عن الموثوقية أنه يوجد ولو مقدار ذرة من الشك في نصوص الكتاب المقدس

نحن نؤمن أن كل الكتاب المقدس بعهديه القديم والجديد هو كلام موحى به من الله

أما عن موضوع البحث عن الموثوقية وذلك لنستطيع تفسير نصوص الكتاب المقدس التي كنا لا نفهما في الماضى بسبب عجز العلم عن شرحها

ولذلك البحث عن الموثوقية لن يتوقف لأنه كلما تقدم العلم سيمكننا ذلك الحصول على المزيد من التفسيرات للنصوص

فالكتاب المقدس هدفه الأول هو البنيان الروحى للإنسان وخلاصه

والكتاب المقدس ليس كتاب بحث علمى مطالب بسرد تفاصيل التفاصيل

https://coptic-treasures.com/

فهرس الموضوعات

الموضـــــــــــوع	رقم الصفحة
المقدمة	1
ملخص البحث	2
دراسة للنصوص العبرية	14
كيف بدأ الكون	29
تكوين النظام الشمسى	33
مراحل تطور الشمس منذ التكوين	38
تطور نجم شبيه بالشمس	41
مشاهدة تكوين نظام شمسى جديد	42
تلسكوب James Webb يرصد تكوين أحد الكواكب	44
ديناميكيات تكوين الكواكب	46
تكوين الأقراص الكوكبية الأولى	47
عمر سديم النظام الشمسي الخارجي من النيازك الكربونية	50
كيف تشكلت الأرض	51
كيف تتشكل الكواكب؟	55
العوالم الصالحة للسكن قد تشكلت قبل المجرات الأولى	56
مدى صلاحية الأرض الأولى للحياة عليها	58
اكتشف العلماء أن النجوم والكواكب قد تكون أشقاء	60
يبدأ تكوين الكواكب قبل اكتمال نمو النجم	64
تبدأ الكواكب في التشكل قبل أن تكتمل نجومها	65
الكشف المباشر عن الغاز الجزيئي البارد في مجرة تشكل النجوم	67
تتشكل الكواكب في وقت أبكر مما كان يُعتقد حول النجوم الوليدة	68
تتشكل الكواكب الصخرية مبكراً	73
ألما ALMA تقدم رؤى غير مسبوقة لولادة الكواكب	75
تكوّن الحلقات عن طريق تكتل تجمعات الغبار في المرحلة المبكرة من تطور القرص حول النجم الأولي	79

https://coptic-treasures.com/

وتكتمل الكواكب ولازالت نجومها في مرحلة النمو	80
كوكبان أوليان يتراكمان حول النجم الشاب PDS 70	81
صورة مؤكدة لكوكب حديث الولادة التقطتها تلسكوبات VLT التابعة للمرصد الأوروبي الجنوبي	83
صلاحية الأرض في بداياتها للحياة: وجود الماء السائل تحت شمس فتية خافتة	86
كيف تحولت الأرض من كتلة منصهر إلى كوكب صالح للسكن؟	87
المليار سنة الأولى: قابلية السكن على كوكب الأرض	92
مهمة إلى كوكب الأرض: أول ملياري سنة	95
من غبار النجوم إلى الخلايا الأولى	96
كانت الشمس أقل سطوعاً في البداية	101
ارتفاع درجات الحرارة الكرة الأرضية في البداية	102
تاريخ درجة حرارة سطح الأرض	103
تاريخ درجة حرارة سطح الأرض على مدى 485 مليون سنة	108
على الأرض القديمة انهمرت الأمطار بغزارة	113
مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عبر الزمن	116
تاريخ الأكسجين الجوي	121
الأكسجين والميثان في الغلاف الجوي على الأرض في بداياتها	124
التأثير البيوجيوكيميائي للنيكل واليوريا في حدث الأكسدة العظيم	125
حدث الأكسدة العظيم والأرض المتجمدة	128
الغلاف الجوى خلال العصر الهادى Hadean	130
الغلاف الجوي السام للأرض في بداياتها	133
كانت الأرض القديمة عالماً مائياً	135
كان العالم عبارة عن عالم مائي بدون قارات على الإطلاق	137
تشكل الستروماتوليت في البحيرات الحرارية المائية	141
كانت الأرض القديمة عالماً مائياً	144
نظرية جديدة تشرح كيف أصبحت الأرض القديمة رطبة للغاية	146
يمنع عدم تناسق السحب بين الليل والنهار تكوّن المحيطات المبكرة على كوكب الزهرة، لكن ليس على الأرض	148
ليكن نور: ماذا حدث في الكون المبكر؟	151
نظرية جديدة على أقدم ضوء في الكون	154
بعد الانفجار العظيم، شكّل الضوء والكهرباء الكون المبكر	157

https://coptic-treasures.com/

كيف أضاء الكون في بداية التكوين	158
الوجه المضيء والمظلم لسديم تكوّن النجوم	160
يكشف ويب عن النجوم الشباب في جميع مراحل التكوين	162
سديم الفراشة يعطى تصور على الضوء الأولى	164
نظريات تكوين القمر	168
علماء الفلك يرصدون قرصاً يتشكل حول كوكب خارج المجموعة الشمسية أثناء تشكل القمر	169
يدرس تلسكوب جيمس ويب القرص المتشكل حول كوكب ضخم والذي يشكل القمر	171
أقمار الأرض شبه الحقيقية والشبحية تؤيد تكون القمر من قرص يدور حول الكوكب	172
قابلية الأرض المبكرة للحياة: وجود الماء السائل تحت شمس فتية خافتة، بفضل التسخين المدّي القوي الناتج عن قرب القمر	174
القمر ربما ساهم في حماية الأرض الفتية من الشمس	175
طول النهار كان أقل من 12 ساعة	178
لماذا يبلغ طول اليوم 24 ساعة	180
عندما كان للقمر غلاف مغناطيسي	182
الأرض كانت تدور حول محورها في 19 ساعة في الماضي	185
الأرض كانت تدور حول محورها كل 18 ساعة	190
كان متوسط طول اليوم على الأرض أقل من 19 ساعة	194
المراجع	197

https://coptic-treasures.com/

مقدمة

كلما زاد التقدم العلمى يعطينا هذا التقدم فرصة لتفسير مراحل الخلق االمذكورة فى سفر التكوين بالأصحاح الأول، فمنذ عشر سنوات مضت لم تكن غالبية المعلومات المذكورة فى هذا البحث متوافرة، هكذا الحال أيضاً فبعد عشر سنوات ستتوافر معلومات واكتشافات أكثر وأكثر ستمكننا بعمل تفسيرات أكثر دقة للأصحاح الأول من سفر التكوين، وكما وضحنا فى هذا البحث بعد دراسة النصوص العبرية وبعد دراسة النظريات العلمية الحديثة، مفهوم خلق النور باليوم الأول للخليقة ومفهوم الظلمة، وكذلك أن الشمس والأرض قد خلقتا معاً فى اليوم الأول وكذلك القمر قد نشأ وتكون مع كوكبه الأرض، ثم فى اليوم الرابع اكتمل النظام، فقد ثبتت المواقيت الليل والنهار والايام والسنين، واكتمل ضياء الشمس، والأرض قد اكتمل غلافها الجوى وهدأت الكرة الأرضية وثبتت حرارتها وتوافر الأكسجين لتكون الحياة ممكنة على سطحها، وكذلك الحال للقمر الذى له دور مهم فى نظام كوكب الأرض، فقد اكتمل تكوينه ونظامه فى اليوم الرابع.

إذن المعضلة فى العلم الذى يكون فى وقت من الأوقات عاجز إعطاء التفسيرات العلمية لحقيقة ما

لقد تناولنا فى كتب سابقة عدة مواضيع تم دراستها بالأصحاح الأول من سفر التكوين وهى

- عمر الخليقة هو أقل من 10,000 سنة بالإثبتات العلمية
- الجلد معناه وتفسيره
- مفهوم كلمة يوم فى الأصحاح الأول من سفر التكوين، وسوف يكون لهذا الكتاب جزء ثان إنشاء الرب وعشنا
- وها هو بحث جديد عن خلق النور والشمس

هنرى ناجى فوزى

سبتمبر 2026

https://coptic-treasures.com/

ملخص البحث

https://coptic-treasures.com/

"فِي الْبَدْءِ براشيت خَلَقَ برا اللهُ אלהים السَّمَاوَاتِ את השמים وَالأَرْضَ ואת הארץ." تك 1:1

فى البدء فى اللغة العبرية בראשית وفى الترجمة السبعينية Εν αρχη، ونجد نفس الكلمة فى انجيل يوحنا 1:1 "فِي الْبَدْءِ Εν αρχη كَانَ الْكَلِمَةُ"، فكما ذكر يوحنا الإنجيلى فى البدء كان الكلمة الذى به كان كل شيء وبغيره لم يكن شيء، هكذا فى تتكوين 1:1 تعنى كلمة فى البدء أن الله خلق هذا الكون من العدم، فى نفس الوقت عندما ذكر سفر التكوين أن الله خلق السماء השמים والأرض، تشير عبارة السماوات والأرض אֵת הַשָּׁמַיִם וְאֵת הָאָרֶץ إلى "مجمل الكون المنظم".

وبما أن كلمة أرض אֶרֶץ في سفر التكوين 2:1 تصف كونًا غير مكتمل وغير منظم بعد، فلا يمكن أن تتطابق مع كلمة أرض אֶרֶץ في سفر التكوين 1:1 التي، عند اقترانها بكلمة سماء שָׁמַיִם، تصف كونًا مكتملًا ومنظمًا.

كان الكون شديد التكثيف، بحجم أقل من مليون مليار مليار جزء من حجم الذرة الواحدة. يُعتقد أنه في هذه الحالة فائقة الكثافة والطاقة، اندمجت القوى الأساسية الأربع - الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والقوتين النوويتين القوية والضعيفة - في قوة واحدة

في جزء ضئيل للغاية من الثانية، تمددت كل تلك المادة والطاقة بشكل متساوٍ تقريبًا، مع اختلافات طفيفة ناتجة عن تقلبات على المستوى الكمي، مع مرور الوقت وبرودة المادة، بدأت أنواعٌ أكثر تنوعًا من الجسيمات بالتشكل، وتكثفت في نهاية المطاف لتُشكّل النجوم والمجرات في كوننا الحالي، وعندما بلغ عمر الكون جزءًا من مليار من الثانية، كان قد برد بما يكفي لانفصال القوى الأساسية الأربع عن بعضها. كما تشكلت الجسيمات الأساسية للكون. ومع ذلك، كان لا يزال شديد الحرارة لدرجة أن هذه الجسيمات لم تكن قد تجمعت بعد لتُشكّل العديد من الجسيمات دون الذرية التي نعرفها اليوم، مثل البروتون. ومع استمرار الكون في التوسع، استمر هذا الحساء البدائي شديد الحرارة، كان الإشعاع في الكون المبكر شديدًا لدرجة أن تصادم الفوتونات كان يُشكّل أزواجًا من الجسيمات المكونة من المادة والمادة المضادة، وهي تشبه المادة العادية في كل شيء باستثناء اختلاف الشحنة الكهربائية. يُعتقد أن الكون المبكر كان يحتوي على كميات متساوية من المادة والمادة المضادة. ولكن مع برودة الكون، لم تعد الفوتونات تمتلك الطاقة الكافية لتكوين أزواج من المادة والمادة المضادة.

"وَكَانَتِ الأَرْضُ והארץ היתה خَرِبَةً وَخَالِيَةً תהו ובהו، وَعَلَى وَجْهِ الْغَمْرِ ظُلْمَةٌ ..." تك 2:1

المرحلة الثانية كانت الشمس لازالت فى مرحلة التكاثف ولم تبدأ الاندماجات والانشطارات لذلك كان نجم الشمس معتماً في غضون الثانية الأولى من عمر الكون، كانت درجة حرارته كافية لتتجمع المادة المتبقية وتتحد لتشكل البروتونات والنيوترونات، وهي الجسيمات المعروفة التي تُكوّن نوى الذرات. وبعد ثلاث دقائق، تجمعت البروتونات والنيوترونات لتشكل نوى الهيدروجين والهيليوم. من حيث الكتلة، شكّل الهيدروجين 75% من مادة الكون المبكر، بينما شكّل الهيليوم 25%. يُعدّ وفرة الهيليوم تنبؤًا رئيسيًا لنظرية الانفجار العظيم، وقد أكدته الملاحظات العلمية.

https://coptic-treasures.com/

النظام الشمسي تشكل من سحابة نتيجةً لانكماش جزء من الغاز والغبار. وربما كان هذا السديم جزءًا من سحابة بين نجمية أكبر بكثير من الغاز والغبار، احتوت على كمية كافية من المادة لتكوين مئات إلى آلاف النجوم مثل شمسنا. وربما تسببت اختلافات الكثافة في تفتت السحابة الأكبر إلى العديد من السحب الأصغر التي أنتجت النجوم والأنظمة الكوكبية المصاحبة لها. وكان السديم الشمسي، أو النظام الشمسي الأولي، أحد هذه السحب الأصغر. على الرغم من أن السديم الشمسي لم يكن سوى جزء صغير من السحابة الأم الأكبر بكثير، إلا أنه كان على الأرجح يبلغ قطره سنة ضوئية واحدة على الأقل.

فبينما كان السديم يدور حول مركز المجرة، أدى مروره عبر موجة الكثافة في الذراع الحلزونية إلى إبطاء حركته قليلاً، مما ضغط الغاز وبدأ انكماشه بفعل الجاذبية. ويدعم هذه الفكرة ملاحظة أن الأذرع الحلزونية للمجرات تتميز بمجموعات من النجوم الفتية حديثة التكوين، وفي البداية كانت سحابة الغاز والغبار باردة وتدور ببطء. فجذبت الجاذبية المادة نحو المركز، ومع انكماش السحابة، زادت سرعة دورانها للحفاظ على الزخم الزاوي. استمرت في الانكماش، وبالتالي زادت سرعة دورانها، وبعد حوالي 100,000 عام، انفصل عنها قرص من المادة في مستواها الاستوائي. تجمعت معظم مادة السديم الشمسي في مركز القرص، لتشكل الشمس الأولية. ومع انكماش الشمس الأولية، تحولت طاقة الوضع الجاذبية إلى طاقة حرارية، مما أدى إلى تسخينها إلى درجة بدأت عندها في الإشعاع بأطوال موجية تحت الحمراء، واستمرت الشمس البدائية في الانكماش، وإرتفاع درجة حرارتها وإضاءتها. وأدى ذلك إلى تسخين الجزء الداخلي من القرص الاستوائي القريب من الشمس البدائية، دون الجزء الأبعد. نتج عن الاختلاف القطري في درجة الحرارة عبر القرص تكثف تفاضلي إلى حبيبات صلبة صغيرة. عند درجات الحرارة المرتفعة في الجزء الداخلي من القرص. مع ارتفاع درجة حرارة الشمس البدائية وبدء اندماج الهيدروجين، بدأت المواد المحيطة بها في التكتل لتكوين أجسام أكبر من خلال عملية تُسمى التراكم. أدى ذلك إلى تكوين الكواكب الصخرية الداخلية بينما شكلت المواد المتبقية حزام الكويكبات مع ازدياد حجم الكويكبات، جذبت كتلتها المتزايدة مواد إضافية بفعل الجاذبية حتى أزالت المنطقة المحيطة بمداراتها.

الكواكب هي نتاج ثانوي لتكوين النجوم، حيث تتشكل في أقراص كوكبية أولية حول النجوم الجديدة. تمتلئ هذه الأقراص بالغاز والغبار، مما يؤدي إلى تركيز الكتلة في حلقات تُشكل في النهاية الكواكب، يتكون القرص الكوكبي الأولي من سحابة دوارة من الغاز والغبار، ذات تركيب مشابه لتركيب نجمها، وتتشكل عبر الانهيار الجذبي لسحابة جزيئية. ويخضع تطورها لتوازن بين قوى الجاذبية والمغناطيسية وضغط الغاز والدوران. ويُعرف نهاية القرص الكوكبي الأولي بفقدانه للغاز والغبار. في بعض الحالات، قد يصل عمر القرص إلى 30 مليون سنة. وبشكل عام، يعتمد تطور القرص الكوكبي الأولي وعمره على كتلة نجم النظام، بدأ تراكم الكواكب الأرضية بتجمع حبيبات القرص والمكثفات عالية الحرارة لتشكيل حصى، والتي بدورها اندمجت بفعل الجاذبية لتكوين كويكبات يصل حجمها إلى مئات الكيلومترات. وُجدت كويكبات ذات نوى معدنية، والتي تُصنف اليوم على أنها نيازك

https://coptic-treasures.com/

حديدية، خلال المليون سنة الأولى من عمر النظام الشمسي. إن التركيب الحالي للأرض، بما في ذلك مياهها ومركباتها الأخرى الضرورية للحياة، موروث من عمليات التراكم والتجزئة التي حدثت خلال تكوينها وتاريخها المبكر.

وعلى وجه الغمر ظلمة، بالنسبة للغمر فإن أصل الماء في نظامنا الشمسي قد تشكل قبل ولادة الشمس نفسها، وتشير النتائج إلى أن مياه الأرض قد نشأت من السديم الشمسي، وأثناء تشكل النظام الشمسي، مرّ هذا الماء بدورات تحول فيها إلى غاز ثم عاد إلى جليد، ليصبح في النهاية جزءًا من كواكب مثل الأرض، وأن الأرض القديمة كانت عالمًا مائيًا، يخلو من اليابسة. راجع كتابنا (موثوقية..فعمل الله الجلد وفصل بين المياه التي تحت الجلد والمياه التي فوق الجلد)

أما بالنسبة للظلمة قبل أن يصنع الله النور، فبعد الإنفجار العظيم على الرغم من وجود نوى ذرية، كان الكون الفتيّ لا يزال شديد الحرارة بحيث لم تتمكن الإلكترونات من الاستقرار حولها لتكوين ذرات مستقرة. بقيت مادة الكون ضبابًا مشحونًا كهربائيًا كثيفًا للغاية، لدرجة أن الضوء كان يجد صعوبة في اختراقه. استغرق الأمر حوالي 380,000 عام أخرى حتى يبرد الكون بما يكفي لتكوّن الذرات المتعادلة - وهي لحظة محورية تُعرف بإعادة التركيب. جعل الكون الأكثر برودة شفافًا لأول مرة، مما سمح للفوتونات التي كانت تدور بداخله بالمرور عبره دون عوائق. لا نزال نرى هذا التوهج البدائي اليوم على شكل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، الموجود في جميع أنحاء الكون. يشبه هذا الإشعاع ذلك المستخدم في بث إشارات التلفزيون عبر الهوائيات. ولكنه أقدم إشعاع معروف، وقد يحمل في طياته العديد من الأسرار حول اللحظات الأولى للكون.

عادةً ما تتفكك السحابة الجزيئية إلى كتل منفصلة تنهار من تلقاء نفسها. ومع انهيار كل كتلة، تتحول طاقة الجاذبية بسرعة إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى تسخين الغاز وبدء انبعاث موجات راديوية ضعيفة منه. عندما تتشكل نواة كثيفة بما يكفي في مركز الكتلة، يتباطأ الانكماش، ويُطلق على الجسم اسم النجم الأولي. عادةً، تتشكل العديد من النجوم الأولية المتجاورة في نفس الوقت تقريبًا. يستمر النجم الأولي في الانكماش بفعل الجاذبية، ويرتفع حرارته إلى درجة كافية للتألق في الجزء تحت الأحمر من الطيف الكهرومغناطيسي. أما الضوء المرئي الضئيل الذي ينبعث منه، فيحجبه غلاف الغبار المحيط به. في نهاية المطاف، يتبدد غلاف الغبار، فينضم جزء منه إلى القرص الاستوائي المتنامي حول النجم الأولي (الذي قد تتشكل فيه الكواكب لاحقًا)، بينما يتطاير جزء آخر مع ازدياد حرارة النجم الأولي وتوهجه. ومع استمرار انكماش النجم الأولي وازدياد حرارته، تُفتت التصادمات الجزيئات إلى ذرات منفردة، وتُنزع الإلكترونات من الذرات، مما يؤدي إلى تأين الغاز.

https://coptic-treasures.com/

"וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים «יְהִי אוֹר»; וַיְהִי־אוֹר." تك 3:1

"ليكن نور". الكلمة العبرية יְהִי تعني "أن يحدث، أن يقع، أن يظهر". لم يُستخدم الفعلان בָּרָא و עָשָׂה، اللذان يعنيان "أن يخلق" و"أن يصنع"، وهذا الاختيار اللغوي منطقي. خلق الله النور المادي "في البدء"، عندما أوجد الكون. وشملت مادة الكون وطاقته النور.

יְהִי هي صيغة تعبيرًا عن الأمر أو الإرادة. في العبرية التوراتية، يُستخدم صيغة الأمر فى المستقبل عادةً للأوامر الإلهية وللأمنيات: "ليكن كذا"، تأتي كلمة יְהִי بصيغة الأمر، التي تُعبّر عن رغبة أو أمر. تُعرف أيضًا بالصيغة المختصرة، لأنها مبنية على صيغة الماضي الناقص (المعروفة بصيغة المستقبل في العبرية الحديثة)، أما הָיָה : فعل الماضي من نفس الجذر، ويعني "كان" أو "حدث بالفعل".

لذا، فإنّ יְהִי אוֹר = "ليكن نور" (صيغة أمر). و וַיְהִי هي صيغة الماضي التام (أو صيغة الماضي البسيط) للفعل "يكون"، وتُترجم عادةً إلى صيغة الماضي البسيط: "وكان". في السرد، تُحوّل صيغة الماضي التام صيغ الماضي الناقص إلى صيغة الماضي، لذا فإنّ וַיְהִי אוֹר = "وكان نور". وهي تُشير إلى النتيجة المُتحققة للأمر الإلهي السابق. لذا، فإنّ عبارة יְהִי ... וַיְהִי تُعبّر عن فعل الكلام بالإضافة إلى النتيجة المُتحققة: الله يأمر، والحالة المأمور بها تتحقق. الجملتان مُتكاملتان وليستا مُكررتين: إحداهما تُعبّر عن القدرة؛ أما الآخر فهو النتيجة.

على الرغم من وجود نوى ذرية، كان الكون الفتيّ لا يزال شديد الحرارة بحيث لم تتمكن الإلكترونات من الاستقرار حولها لتكوين ذرات مستقرة. بقيت مادة الكون ضبابًا مشحونًا كهربائيًا كثيفًا للغاية، لدرجة أن الضوء كان يجد صعوبة في اختراقه. استغرق الأمر حوالي 380,000 عام أخرى حتى يبرد الكون بما يكفي لتكوّن الذرات المتعادلة - وهي لحظة محورية تُعرف بإعادة التركيب. جعل الكون الأكثر برودة شفافًا لأول مرة، مما سمح للفوتونات التي كانت تدور بداخله بالمرور عبره دون عوائق. لا نزال نرى هذا التوهج البدائي اليوم على شكل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، الموجود في جميع أنحاء الكون.

عندما برد الكون قليلًا، تمكنت الإلكترونات من الانضمام إلى الذرات المتأينة، مكونةً الهيدروجين والهيليوم المتعادلين. حدثت هذه العملية، التي يعرفها علماء الفلك باسم إعادة التركيب، بعد حوالي 300 ألف عام من الانفجار العظيم، وجعلت الكون شفافًا، لأن الضوء لم يعد ينحرف بفعل الإلكترونات الحرة.

مع تشكل الشمس الأولية في المركز، بدأ التكثيف الجزئي - وهي عملية تتصلب فيها المادة الغازية إلى حبيبات صغيرة بحجم الرمل فقط في المناطق التي تكون فيها درجة الحرارة المحيطة أقل من نقطة انصهار المادة. تكثفت حبيبات معدنية من الحديد والنيكل فقط بالقرب من الشمس الأولية. أما في المناطق الأبعد، حيث كانت درجة الحرارة أقل، فقد انضمت إليها حبيبات

https://coptic-treasures.com/

من معادن السيليكات. في مناطق أبعد، تكثفت أنواع مختلفة من الجليد، كالماء وثاني أكسيد الكربون والميثان والأمونيا. اصطدمت هذه الحبيبات الصلبة ببعضها والتصقت ببعضها في عملية تُعرف بالتراكم، مُشكّلةً كويكبات نمت في الحجم. خلال فترة زمنية تتراوح بين بضعة عشرات الملايين إلى مئة مليون سنة، نمت أكبر الكويكبات لتصبح كواكب أولية، بينما أصبحت الكويكبات الأصغر منها العديد من الأقمار وغيرها من الأجرام الصغيرة في النظام الشمسي. مع استمرار نمو الكواكب الأولية، ازداد تأثير جاذبيتها. استطاعت جذب كميات أكبر من مادة القرص، مما سرّع نموها، وفي الوقت نفسه نظّف الفضاء بين الكواكب المحيط بها.

وُلدت أرضنا داخل قرص كوكبي أولي، وهو الجزء المتبقي من السديم الذي كان يحيط بالشمس الفتية. في هذا القرص، اصطدم الغاز والغبار والتصقا ببعضهما البعض، مما أدى تدريجياً إلى تكوين أجسام أكبر حجماً تسمى الكويكبات. استمرت الكويكبات في الاصطدام والاندماج لتكوين الكواكب الأولية، وصولاً إلى الكواكب. كان الجزء الداخلي من القرص، الأقرب إلى الشمس، أكثر سخونة، لذا تشكلت هناك كواكب تتكون في الغالب من الصخور والمعادن - عطارد، الزهرة ، المريخ، وكوكبنا الأرض. ثم، في الجزء الخارجي الأكثر برودة من القرص، تشكلت كواكب قادرة على جذب كميات كبيرة من الغاز - الكواكب الغازية العملاقة.

كان غلاف الأرض الجوي في ذلك الوقت يتكون من 70% على الأقل من ثاني أكسيد الكربون. كنا نعلم مسبقًا من أبحاث سابقة أن الغلاف الجوي للأرض في بداياته كان منخفض الأكسجين للغاية. كان كوكبنا مغطى بالكامل أو شبه بالكامل بالجليد، وهو سيناريو يُعرف عادةً باسم "الأرض المتجمدة". كان الاصطدام قويًا لدرجة أنه حوّل الجليد مباشرةً إلى بخار ماء

وقد أثبتت الأبحاث أن الكواكب تنمو مع نجومها في نفس الوقت، وفي بعض الأحيان قد يكتمل نمو الكواكب قبل أن يكتمل نمو نجومها. أن النجوم والكواكب تنمو معًا كما لو كانت أشقاء ففي أعماق سحابة LI709 الكثيفة بين النجوم في كوكبة الحواء، كشف أن هذا الاعتقاد قد لا يكون صحيحًا. فمع عمر يقل عن نصف عمر النجوم الشابة الأخرى التي تحتوي على حلقات غبار، ويقل عمره عن 500 ألف عام، لا يزال أمام IRS 63 طريق طويل لجمع الكتلة، ومع ذلك، فقد بدأت الكواكب بالتكوّن بالفعل. قال إيان ستيفنز Ian Stephens، عالم الفلك في مركز الفيزياء الفلكية بجامعة هارفارد ومؤسسة سميثسونيان Smithsonian (CfA): "رصدنا القرص الكوكبي الأولي الفتيّ المسمى IRS 63، ووجدنا فجوات وحلقات داخله، ما يدل على تكوّن الكواكب. كان يُعتقد تقليديًا أن النجم يُكمل معظم مراحل تكوينه قبل تكوّن الكواكب، لكن رصدنا أظهر أنهما يتكوّنان في الوقت نفسه".

أيضاً توصل علماء الفلك إلى أدلة دامغة على أن الكواكب تبدأ بالتشكل بينما لا تزال النجوم الوليدة في طور النمو. تُظهر الصورة عالية الدقة، الملتقطة بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، قرصًا نجميًا أوليًا فتيًا يحتوي على فجوات متعددة وحلقات من الغبار. تُظهر هذه النتيجة الجديدة، التي نُشرت مؤخرًا في مجلة Nature، أحدث مثال وأكثرها تفصيلًا لحلقات الغبار التي تعمل كمهد كوني، حيث تتشكل بذور الكواكب وتترسخ.

https://coptic-treasures.com/

دومينيك سيغورا كوكس Dominique Segura-Cox من معهد ماكس بلانك Max Planck للفيزياء الفلكية خارج الأرض (MPE) في ألمانيا النجم الأولي IRS 63 باستخدام مرصد ألما الراديوي. يقع هذا النظام على بُعد 470 سنة ضوئية من الأرض، في أعماق سحابة L1709 الكثيفة بين النجوم في كوكبة الحواء. لا تزال النجوم الأولية، مثل IRS 63، مُحاطة بغلاف ضخم من الغاز والغبار، ويتغذى النجم الأولي وقرصه من هذا المخزون من المواد.

درس علماء الفلك القرص الكوكبي الأولي للنجم TMC1A، وهو عبارة عن سحابة مسطحة من المادة تدور حول نجم في طور التكوين. وفي هذه الأقراص من الغاز والغبار، تتشكل الكواكب. ولاحظ الباحثون في المنطقة القرصية الشكل نقصًا ملحوظًا في إشعاع أول أكسيد الكربون. اشتبهوا في أن الإشعاع توقف بفعل جزيئات الغبار الكبيرة. وباستخدام نماذج حاسوبية رقمية، أثبت علماء الفلك بالفعل أن جزيئات الغبار في القرص الكوكبي الأولي الفتي قد نمت من جزء من ألف من المليمتر إلى ملليمتر كامل.

"4 وَرَأَى اللهُ النُّورَ أَنَّهُ حَسَنٌ. وَفَصَلَ اللهُ بَيْنَ النُّورِ وَالظُّلْمَةِ. 5 وَدَعَا اللهُ النُّورَ نَهَارًا، وَالظُّلْمَةُ دَعَاهَا لَيْلاً. وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا وَاحِدًا." تكوي 1:4-5

فى السطور التالية سنعرف لماذا أن الله حدد الوقت بأيام وسنين وكذلك النورين العظيمين فى اليوم الرابع، عندما كانت الشمس الفتية الخافتة تشع حوالي 70% فقط من طاقتها الحالية. في ذلك الوقت، كان من المفترض أن تكون الأرض كرة ثلجية عالمية لو كانت تمتلك خصائص جوية مشابهة لخصائص الأرض الحالية. لقد تبين أن نظام الأرض والقمر الحديث لا يحتوي إلا على حوالي 1% من طاقة دورانه المداري الأولية، عندما كانت الأرض تدور بسرعة وكان القمر في مدار ضيق للغاية. وقد تبددت معظم هذه الطاقة عبر المد والجزر، ونوضح أن التسخين الناتج عن المد والجزر ربما كان له تأثير أكبر بكثير على متوسط درجة حرارة سطح الأرض، أن تسخين المد والجزر ربما ساهم في ارتفاع درجة حرارة الأرض بعدة درجات مئوية خلال المليون سنة الأولى من عمرها.

عندما تصلّب محيط الصهارة على الأرض، أطلق كميات هائلة من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. ونتيجةً لذلك، احتوى الغلاف الجوي للأرض في بداياته على كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون والماء. ساعدت هذه الغازات في الحفاظ على مناخ الكوكب الفتيّ القاسي. ولكي يصبح هذا المناخ أكثر اعتدالًا خلال حقبة الهاديان، كان لا بدّ من حدوث تغييرات سريعة، من الناحية الجيولوجية. كان لا بدّ من إزالة غازات الدفيئة، وكان الصخر هو المستودع الوحيد لها. وكجزء من دورة الكربون على الأرض، يُخزّن الكربون في الصخور من خلال تحوّله إلى معادن كربوناتية في أحواض المحيطات

https://coptic-treasures.com/

كانت الشمس في بداياتها، تمامًا كالأرض في بداياتها، مختلفة تمامًا عما هي عليه الآن. لفهم السبب، نحتاج إلى معرفة بعض المعلومات حول كيفية انبعاث هذه الكمية الهائلة من الطاقة من الشمس والنجوم الأخرى. تُنتج النجوم كل ضوئها وحرارتها من خلال عملية الاندماج النووي، تُعدّ تفاعلات الاندماج النووي التي تُحوّل الهيدروجين إلى هيليوم من أكثر تفاعلات الاندماج النووي شيوعًا في النجوم. وهذه هي الطريقة التي يُنتج بها معظم الطاقة القادمة من الشمس. إلا أن النجوم تُدمج أيضًا ذرات الهيليوم معًا لتكوين عناصر مثل الكربون والأكسجين والنيتروجين. وتُصنع العديد من العناصر الكيميائية بهذه الطريقة. إنها عملية بالغة الأهمية لدرجة أنها تُعرف باسم "التخليق النووي النجمي"، وهي المسؤولة عن انبعاث هذا الكم الهائل من الضوء والحرارة من شمسنا. مع مرور الوقت، ومع استمرار التخليق النووي النجمي في الشمس، مُنتجًا المزيد والمزيد من الهيليوم والكربون وغيرهما، أصبحت الشمس أكثر سخونة وإشراقًا تدريجيًا.

كان غلاف الأرض في حقبة الأركي فقيرًا بالأكسجين. مع ذلك، تشير النماذج الكيميائية الضوئية للكواكب الشبيهة بالأرض حول نجوم شبيهة بالشمس إلى إمكانية الحفاظ على كميات ضئيلة من الأكسجين في الغلاف الجوي العلوي عبر التحلل الضوئي لثاني أكسيد الكربون. إذا ارتفع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ببطء كافٍ، فإن المحيط بأكمله يملك الوقت الكافي للاختلاط ومعادلة ثاني أكسيد الكربون الذي يمتصه، دون أن يصبح شديد الحموضة. ولهذا السبب، خلال فترات أخرى من تاريخ الأرض عندما كان ثاني أكسيد الكربون مرتفعًا جدًا، كما هو الحال في العصر الأوردوفيسي، أو خلال حقبة الحياة الوسطى (منذ 200 إلى 100 مليون سنة)، ازدهرت الحياة وكانت المحيطات صالحة لسكن الكائنات البحرية. من المهم الإشارة هنا إلى أن الأرض كانت مختلفة تمامًا خلال فترات ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون، إذ لم تكن هناك أنهار جليدية قارية أو كانت صغيرة جدًا، وكان متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى بكثير. وتُعزى هذه التغيرات واسعة النطاق في مستويات ثاني أكسيد الكربون جزئيًا إلى التغيرات الطبيعية للأرض. مما سبق يتبين لنا السبب فى أن لماذا خلق الله العشب والبقول أولاً فى اليوم الثالث قبل الكائنات البحرية والزواحف فى اليوم الخامس والبهائم فى اليوم السادس، وذلك بسبب انخفاض الاكسجين وأن الغلاف الجوى كان يتكون من نسبة تزيد عن 70% من ثانى اكسيد الكربون، ولذلك خلق الله العشب أولاً من أجل عمليات التمثيل الضوئى لتخليق الأكسجين.

وقد نتج هذا الأكسجين الأولي عن ظهور عائلة من الكائنات الدقيقة تُسمى البكتيريا الزرقاء. كلمة "زرقاء" تعني "أزرق"، وتتميز هذه الخلايا بلونها الأزرق المخضر. ولا يزال أصل هذه الكائنات مجهولًا كانت البكتيريا الزرقاء قادرة على استخدام ثاني أكسيد الكربون، وتحليل الماء إلى جزيئاته المكونة له، الهيدروجين والأكسجين. معادلة نموذجية هي: $6 + CO2 + 6H2O$ energy = $C6H12O6 + 6O2$ يتحد الهيدروجين مع الكربون لتكوين مجموعة متنوعة من الهيدروكربونات، بينما يُطرح الأكسجين كناتج ثانوي غير مرغوب فيه.

https://coptic-treasures.com/

تم اكتشاف مصدر كبير آخر للأكسجين في المحيطات مؤخرًا. هذا المصدر هو الكائن الحي الدقيق البحري، البروكلوروكوكس Prochlorococcus، الذي يعتقد بعض الباحثين، نظرًا لوفرته، أنه ينتج كمية من الأكسجين تفوق ما تنتجه البكتيريا الزرقاء. وقد عُثر على كميات هائلة من هذا الكائن الحي، الذي لم يُدرس سابقًا، في المحيطات الرئيسية حول العالم، بما في ذلك المحيط الهادئ والمحيط الأطلسي والمحيط الجنوبي. يُعتقد حاليًا أن البروكلوروكوكس هو أكثر الكائنات الحية الضوئية وفرةً في المحيطات اليوم. ولذلك سبق خلق الكائنات البحرية والزواحف سبق خلق البهائم.

أن علماء الفلك قد رصدوا تكون القمر من قرص يدور حول كوكبه وهذه الكشف ربما يكون أقرب إلى الواقع، لأنه غير ممكن أن يكون القمر قد تشكل من التصادم أو من الإنشطار الكوكبى أو من الأستحواذ، لأننا كما نرى يذكر سفر التكوين أن النباتات قد خلق فى اليوم الثالث، أى قبل اكتمال نمو الشمس والقمر، ولذلك كيف ينمو النبات فى نفس الوقت الذى تحدث فيه تطورات عنيفة على كوكب الأرض.

لكن ما تم رصده حول تكوين قمر من القرص الذى يدور حول كوكبه هى أقرب إلى الواقع، حيث أنه تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار. وكما ذكر فى ههذا البحث خير دليل هو أشباه الأقمار التى لازالت تحيط بالكرة الأرضية حتى الآن

تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار.

الأقمار الشبحية - إن وُجدت فعلاً - هي سحب غبارية دوّامية تشارك الأرض مدارها، فتتقدمها أو تتأخر عنها أثناء دورانها حول الشمس. تُعرف رسمياً باسم "سحب كورديلفسكي"، وقد رُصدت الأقمار الشبحية لأول مرة في ستينيات القرن الماضي، ولم يتم تأكيد وجودها إلا بشكل مبدئي في عام 2018. ولا يزال الجدل قائماً حول وجود هذه السحب من عدمه. ومن المحتمل أن تظهر وتختفي تبعاً لتأثير الشمس والكواكب. من هنا نفهم أن الأقمار قد نشأت وتكونت مع كواكبها.

عندما تشكّل القمر لأول مرة قبل حوالي 4.5 مليار سنة، كان طول اليوم أقل من 10 ساعات. لكن منذ ذلك الحين، أدى تأثير جاذبية القمر على الأرض إلى إبطاء دوران كوكبنا، يُبطئ القمر دوران الأرض عن طريق جذبه لمحيطاتها، مُحدثًا انتفاخات

https://coptic-treasures.com/

مدّية على جانبي الكوكب، والتي نشهدها على شكل مدّ وجزر. تعمل جاذبية القمر على هذه الانتفاخات، بالإضافة إلى الاحتكاك بين المدّ وقاع المحيط، كمكابح لكوكبنا الدوّار. يقول موراي Murray: "يُنتج ضوء الشمس أيضًا مدًّا جويًا بنفس نوع الانتفاخات. تجذب جاذبية الشمس هذه الانتفاخات الجوية، مُحدثةً عزم دوران على الأرض. ولكن بدلًا من إبطاء دوران الأرض كما يفعل القمر، فإنه يُسرّعه." على مدار معظم تاريخ الأرض الجيولوجي، تفوقت ظاهرة المد والجزر القمري على ظاهرة المد والجزر الشمسي بنحو عشرة أضعاف؛ ومن هنا، تباطأت سرعة دوران الأرض وازداد طول النهار.

"14 وَقَالَ اللهُ: «لِتَكُنْ יְהִי أَنْوَارٌ فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتَفْصِلَ بَيْنَ והיו לאתת النَّهَارِ وَاللَّيْلِ، وَتَكُونَ لآيَاتٍ
והיו לאתת وَأَوْقَاتٍ وَأَيَّامٍ وَسِنِينٍ. 15 وَتَكُونَ أَنْوَارًا فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ». وَكَانَ كَذلِكَ.
16 فَعَمِلَ ויעש اللهُ אלהים النُّورَيْنِ الْعَظِيمَيْنِ את־שני המארת הגדלים: النُّورَ الأَكْبَرَ لِحُكْمِ النَّهَارِ،
وَالنُّورَ الأَصْغَرَ لِحُكْمِ اللَّيْلِ، وَالنُّجُومَ. 17 وَجَعَلَهَا اللهُ فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتُنِيرَ عَلَى الأَرْضِ، 18 وَلِتَحْكُمَ عَلَى
النَّهَارِ وَاللَّيْلِ، وَلِتَفْصِلَ بَيْنَ النُّورِ وَالظُّلْمَةِ. وَرَأَى اللهُ ذلِكَ أَنَّهُ حَسَنٌ. 19 وَكَانَ مَسَاءٌ وَكَانَ صَبَاحٌ يَوْمًا رَابِعًا."

تكوين 1:14-19

كما ذكر أن الفعل ברא استخدم فى الآية الأولى لأنه يعبر يستخدم فى الخلق المطلق، وهذا الفعل يستخدم مع عمل الله فى الخلق ولا يستخدم مع عمل البشر، فكلمة ברא هي دائمًا فعل إلهي، ويُستخدم فعل בָּרָא للدلالة على الإبداع الإلهي، ويُشير إلى شيء جديد أو غير مسبوق، وعلى عكس الفعل ויעש، الذى يعني صنع (شيء من عناصر موجودة) كما فى الآية " فَعَمِلَ اللهُ الْجَلَدَ، ..." تك 7:1، وكذلك "فَعَمِلَ اللهُ النُّورَيْنِ الْعَظِيمَيْنِ ..." تك 16:1، وكما ذكرنا استخدم الفعل (عمل ויעש) فى هذه الآية والذى يدل على صنع شيء من عناصر موجودة بالفعل أى أن الشمس والقمر كانا موجودان قبل اليوم الرابع. وإنما المقصود هو أن تكون هذه االأنوار ثابته ومحددة لتنظيم الأوقات الليل والنهار والأيام والسنين، الأجرام السماوية (الشمس والقمر والنجوم) خُلقت في حقيقتها منذ اليوم الأول، ولكن الله أمرها في اليوم الرابع بأن تتدلى وتتثبت في السماء لتبدأ وظيفتها الظاهرة للبشر وتنظيم الوقت على الأرض.، سعديا الفيومي من الربانيين يقول أن الضمير في והיו לאתת تكون لآيات، يعود على النهار والليل المذكورين قبله، ومن ثم فسرها بأن النهار والليل هما الآيات والعلامات للأوقات والأعياد وليس الشمس والقمر. أنظر آخر المقال للتعرف على التفسيرات العلمية

https://coptic-treasures.com/

بخصوص المصطلح العبري יְהִי، بمعنى "أن يكون" أو "أن يحدث" أو "أن يقع". بما أن النور قد خُلق بالفعل في اليوم الأول، وبما أن هناك صلة وثيقة بين اليوم الأول واليوم الرابع، فلا داعي، بل لا ينبغي لنا، أن ننظر إلى استخدام الفعل הָיָה في اليوم الرابع على أنه يشير إلى فعل خلق جديد؛ أي فعل إيجاد شيء أو مجموعة أشياء لم تكن موجودة من قبل. بالنظر إلى تعدد معاني هذا الفعل العبري، فضلاً عن كون رواية الخلق مكتوبة من منظور مراقب يقف على الأرض، يبدو من الجائز تمامًا فهم مصطلح הָיָה، المستخدم لوصف أحداث اليوم الرابع من الخلق، بمعنى "ليظهر"، وهو مرادف لـ "ليظهر الآن".

فجوهر اليوم الرابع هو: لتظهر الأنوار الآن وتبدأ وظيفتها كحاملات للنور ومؤشرات للوقت على الأرض. بصيغة موسعة، يمكننا التعبير عنها كالتالي: لتكن الآن (مع استخدام الفعل العبري הָיָה بمعنى "لتظهر الآن"، وليس بمعنى "لتوجد الآن" أنوار في رحاب السماء لتمييز الليل والنهار ولتكون مؤشرات للوقت على الأرض. والطريقة التي يتحقق بها هذا الأمر الإلهي هي أن تصبح هذه الأنوار التي خُلقت سابقًا مرئية.

الشمس الفتية الخافتة فى الثلاثة أيام الأولى للخليقة كانت تشع حوالي 60-70% فقط من طاقتها الحالية. لكن ما الفائدة الواجبة لأن تكون الشمس خافتة فى البداية، هناك أسباب كثيرة منها: كانت الشمس لازالت فى مرحلة التكاثف ولم تبدأ الاندماجات والانشطارات لذلك كان نجم الشمس معتماً في غضون الثانية الأولى من عمر الكون، أشارت الدراسات الحديثة إلى أن خفوت ضوء الشمس في بداياتها ربما لم يكن مشكلة على الإطلاق، بل كان عاملًا منقذًا. فلو كانت الشمس تمتلك ما بين 92% و95% من سطوعها الحالي قبل 4.5 مليار سنة، لكانت الأرض قد أصبحت شديدة الحرارة، مما كان سيؤدي إلى ما يُعرف بـ"الأرض البخارية"، حيث يعجز بخار الماء عن التكثف من الغلاف الجوي.

لكن ما تم رصده حول تكوين قمر من القرص الذى يدور حول كوكبه هى أقرب إلى الواقع، حيث أنه تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار. وكما ذكر فى ههذا البحث خير دليل هو أشباه الأقمار التى لازالت تحيط بالكرة الأرضية حتى الآن

عندما تشكّل القمر لأول مرة قبل حوالي 4.5 مليار سنة، كان طول اليوم أقل من 10 ساعات. لكن منذ ذلك الحين، أدى تأثير جاذبية القمر على الأرض إلى إبطاء دوران كوكبنا، مما نتج عنه يوم أطول فأطول. واليوم، يستمر طول اليوم في الازدياد بمعدل 1.7 مللي ثانية تقريبًا كل قرن. يُبطئ القمر دوران الأرض عن طريق جذبه لمحيطاتها، مُحدثًا انتفاخات مدّية على جانبي الكوكب، والتي نشهدها على شكل مدّ وجزر. تعمل جاذبية القمر على هذه الانتفاخات، بالإضافة إلى الاحتكاك بين المدّ وقاع

https://coptic-treasures.com/

المحيط، كمكابح لكوكبنا الدوّار. يقول موراي Murray: "يُنتج ضوء الشمس أيضًا مدًّا جويًا بنفس نوع الانتفاخات. تجذب جاذبية الشمس هذه الانتفاخات الجوية، مُحدثةً عزم دوران على الأرض. ولكن بدلًا من إبطاء دوران الأرض كما يفعل القمر، فإنه يُسرّعه." على مدار معظم تاريخ الأرض الجيولوجي، تفوقت ظاهرة المد والجزر القمري على ظاهرة المد والجزر الشمسي بنحو عشرة أضعاف؛ ومن هنا، تباطأت سرعة دوران الأرض وازداد طول النهار. في البداية، كان القمر على مسافة تعادل ثلاثة أضعاف نصف قطر الأرض، مباشرة بعد حد روش". بناءً على هذه المسافة والزخم الزاوي المُقدَّر، يُمكن القول إن النهار كان يدوم أربع ساعات فقط. مع مرور الوقت، ابتعد القمر وزاد طول النهار: عندما كان عمر الكوكب وقمره 30 ألف عام، كان النهار يدوم ست ساعات؛ وعندما بلغ عمرهما 60 مليون عام، أصبح النهار يدوم عشر ساعات. ظهرت أولى دلائل الحياة قبل 3.5 مليار سنة، عندما كان طول النهار 12 ساعة. وظهرت عملية التمثيل الضوئي قبل 2.5 مليار سنة، عندما كان طول النهار 18 ساعة. وقبل 1.7 مليار سنة، أصبح طول النهار 21 ساعة، وظهرت الخلايا حقيقية النواة. وبدأت الحياة متعددة الخلايا قبل 1.2 مليار سنة، عندما أصبح طول النهار 23 ساعة. وظهر أسلاف الإنسان الأوائل قبل 4 ملايين سنة، عندما كان طول النهار قريبًا جدًا من 24 ساعة.

مما سبق يتبين لنا أن القمر قد نشأ وبدأ تكوينه مع بداية نشأة الأرض فى اليوم الأول، فالقمر ساهم فى ارتفاع درجة حرارة الأرض وبدونه كانت ستصبح الأرض كرة جليدية, وكذلك القمر ساهم فى تشكيل الأررض بشكلها الحالى وانتظام دوران الأرض ومن ثم انتظام الليل والنهار والأيام والسنين، كذلك القمر كان يمتلك مجالًا مغناطيسيًا قويًا قبل حوالي أربعة مليارات سنة، حمى الأرض الفتية، عمل هذا المجال كدرع ثانٍ لحماية الغلاف الجوي للأرض من أشعة الشمس الفتية المتقلبة. لذلك كان لابد أن القمر أن يكون قد نشأ وتكون جنباً إلى جنب مع الأرض، أن علماء الفلك قد رصدوا تكون القمر من قرص يدور حول كوكبه وهذه الكشف ربما يكون أقرب إلى الواقع، لأنه غير ممكن أن يكون القمر قد تشكل من التصادم أو من الإنشطار الكوكبى أو من الأستحواذ، لأننا كما نرى يذكر سفر التكوين أن النباتات قد خلق فى اليوم الثالث، أى قبل اكتمال نمو الشمس والقمر، ولذلك كيف ينمو النبات فى نفس الوقت الذى تحدث فيه تطورات عنيفة على كوكب الأرض. حيث أنه تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار.

https://coptic-treasures.com/

دراسة للنصوص العبرية

https://coptic-treasures.com/

يبدأ الكتاب المقدس بهذه الكلمات المألوفة: בראשית ברא אלהים את השמימואת הארץ، والتي تُترجم غالبًا إلى: " فِي الْبَدْءِ خَلَقَ اللهُ السَّمَاوَاتِ وَالأَرْضَ". في الواقع، يُعدّ سفر التكوين 1:1 أساس الكتاب المقدس، ولذا فإنّ الفهم الصحيح لهذه الآية أمرٌ بالغ الأهمية.

يعتمد تحديد كيفية قراءة الآية الأولى بشكل أساسي على فهم الكلمة الافتتاحية **בראשית.** ويستند الرأي القائل بأن الآية الأولى جملة تابعة ("عندما بدأ الله في الخلق...") إلى فهم أن في حالة الإضافة. وتتمثل الحجة الرئيسية لهذا الرأي في غياب أداة التعريف في בְּרֵאשִׁית وحقيقة أن ראשית تظهر في الغالب في الكتاب المقدس العبري في حالة الإضافة. ومع ذلك، فبينما تظهر ראשית عادةً في الكتاب المقدس العبري في حالة الإضافة، فإنها تظهر أيضًا في حالة المفعول المطلق بدون أداة التعريف (مثل إشعياء 10:46). وبالتالي، فإن عدم وجود أداة تعريف مع ראשית لا يعني بالضرورة أنها في حالة الإضافة. بمعنى آخر، ليست أداة التعريف ضرورية للدلالة على الحالة المطلقة. علاوة على ذلك، غالبًا ما تفتقر دلالات الزمن في التعبيرات الظرفية إلى أداة التعريف[1]. لاحظ هايدل Heidel ، على سبيل المثال، أن مصطلحات مثل רֵאשִׁית (بداية)، وראֹשׁ (رأس، بداية)، وקֶדֶם (العصور القديمة)، وעֹלָם (إلى الأبد، الأبدية)، "عند استخدامها في التعبيرات الظرفية، تأتي دائمًا تقريبًا بدون أداة التعريف، وذلك في الحالة المطلقة"[2].

حرفيًا، يشير مصطلح בראשית (berēshîṯ) إلى البداية المطلقة للمخلوقات، ربما بمعنى البدء أو التأسيس. ويمكن استخلاص سببين على الأقل يدعمان فكرة أن berēshîṯ تؤكد على البداية المطلقة للمخلوقات. أولًا، ترجمها مترجمو[3] السبعينية بـ Ἐν ἀρχῇ ، وهو تعبير ورد أيضًا في بداية إنجيل يوحنا (1:1). ثانيًا، إن اعتبار هذا التعبير بداية مطلقة للخلق يُسهّل فهم الفكرة ويجعلها منطقية. مع ذلك، يبدو أن berēshîṯ تعني "في بدء" وليس "في البدء". إذا صحّ هذا، فينبغي ربط الآية 1 بالآية 3 لنحصل على الترجمة التالية: "في بدء خلق الله السماوات والأرض، قال الله ليكن...". في هذا السياق، تشير berēshîṯ إلى "بداية" الزمن نفسه، وليس إلى لحظة ما في الأزل. قبل البداية، كان الله موجودًا[4].

---

[1] Eduard König, Historisch-Comparative Syntax der Hebräischen Sprache (Leipzig: J. C. Hinrichs, 1897), 287; idem, Die Genesis: Eingeleitet, Übersetzt und Erklärt (Gütersloh: Bertelsmann, 1919), 130

[2] Alexander Heidel, The Babylonian Genesis (Chicago: University of Chicago Press, 1951), P. 92

[3] Cuthbert A. Simpson, “Genesis” in George Arthur Buttrick (ed.), The Interpreter’s Bible Vol. 1 (New York: Abingdon Press, 1956), 466

[4] Simpson, “Genesis”, 466

https://coptic-treasures.com/

إضافةً إلى ذلك، لا يُلزم شكل كلمة ראשית ولا السياق بفهمها على أنها بناءٌ مُصطنع. في الواقع "يُرجّح السياقُ الحالةَ المُطلقة"[1]. ويلاحظ على سبيل المثال، أن "سياق كلمة בראשית في بداية سرد تاريخ العالم يُضفي عليها معنىً مُطلقًا مناسبًا للغاية هنا"[2].

في سياق الآية الأولى، يبدو أن الجناس בראשית ברא يربط مفهوم בראשית (في البدء) بـ ברא (خلق)، وهو مصطلح (عند استخدامه في صيغة قال) يُستخدم حصراً للدلالة على الفعل الإلهي. كما أن الفعل ברא هو الكلمة الأنسب للتعبير عن الخلق المطلق. ويبدو أن ربط هذا المصطلح بـ בראשית هنا في الآية الأولى يُعبّر عن فكرة أن البدء كان بفعل إلهي[3].

من المهم أيضًا أن الفهم التقليدي، "في البدء خلق الله السماوات والأرض"، مدعومٌ بالترجمة السبعينية: " Εν αρχη εποιησεν ο θεος τον ουρανον και την γην" ما يعني أن الآية الأولى من سفر التكوين 1:1 جملة مستقلة (رئيسية)[4]، وإن اعتبار الآية الأولى جملة تابعة غير مقنع. تشير الأدلة بقوة إلى الرأي التقليدي القائل بأن الآية الأولى جملة مستقلة. وبالتالي، لا يسمح علم الكونيات التوراتي بوجود المادة قبل الخلق. الآية الأولى بمثابة إعلان عن الخلق المطلق "في البدء خلق الله السماوات والأرض".

الفعل היתה في الجملة الافتتاحية للآية الثانية يُتيح فكرة التسلسل الزمني بين الآيتين الأولى والثانية (في البدء خلق الله السماوات والأرض. ثم كانت الأرض خربةً غير مُشكَّلة وغير مملوءة...). كذلك، تُفهم عبارة תהו ובהו (خربةً غير مُشكَّلة وغير مملوءة).

تكوين 1:1 يصف فعل الخلق الأول بفعل يبدأ بـ ברא، وأن أفعال الخلق اللاحقة تُوصف بأفعال تبدأ بـ ויאמר بدءًا من تكوين 3:1 يُلاحظ أن أول فعل يبدأ بـ ויאמר ورد في تكوين 3:1. علاوة على ذلك، يبدأ كل يوم من أيام عمل أسبوع الخلق التالية (الأيام ٢-٦) بنفس الفعل ויאמר (تكوين 1: 6،9،14،20،24). ويفهم أن الفعل المضارع الذي يصف فعل الخلق الأصلي في الآية الأولى يعمل كفعلٍ سابقٍ للزمن.

من النص، تتكون الكلمة الأولى בראשית (بِريشِت) من حرف جرّ، be، بمعنى "في"، بالإضافة إلى اسم، re'shit، بمعنى "بداية" أو "رئيسي"، يعمل كـ "من" (علاقة بناء أو ملكية) مع ما يليه[5]. هذا يعني أن حرف الجرّ be يُستخدم بمعنى

[1] Young, Studies in Genesis One, 6
[2] Wenham, Genesis 1–15, 12
[3] Young, Studies in Genesis One, 7
[4] Claus Westermann, Genesis 1–11 (trans. John J. Scullion; Minneapolis: Fortress, 1994), 94
[5] Mark S Smith, The Priestly Vision of Genesis 1 (Fortress Press, 2010), 44

https://coptic-treasures.com/

ظرفي زمني. لذلك، ينبغي اعتبار الجملة جملةً زمنيةً مشروطة. يشير هذا إلى أن كلمة bereshit، في علاقتها بالجزء الآخر من الجملة الأولى، يجب فهمها على أنها تُعبّر عن علاقة زمنية ضمن الجملة. وبهذا المعنى، ينبغي اعتبار الجملة الأولى زمنية[1].

علاوة على ذلك، فإن عبارة "خلق الله" ברא אלהים متبوعة بجملة موصولة لا تستخدم ضميرًا موصولًا (مثل "الذي" أو "التي")[2]. تُعرّف هذه العبارة الاسم الذي يسبقها أو تُحدّده. وهذا يجعل ترجمة الجملة الأولى تابعة أو معتمدة على الجملة التي تليها. إضافة إلى ذلك، استُخدم مصطلح "خلق" (bārā) لوصف كلٍّ من أفعال الله التاريخية وأفعاله الإبداعية في البدء. وهذا يعني أن الله خالق الكون منذ البدء، بما في ذلك السماوات والأرض.

الفعل "بارا" يعني "خلق"، وهو يشير إلى الخلق التلقائي ومفهوم الخلق من العدم، إذ لا يُذكر معه أي شيء عن المواد. الفعل "بارا" يُترجم إلى صيغة الماضي التام (قال)، ما يصف فعلًا بسيطًا. كما أن "الخلق" يعني إيجاد شيء جديد تمامًا، أو ابتكار شيء جديد، أو اختراع شيء ما[3]. ويؤكد توماسي-أنكراه Twumasi-Ankrah وآخرون أن الفعل "بارا" في التراث اليهودي القديم كان يُستخدم لوصف قدرة الله الإبداعية التي من خلالها يُوجد أشياءً لم تكن موجودة من قبل. وهذا يُشير إلى أن أفعال الله الإبداعية لا تتطلب موادًا موجودة مسبقًا، بل تنبع فقط من قدرته وإرادته الإلهية. ويؤكد هذا القول فكرة أن أفعال الله الإبداعية لا تعتمد على أي شيء خارجي، بل تتضمن إيجاد شيء من العدم[4].

והארץ היתה תהו ובהו וחשך על־פני תהום ורוח אלהים מרחפת על־פני המים وَكَانَتِ الأَرْضُ خَرِبَةً وَخَالِيَةً، وَعَلَى وَجْهِ الْغَمْرِ ظُلْمَةٌ، وَرُوحُ اللهِ يَرِفُّ عَلَى وَجْهِ الْمِيَاهِ. في هذه الآية الثانية، تبرز أهمية وظيفة حرف العطف الأول ו (و). فمن النص، يتضح أن عبارة "وكانت الأرض" (و) تُشير إلى أن الآية الثانية جملة عطفية، يُحتمل أن تكون ظرفية أو مُرتبطة بالآية الثالثة. وهي تُصوّر حالة الأرض قبل أعمال الله الخالقة في الآية الثالثة، إذ كان الخلق عملية تدريجية[5]. وقد لاحظ هاملتون Hamilton أن الآية الثانية تصف الوضع قبل الخلق المُفصّل في الآيات من الثالثة فصاعدًا. ولأن جمل الآية الثانية ظرفية تُوسّع جملة الآية الأولى، فليس من الدقيق البدء بها كجملة جديدة، بل كجملة مُتصلة بالآية الأولى باستخدام حرف العطف " ו ". هذا يعني أنه بما أن الآية الاولى تعبر عن فكرة يتم توضيحها في الجزء الأول من الآية الثانية.[6]

---

[1] Cuthbert A. Simpson, “Genesis,” In George Arthur Buttrick (ed.), The Interpreter’s Bible 1 (New York: Abingdon Press, 1956), 466

[2] Smith, The Priestly Vision of Genesis 1, 44

[3] Paul Copan and William Lane Craig, Creation out of Nothing: A Biblical, Philosophical, and Scientific Exploration (Baker Academic, 2004), 25 citing Gerhard von Rad

[4] Twumasi-Ankrah et al., “An Analytical Study of the Translations of Genesis 1: 26-27 in the Akuapem-Twi Bible,” 52-53. 44 Gordon J Wenham, “Genesis 1-15, Word Biblical Commentary,” Waco, TX: Word Books, 1987, 12 Smith, The Priestly Vision of Genesis 1, 43

[5] Wenham, “Genesis 1-15, Word Biblical Commentary,” 15

[6] Hamilton, The New International Commentary on the Old Testament: The Book of Genesis, 117

https://coptic-treasures.com/

كلمة bārā، التي تُترجم إلى "خلق"، تُستخدم دائمًا فقط في سياق أعمال الله[1]. وبغض النظر عن هذا النص، يمكن استخلاص ملاحظتين أساسية حول "بارا". أولًا، الله هو دائمًا فاعل "بارا". لذا، فإن فعل الخلق إلهيٌّ حصرًا. ثانيًا، "كلما استُخدم الفعل، يكون مفعوله المباشر هو المنتج المخلوق، وليس المواد المستخدمة كوسيلة في الخلق". ووفقًا لغيرهارد فون راد، "من الصحيح القول إن فعل "بارا" (bara)، بمعنى "خلق"[2]، يحمل فكرة كلٍّ من السهولة التامة والخلق من العدم، لأنه لا يرتبط أبدًا بأي ذكر للمادة". كلمة "بارا" لا تستبعد بحد ذاتها استخدام المواد الموجودة استبعادًا قاطعًا[3]. ومع ذلك، لا يُفهم ضمنيًا وجود أي مادة إذا لم تُذكر أي مادة ليتم العمل عليها. لذلك، على الرغم من أن فكرة الخلق من العدم غير مذكورة صراحةً، إلا أنه يمكن استنتاجها من كلمة "بارا". لم يكن للكون وجود سابق لهذا الفعل الخلقي البدائي لله. وهذا يعني أن الكون ليس أزليًا. لم يوجد الكون إلا عندما أمره الله بالوجود.

تشير عبارة السماوات والأرض אֵת הַשָּׁמַיִם וְאֵת הָאָרֶץ إلى "مجمل الكون المنظم". وبما أن كلمة أرض אֶרֶץ في سفر التكوين 2:1 تصف كونًا غير مكتمل وغير منظم بعد، فلا يمكن أن تتطابق مع كلمة أرض אֶרֶץ في سفر التكوين 1:1 التي، عند اقترانها بكلمة سماء שָׁמַיִם، تصف كونًا مكتملًا ومنظمًا. في الوقت نفسه، لا تحمل كلمة הָאָרֶץ نفس الدلالة التي كانت تحملها في الآية الأولى. ففي الآية الأولى، اقترنت بكلمة السماء הַשָּׁמַיִם لتشكيل تركيبة تدل على العالم والكون المنظمين اللذين نعرفهما الآن. لكن في الآية الثانية، يصور النص الأرض على أنها في حالة غير صالحة للسكن[4].

أن كلمة אֶרֶץ قد تشير إلى الوعاء ومحتويات كل ما هو أسفل הַשָּׁמַיִם ، يبدو أن كلمة הַשָּׁמַיִם قد تشير أيضًا إلى الوعاء ومحتويات كل ما هو أعلى אֶרֶץ. وبالتالي، فإن كلمة הַשָּׁמַיִם ، بحد ذاتها، قد تشير إلى النصف الآخر من كل ما قيل إنه خُلق

تم تحليل عبارة אֵת הַשָּׁמַיִם וְאֵת הָאָרֶץ لإثبات أن كلمة אֶרֶץ في سفر التكوين 1:1 قد تتطابق في معناها مع كلمة אֶרֶץ في سفر التكوين 2:1. يشير هذا الترابط الدلالي المحتمل بين الكلمتين، بالإضافة إلى تقاربهما، بقوة إلى وجود علاقة دلالية ونحوية بين سفر التكوين 1:1 و2:1. أولًا، يُقدّم سفر التكوين 1:1 أول فعل إبداعي لله في الرواية.

[1] Claus Westermann, Genesis translated by David E. Green (London: T8.T Clark International, 2004), 8

[2] Victor P. Hamilton, Handbook on the Pentateuch: Genesis, Exodus, Leviticus, Numbers, Deuteronomy (Grand Rapids, MI: Baker Book House, 1982), np

[3] Gerhard von Rad as cited by Paul Copan and William Lane Craig, Creation Out of Nothing: A Biblical, Philosophical, and Scientific Exploration (Leicester: Inter-Varsity Press, 2004), 25

[4] Young, Edward J. 1961. “The Interpretation of Genesis 1:2.” Westminster Theological Journal 23, no. 2 (May): 168

https://coptic-treasures.com/

ثم يصف تكوين 2:1 هذا الخلق الأولي المذكور في سفر التكوين 1:1 بأنه غير مكتمل. بعد ذلك، يصف ما تبقى من رواية الخلق كيف شكّل الله هذا الخلق الأولي غير المكتمل في سفر التكوين 1:1، وكيف أضاف إليه[1].

أدى هذا التفسير لسفر التكوين ١:١، في سياقه الدلالي المتصل بسفر التكوين 2:1، وضمن السياق الأوسع لقصة الخلق، إلى استنتاج علماء مسيحيين ويهود على مر العصور بأن الله خلق العالم من العدم. ولأن سفر التكوين ١:١ لا يصف وجود أي شيء قبل الخلق الأول، باستثناء الله نفسه، فقد استنتج المفسرون منطقيًا أن الله خلق العالم من العدم. وهكذا، فإن عقيدة الخلق من العدم هي قراءة لاهوتية متأصلة في الآيات الأولى من الكتاب المقدس.

الكلمة الأولى هي בראשית (بِرِشِت). كلمة ראשית (بِرِشِت) (Strong's lexicon No. H7225) تعني "البداية" أو "الأول". تُستخدم هذه الكلمة لاحقًا في سفر التكوين 10 عندما يخبرنا الله عن نمرود ومملكته الأولى: "وكانت بداية مملكته بابل وأوروك وأكاد وكلنة في أرض شنعار" (تكوين 10:10). نعلم أن مملكة نمرود انتهت عندما بلبل الله الألسنة عند برج بابل.

حاول العديد ممن كتبوا عن سفر التكوين 1 التمييز بشكلٍ دقيق بين كلمتين عبريتين وردتا فيه: (בָּרָא، بمعنى خلق) و (עָשָׂה، بمعنى صنع أو فعل). يقبل كلٌّ من التطوريين الإلهيين وأنصار الخلق القديم ملايين السنين التي تنادي بها المؤسسة العلمية (مع أن أنصار الخلق القديم لا يقبلون نظرية التطور الداروينية الحديثة، بينما يقبلها التطوريون الإلهيون). ويحاولون أحيانًا تبرير قبول ملايين السنين بالقول إن كلمة برا تشير إلى الخلق الخارق للطبيعة من العدم (كلمة لاتينية تعني "من لا شيء")، بينما تعني كلمة عَسَة الصنع من مادة موجودة مسبقًا، وبالتالي تسمح بالخلق على مدى فترة زمنية طويلة. ويقول هؤلاء إن أحداث الخلق الخارقة للطبيعة الوحيدة كانت متعلقة بالسماوات والأرض (تكوين 1:1)، ومخلوقات البحر والطيور (21:1)، وآدم وحواء (27:1). بما أن كلمة "asah" تستخدم لجميع الأعمال الإبداعية الأخرى في سفر التكوين 1، فمن الممكن أن تكون تلك الأعمال عمليات إبداعية على مدار ملايين السنين[2].

لتشكيل أو خلق בָּרָא : ('bara)		أن يفعل أو يصنع עָשָׂה : ('asa)	
تك 1:1	خلق السماوات والأرض	تك 7:1	عمل الجلد
تك 21:1	خلق الكائنات البحرية والطيور	تك 16:1	عمل الشمس والقمر والنجوم
تك 27:1	خلق الإنسان (آدم وحواء)	تك 25:1	عمل جميع المخلوقات البرية
تك 3:2	خلق وصنع جميع أعماله	تك 4:2	عمل الأرض والسماوات
تك 4:2	خلق السماوات والأرض	تك 1:3	حيوانات البرية التي عملها الرب

[1] Wilson, Joshua. 2023. "Genesis 1:1–2 and the Doctrine of Creatio Ex Nihilo (Part 1): A Lexical Analysis of the Phrase אֵת הַשָּׁמַיִם וְאֵת הָאָרֶץ." Answers Research Journal 16 (June 7): 265–281.

[2] Answers in Depth, Vol. 2(2007), pp. 138–139

https://coptic-treasures.com/

تك 1:5	خلق الانسان	تك 7:3	عملا مآزر من أوراق التين
تك 2:5	خُلق الذكر والأنثى	تك 21:3	ملابس مصنوعة من جلود الحيوانات
مز 47:89	خلق جميع بني البشر	تك 22:6	عمل نوح الفلك
مز 30:104	ترسل روحك فتخلق ... الأرض	تك 4:7	وأمحو عن وجه الأرض كل قائم عملته
مز 5:148	خلق السماوات	اش 2:20	ففعل هكذا ومشى معرى وحافيا
اش 26:40	خلق النجوم و الأشجار والأنهار		
اش 16:54	خلق الحداد		

يظهر الجذر العبري ב-ר-א (ب-ر-ع) في صيغة قال (صيغة الفعل الأساسية في اللغة العبرية) في سفر التكوين 1:1 كفعل تام، مما يدل على حدث مكتمل. يظهر هذا الجذر، بجميع صيغه الفعلية في الكتاب المقدس العبري، حوالي 54 مرة في 46 آية. أما في صيغة قال - الصيغة الأساسية للفعل - فيظهر الفعل حوالي 38 مرة[1].

ما يجعل فعل ברא مميزًا ليس كثرة استخدامه، بل حصريته. ففي كل مرة يظهر فيها الفعل في صيغة "قال"، يكون الفاعل هو الله. البشر لا يستخدمون "بارا" أبدًا. فهم يصنعون، ويشكلون، ويبنون، لكنهم لا يستخدمون ברא. هذا الفعل مخصص حصريًا للفعل الإلهي. وهذا يُخبرنا بشيء مهم حتى قبل أن نتناول نطاق معنى الكلمة: أيًا كان ما يدل عليه "بارا"، فهو يصف شيئًا يفعله الله وحده. يحمل هذا الفعل ثقلًا لاهوتيًا لا يشاركه فيه أي فعل خلق عبري آخر[2].

أولاً، كلمة ברא هي دائمًا فعل إلهي، وليست فعلًا بشريًا. ثانيًا، لا تصف دائمًا الخلق المادي. فالظلام، والمصائب، والقلب الطاهر، والريح ليست أشياء مادية وُجدت من مواد خام. ثالثًا، غالبًا ما تؤكد الكلمة على الحداثة، والسيادة الإلهية، والغاية. والخيط الذي يربط كل استخدام لها هو أن الله يفعل شيئًا لا يقدر عليه إلا هو، شيئًا حاسمًا، وذا سلطة، وغالبًا ما يكون غير مسبوق.

يُستخدم فعل (בָּרָא) للدلالة على الإبداع الإلهي، وغالبًا ما يُشير إلى شيء جديد أو غير مسبوق. أما (עָשָׂה) فهي الكلمة العبرية العامة التي تعني "يصنع" أو "يفعل"، وقد وردت آلاف المرات في الكتاب المقدس العبري من قِبل الله والبشر. يستخدم سفر التكوين 1 كلا الفعلين، أحيانًا بشكل متقارب، لكنه يُخصّص בָּרָא للحظات ذات دلالة إبداعية خاصة (كالكون، والكائنات البحرية، والبشرية).

[1] Francis Brown, S. R. Driver, and Charles A. Briggs, A Hebrew and English Lexicon of the Old Testament (Oxford: Clarendon Press, 1906), s.v בָּרָא

[2] Ludwig Koehler and Walter Baumgartner, The Hebrew and Aramaic Lexicon of the Old Testament, 2 vols., study ed. (Leiden: Brill, 2001), s.v "ברא"
Gordon J. Wenham, Genesis 1–15, Word Biblical Commentary (Waco, TX: Word Books, 1987), 14

https://coptic-treasures.com/

يشير قاموس العبرية الكلاسيكية إلى أن هذا الفعل ברא يعني "دائمًا من الله". ويشير معجم العهد القديم العبري والآرامي، بتفصيل أكبر، إلى أن "الفعل ברא في العهد القديم مصطلح لاهوتي بامتياز، وموضوعه دائمًا هو الله". ويقولون ברא لأن لهذا الفعل كلمتين متجانستين، أي فعلين يستخدمان نفس الحروف الجذرية ولكنهما ليسا مرتبطين (أو يبدو أنهما ليسا كذلك). وردت عبارة ברא بمعنى "يسمنون" مرة واحدة فقط في الكتاب المقدس، في سفر صموئيل الأول 29:2، حيث اتهم عالي وأبناؤه بـ"أكل باكورة" ذبائح بني إسرائيل. وكلمة "أكل" هنا هي להבריאכם، ولا تحتاج إلى فهم قواعد اللغة أو معرفة اللغة العبرية لتحديد أن ברא هي جذر هذا الفعل. ومن المثير للدهشة أن "الباكورة" هي ראשית (ريشيت)، وهي نفس الكلمة التي رأيناها في בראשית ברא (بيريشيت بارا) بمعنى "في بداية خلق الله".

من الصعب تصديق أن هذا محض صدفة، لكن كلمة ברא، رغم ورودها مرة واحدة فقط في الكتاب المقدس كفعل، حقيقية؛ فهي تُعطينا الصفة בריא (باري) بمعنى "سمين" - كما في قصة الأبقار السمينة في حلم فرعون في سفر التكوين 41.

أما ברא فهي فعل بمعنى "قطع". وردت خمس مرات فقط، لكنها بالتأكيد فعلٌ يستطيع الإنسان القيام به. مع ذلك، ربط البعض هذا الجذر بـ ברא للإشارة إلى أن طريقة خلق الله لم تكن من العدم، بل كانت طريقة "لقطع" مادة بدائية إلى مختلف جوانب الخلق.

لكن في سفر التكوين 1، فالكلمات التي تتحدث عن "خلق" الله للسماء والأرض تُعامل هذا الفعل، الذي يُنسب إلى الله وحده، كمصطلح عام للغاية - لأنه، كما ذكرتُ قبل قليل، ليس هذا هو الفعل الذي استُخدم عند خلق السماء والأرض فعليًا. سنبدأ مناقشتنا حول ذلك، مع خلق السماء في اليوم الثاني، في المرة القادمة.

الفعل العبري עשה يعني "أن يفعل" أو "يصنع". ومن الاستخدامات الشائعة لهذا الفعل حثّ الناس على الطاعة، إما بفعل كل ما أمر به الله، كما في سفر التثنية 18:6، أو بتذكر ما فعله الله، كما في المزمور 1:98، استند مؤلفو الكتاب المقدس إلى استخدام كلمة עשה إما لإدانة الملك، كما في سفر الملوك الأول 25:16، أو لمدحه، كما في سفر الملوك الثاني 2:22.

وعندما تُستخدم كلمة עשה بمعنى "صنع"، فإنها تُؤكد على الشيء المخلوق، كما في سفر التكوين 6:8: "وَحَدَثَ مِنْ بَعْدِ أَرْبَعِينَ يَوْمًا أَنَّ نُوحًا فَتَحَ طَاقَةَ الْفُلْكِ الَّتِي كَانَ قَدْ عَمِلَهَا". لكن عندما يحدث نشاطٌ دون وجود مفعولٍ يُراد التركيز عليه، يُمكن ترجمة الفعل עשה ببساطة إلى "عمل"، كما في سفر راعوث 19:2: "فقالت لها حماتها: أين التقطتِ السنابل اليوم؟ وأين عملتِ؟ مباركٌ الرجل الذي لاحظكِ. فأخبرت حماتها بمن عملت معه، وقالت: اسم الرجل الذي عملت معه اليوم بوعز." والاسم מעשה بمعنى "فعل أو عمل"، مشتقٌ من هذا الجذر الفعلي.

https://coptic-treasures.com/

ברא : يُعدّ الفعل ברא (*bara' I*) من أكثر الأفعال غرابةً وصعوبةً في الفهم في الكتاب المقدس العبري، إذ يدلّ على فعل الله الخالق (تكوين 1:1، إشعياء 5:42، إرميا 22:31). وعلى عكس أفعال مثل יצר (*yasar*)، التي تعني تشكيل أو تكوين (شيء من شيء آخر)، أو ויעש (*'asa*)، التي تعني صنع (شيء من عناصر موجودة)، فإنّ الفعل ברא (*bara'*) يدلّ على الخلق من العدم. يصعب تخيّل هذا الخلق، ولكن ربما كان البئر أو النبع الذي يُخرج الماء من العدم استعارةً مناسبةً لأيّ قارئ عبري. قد لا يكون الفعل ברא (*bara'*) مرتبطًا لغويًا بالفعل באר (*ba'ar*) - الذي يعني التصريح أو الكتابة، وله مشتقات تتعلق بالآبار والينابيع - ولكن على الصعيد الشعري، يُمثل هذان الفعلان بالتأكيد ألوانًا متقاربة.

لذا، فإن فعلنا ברא (*bara'*) لا يرتبط كثيرًا بفعل יצר (*yasar*) أو ויעש (*'asa*)، بل يرتبط على الأرجح ارتباطًا وثيقًا بفعل דבר (*dabar*) الذي يعني الكلام أو النطق. نعلم أن خلق الله وكلامه متلازمان. ففي البدء كان الكلمة، وبه كان كل شيء (يوحنا 1: 1-3)، وقد علمنا موسى أن الإنسان لا يحيا بالخبز وحده، بل بكل كلمة تخرج من فم الرب (تثنية 8: 3، متى 4: 4). يأتي هذا الفعل من مشتق واضح واحد: الاسم المؤنث בריאה (beri'a)، الذي يدل على الخلق، أو ربما "شيء جديد تمامًا". وقد ورد استخدامه مرة واحدة فقط، في سفر العدد 30:16، حيث يقترح موسى على الرب أن يبتكر "شيئًا جديدًا تمامًا" للتعامل مع قورح الثائر ورفاقه.

"وَكَانَتِ الأَرْضُ خَرِبَةً תהו وَخَالِيَةً ובהו ، ..." تكوين 2:1، كلمتا תהו ובהו هما زوج، حيث يعتمد أحدهما على الآخر، أو يتشابكان معاً. يحللها علماء الصرف كأسماء مذكرة. ومع ذلك، يمكن أيضاً تحليلها كأسماء مؤنثة بلاحقة مذكرة. كلمة תהו تعني (غير حقيقي، معوج، مزيف، فوضى #8414)، أما كلمة ובהו فتعني (فارغ أو خاوى #922).

تواجد الأنوار في جلد السماء قبل اليوم الرابع بحسب النص

أول ما خُلق هو "النور" אור. يظهر هذا الاسم العبري 128 مرة في الكتاب المقدس العبري. ويظهر بكثرة في سفر أيوب (32 مرة) وسفر إشعياء (32 مرة)، ثم في سفر المزامير (19 مرة). في سفر التكوين، ترد هذه الكلمة 6 مرات، وجميعها في رواية الخلق الأولى: مرتين في تكوين 3:1، ومرتين في 4:1، ومرة واحدة في 5:1 و18:1. لم يصف النص كيفية خلق النور، أو كيف وُجد، بل ذكر فقط تنفيذ أمر الله، أي ظهور النور.

تشير الكلمة العبرية me'uruto מְאֹרֹת المشتقة من ma'or מָאוֹר إلى مصباح (خروج 6:25؛ 20:27؛ 8:35؛ لاويين 2:24؛ عدد 4: 9،16). هذا المصباح ليس مصدرًا للضوء بحد ذاته، بل يجب أولًا سكب الزيت فيه ليضيء. وبالمثل، فإن

https://coptic-treasures.com/

المصابيح/الأنوار السماوية ليست مصدرًا للضوء، بل يأتي نورها من مكان آخر. فالشمس والقمر والنجوم لا تنقل إلا الضوء الموجود مسبقًا إلى الأرض، ومن ثم لا يوجد ضوء آخر غير ذلك الذي خُلق في اليوم الأول[1]. هذا الضوء نتج عن التكاثف السديمي وبداية تكون النجم الأولى وهذا ما سيتم شرحه في هذا البحث

الفعل *badal* (בָּדַל) يعني "يفصل". ورد هذا الفعل 42 مرة في الكتاب المقدس العبري. وقد استُخدم 32 مرة في صيغة hifil بمعنى "يقسم او يفصل"، و10 مرات في صيغة nifal (عدد 21:16؛ أخبار الأيام الأول 9:12؛ 13:23؛ عزرا 21:6؛ 1:9؛ 8:10، 11، 16؛ نحميا 2:9؛ 29:10) بمعنى "ينفصل، يُفصل، يُستبعد". ورد هذا الفعل *badal* (בָּדַל) 5 مرات في سفر التكوين. جميع هذه المواضع الخمسة وردت في رواية الخلق الأولى (تكوين 4:1، 6، 7، 14، 18)، وجميع الصيغ الفعلية الخمسة في صيغة الفعل المضارع البسيط. أهمية "الفصل" *badal* (בָּדַל). يشير فصل الله في تكوين 4:1 b إلى أن العالم المخلوق في عملية تطور مستمرة. لم ينتهِ الخلق بظهور النور ولا بتقييمه بأنه حسن[2].

يُعدّ الفصل ذا أهمية بالغة لخلق العالم المنظم، لأن نظام العالم المخلوق يقوم على الفصل والتمييز والتمايز. مع الفصل، تنتهي الوحدة البدئية (الحالة الفوضوية الأولى)، وتبدأ عملية التمايز التي يُؤسس من خلالها العالم المنظم، بشروطه المسبقة للحياة. يُنظر إلى العالم المخلوق في المقام الأول على أنه واقع متمايز ومنظم جيدًا، وبالتالي قابل للفهم.

باستثناء ما ورد في تكوين 4:1 b، ورد فعل "يفصل" *badal* (בָּדַל) أربع مرات أخرى في قصة الخلق الأولى. يصف اثنان من هذه المواضع وظيفة الفلك في الفصل بين المياه التي تحته والمياه التي فوقه (تكوين 1: 6-7). كما أن للأضواء السماوية وظيفة الفصل بين الليل والنهار، وبين التقويم الزمني (تكوين 14:1)، وبين النور والظلام (تكوين 18:1).

لم يُستخدم فعل "يفصل" *badal* (בָּדַל) في قصة الخلق الثالثة (تكوين 1: 9-10)، لكن فكرة الفصل حاضرة هناك في جمع المياه وظهور اليابسة. وتظهر فكرة الفصل أيضًا في قصة الخلق الرابعة (تكوين 1: 11-12)، حيث تنبت النباتات من الأرض، ثم تُصنّف هذه النباتات حسب أنواعها (عشب، حبوب، ثمار). بحسب المؤلف Wénin، يتجلى الفصل أيضًا في تصنيف وتجميع المخلوقات إلى أنواع وأصناف، مثل: ثلاثة أنواع من الأنوار السماوية (تكوين 16:1)، وثلاث مجموعات من الكائنات الحية (تكوين 1: 20-21: وحوش البحر العظيمة، والأسماك، والطيور)، وثلاثة أنواع/فئات من الحيوانات على اليابسة (تكوين 1: 24-25: الماشية، والزواحف، والوحوش). يُعد الفصل، بوصفه إرساءً للتمييز، سمةً ثابتةً في عملية الخلق الإلهية في سفر التكوين 1. فمن خلال الفصل، تصبح جميع المخلوقات مختلفة، ويُخصص لها مكانها (المناسب)[3]. يُنشئ هذا الفصل بين النور

[1] Jacob Milgrom, The Alleged 'Hidden Light', p. 42 and 44 (
[2] Federico Giuntoli, Genesi 1,1–11,26, p. 79; cf. also Paul Beauchamp, Création et séparation. Étude exégétique du chapitre premier de la Genèse, Cerf, Paris 2005, p. 235.
[3] André Wénin, Da Adamo ad Abramo o l'errare dell'uomo, p. 23. Separation as differentiation assigns (

https://coptic-treasures.com/

والظلام في سفر التكوين 4:1 b إيقاع الزمن كجزء لا يتجزأ من العالم المخلوق. فجميع أعمال الخلق المتعاقبة - وكذلك تاريخها اللاحق - تجري ضمن هذا الإيقاع الزمني.

يُعدّ الفصل بين الأشياء ذا أهمية خاصة في أعمال الخلق الثلاثة الأولى، حيث تُنشأ ثلاث فئات وجودية: الأولى هي فئة الزمان (تكوين 1: 1-5)، واثنتان هما فئتا المكان (تكوين 1: 6-8: البُعد الرأسي للمكان؛ 1: 9-10: البُعد الأفقي للمكان). وتختلف استخدامات الفصل بين الأشياء الثلاثة الأولى. ففي العمل الأول (تكوين 4:1) يوجد فصل بين الواقع المخلوق (النور אור) والواقع غير المخلوق (الظلمة חֹשֶׁךְ). أما في العمل الثاني (تكوين 7:1) فقد تمّ الفصل بواسطة الواقع المخلوق (الجلد רָקִיעַ). في العمل الثالث من الخلق (تكوين 9:1)، يكشف الانفصال عن واقع جديد (الأرض اليابسة – يَبَّاشَة *ibshh* יַבָּשָׁה). يشير الانفصال في سفر التكوين 4:1 b إلى وجود العناصر السابقة، أي النور المخلوق (تكوين 3:1) والظلمة غير المخلوقة (تكوين 2:1 b)[1]. ووفقًا لجان لويس سكا، Jean-Louis Ska يعمل هذا الانفصال في 4:1 b كاستمرار تكميلي لفعل الخلق السابق بالكلمة[2] في تكوين 3:1.

في تكوين 1: 14-15، حيث تُواصل الجملتان التاليتان الحديث عن الأنوار، وتبدأ كل منهما بفعل الربط יהיה وتحتويان على عبارة حرف جرّية واحدة على الأقل تبدأ بحرف اللام. في كلتا الجملتين اللاحقتين، يُقدّم حرف اللام الأول بوضوح مُكمّل الفاعل. وبالتالي، يقع عبء الإثبات على عاتق من يُريد أن يُجادل بأن الحالة يجب أن تكون مختلفة في تكوين 14:1. ثانيًا، يُستخدم حرف اللام قبل الاسم אחת («علامات») في تكوين 1: 14 ب وقبل التعبير מאורת ברקיע השמים «أنوار في جلد السماء» في تكوين 15:1 أ كـ «لام lamed غرض»، والذي يتضمن عادةً فكرة تغيير الحالة أو الشكل. وبالتالي، ستكون الفكرة هي أن "الأضواء في اتساع السماء" تصبح "علامات" وتصبح "أضواء في اتساع السماء لتنير الأرض"، بدلاً من أن تكون موجودة في اليوم الرابع.

الاسم מועד هو اسم مشتق من الفعل الذي أحد تعريفاته هو "تحديد وقت أو مكان". وبالتالي، ليس من المستغرب أن يُعرَّف מועד بشكل مختلف على أنه "وقت أو مكان أو اجتماع مُعَدَّ"[3]، على الرغم من أن كلمة מועדים في سفر التكوين 14:1 تعني بوضوح "أوقات مُعَدَّة."

[1] Mark S. Smith, The Priestly Vision of Genesis 1, Fortress Press, Minneapolis (MN) 2010, p. 79, 91)
[2] Jean L'Hour, Genèse 1-2,4a, p. 99-101)
[3] Ludwig H. Koehler and Walter Baumgartner, Lexicon in Veteris Testamenti Libros (Leiden: Brill, 1985), 388, citing (2 Sam 20:5; Isa 47:7.

https://coptic-treasures.com/

يُستخدم مصطلح מועד بشكل متكرر كمصطلح تقني لعيد سنوي (على سبيل المثال، اللاويين 23؛ العدد 28-29)[1]. وبناءً على ذلك، ليس من المستغرب أن عددًا من العلماء قد فسروا كلمة מועדים في سفر التكوين 14:1 على أنها إشارة إلى أوقات مقدسة سنوية. ومع ذلك، يُستخدم المصطلح بشكل متكرر كدلالة على أشياء أخرى. أوقات محددة، بما في ذلك الإيقاعات الدورية للطبيعة، مثل هجرة الطيور. وبالتالي يطرح السؤال ما إذا كان سياق تكوين 14:1 يشير إلى نفس الدقة.

كلمة מועדים (تكوين 1: 14) من خلال الفهم للمصطلح السابق، אתת (علامات). فأن استخدام אחת يشير إلى "النور الروحي الأساسي لمجد الله"، ويخلص إلى أنه "يُقادنا... إلى أخذ المصطلح التالي، "المواسم"، في سياقه المتعلق بالعلامات الخاصة، وباعتباره يشير في المقام الأول إلى أوقات العبادة المُحددة".[2] من الواضح أنه يفترض أن "النور الروحي الأساسي لمجد الله" يمكن رؤيته بشكل أوضح بكثير في تحديد أوقات العبادة الخاصة منه في تحديد دورات الطبيعة. ومع ذلك، فإن هذا الافتراض يكشف عن ثنائية غير عبرية بين الطبيعة والنعمة، وهي ثنائية ينتقدها هو نفسه. يمكن أيضًا فهم "العلامات" في تكوين 1: 14 على أنها مبادئ تنظيمية وإرشادات للكون بدلاً من كونها علامات لمجد الله في حد ذاته.

في تعليقاته على سفر التكوين 14:1، يشير إي. أ. سبيسر E. A. Speiser إلى أنه "لا يمكن القول إن الشمس والقمر يحددان الفصول بدقة؛ علاوة على ذلك، سيكون الترتيب حينها غير متوازن[3]، لذلك يجادل بأن عبارات לאחת و למועדים تشكل ثنائية، وأن الرابط بين למועדים و לימים هو توضيحي، وأن الرابط بين לימים و שנים هو ربط، كما يتضح في الترجمة لسفر التكوين 14:1 ب.

لم يتناول سبيسر مسألة ما إذا كانت كلمة "מועדים" في سفر التكوين 14:1 تشير إلى أوقات مقدسة سنوية. قد يُجادل البعض بأن الشمس والقمر يُحددان وقت الاحتفال بها. مع ذلك، سيبقى الترتيب غير متوازن (إذ سيظل يتوقع أيامًا، و"מועדים" سنوات). بناءً على ذلك، لا يُفنّد هذا الاحتمال اقتراحه بأن العلاقات بين العلامات، و"מועדים" الأيام، والسنوات تُفهم على التوالي من حيث التكرار، والتفسير، والترابط.

يبدو أن هناك سببًا وجيهًا لتبني وجهة نظر سبيسر بشأن العلاقات بين أجزاء سفر التكوين 14:1 ب. من المهم في سياق نقاشنا أن كلمة "מועדים" في سفر التكوين 14:1 تُعرَّف هنا بأنها "أيام وسنوات" وليست "מקראי קדש"، كما في سفر اللاويين 37:23. في هذا السياق، تُمثل هذه الأيام الأيام الأربعة والعشرين المتتالية من الدورة الطبيعية، حيث يُحكم كل يوم منها جزئيًا بواسطة "النور الأصغر"، أي القمر، وجزئيًا بواسطة "النور الأكبر"، أي الشمس، تمامًا كما يتألف كل يوم من

[1] Jay P. Green, ed., The New Brown-Driver-Briggs-Gesenius Hebrew and English Lexicon with an Appendix Containing the Biblical Aramaic (Peabody, MA: Hendrickson, 1979), 417.

[2] James B. Jordan, Christianity and the Calendar: A Syllabus (Niceville, FL: Biblical Horizons, 1988), 81

[3] E. A. Speiser, Genesis, AB 1 (Garden City, NY: Doubleday, 1969), 6

https://coptic-treasures.com/

الأيام الستة في سفر التكوين 1 من مساء وصباح. ومن المناسب أيضًا تعريف "מועדים" بأنها "سنوات"، نظرًا لأن الدورات اليومية والسنوية هي الإيقاعات السائدة في العالم الطبيعي. من ناحية أخرى، لم تُصنَّف الأوقات المقدسة التي تستمر عامًا كاملًا، كالسنة السبتية واليوبيل، على أنها "מועדים" في العهد القديم. وتأكيداً لهذا الاستنتاج، تجدر الإشارة إلى أن الترجمة السبعينية تترجم كلمة מועדים إلى καιρούς ("أوقات") في سفر التكوين 14:1 وإلى καιρὸν ("وقت") في سفر إرميا 7:8، بدلاً من ἑορται ("أعياد") كما في سفر اللاويين 37:23.

أنه وفقًا لتكوين 14:1، فإن "الأضواء في جلد السماء" كانت موجودة قبل اليوم الرابع من أسبوع الخلق، لكنها اتخذت غرضًا جديدًا في ذلك الوقت. ويستند هذا الرأي إلى دليلين جوهريين. أولًا، يشير نمط استخدام فعل الربط وحرف الجر المضاف إليه لام lamed في تكوين 14:1 أ ، 15، إلى أن عبارة المصدر المضاف إليها لام lamed "להבדיל" في تكوين 14:1 أ يجب أن تُفهم على أنها وصف مباشر لفعل الربط وليس فاعل الجملة. ثانيًا، استُخدمت اللام lamed قبل الاسم אחת في تكوين 14:1 ب، وقبل عبارة מאורת ברקיע השמים في تكوين 15:1 أ، كـ"لام lamed ذات غاية"، مما يوحي بأن الأنوار ببساطة تُصبح شيئًا جديدًا، بدلًا من أن تكون موجودة لأول مرة.

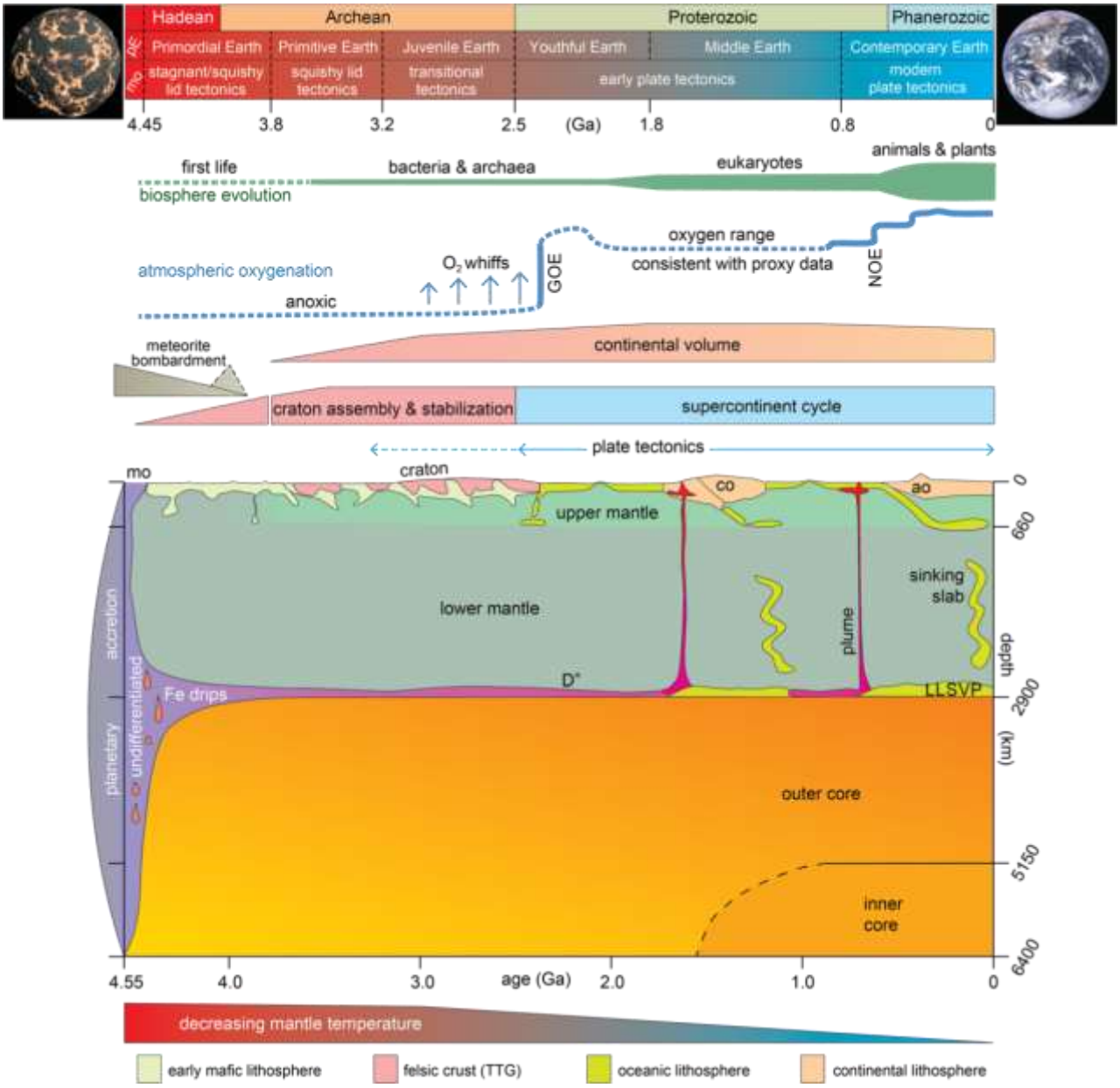
غالبًا ما يُعرّف מועדים في تكوين 14:1 على أنها الأوقات المقدسة السنوية، لا الدورات الطبيعية. من الناحية الدلالية، يُعدّ هذا الموقف غامضًا. مع ذلك، من الناحية النحوية، يوجد دليل قوي على تعريف מועדים على أنها أيام وسنوات الدورة الطبيعية، لا على أنها أوقات عبادة خاصة.

الاسم العبري אור (ʾōr) هو كلمة تعني النور. في سفر التكوين 1:3، يُستخدم אור (ʾōr) للإشارة إلى نور الخلق بشكل عام: "وقال الله: ليكن نور (אור)، فكان نور (אור)". في سفر القضاة 2:16، يُستخدم אור (ʾōr) للإشارة إلى نور الفجر: " عِنْدَ ضَوْءِ الصَّبَاحِ (אור)". كما يمكن أن يُستخدم الاسم אור (ʾōr) كصفة شعرية، كما في إشعياء 5:2 " هَلُمَّ فَنَسْلُكُ فِي نُورِ (אור) الرَّبِّ ". ومن المثير للاهتمام أن كلمة אור (ʾōr) تظهر أيضًا في سفر أيوب 18:41 في وصفها للوحش الذي " عِطَاسُهُ يَبْعَثُ نُورًا (אור)".

https://coptic-treasures.com/

دراسة كيف تكونت النجوم والكواكب

https://coptic-treasures.com/



مخطط تطور الأرض عبر الزمن (مستمد بشكل كبير من دراسة الغلاف الصخري القاري) منذ التراكم الأولي من السديم الشمسي والقصف النيزكي المبكر المكثف وحتى اليوم، مع تسليط الضوء على التغيرات في البنية الداخلية للأرض الصلبة، نسبةً إلى انخفاض درجة حرارة الوشاح، والتغيرات في حجم القارات، والنمط التكتوني، وتكوين الغلاف الجوي، وتطور المحيط الحيوي. تعود التقسيمات الرئيسية للأرض إلى طبقات داخلية وسطحية مختلفة إلى وقت تراكمها تقريبًا، باستثناء اللب الداخلي، الذي ربما لم يتشكل إلا منذ حوالي مليار سنة. تحدد التغيرات في سجل الصخور القارية العصور السبعة للأرض، وهي موضحة في أعلى المخطط (الأرض البدائية، الأرض الأولية، الأرض البدائية، الأرض الفتية، الأرض الشابة، الأرض الوسطى، الأرض المعاصرة). الاختصارات: ao - سلسلة جبال تراكمية؛ co - سلسلة جبال تصادمية؛ GOE - حدث أكسدة عظيم؛ LLSVP - مناطق كبيرة ذات سرعة قص منخفضة. NOE – حدث الأكسدة في العصر النيوبروتيروزوي؛ pE – الأرض البدائية؛ mo – محيط الصهارة.

https://coptic-treasures.com/

كيف بدأ الكون

وفقًا لنظرية التضخم الكوني لغوث Guth، حدث تمدد هائل في جزء من الثانية بعد الانفجار العظيم[1]. مهدت فترة التضخم هذه الطريق لبنية الكون وتكوينه المرئيين اليوم. تتوافق نظرية غوث مع الأدلة العلمية المرئية، تفترض نظرية التضخم الكوني أن الكون شهد تمددًا هائلاً في الجزء الأول من الثانية بعد الانفجار العظيم. امتد الكون خلال فترة التضخم هذه إلى ما وراء أفق الرؤية، مما مكّن المناطق البعيدة من التفاعل والوصول إلى حالة توازن حراري. تعني هذه النظرية أن التمدد سمح للمناطق البعيدة في الكون بالتفاعل والتأثير على بعضها البعض، مما أدى إلى وصولها إلى نفس درجة الحرارة.

بعبارة أخرى، تسمح الفيزياء التي تصفها نظرية التضخم الكوني للكون الحالي بالتمدد بسرعة تفوق سرعة الضوء خلال هذه الفترة المبكرة من التضخم. كان ذلك ليُزيل مشكلتي المسافة والزمن اللتين تحولان دون تحقيق التوازن الحراري. تشير نظرية التضخم الكوني إلى أن فترة التوسع السريع والكبير أدت إلى زيادة في عامل المقياس للكون، الذي يُحدد الأحجام النسبية للأبعاد المكانية (حجم الفضاء نفسه). ونتيجةً لذلك، فإن أي انحرافات طفيفة عن الشكل المسطح في الكون المبكر كانت ستتمدد وتضعف بشكل كبير خلال فترة التضخم هذه. بعبارة أخرى، كان التوسع السريع سيُخفف من حدة هذه الانحرافات، مما يجعل الكون أكثر تسطحًا وانتظامًا.

خلال نمو الكون، أصبحت كثافة الطاقة المرتبطة بمجال التضخم هي السائدة على أشكال الطاقة الأخرى كالإشعاع والمادة. وكان لهذه الهيمنة تأثير مُساوٍ على هندسة الكون بأكمله، مما جعله أقرب إلى شكل مسطح. لذا، فإن علم الكونيات التضخمي الذي ظهر في ثمانينيات القرن العشرين يُقدم حلولًا مقنعة لمثل هذه التساؤلات حول أصل الكون. يُعيد هذا الاكتشاف تشكيل فهمنا للديناميكيات المبكرة ويضع الأسس للنظريات الكونية الحديثة.

يعتقد الباحثون أن هذا التضخم الكوني قد انطلق بفعل تقلبات كمومية في نسيج الزمكان، وهي ظاهرة تنبأت بها ميكانيكا الكم. ويُعتقد أنه على هذه المستويات الكمومية، تضخمت تقلبات دقيقة خلال التضخم، مما أدى إلى ظهور اضطرابات واختلافات تطورت في نهاية المطاف إلى المجرات الأولى، وتجمعات المجرات، والتكوينات الكونية الكبيرة.

مع التقدم الحاصل في علم الكونيات، يدرس العلماء فكرة أن كوننا قد يكون مجرد واحد من بين العديد من الأكوان المتعددة. تشير هذه النظرية إلى احتمال وجود عدد لا نهائي من الأكوان، لكل منها قوانينه الفيزيائية وثوابته وخصائصه المميزة. ورغم أن هذه الفرضية لا تزال في طور التخمين وتتجاوز إمكانيات الاختبار التجريبي الحالية، إلا أن فرضية الأكوان المتعددة تقدم تفسيراً جذاباً لبعض جوانب الكون الأكثر إثارة للحيرة. فعلى سبيل المثال، قد يجد الضبط الدقيق للثوابت والمعايير في كوننا لدعم الحياة

[1] American Public University System (https://www.apu.apus.edu/area-of-study/math-and-science/resources/origin-of-the-universe/)

https://coptic-treasures.com/

مبرراً في سيناريو الأكوان المتعددة، حيث يمتلك كل إقليم خصائص فريدة. في هذه الحالة، لن يكون كوننا مصمماً لدعم وجود الحياة كما نعرفها، بل هو نتاج الصدفة والمصادفة. وقد توجد أكوان أخرى كثيرة ضمن الأكوان المتعددة غير قادرة على دعم مثل هذه الحياة.

بعد ترسيخ نظرية الانفجار العظيم لبداية الكون، استنتج الباحثون أن قوة الجاذبية ستُبطئ تمدد الكون بمرور الوقت، حيث تتجاذب جميع المواد الموجودة فيه لتُعيد تجميع نفسها. واعتقدوا أن الجاذبية ستوقف التمدد في نهاية المطاف. ثم سيحدث ارتدادٌ يُؤدي إلى اندماج كل شيء ببطء، ربما حتى يعود إلى نقطة واحدة. أطلق الباحثون على هذه النظرية اسم "الانضغاط العظيم". بل إنها أدت إلى ظهور فكرة أن الكون ربما يمر بدورة ارتداد متكررة، حيث يتمدد وينكمش مرارًا وتكرارًا نتيجة لقوى متنافسة تسعى للسيطرة على بعضها البعض.

لكن الملاحظة العلمية لمعدل تمدد الكون كشفت أنه لا يتباطأ، بل على العكس، يتزايد. يشير هذا الاكتشاف غير المتوقع، الذي تم التوصل إليه من خلال دراسة المستعرات العظمى في أواخر التسعينيات، إلى أن قوة غامضة تُسمى الطاقة المظلمة تُعارض الجاذبية على نطاق كوني وتُسرّع تمدد الكون. إن وجود الطاقة المظلمة التي تدفع هذا التوسع المتسارع له آثار بالغة الأهمية على مستقبل كوننا. فهو يشير إلى أن المجرات ستستمر في التباعد بوتيرة متزايدة باستمرار.

ساعدت دراسات لاحقة في توضيح وتيرة الانفجار العظيم. إليكم النظرية: في أول 10^{-43} ثانية من وجوده، كان الكون شديد التكثيف، بحجم أقل من مليون مليار مليار جزء من حجم الذرة الواحدة. يُعتقد أنه في هذه الحالة فائقة الكثافة والطاقة، اندمجت القوى الأساسية الأربع - الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والقوتين النوويتين القوية والضعيفة - في قوة واحدة، لكن نظرياتنا الحالية لم تتوصل بعد إلى كيفية عمل هذه القوة الموحدة. لتحقيق ذلك، نحتاج إلى معرفة كيفية عمل الجاذبية على المستوى دون الذري، وهو ما لا نعرفه حاليًا[1].

يُعتقد أيضًا أن التقارب الشديد بين جسيمات الكون الأولى سمح لها بالاختلاط والتفاعل والاستقرار عند درجة حرارة متقاربة. ثم، في جزء ضئيل للغاية من الثانية، تمددت كل تلك المادة والطاقة بشكل متساوٍ تقريبًا، مع اختلافات طفيفة ناتجة عن تقلبات على المستوى الكمي. قد يُفسر نموذج التوسع السريع هذا، المسمى بالتضخم الكوني، سبب تمتع الكون بدرجة حرارة وتوزيع متساويين للمادة. بعد التضخم، استمر الكون في التوسع، ولكن بمعدل أبطأ بكثير. ولا يزال من غير الواضح ما الذي غذّى التضخم الكوني تحديدًا.

مع مرور الوقت وبرودة المادة، بدأت أنواعٌ أكثر تنوعًا من الجسيمات بالتشكل، وتكثفت في نهاية المطاف لتُشكّل النجوم والمجرات في كوننا الحالي. وعندما بلغ عمر الكون جزءًا من مليار من الثانية، كان قد برد بما يكفي لانفصال القوى الأساسية

[1] (https://www.nationalgeographic.com/science/article/origins-of-the-universe

https://coptic-treasures.com/

الأربع عن بعضها. كما تشكلت الجسيمات الأساسية للكون. ومع ذلك، كان لا يزال شديد الحرارة لدرجة أن هذه الجسيمات لم تكن قد تجمعت بعد لتُشكّل العديد من الجسيمات دون الذرية التي نعرفها اليوم، مثل البروتون. ومع استمرار الكون في التوسع، استمر هذا الحساء البدائي شديد الحرارة - والذي يُسمى بلازما الكواركات والغلوونات - في التبريد. بعض مصادمات الجسيمات، مثل مصادم الهادرونات الكبير في سيرن، تتمتع بقوة كافية لإعادة تكوين بلازما الكواركات والغلوونات.

كان الإشعاع في الكون المبكر شديدًا لدرجة أن تصادم الفوتونات كان يُشكّل أزواجًا من الجسيمات المكونة من المادة والمادة المضادة، وهي تشبه المادة العادية في كل شيء باستثناء اختلاف الشحنة الكهربائية. يُعتقد أن الكون المبكر كان يحتوي على كميات متساوية من المادة والمادة المضادة. ولكن مع برودة الكون، لم تعد الفوتونات تمتلك الطاقة الكافية لتكوين أزواج من المادة والمادة المضادة. وهكذا، كما في لعبة الكراسي الموسيقية، تزاوجت العديد من جسيمات المادة والمادة المضادة، ثم أفنتها بعضها بعضًا. بطريقة ما، نجت بعض المادة الزائدة، وهي الآن المادة التي يتكون منها البشر والكواكب والمجرات. وجودنا دليل واضح على أن قوانين الطبيعة تُعامل المادة والمادة المضادة بشكل مختلف قليلًا. وقد لاحظ الباحثون تجريبيًا هذا الخلل في القواعد، والذي يُسمى انتهاك تناظر الشحنة الزوجية (CP). ولا يزال الفيزيائيون يحاولون فهم كيف انتصرت المادة في الكون المبكر.

في غضون الثانية الأولى من عمر الكون، كانت درجة حرارته كافية لتتجمع المادة المتبقية وتتحد لتشكل البروتونات والنيوترونات، وهي الجسيمات المعروفة التي تُكوّن نوى الذرات. وبعد ثلاث دقائق، تجمعت البروتونات والنيوترونات لتشكل نوى الهيدروجين والهيليوم. من حيث الكتلة، شكّل الهيدروجين 75% من مادة الكون المبكر، بينما شكّل الهيليوم 25%. يُعدّ وفرة الهيليوم تنبؤًا رئيسيًا لنظرية الانفجار العظيم، وقد أكدته الملاحظات العلمية.

على الرغم من وجود نوى ذرية، كان الكون الفتيّ لا يزال شديد الحرارة بحيث لم تتمكن الإلكترونات من الاستقرار حولها لتكوين ذرات مستقرة. بقيت مادة الكون ضبابًا مشحونًا كهربائيًا كثيفًا للغاية، لدرجة أن الضوء كان يجد صعوبة في اختراقه. استغرق الأمر حوالي 380,000 عام أخرى حتى يبرد الكون بما يكفي لتكوّن الذرات المتعادلة - وهي لحظة محورية تُعرف بإعادة التركيب. جعل الكون الأكثر برودة شفافًا لأول مرة، مما سمح للفوتونات التي كانت تدور بداخله بالمرور عبره دون عوائق. لا نزال نرى هذا التوهج البدائي اليوم على شكل إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، الموجود في جميع أنحاء الكون. يشبه هذا الإشعاع ذلك المستخدم في بث إشارات التلفزيون عبر الهوائيات. ولكنه أقدم إشعاع معروف، وقد يحمل في طياته العديد من الأسرار حول اللحظات الأولى للكون.

لم يكن هناك نجم واحد في الكون حتى حوالي 180 مليون سنة بعد الانفجار العظيم. استغرق الأمر كل هذا الوقت لتجميع سحب الهيدروجين بفعل الجاذبية وتشكيلها إلى نجوم. يعتقد العديد من الفيزيائيين أن سحبًا هائلة من المادة المظلمة، وهي مادة

https://coptic-treasures.com/

لا تزال مجهولة وتفوق المادة المرئية بأكثر من خمسة أضعاف، وفرت دعامة جاذبية للمجرات والنجوم الأولى. بمجرد أن اشتعلت النجوم الأولى في الكون، كان الضوء المنبعث منها قويًا بما يكفي لانتزاع الإلكترونات من الذرات المتعادلة مرة أخرى، وهي مرحلة أساسية في الكون تُعرف باسم إعادة التأين. حاول العلماء إلقاء نظرة على هذا "الفجر الكوني"، لكن النتائج كانت متفاوتة. في عام 2018، أعلن فريق أسترالي عن رصد دلائل على تشكل النجوم الأولى بعد حوالي 180 مليون سنة من الانفجار العظيم، على الرغم من أن فرقًا أخرى لم تتمكن من إعادة إنتاج نتائجهم. وبحلول 300 مليون سنة بعد الانفجار العظيم، وُلدت المجرات الأولى. على مدى مليارات السنين الماضية، تشكلت النجوم والمجرات وتجمعات المجرات، ثم عادت للتشكل، لتُنتج في النهاية مجرتنا درب التبانة، وموطننا الكوني، النظام الشمسي.

وحتى الآن، لا يزال الكون يتوسع. ولدهشة علماء الفلك، تتسارع وتيرة هذا التوسع. تتفاوت تقديرات معدل التوسع، لكن البيانات التي جمعها تلسكوب جيمس ويب الفضائي تُضيف إلى مجموعة متزايدة من الأدلة التي تُشير إلى أنه أسرع بكثير مما ينبغي. يُعتقد أن هذا التسارع مدفوع بقوة تُقاوم الجاذبية تُسمى الطاقة المظلمة. لا نزال نجهل ماهية الطاقة المظلمة، لكن يُعتقد أنها تُشكل 68% من إجمالي المادة والطاقة في الكون. أما المادة المظلمة فتُشكل 27% أخرى. باختصار، كل المادة التي رأيتها في حياتك - من حبك الأول إلى النجوم في سمائك - تُشكل أقل من 5% من الكون.



مجرة أندروميدا Andromeda أو M31 هي أكبر مجرة مجاورة لمجرة درب التبانة. في هذه الصورة المستندة إلى بيانات من وكالة ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية، يشير اللون الأحمر إلى غاز الهيدروجين، والأخضر إلى الغبار البارد، والأزرق إلى الغبار الأكثر دفئًا. Photograph by ESA/NASA/JPL-Caltech/GBT/WSRT/IRAM/C. Clark (STScI)

https://coptic-treasures.com/

تكوين النظام الشمسى

فرضية السديم[1]، التي تنص على أن النظام الشمسي تشكل من سحابة من الغاز والغبار. وربما كان هذا السديم جزءًا من سحابة بين نجمية أكبر بكثير من الغاز والغبار، احتوت على كمية كافية من المادة لتكوين مئات إلى آلاف النجوم مثل شمسنا. وربما تسببت اختلافات الكثافة في تفتت السحابة الأكبر إلى العديد من السحب الأصغر التي أنتجت النجوم والأنظمة الكوكبية المصاحبة لها. وكان السديم الشمسي، أو النظام الشمسي الأولي، أحد هذه السحب الأصغر. على الرغم من أن السديم الشمسي لم يكن سوى جزء صغير من السحابة الأم الأكبر بكثير، إلا أنه كان على الأرجح يبلغ قطره سنة ضوئية واحدة على الأقل، ويحتوي على كمية من المادة لا تقل عن (وربما تصل إلى ضعف) ما يحتويه النظام الشمسي اليوم. وربما كان تركيبه مشابهًا لما نحدده طيفيًا اليوم لغلاف الشمس الجوي: حوالي 71% هيدروجين، و27% هيليوم، و2% من جميع العناصر الكيميائية الأخرى المعروفة. تشكل الهيدروجين والهيليوم في أعقاب الانفجار العظيم، الذي حدث قبل حوالي 13 إلى 14 مليار سنة. أما العناصر الكيميائية الأثقل (التي تصل كتلتها الذرية إلى الحديد) فقد تم تصنيعها عن طريق تفاعلات الاندماج النووي في نوى النجوم الضخمة، بينما تشكلت العناصر الأثقل من الحديد عندما انفجرت النجوم الضخمة كمستعرات عظمى. أدى الموت الانفجاري لهذه النجوم الضخمة إلى تشتيت العناصر الأثقل عبر الفضاء بين النجوم، حيث أثرت على سحب الغاز والغبار التي ستتشكل منها أجيال جديدة من النجوم وأنظمتها الكوكبية.

قد يكون مرور السديم الشمسي عبر موجة الكثافة المرتبطة بأحد الأذرع الحلزونية لمجرتنا درب التبانة هو السبب في انكماشه بفعل الجاذبية. فبينما كان السديم يدور حول مركز المجرة، أدى مروره عبر موجة الكثافة في الذراع الحلزونية إلى إبطاء حركته قليلاً، مما ضغط الغاز وبدأ انكماشه بفعل الجاذبية. ويدعم هذه الفكرة ملاحظة أن الأذرع الحلزونية للمجرات تتميز بمجموعات من النجوم الفتية حديثة التكوين، وسحب غازية متوهجة ناتجة عن إثارة نجوم فتية ساخنة قريبة. وثمة سبب محتمل آخر لضغط الغاز وبدء الانكماش بفعل الجاذبية، وهو موجة الصدمة الناتجة عن انفجار مستعر أعظم قريب. في الواقع، هناك أدلة، تستند إلى وفرة نظائر معينة، تشير إلى أن مستعرًا أعظمًا قريبًا انفجر قبل فترة وجيزة من تكوّن النظام الشمسي.

في البداية، كانت سحابة الغاز والغبار باردة وتدور ببطء. جذبت الجاذبية المادة نحو المركز، ومع انكماش السحابة، زادت سرعة دورانها للحفاظ على الزخم الزاوي. استمرت في الانكماش، وبالتالي زادت سرعة دورانها، وبعد حوالي 100,000 عام، انفصل عنها قرص من المادة في مستواها الاستوائي. تجمعت معظم مادة السديم الشمسي في مركز القرص، لتشكل الشمس الأولية. ومع انكماش الشمس الأولية، تحولت طاقة الوضع الجاذبية إلى طاقة حرارية، مما أدى إلى تسخينها إلى درجة بدأت عندها في الإشعاع بأطوال موجية تحت الحمراء.

[1] (https://www.ebsco.com/research-starters/astronomy-and-astrophysics/origins-solar-system#full-article

https://coptic-treasures.com/

استمرت الشمس البدائية في الانكماش، فارتفعت درجة حرارتها وإضاءتها. أدى ذلك إلى تسخين الجزء الداخلي من القرص الاستوائي القريب من الشمس البدائية، دون الجزء الأبعد. نتج عن الاختلاف القطري في درجة الحرارة عبر القرص تكثف تفاضلي إلى حبيبات صلبة صغيرة. عند درجات الحرارة المرتفعة في الجزء الداخلي من القرص، لم تتكثف سوى المعادن ومعادن السيليكات، بينما في الأجزاء الأبعد، حيث كانت درجة الحرارة أقل، تكثفت مواد أكثر وفرة مثل الماء والأمونيا والميثان إلى جليد. اصطدمت الحبيبات الصلبة المتكونة بالتكثف ببعضها البعض أثناء دورانها حول الشمس البدائية؛ وإذا لم تكن الاصطدامات عنيفة للغاية، فإنها تلتصق ببعضها في عملية تسمى التراكم، مكونة تدريجيًا أجسامًا يصل حجمها إلى عدة كيلومترات تسمى الكويكبات. لا يُعرف على وجه الدقة كيف التصقت الحبيبات ببعضها؛ ربما اكتسبت شحنات كهربائية وظلت متماسكة بفعل الكهرباء الساكنة، أو إذا كانت الحبيبات قريبة من نقاط انصهارها، فربما كانت "لزجة" إلى حد ما.

مما سبق نلخص أن فرضية السديم، وهي نموذج علمي سائد يُفسر كيفية تشكل نظامنا الشمسي من سحابة هائلة من الغاز والغبار. هذه السحابة، التي كانت جزءًا من مادة بين نجمية أكبر، تفتتت إلى سحب أصغر، مما أدى إلى ولادة النجوم والأنظمة الكوكبية، بما في ذلك سديمنا الشمسي. احتوى السديم الشمسي، الذي يبلغ قطره حوالي سنة ضوئية واحدة، بشكل أساسي على الهيدروجين والهيليوم، وهما عنصران نتجا في أعقاب الانفجار العظيم. بدأت عملية التكوين عندما تسببت قوى الجاذبية في انكماش السديم، مما أدى إلى تكوين قرص دوار تتوسطه الشمس البدائية.

مع ارتفاع درجة حرارة الشمس البدائية وبدء اندماج الهيدروجين، بدأت المواد المحيطة بها في التكتل لتكوين أجسام أكبر من خلال عملية تُسمى التراكم. أدى ذلك إلى تكوين الكواكب الصخرية الداخلية والعمالقة الغازية الخارجية، بينما شكلت المواد المتبقية حزام الكويكبات وحزام كايبر. تعرض النظام الشمسي المبكر لقصف شديد خلال مرحلة استقراره، مما أدى إلى تشكيل أسطح الكواكب والأقمار. ساعدت طرقٌ متنوعة، من بينها دراسة النيازك والنظائر، العلماء على تقدير عمر النظام الشمسي بنحو 4.6 مليار سنة. وبشكل عام، تُفسّر فرضية السديم بنجاح العديد من الخصائص المرصودة للنظام الشمسي، بينما تستمر الأبحاث الجارية في تحسين فهمنا لتكوين الكواكب.

مع ازدياد حجم الكويكبات، جذبت كتلتها المتزايدة مواد إضافية بفعل الجاذبية حتى أزالت المنطقة المحيطة بمداراتها. استمرت الكويكبات في النمو من خلال التصادمات، لتصبح كواكب أولية. كانت الكويكبات والكواكب الأولية التي نمت في الجزء الداخلي من القرص صخرية ومعدنية في الغالب، بينما كانت تلك التي نمت في الأجزاء الخارجية من القرص تتكون في الغالب من جليد، مثل الماء والأمونيا والميثان. ولأن الماء والأمونيا والميثان كانت أكثر وفرة بكثير من المعادن والسيليكات، نمت الكواكب الأولية الخارجية أكبر بكثير من الكواكب الداخلية؛ ومع ازدياد كتلتها، تمكنت من التقاط غازي الهيدروجين والهيليوم، اللذين كانا أكثر وفرة في القرص، وبالتالي ازداد حجمها. شكل الهيدروجين والهيليوم أغلفة سميكة حول نوى الكواكب، حيث بقيت المادة في الجزء الخارجي من الغلاف غازية ولكنها بدأت تسيل مع العمق بسبب ازدياد الضغط. في النهاية، لم يتبق سوى عدد قليل من

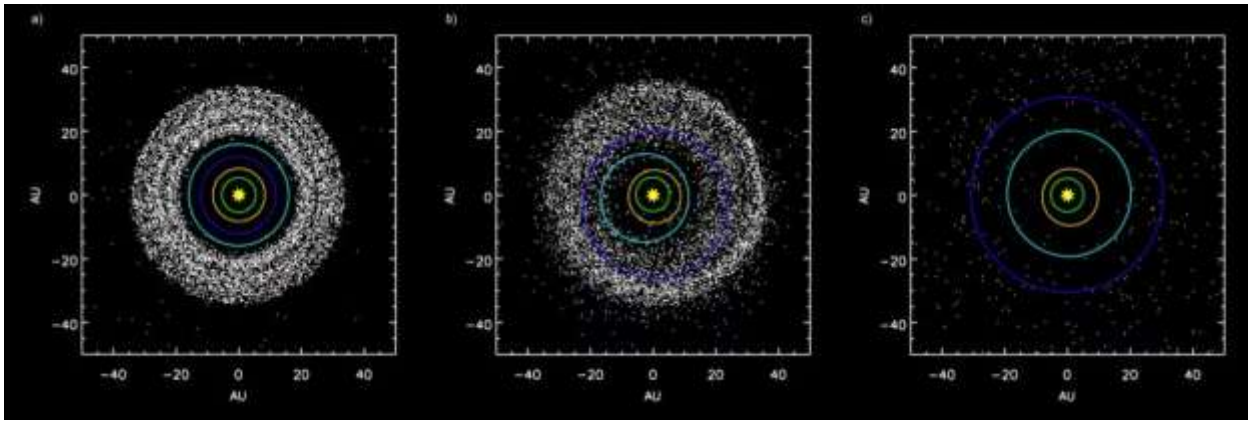
https://coptic-treasures.com/

الأجسام بحجم الكواكب: أربعة كواكب داخلية صغيرة صخرية ومعدنية (الكواكب الأرضية) وأربعة كواكب خارجية كبيرة غازية/سائلة/جليدية (ما يسمى بالكواكب الغازية العملاقة).

حزام الكويكبات، وهو منطقة من الأجسام الصخرية والمعدنية الصغيرة بين مداري المريخ والمشتري، يُرجح أنه بقايا مواد من مرحلة مبكرة من تطور النظام الشمسي لم تتجمع لتشكل كوكبًا، ربما بسبب تأثير جاذبية المشتري. وحزام كايبر ، وهو منطقة من الأجسام الجليدية والصخرية وراء مدار نبتون، يُرجح أيضًا أنه بقايا مواد لم تتجمع لتشكل كوكبًا رئيسيًا؛ بلوتو هو أحد أكبر أعضاء حزام كايبر. تراكمت الجليديات في محيط الكواكب العملاقة لتشكل نوى مذنبة صغيرة، والتي، من خلال تفاعلاتها الجاذبية مع الكواكب العملاقة، قُذفت عشوائيًا إلى أطراف النظام الشمسي البعيدة لتشكل سحابة مذنب أورت.

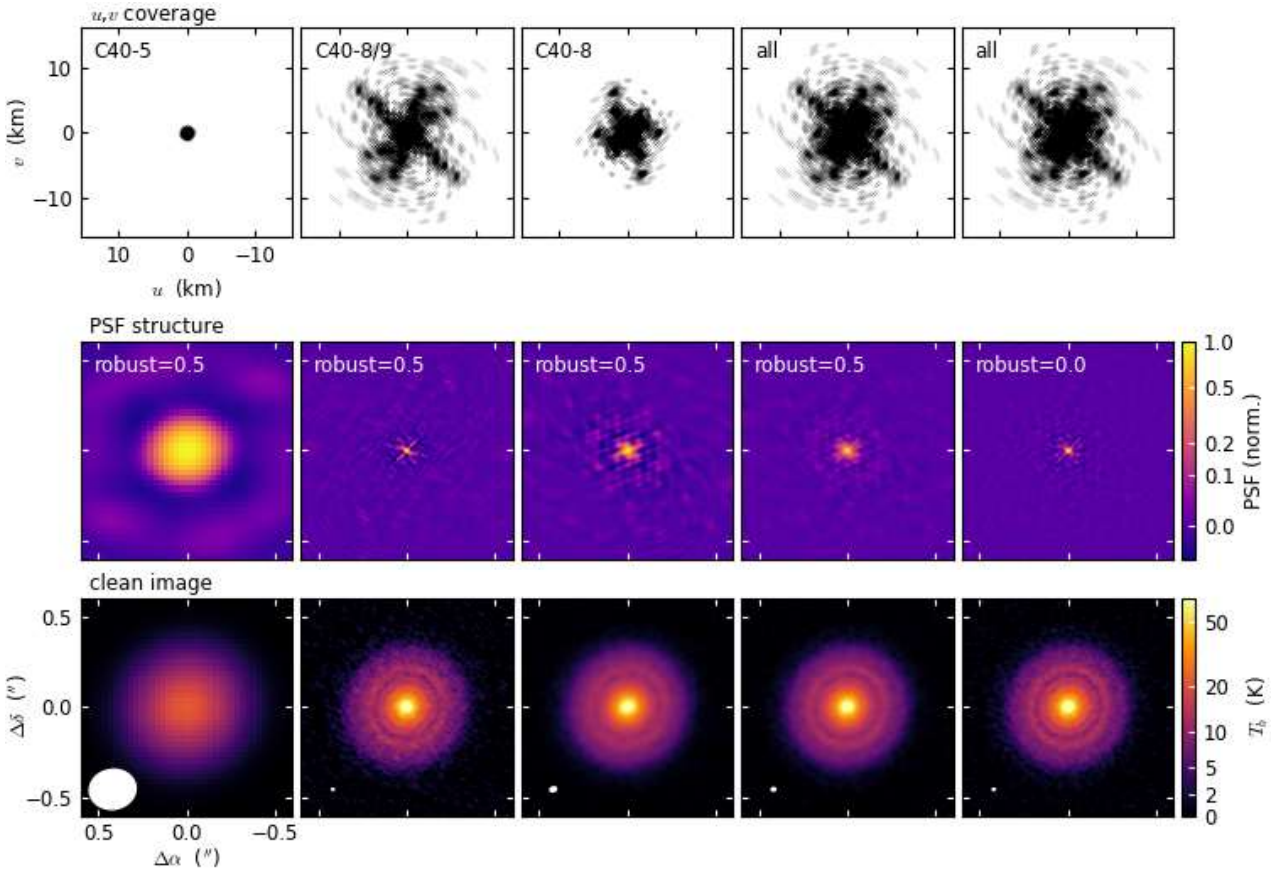
تشكلت معظم الأقمار الكبيرة للكواكب على الأرجح بعملية مشابهة لتشكل الكواكب نفسها: عن طريق التراكم في قرص استوائي حول الكوكب الأولي. أما الأقمار الأصغر، فربما تكونت بشكل منفصل عن الكوكب الأولي، ثم تم جذبها لاحقًا بفعل الجاذبية. ويُعتقد أن قمر الأرض قد تشكل نتيجة اصطدام كوكب أولي كبير بالأرض في بداياتها، حيث أدى الاصطدام إلى قذف مواد من قشرة الأرض ووشاحها، بالإضافة إلى الجسم المصطدم نفسه، إلى مدار حول الأرض، حيث تراكمت هناك لتشكل قمرنا.

مع استمرار انكماش الشمس البدائية بفعل الجاذبية، ارتفعت كثافة ودرجة حرارة نواتها تدريجيًا إلى مستوى كافٍ لبدء اندماج الهيدروجين لتكوين الهيليوم. في هذا التفاعل النووي الحراري، تندمج أربع نوى هيدروجين لتكوين نواة هيليوم واحدة . تتجاوز الكتلة الإجمالية لنوى الهيدروجين الأربع الداخلة في التفاعل كتلة نواة الهيليوم الناتجة بقليل، ويتحول هذا الفائض الطفيف في الكتلة إلى طاقة. بمجرد بدء اندماج الهيدروجين في نواتها، أصبحت الشمس نجمًا كاملًا من نجوم التسلسل الرئيسي.



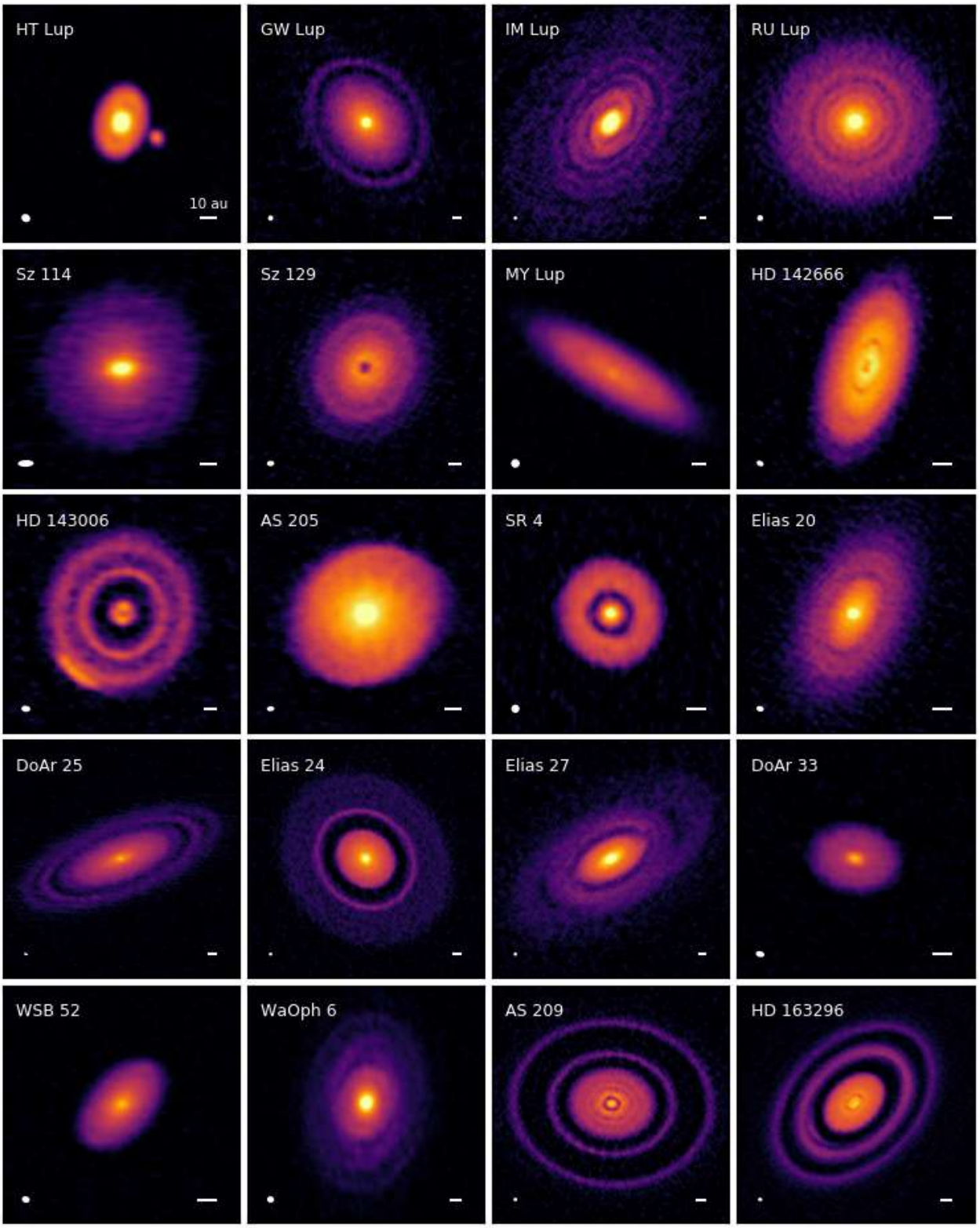
مع تطور النظام الشمسي، تتبخر المواد المتطايرة، وتتراكم المادة على الكواكب، وتندمج الكويكبات الصغيرة معًا، وتنتقل المدارات إلى تكوينات مستقرة. قد تهيمن الكواكب الغازية العملاقة على ديناميكيات نظامنا الشمسي من الناحية الجاذبية، لكن الكواكب الصخرية الداخلية هي التي تشهد، على حد علمنا، جميع العمليات الكيميائية الحيوية المثيرة للاهتمام.

https://coptic-treasures.com/



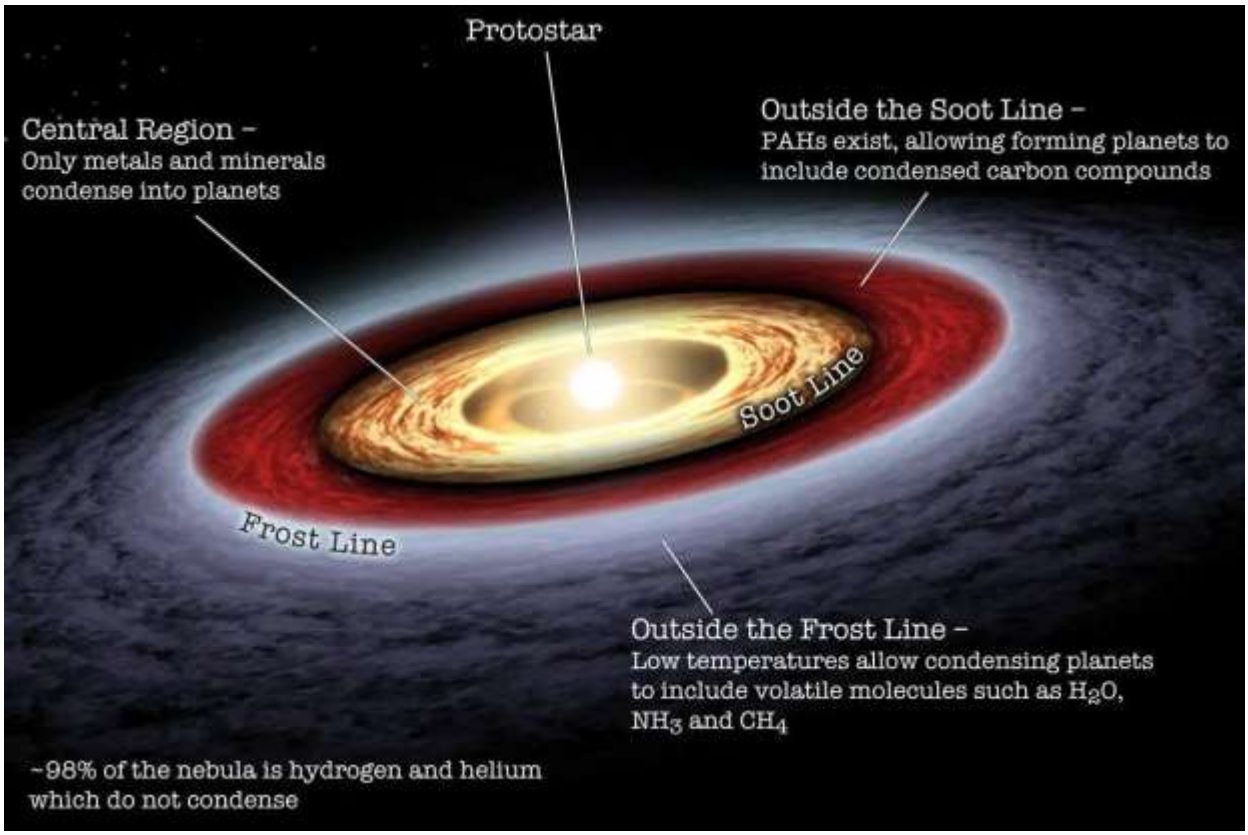
يوضح الشكل تأثير تغطية التردد المكاني وترجيح الرؤية على بنية دالة انتشار النقطة (PSF) وشكل الصورة، لقرص RU Lup. تُظهر اللوحات العلوية تغطية u,v المرصودة. تُظهر اللوحات الوسطى بنى دالة انتشار النقطة المقابلة، مع توضيح معلمات الترجيح القوية المناسبة. تُظهر اللوحات السفلية الصور المقابلة، على نفس مقياسTb ، والمُنشأة من مجموعات فرعية من الناتج النهائي للمعايرة الذاتية. تم تحديد أبعاد حزمة FWHM في الزوايا السفلية اليسرى لكل صورة. S. M. Andrews et al. and the DSHARP collaboration, arXiv:1812.04040

https://coptic-treasures.com/



عشرون قرصًا كوكبيًا أوليًا جديدًا، كما صورها مشروع DSHARP (مشروع دراسة البنى الفرعية للأقراص بدقة زاوية عالية)، تُظهر شكل الأنظمة الكوكبية حديثة التكوين. من المرجح أن تكون الفجوات في القرص مواقع للكواكب حديثة التكوين. S. M. Andrews et al. and the DSHARP collaboration, arXiv:1812.04040

https://coptic-treasures.com/



رسم تخطيطي لقرص كوكبي أولي، يوضح خطي السخام أو الغبار Soot والصقيع. بالنسبة لنجم كالشمس، تشير التقديرات إلى أن خط الصقيع يقع على بعد حوالي ثلاثة أضعاف المسافة الأولية بين الأرض والشمس، بينما يقع خط السخام على مسافة أقرب بكثير. من الصعب تحديد المواقع الدقيقة لهذين الخطين في ماضي نظامنا الشمسي. NASA / JPL-Caltech, annonations by Invader Xan

مراحل تطور الشمس منذ التكوين

يشير التطور الشمسي إلى العملية التي شهدتها الشمس من تغير وتطور منذ نشأتها قبل أكثر من 4.5 مليار سنة. بدأ هذا التطور بانهيار سحابة باردة بين النجوم، مما أدى في النهاية إلى تكوين نجم أولي. ومع تراكم كتلة هذا النجم الأولي، ارتفعت درجة حرارته ودخل مرحلة تي-تاوري، التي تتميز برياح ونفاثات قوية. وعندما وصلت درجة حرارة لبّه إلى حوالي 10 ملايين كلفن، بدأ اندماج الهيدروجين، مما مثّل انتقال الشمس إلى مرحلة التسلسل الرئيسي، حيث بقيت معظم حياتها. ومع مرور الوقت، ازداد لمعان الشمس باطراد، ومن المتوقع أن تستمر على مرحلة التسلسل الرئيسي لمدة 5.5 مليار سنة أخرى[1].

في نهاية المطاف، ستنفد الشمس وقودها الهيدروجيني، مما يؤدي إلى تمددها إلى مرحلة العملاق الأحمر، حيث يبرد سطحها بينما يزداد حجمها بشكل ملحوظ. بعد ذلك، ستفقد الشمس طبقاتها الخارجية، مكونة سديمًا كوكبيًا، تاركةً وراءها لبًا كربونيًا

[1] https://www.ebsco.com/research-starters/astronomy-and-astrophysics/solar-evolution

https://coptic-treasures.com/

كثيفًا، لتتحول إلى قزم أبيض. سيبرد هذا القزم الأبيض على مدى مليارات السنين، ليصبح في نهاية المطاف قزماً أسود. يجمع علم تطور الشمس بين النماذج النظرية والبيانات الرصدية لفهم ماضي الشمس ومسارها المستقبلي في الكون.

وُلدت الشمس قبل ما يزيد قليلاً عن 4.5 مليار سنة من سحابة بين نجمية تبلغ درجة حرارتها 10 كلفن، ويبلغ قطرها حوالي 1014 كيلومترًا، تتكون من غاز ذري وجزيئي بارد. وبسبب حدثٍ ما، كالمستعر الأعظم القريب، تسببت اضطرابات فوق صوتية في السحابة في انهيار منطقة مضغوطة تحت تأثير جاذبيتها، متفتتةً إلى أجزاء أصغر (في حدود 1012 كيلومترًا) خلال فترة زمنية تقارب مليوني سنة. تسطحت هذه الكتل لتشكل أقراصًا بفعل زخمها الزاوي، مغذيةً مراكز الأقراص أثناء انهيارها. في القرص الذي سيصبح فيما بعد النظام الشمسي، تراكمت في المركز كتلة تعادل كتلة شمسية أو كتلتين شمسيتين بعد 104 سنوات إضافية، وأصبح معتمًا لإشعاعه. ونتيجةً لذلك، ارتفعت درجة الحرارة المركزية إلى حوالي 10000 كلفن، وتحولت الكتلة المنهارة إلى نجم أولي في غضون 105 سنوات أخرى.

انكمش هذا النجم الأولي، الذي كان بحجم مدار عطارد تقريبًا وبإضاءة تفوق إضاءة الشمس الحالية بعدة مرات، على مدى المليون سنة التالية. وخلال هذه العملية، دخلت الشمس في مراحلها الأولى مرحلة تي-تاوري من التطور، حيث أظهرت رياحًا نجمية أولية قوية وتدفقات ثنائية القطب من النفاثات التي أصبحت أقل تركيزًا مع تسطح القرص المحيط بها وتلاشيه. وتطورت تركيبات هذه النفاثات بشكل متزامن من كونها جزيئية في المقام الأول إلى ذرية مع ارتفاع درجة حرارة الشمس الفتية. وانخفض هذا النشاط مع تباطؤ تطور الشمس كنجم أولي على مدى 107 سنوات التالية، حيث كافحت الجاذبية لضغط المادة النجمية الساخنة والمتأينة بشكل أكبر. وعندما وصلت درجة حرارة النواة إلى عشرة ملايين كلفن، أصبح اندماج الهيدروجين إلى هيليوم من خلال سلسلة تفاعلات البروتون-بروتون ممكنًا.

تولد النجوم في السدم، وهي سحب ضخمة من الغاز والغبار في الفضاء بين النجوم. يبلغ قطر هذه السحب عادةً عشرات السنين الضوئية، وتحتوي على كمية كافية من المادة لتكوين مئات إلى آلاف النجوم. يتكون الغاز في معظمه من الهيدروجين (حوالي 71% من كتلته)، مع وجود بعض الهيليوم (حوالي 27% من كتلته) وكميات ضئيلة من عناصر أثقل. أما جزيئات الغبار فهي حبيبات صلبة صغيرة من الكربون، ومعادن السيليكات، ومركبات الحديد، والجليد، ويبلغ متوسط حجمها حوالي 0.001 ملليمتر. تتميز السدم التي تتشكل فيها النجوم ببرودتها الشديدة، حيث تصل درجة حرارتها إلى حوالي 10 كلفن. عند هذه الدرجات المنخفضة، يمكن للذرات أن ترتبط معًا لتكوين جزيئات، ولذلك تُسمى هذه السدم بالسحب الجزيئية. ونتيجةً لانخفاض درجات الحرارة أيضًا، يكون ضغط الغاز ضعيفًا للغاية، ويكاد لا يمنع السحابة من الانكماش بفعل جاذبيتها الذاتية. في الأجزاء الأكثر كثافة من السحابة، قد تتغلب الجاذبية الذاتية على الضغط الضعيف، مما يؤدي إلى انهيار ذلك الجزء من

https://coptic-treasures.com/

السحابة. قد يكون سبب هذه الزيادة في الكثافة هو اصطدام السديم بموجة كثافة من ذراع حلزوني أثناء دورانه حول مركز مجرته، أو رياح نجمية قوية من نجم قريب تشكّل بالفعل، أو موجات صدمية من انفجار مستعر أعظم قريب[1].

عادةً ما تتفكك السحابة الجزيئية إلى كتل منفصلة تنهار من تلقاء نفسها. ومع انهيار كل كتلة، تتحول طاقة الجاذبية بسرعة إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى تسخين الغاز وبدء انبعاث موجات راديوية ضعيفة منه. عندما تتشكل نواة كثيفة بما يكفي في مركز الكتلة، يتباطأ الانكماش، ويُطلق على الجسم اسم النجم الأولي. عادةً، تتشكل العديد من النجوم الأولية المتجاورة في نفس الوقت تقريبًا. يستمر النجم الأولي في الانكماش بفعل الجاذبية، ويرتفع حرارته إلى درجة كافية للتألق في الجزء تحت الأحمر من الطيف الكهرومغناطيسي. أما الضوء المرئي الضئيل الذي ينبعث منه، فيحجبه غلاف الغبار المحيط به. في نهاية المطاف، يتبدد غلاف الغبار، فينضم جزء منه إلى القرص الاستوائي المتنامي حول النجم الأولي (الذي قد تتشكل فيه الكواكب لاحقًا)، بينما يتطاير جزء آخر مع ازدياد حرارة النجم الأولي وتوهجه. ومع استمرار انكماش النجم الأولي وازدياد حرارته، تُفتت التصادمات الجزيئات إلى ذرات منفردة، وتُنزع الإلكترونات من الذرات، مما يؤدي إلى تأين الغاز.

عندما تصل درجة الحرارة في مركز النجم الأولي المنكمش إلى عدة ملايين من الدرجات (بالكلفن)، تبدأ نوى الهيدروجين بالاندماج معًا لتكوين نوى الهيليوم. الطاقة المنبعثة من تفاعل الاندماج النووي هذا توقف الانكماش، ويصبح النجم الأولي نجمًا من نجوم التسلسل الرئيسي. تستغرق النجوم الأولية ذات الكتلة الأكبر وقتًا أقل للوصول إلى مرحلة التسلسل الرئيسي مقارنةً بالنجوم الأولية ذات الكتلة الأقل، لأن كتلتها الأكبر تعني جاذبية أقوى وانكماشًا أسرع. تستمر مرحلة النجم الأولي حوالي مئة ألف سنة لنجم كتلته عشرة أضعاف كتلة الشمس، وبضع عشرات الملايين من السنين لنجم كالشمس بكتلة شمسية واحدة، ومن عدة مئات الملايين إلى مليار سنة لنجم كتلته 0.1 من كتلة الشمس.

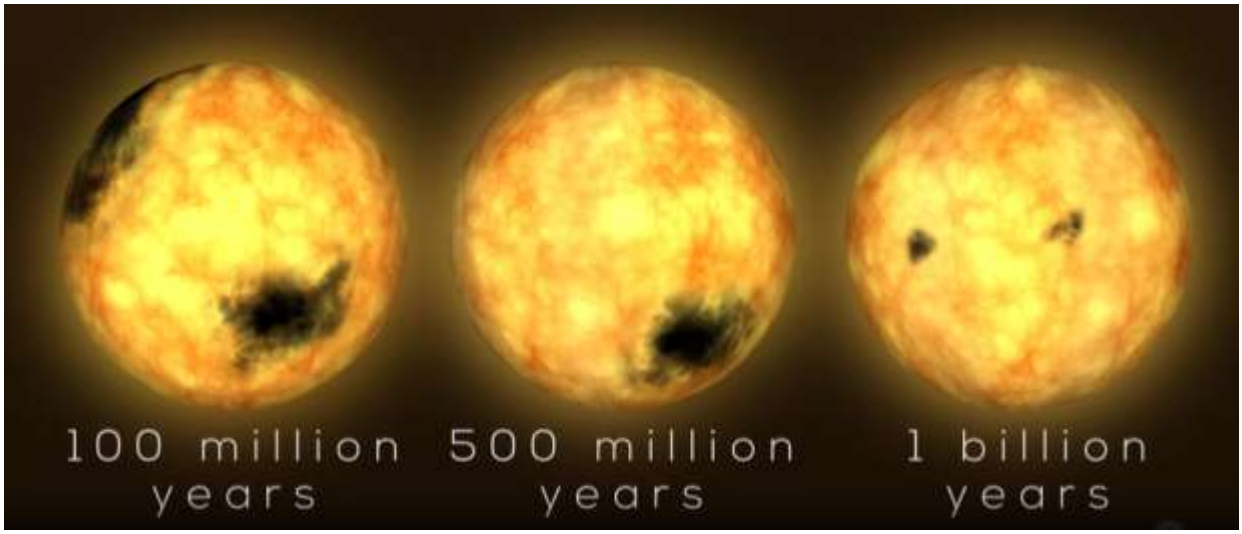
في اندماج الهيدروجين، تندمج أربع نوى هيدروجين لتكوين نواة هيليوم واحدة. كتلة نوى الهيدروجين الأربع أكبر بقليل من كتلة نواة الهيليوم الناتجة، وتُحوَّل الكتلة الزائدة إلى طاقة وفقًا لمعادلة ألبرت أينشتاين $E = mc^2$، التي تنص على أن الطاقة E والكتلة m متكافئتان وترتبطان بثابت فيزيائي c (مربع سرعة الضوء). للتغلب على التنافر الكهربائي بين نوى الهيدروجين الموجبة الشحنة (البروتونات المجردة)، يلزم وجود درجات حرارة عالية (لتحرك النوى بسرعة) وكثافة عالية (لتقارب النوى). هذه هي الظروف السائدة في لب نجوم التسلسل الرئيسي.

[1] (https://www.ebsco.com/research-starters/physics/stellar-evolution

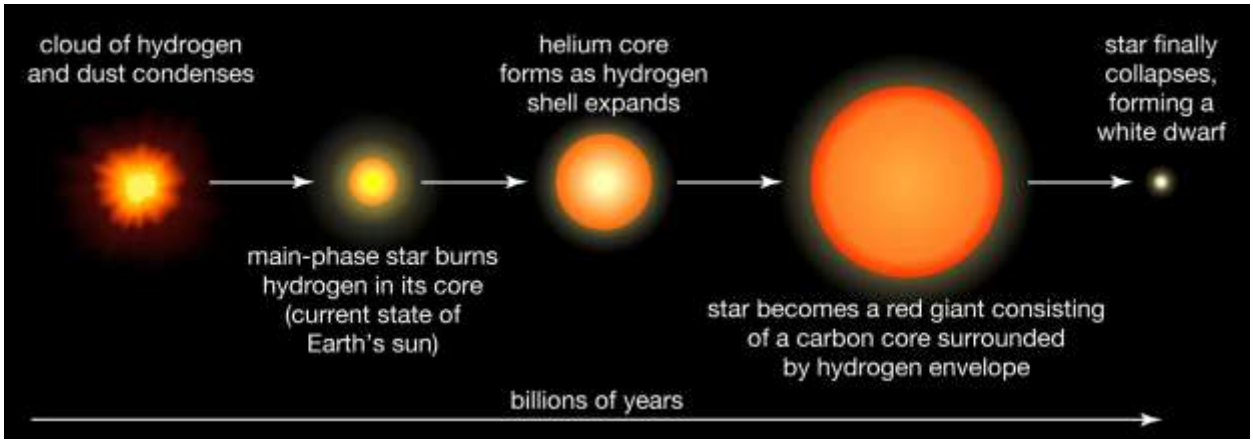
https://coptic-treasures.com/

تطور نجم شبيه بالشمس

تُظهر النجوم العديد من التغيرات الملحوظة مع تقدمها في العمر. فعلى سبيل المثال، في النجوم الشبيهة بالشمس، يتباطأ معدل دورانها على مدى ملايين السنين، كما يقل عدد البقع النجمية الداكنة على سطحها. يقوم تلسكوب TESS التابع لناسا (مسبار مسح الكواكب الخارجية العابرة) بمسح مساحة واسعة من السماء لمدة شهر تقريبًا في كل مرة، باحثًا عن تغيرات في ضوء النجوم لرصد الكواكب التي تدور حولها. يستخدم العلماء بيانات TESS نفسها لتحديد سرعة دوران النجوم من خلال مراقبة التقلبات المنتظمة في ضوئها الناتجة عن ظهور واختفاء البقع النجمية. ولأن الدوران يتباطأ مع تقدم العمر، يستطيع علماء الفلك استخدام TESS لمعرفة المزيد عن كيفية تطور النجوم عبر الزمن[1].



مع تقدم عمر النجم، يقل دورانه وعدد وحجم بقعِه، كما هو موضح في هذا الرسم المتحرك لنجم شبيه بالشمس. ترتبط بقع النجوم بمجالات مغناطيسية محلية تضخّمت بفعل دوران النجم، لذا فإن هذه الظواهر مترابطة.Credit: NASA's Goddard Space Flight Center



[1] (https://svs.gsfc.nasa.gov/14906/

https://coptic-treasures.com/

مشاهدة تكوين نظام شمسي جديد

تمكن باحثون دوليون، ولأول مرة، من تحديد اللحظة التي بدأت فيها الكواكب بالتشكل حول نجم خارج نطاق الشمس. وباستخدام تلسكوب ألما وتلسكوب جيمس ويب الفضائي، رصدوا تكوّن أولى ذرات المواد المُكوِّنة للكواكب - معادن ساخنة بدأت للتو بالتصلب. ويمثل هذا الاكتشاف أول رصد لنظام كوكبي في مثل هذه المرحلة المبكرة من تكوينه، ويفتح نافذة على ماضي نظامنا الشمسي[1].

تقول ميليسا ماكلور Melissa McClure، الأستاذة بجامعة لايدن في هولندا والمؤلفة الرئيسية للدراسة الجديدة المنشورة اليوم في مجلة Nature: "لأول مرة، حددنا اللحظة الأولى التي بدأ فيها تشكل الكواكب حول نجم غير شمسنا". وتقارن ميريل فان هوف Merel van ‘t Hoff ، الأستاذة بجامعة بيردو في الولايات المتحدة الأمريكية والمؤلفة المشاركة في الدراسة، نتائجهم بـ"صورة للنظام الشمسي الوليد"، قائلةً: "إننا نرى نظامًا يشبه ما كان عليه نظامنا الشمسي عندما بدأ يتشكل".

يتشكل هذا النظام الكوكبي الوليد حول النجم HOPS-315، وهو نجم أولي أو نجم وليد يقع على بُعد حوالي 1300 سنة ضوئية منا، ويُشبه الشمس في بداياتها. غالبًا ما يرى علماء الفلك حول هذه النجوم الوليدة أقراصًا من الغاز والغبار تُعرف باسم "الأقراص الكوكبية الأولية"، وهي مهد الكواكب الجديدة. وبينما رصد علماء الفلك سابقًا أقراصًا فتية تحتوي على كواكب ضخمة حديثة التكوين تُشبه كوكب المشتري، يقول ماكلور: "لطالما عرفنا أن الأجزاء الصلبة الأولى للكواكب، أو "الكويكبات"، يجب أن تتشكل في مراحل مبكرة من الزمن".

في نظامنا الشمسي، وُجدت أول مادة صلبة تكثفت بالقرب من موقع الأرض الحالي حول الشمس محصورة داخل نيازك قديمة. يُحدد علماء الفلك عمر هذه الصخور البدائية لتحديد متى بدأ عداد الزمن في تكوين نظامنا الشمسي. تحتوي هذه النيازك على كميات هائلة من المعادن البلورية التي تضم أحادي أكسيد السيليكون (SiO)، والتي تتكثف عند درجات الحرارة العالية للغاية الموجودة في الأقراص الكوكبية الفتية. ومع مرور الوقت، تترابط هذه المواد الصلبة المتكثفة حديثًا، مما يمهد الطريق لتكوين الكواكب مع ازدياد حجمها وكتلتها. وقد تشكلت الكويكبات الأولى التي بلغ حجمها كيلومترًا واحدًا في النظام الشمسي، والتي نمت لتصبح كواكب مثل الأرض أو نواة كوكب المشتري، بعد تكثف هذه المعادن البلورية مباشرة.

وبأكتشافهم الجديد، وجد علماء الفلك أدلة على بدء تكثف هذه المعادن الساخنة في القرص المحيط بنجم HOPS-315. وتُظهر نتائجهم أن SiO موجود حول النجم الوليد في حالته الغازية، وكذلك داخل هذه المعادن البلورية، مما يشير إلى أنه في بداية

[1] McClure, M.K., van’t Hoff, M., Francis, L. et al. Refractory solid condensation detected in an embedded protoplanetary disk. Nature 643, 649–653 (2025)
https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/for-the-first-time-astronomers-witness-the-dawn-of-a-new-solar-system/

https://coptic-treasures.com/

عملية التصلب. يقول إدوين بيرجين، الأستاذ بجامعة ميشيغان بالولايات المتحدة الأمريكية، والمؤلف المشارك في الدراسة: "لم تُشاهد هذه العملية من قبل في قرص كوكبي أولي، أو في أي مكان خارج نظامنا الشمسي".

تم رصد هذه المعادن لأول مرة باستخدام تلسكوب جيمس ويب الفضائي، وهو مشروع مشترك بين وكالات الفضاء الأمريكية والأوروبية والكندية. ولتحديد مصدر الإشارات بدقة، رصد الفريق النظام باستخدام مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA). وباستخدام هذه البيانات، توصل الفريق إلى أن الإشارات الكيميائية تنبعث من منطقة صغيرة في القرص المحيط بالنجم، تُعادل مدار حزام الكويكبات حول الشمس. يقول لوغان فرانسيس، الباحث ما بعد الدكتوراه في جامعة ليدن والمؤلف المشارك في الدراسة: "إننا نرى هذه المعادن في نفس الموقع في هذا النظام خارج المجموعة الشمسية كما نراها في الكويكبات في نظامنا الشمسي".

لهذا السبب، يُوفر قرص HOPS-315 نموذجًا رائعًا لدراسة تاريخنا الكوني. وكما يقول فان هوف: "يُعد هذا النظام من أفضل الأنظمة المعروفة لدينا لدراسة بعض العمليات التي حدثت في نظامنا الشمسي". كما يتيح هذا الاكتشاف لعلماء الفلك فرصة جديدة لدراسة مراحل تكوين الكواكب المبكرة، من خلال استخدامه كبديل للأنظمة الشمسية الوليدة في مجرتنا. وتقول إليزابيث همفريز Elizabeth Humphreys ، عالمة الفلك في المرصد الأوروبي الجنوبي ومديرة برنامج مرصد ألما الأوروبي، والتي لم تشارك في الدراسة: "لقد أُعجبتُ حقًا بهذه الدراسة، التي تكشف عن مرحلة مبكرة جدًا من تكوين الكواكب. وتشير إلى إمكانية استخدام HOPS-315 لفهم كيفية تشكّل نظامنا الشمسي. وتُبرز هذه النتيجة القوة المشتركة لتلسكوب جيمس ويب الفضائي ومرصد ألما في استكشاف الأقراص الكوكبية الأولية."

https://coptic-treasures.com/



HOPS-315، نجم وليد رصد فيه علماء الفلك أدلة على المراحل الأولى لتكوين الكواكب. التُقطت الصورة بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA). تُظهر هذه الملاحظات، إلى جانب بيانات من تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST)، أن المعادن الساخنة بدأت بالتصلب. باللون البرتقالي، نرى توزيع أول أكسيد الكربون، وهو ينطلق بعيدًا عن النجم على شكل رياح تشبه الفراشة. باللون الأزرق، نرى نفاثًا ضيقًا من أول أكسيد السيليكون، ينطلق هو الآخر بعيدًا عن النجم. تُعد هذه الرياح والنفاثات الغازية شائعة حول النجوم الوليدة مثل HOPS-315. تشير ملاحظات ALMA وJWST إلى أنه، بالإضافة إلى هذه السمات، يوجد أيضًا قرص من أول أكسيد السيليكون الغازي حول النجم يتكثف إلى سيليكات صلبة، وهي المراحل الأولى لتكوين الكواكب. حقوق الصورة: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)/M. McClure et al.

تلسكوب James Webb يرصد تكوين أحد الكواكب

استخدم علماء الفلك تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا لدراسة Cygni b 29، وهو جرم سماوي يبلغ حجمه حوالي 15 ضعف حجم كوكب المشتري[1]، ويدور حول نجم قريب. وقد وجدوا أدلة متعددة تشير إلى أن Cygni b 29 قد تشكل بالفعل من خلال عملية التكوين من الأسفل إلى الأعلى، مما يُقدم رؤى جديدة حول كيفية نشأة أضخم الكواكب. نُشرت ورقة بحثية تصف هذه النتائج يوم الثلاثاء في مجلة رسائل الفيزياء الفلكية.

من المعروف أن عملية تكوين الكواكب تحدث داخل أقراص عملاقة من الغاز والغبار حول النجوم من خلال عملية تُسمى التراكم. يتجمع الغبار معًا ليشكل حصى، تصطدم وتنمو تدريجيًا، مُشكلةً كواكب أولية، ثم كواكب كاملة. بعد ذلك، تجمع الكواكب الأكبر حجمًا الغاز لتُصبح كواكب عملاقة مثل المشتري. ونظرًا لأن تكوين الكواكب الغازية العملاقة يستغرق وقتًا أطول، ولأن

[1] (https://science.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-redefines-dividing-line-between-planets-stars/

https://coptic-treasures.com/

قرص المادة المُكوّنة للكواكب يتبخر ويختفي في النهاية، فإن الأنظمة الكوكبية تحتوي في النهاية على عدد أكبر بكثير من الكواكب الصغيرة مقارنةً بالكواكب الكبيرة.

على النقيض، تتشكل النجوم عندما تتفتت سحابة هائلة من الغاز، وينهار كل جزء منها تحت تأثير جاذبيته، فيصغر حجمه ويزداد كثافة. نظريًا، يمكن أن تحدث عملية تفتت مماثلة داخل الأقراص الكوكبية الأولية أيضًا. وهذا قد يفسر وجود بعض الأجسام الضخمة جدًا على بعد مليارات الأميال من نجومها المضيفة، في مناطق كان من المفترض أن يكون فيها القرص الكوكبي الأولي رقيقًا جدًا بحيث لا يسمح بتراكم المادة.

يقع النجم Cygni b 29 على الحد الفاصل بين ما يمكن تفسيره بهاتين الآليتين المختلفتين. يزن 15 ضعف وزن كوكب المشتري، ويدور حول نجمه على مسافة متوسطة تبلغ 1.5 مليار ميل (2.4 مليار كيلومتر)، وهي مسافة تقارب مسافة كوكب أورانوس في نظامنا الشمسي. وقد استهدفه فريق البحث لأنه قد يكون ناتجًا عن أي من العمليتين. "في النماذج الحاسوبية، من السهل جدًا أن يتطور التفتت في قرص إلى كتل أعلى بكثير من Cygni b 29. هذه هي أدنى كتلة يمكن الحصول عليها بشكل معقول. ولكن في الوقت نفسه، فهي أعلى كتلة يمكن الحصول عليها من التراكم"، كما قال المؤلف الرئيسي ويليام بالمر من جامعة جونز هوبكنز ومعهد علوم تلسكوب الفضاء، وكلاهما في بالتيمور.

استخدم برنامج بالمر الرصدي كاميرا الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRCam) التابعة لتلسكوب جيمس ويب الفضائي في وضع التصوير الإكليلي لتصوير كوكب Cygni b 29 مباشرةً. كان هذا الكوكب أول أربعة أجرام استهدفها البرنامج، وكلها معروفة بكتلتها التي تتراوح بين 1 و15 ضعف كتلة كوكب المشتري. كما اشترط الفريق أن تدور الأجرام المستهدفة على مسافة لا تتجاوز 15 مليار كيلومتر (9 مليارات ميل) من نجومها. كانت الكواكب جميعها حديثة التكوين وساخنة، حيث تراوحت درجة حرارتها بين 530 و1000 درجة مئوية (1000 إلى 1900 درجة فهرنهايت). وهذا يضمن تشابه التركيب الكيميائي لغلافها الجوي مع كواكب نظام HR 8799، الذي درسه بالمر سابقًا.

باختيار مرشحات مناسبة، تمكن الفريق من رصد دلائل امتصاص الضوء بواسطة ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وأول أكسيد الكربون (CO)، مما سمح لهم بتحديد كمية هذه العناصر الكيميائية الأثقل، والتي يُطلق عليها علماء الفلك مجتمعةً اسم المعادن. وجدوا أدلة قوية على أن الكوكب Cygni b 29 غني بالمعادن مقارنةً بنجمه المضيف، الذي يُشبه شمسنا في تركيبه. ونظرًا لكتلة الكوكب، فإن كمية العناصر الثقيلة التي يحتويها تُعادل حوالي 150 كوكبًا أرضيًا. وهذا يُشير إلى أنه تراكمت عليه كميات كبيرة من المواد الصلبة الغنية بالمعادن من قرص كوكبي أولي. كما استخدم الفريق مصفوفة تلسكوبات بصرية أرضية تُسمى CHARA (مركز علم الفلك عالي الدقة الزاوية) لتحديد ما إذا كان مدار الكوكب مُتوافقًا مع دوران النجم. وقد أكدوا هذا التوافق، وهو أمر متوقع لجسم تشكّل من قرص كوكبي أولي.

https://coptic-treasures.com/

قال آش ميسييه Ash Messier، الباحث المشارك وطالب الدراسات العليا في جامعة جونز هوبكنز: "تمكّنا من تحديث مدار الكوكب، كما رصدنا النجم المضيف لتحديد اتجاهه بالنسبة لهذا المدار. وأظهرنا أن ميل الكوكب متوافق تمامًا مع محور دوران النجم، وهو ما يُشابه ما نراه في كواكب مجموعتنا الشمسية". وأضاف بالمر Balmer: "تشير هذه الأدلة مجتمعةً بقوة إلى أن الكوكب Cygni b 29 قد تشكّل داخل قرص كوكبي أولي من خلال تراكم سريع لمواد غنية بالمعادن، وليس من خلال تفتت الغاز. بعبارة أخرى، تشكّل ككوكب وليس كنجم". وبينما يجمع الفريق البيانات عن الأهداف الثلاثة الأخرى ضمن برنامجهم، يخططون للبحث عن أدلة على وجود اختلافات في التركيب بين الكواكب ذات الكتلة المنخفضة والكواكب ذات الكتلة العالية. ومن شأن ذلك أن يُقدّم رؤى إضافية حول آليات تشكّلها.

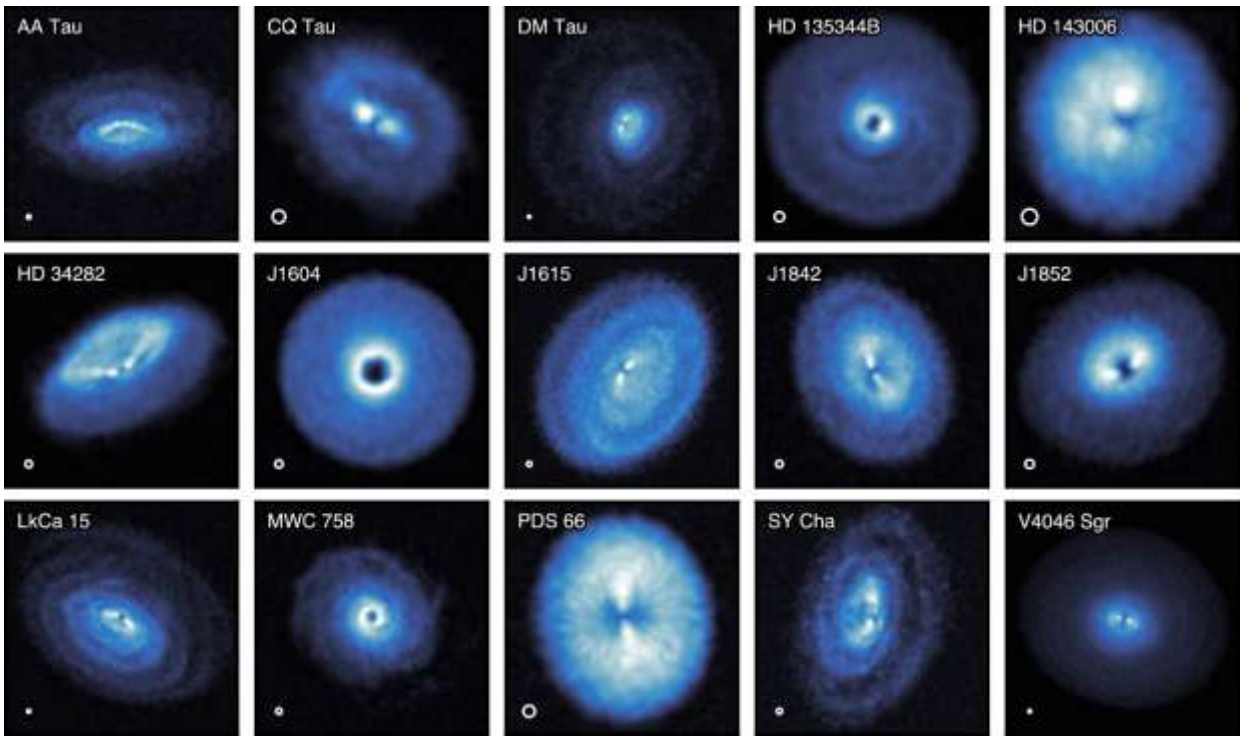
ديناميكيات تكوين الكواكب

ذكرت الجمعية الفلكية الأمريكية (AAS) المنظمة الرئيسية لعلماء الفلك المحترفين في أمريكا الشمالية[1]. الكواكب هي نتاج ثانوي لتكوين النجوم، حيث تتشكل في أقراص كوكبية أولية حول النجوم الحديدة. تمتلئ هذه الأقراص بالغاز والغبار، مما يؤدي إلى تركيز الكتلة في حلقات تُشكل في النهاية الكواكب. تختلف آلية هذه العملية، ويعتمد النظام الكوكبي الناتج على كيفية امتزاج المواد في القرص الكوكبي الأولي وتكوين الكواكب. شبّه تيغ الكواكب بالخبز: فنحن نعرف قائمة المكونات الأساسية اللازمة لصنعها، لكن النتيجة النهائية تعتمد على كيفية دمج هذه المكونات. نحتاج إلى دراسة ما يحدث في بيئة تكوين الكواكب لفهم كيفية تشكلها. بالاستفادة من الدقة المكانية والطيفية العالية لمصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر /دون المليمتر (ALMA)، طوّر تيغ Teague وزملاؤه مشروع exoALMA، وهو حملة لاكتشاف الكواكب تركز على الكواكب التي لا تزال في طور التكوين داخل الأقراص الكوكبية الأولية. وقد ركز هذا المشروع على 15 مصدراً، حيث تم الحصول على بيانات رصد عالية الدقة وتحليلها لاستكشاف الحركة، وبنية السرعة ثلاثية الأبعاد، وتوزيعات الكتلة داخل هذه الأقراص الكوكبية الأولية.

بدأت النتائج العلمية الأولية من مرصد إكسو ألما exoALMA في الكشف عن أن عملية تكوين الكواكب ديناميكية للغاية، حيث تكشف القياسات الحركية الدقيقة عن اضطرابات ديناميكية داخل الأقراص الكوكبية الأولية في جميع أنحاء العينة. تشير هذه الاضطرابات إلى تأثيرات الكواكب الأولية على حركة القرص وتوزيع كتلتها أثناء استمرار تكوينها، كما أن الدقة العالية لرصد ألما تكشف عن الآليات الداخلية للأقراص الكوكبية الأولية.

[1]) https://aasnova.org/2026/06/16/aas-248-day-1/#prettyPhoto

https://coptic-treasures.com/



عينة exoALMA الكاملة. تُظهر جميع الأقراص الخمسة عشر دليلاً على وجود بنية فرعية في انبعاثات الغاز الخاصة بها. [Teague et al. 2025]

تكوين الأقراص الكوكبية الأولى

تُعرف الأقراص الكوكبية الأولية (PPD) بأنها مهد الكواكب، ويتراوح عمرها بين مليون و30 مليون سنة، بمتوسط عمر يتراوح بين مليوني وثلاثة ملايين سنة، وذلك تبعًا لحجم النجم. يتكون القرص الكوكبي الأولي من سحابة دوارة من الغاز والغبار، ذات تركيب مشابه لتركيب نجمها، وتتشكل عبر الانهيار الجذبي لسحابة جزيئية. ويخضع تطورها لتوازن بين قوى الجاذبية والمغناطيسية وضغط الغاز والدوران. ويُعرف نهاية القرص الكوكبي الأولي بفقدانه للغاز والغبار. في بعض الحالات، قد يصل عمر القرص إلى 30 مليون سنة. وبشكل عام، يعتمد تطور القرص الكوكبي الأولي وعمره على كتلة نجم النظام، بالإضافة إلى معدل تشتت القرص أثناء تطوره من خلال التراكم والرياح المغناطيسية المائية والتبخر الضوئي. من المحتمل أن يكون قرصنا الكوكبي الأولي قد وُجد لمدة تتراوح بين 3 و5 ملايين سنة، تقريبًا. لسوء الحظ، لا تسمح لنا البيانات الفلكية بتحديد عمر القرص الكوكبي الأولي لنظامنا الشمسي بدقة تتجاوز الضعف، على الرغم من وجود علاقة عكسية واضحة بين أعمار الأقراص الكوكبية الأولية ذات الكتلة النجمية (مثلاً 2-3 ملايين سنة)[1].

[1] William F. McDonough, Earth's composition: origin, evolution and energy budget, arXiv:2505.02641v1 [physics.geo-ph] 05 May 2025

https://coptic-treasures.com/

تُستخدم جسيمات الكوندريول وجسيمات ريوغو لتسجيل المجال المغناطيسي للنظام الشمسي المبكر كدالة لموقعها حول الشمس. توفر هذه البيانات رؤى محتملة حول تطور القرص الكوكبي الأولي، وتُسهم في تطوير نماذجنا لتطوره خلال مرحلة الرياح المغناطيسية المائية. تُعدّ مرحلة التبخر الضوئي، وهي المرحلة الأخيرة من تطور القرص الكوكبي الأولي، بمثابة إكمال لهذه العملية وإبطاء نمو الكوكب، حيث تُؤيّن إشعاعات الفوتونات عالية الطاقة (الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية) الغازات، مما يؤدي إلى تحركها نحو الخارج في تشتت حول الشمس. لا تزال كمية الكتلة التي اكتسبتها الأرض خلال وبعد فقدان القرص غير معروفة. من المتوقع استمرار تراكم المواد الشبيهة بالكوندريت تدريجيًا، ولكن نظرًا لانخفاض درجات الحرارة وفقدان القرص الكوكبي الأولي الغني بالهيدروجين المحيط به، فمن المرجح أن نمو الكواكب اللاحق كان أبطأ وأكثر برودة وأكثر تأكسدًا.

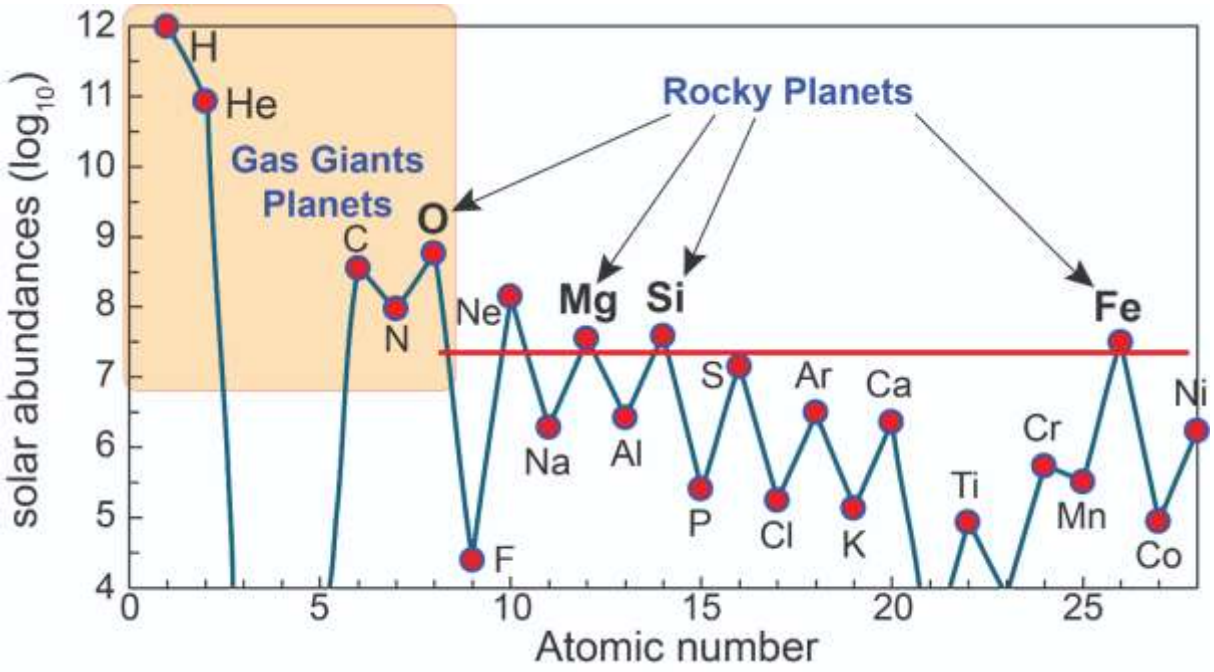
تُعدّ الكوندريتات، وخاصةً من نوع NC، نتاجًا متبقيًا في المراحل اللاحقة لتطور القرص الكوكبي الأولي. على الرغم من أن تكوّن الكوندريتات ربما حدث منذ تكوّن شوائب الكالسيوم والألومنيوم وحتى نهاية وجود القرص الكوكبي الأولي، يبدو أن معظم كوندريتات NC قد تشكّلت بعد حوالي مليوني إلى ثلاثة ملايين سنة من تكوّن شوائب الكالسيوم والألومنيوم. ترافق انهيار السحابة الجزيئية ودورانها مع تدفق سريع للمواد إلى النجم وتدفقها إلى الخارج للحفاظ على الزخم الزاوي. وقد أدى التسخين الاحتكاكي للقرص، وخاصةً على المستوى المتوسط عالي الكثافة خلال هذه العمليات، إلى توليد تدرج حراري مركزي شمسي. هنا، أركز على الخصائص التركيبية للأطوار المتكثفة.

يتطور القرص الكوكبي الأولي زمنيًا ومكانيًا من خلال التسخين ثم التبريد، وتترافق المرحلة الأخيرة مع تكثف المعادن بتسلسل يعتمد على درجة الحرارة، كما هو مسجل في المعادن الكوندريتية. [تجدر الإشارة إلى أنه في المراحل الأولى للنظام الشمسي، كانت أبعاد الزمان والمكان غير واضحة المعالم]. يؤدي تكثف المعادن واندماجها في الكويكبات النامية إلى تطور غير متجانس كيميائيًا للكواكب بالنسبة للقرص الكوكبي الأولي، مما يفسر الاختلاف في التركيب النظائري للأكسجين بين الكواكب والنيازك والشمس. من بين العناصر الأربعة الرئيسية المكونة للكواكب الأرضية (الأكسجين، المغنيسيوم، السيليكون، الحديد)، يُعد الأكسجين الأكثر وفرة، حيث يشكل نصف ذرات هذه الكواكب. ومن المهم ذكره أن أيًا من عمليات التكثف والتراكم هذه لا يؤثر على التركيب العام للقرص الكوكبي الأولي، لأن إزالتها من القرص لا تُمثل سوى فقدان ضئيل للكتلة.

يبدأ التطور المبكر للكواكب الأولية من نظام شمسي داخلي حار (أي مصدر مواد النيكل) تهيمن عليه مكثفات الأوليفين olivine وسبائك الحديد والنيكل Fe-Ni alloys، مما يؤدي إلى نشوء الكواكب الصغيرة والكواكب ذات النوى المعدنية المحاطة بسيليكات غنية بالمغنيسيوم. خلال تراكم الكواكب الصغيرة والكواكب المتمايزة، من المحتمل أن تتحكم الاختلافات في الخصائص الفيزيائية للمعادن مقابل السيليكات (مثل القوة الميكانيكية والمغناطيسية والتوصيل الحراري) في بعض التركيبات النهائية للكواكب (مثل نسبة الأكسجين إلى الحديد).

https://coptic-treasures.com/

لا يتطلب تكثيف العناصر الأربعة الرئيسية (الأكسجين، والمغنيسيوم، والسيليكون، والحديد)، بالإضافة إلى الألومنيوم والكالسيوم والنيكل، التي تُشكل ما يقارب 98 إلى 99% من وزن (ونسبة ذرية) الكواكب الصخرية، دمج أي عناصر متوسطة التطاير. ويفترض إضافة هذه العناصر الثلاثة الأخيرة ثبات نسب الكالسيوم إلى الألومنيوم والحديد إلى النيكل (1.07 ± 0.04 و17.4 ± 0.5 على التوالي) باستخدام نسب الكوندريت chondritic الثابتة. ويعتمد دمج العناصر ذات درجات حرارة التكثيف T_50 المنخفضة على تدرج درجة الحرارة الشمسي المركزي المتطور لـ PPD. وفي هذا الصدد، يُعد التباين بين كوندريتات CC وNC كبيرًا. تُظهر كوندريتات CC اعتمادًا على التركيب، حيث أن تلك التي تحتوي على مادة أساسية أكثر وعدد أقل من الكوندريتات تكون أقل استنزافًا للعناصر متوسطة التطاير، سواءً كانت محبة للصخور أو محبة للحديد. على النقيض من ذلك، تحتوي النيازك الكوندريتية من نوع NC على نسبة أعلى بكثير من الكوندريتات وكميات محدودة من المادة الأساسية. وتتميز هذه النيازك بنقص في العناصر المحبة للحديد متوسطة التطاير مقارنةً بالعناصر المحبة للصخور. ومن المرجح أن هذه السمة الفريدة للنظام الشمسي الداخلي تعود إلى تكثف السيليكات الأكثر تطورًا ذات درجات الحرارة المنخفضة، مما يؤدي إلى دمج كميات أكبر من العناصر المحبة للصخور متوسطة التطاير.



يُظهر منحنى الوفرة الكيميائية الشمسية وفرة العناصر، حيث تُعبّر عنها المعادلة Ai = log10(Ni/NH) + 12، ويُرسم عدد ذرات النيكل وفقًا لعددها الذري. وتختلف العناصر الأكثر وفرة في الكواكب الغازية والجليدية العملاقة (الهيدروجين، والهيليوم، والكربون، والنيتروجين، والأكسجين) عن تلك الموجودة في الكواكب الصخرية (الأكسجين، والحديد، والمغنيسيوم، والسيليكون).

https://coptic-treasures.com/

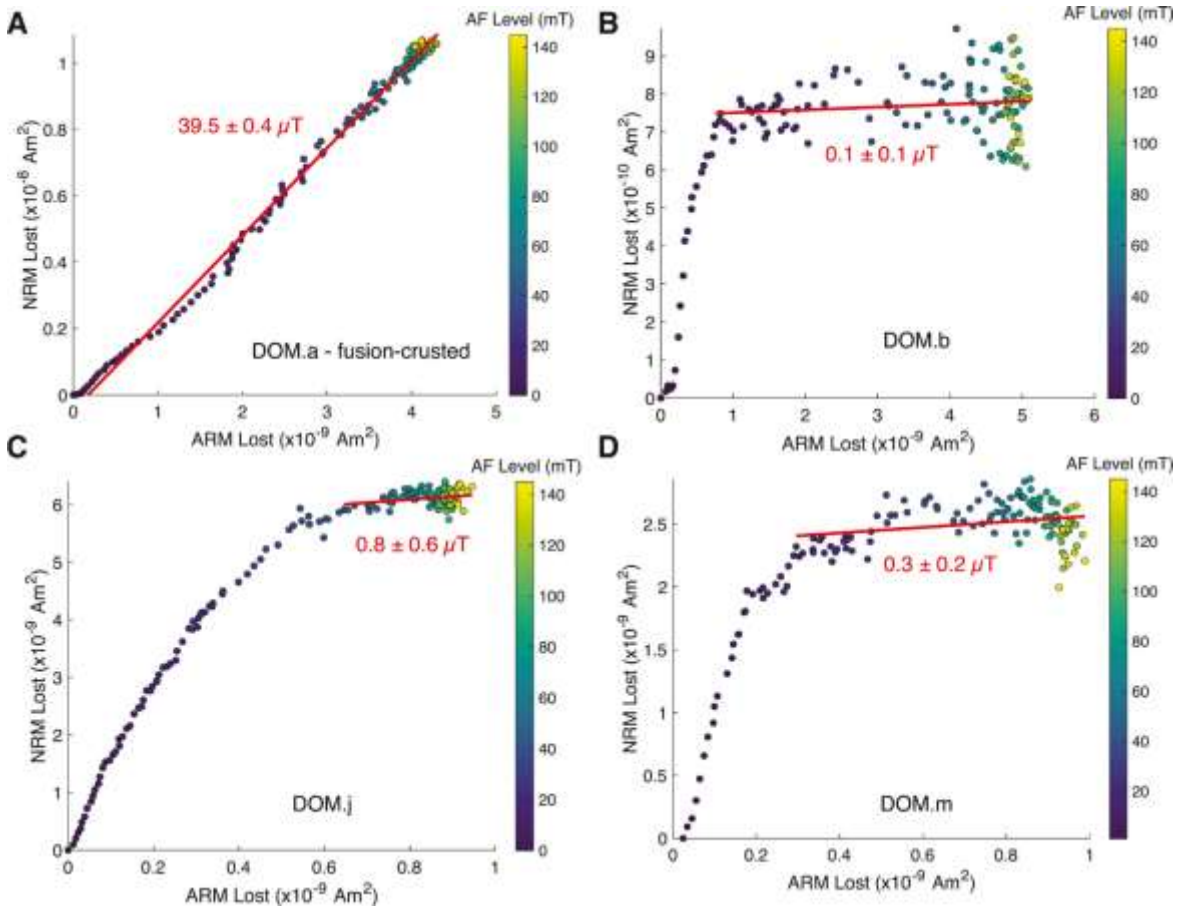
عمر سديم النظام الشمسي الخارجي من النيازك الكربونية

يلعب تطور الأقراص الكوكبية الأولية وعمرها دورًا محوريًا في تكوين وبنية الأنظمة الكوكبية. تشير الملاحظات الفلكية إلى أن هذه الأقراص تتطور على مرحلتين زمنيتين، حيث تتراكم على النجم لعدة ملايين من السنين، ثم يتبدد الغاز في غضون أقل من مليون سنة. ولأن المجالات المغناطيسية للسديم الشمسي تستمد قوتها من غاز القرص الكوكبي الأولي، يمكننا استخدام قياسات المغناطيسية القديمة لاستنتاج عمر السديم الشمسي[1]. كما يمكننا استخدام قياسات المغناطيسية القديمة للنيازك لتحديد هذا العمر، والتحقق مما إذا كان السديم الشمسي قد مر بمرحلتين زمنيتين في تطوره. دراسة القياسات المغناطيسية القديمة لعينات فرعية من نيزكين كربونيين من نوع CO. إذا كان بإمكان الماغنيتيت magnetite في هذين النيزكين اكتساب مغناطيسية متبقية ناتجة عن التبلور، والتي سجلت المجال المحيط أثناء التغيرات المائية، فإن قياساتنا تشير إلى أن شدة المجال المغناطيسي المحلي في موقع الجسم الأم لـ CO كانت 0.9 μT> ميكروتسلا في وقت ما بين 2.7 و5.1 مليون سنة بعد تكوّن الشوائب الغنية بالكالسيوم والألومنيوم. وبالاقتران مع دراسات المغناطيسية القديمة السابقة، نستنتج أن تبدد السديم الشمسي في المنطقة 3-7 AU وحدة فلكية حدث بعد أقل من 1.5 مليون سنة من تبدد السديم في المنطقة 1-3 وحدة فلكية، مما يشير إلى أن الأقراص الكوكبية الأولية تمر بمرحلتين زمنيتين خلال عمرها، وهو ما يتوافق مع التبدد الناتج عن التبخر الضوئي و/أو الرياح المغناطيسية المائية. كما نناقش التوجهات المستقبلية اللازمة للحصول على سجلات قوية لحقول السدم الشمسية باستخدام الكوندريتات الضخمة، بما في ذلك الحصول على الأعمار من النيازك والعمل التجريبي لتحديد كيفية اكتساب الماغنيتيت للمغناطيسية أثناء تغير الجسم الأم للكوندريت.

تلعب المجالات المغناطيسية دورًا هامًا في تكوين الكواكب. ففي الملايين الأولى من عمر النظام الشمسي، حين كان الغاز والغبار هما المكونان الوحيدان، كانت المجالات المغناطيسية مرتبطة بالغاز. وقد تكون النيازك، وهي صخور تشكلت في المراحل المبكرة للنظام الشمسي ووصلت إلى الأرض، قد سجلت هذا المجال المغناطيسي المحيط وحافظت على هذا السجل لمليارات السنين. ومن خلال إجراء قياسات مغناطيسية قديمة للنيازك وربطها بدراسات سابقة، حددنا متى تبدد الغاز في النظام الشمسي المبكر. تشير نتائجنا إلى أن الغاز استمر لحوالي 3 ملايين سنة وتشتت في أقل من 1.5 مليون سنة. ويتوافق هذا مع آليات تشتت الغاز التي تشمل التسخين من الشمس الفتية والرياح المغناطيسية التي تطرد الغاز من النظام الشمسي.

[1] Borlina, C. S., Weiss, B. P., Bryson, J. F. J., & Armitage, P. J. (2022). Lifetime of the outer solar system nebula from carbonaceous chondrites. Journal of Geophysical Research: Planets, 127, e2021JE007139

https://coptic-treasures.com/



تجارب قياس شدة المجال المغناطيسي القديم للمغناطيسية المتبقية المعززة (ARM) للعينات المختارة (a) DOM.a، (b) DOM.b، (c) DOM.j، و(د) DOM.m من DOM 08006. يوضح الشكل فقدان المغناطيسية المتبقية الطبيعية (NRM) أثناء إزالة المغنطة التدريجية باستخدام مجال متناوب (AF) حتى 145 mT، وفقدان المغناطيسية المتبقية المعززة (ARM) أثناء إزالة المغنطة باستخدام مجال متناوب (AF) حتى 145 mT (مجال متناوب 145 mT مع مجال انحياز مستمر 50 µT). تم الإبلاغ عن شدة المجال المغناطيسي القديم (f' = 3.33) وفترات الثقة 95% الخاصة بها. تمثل الخطوط الحمراء نطاق الإكراه المغناطيسي المستخدم لحساب المطابقة.

كيف تشكلت الأرض

بدأ تراكم الكواكب الأرضية بتجمع حبيبات القرص والمكثفات عالية الحرارة لتشكيل حصى، والتي بدورها اندمجت بفعل الجاذبية لتكوين كويكبات يصل حجمها إلى مئات الكيلومترات. وُجدت كويكبات ذات نوى معدنية، والتي تُصنف اليوم على أنها نيازك حديدية، خلال المليون سنة الأولى من عمر النظام الشمسي. إن التركيب الحالي للأرض، بما في ذلك مياهها ومركباتها الأخرى الضرورية للحياة، موروث من عمليات التراكم والتجزئة التي حدثت خلال تكوينها وتاريخها المبكر. ومن خلال استكشاف تركيب الأرض والأجرام السماوية الأخرى، ودراسة العمليات التي تحدث في الأقراص الكوكبية الأولية والأنظمة الكوكبية الأخرى

https://coptic-treasures.com/

التي تبعد مئات إلى آلاف السنين الضوئية، يمكن الكشف عن تطور كوكب الأرض بتفاصيل متزايدة، بدءًا من غبار السديم الشمسي وصولًا إلى كوكب منفصل وديناميكي[1].

تشكلت الشمس والكواكب والأجرام الأخرى في النظام الشمسي نتيجةً لانكماش جزء من سديم شمسي بفعل الجاذبية، وذلك قبل حوالي 4.5 إلى 4.6 مليار سنة. كان الجزء الذي سيُصبح فيما بعد النظام الشمسي، والذي يُسمى السديم الشمسي، يبلغ قطره في البداية حوالي سنة ضوئية (حوالي 9.5 تريليون كيلومتر)، وكان يتكون من حوالي 74% هيدروجين، وحوالي 24% هيليوم، وحوالي 2% من العناصر الكيميائية الأخرى. لا تزال الآلية الدقيقة المسؤولة عن بدء انكماش السديم الشمسي محل تكهنات. ربما تضمنت هذه الآلية انضغاط السديم أثناء مروره عبر موجة كثافة في ذراع حلزوني أثناء دورانه حول مركز مجرتنا، درب التبانة. وربما يكون قد حدث ذلك نتيجةً لموجة صدمية انتشرت عبر السديم عندما انفجر نجم ضخم قريب كمستعر أعظم. من المتفق عليه عمومًا أنه بمجرد بدء الانكماش، استمرت التأثيرات الجاذبية داخل السديم الشمسي في استمرار العملية[2]. أي دوران بطيء أولي للسديم الشمسي زاد من سرعته مع انكماشه للحفاظ على الزخم الزاوي. (يُلاحظ التأثير نفسه لدى متزلجي التزلج الفني، حيث تزداد سرعة دورانهم كلما اقتربوا بأذرعهم من أجسامهم). تسبب ازدياد سرعة الدوران في تحول السديم أولًا إلى شكل مفلطح، ثم إلى قرص استوائي مسطح. تركزت معظم كتلة السديم الشمسي في مركز القرص، مُشكلةً الشمس الأولية، التي ازدادت سخونتها بفعل الانكماش الجاذبي.

مع تشكل الشمس الأولية في المركز، بدأ التكثيف الجزئي - وهي عملية تتصلب فيها المادة الغازية إلى حبيبات صغيرة بحجم الرمل فقط في المناطق التي تكون فيها درجة الحرارة المحيطة أقل من نقطة انصهار المادة. تكثفت حبيبات معدنية من الحديد والنيكل فقط بالقرب من الشمس الأولية. أما في المناطق الأبعد، حيث كانت درجة الحرارة أقل، فقد انضمت إليها حبيبات من معادن السيليكات. في مناطق أبعد، تكثفت أنواع مختلفة من الجليد، كالماء وثاني أكسيد الكربون والميثان والأمونيا. اصطدمت هذه الحبيبات الصلبة ببعضها والتصقت ببعضها في عملية تُعرف بالتراكم، مُشكّلةً كويكبات نمت في الحجم. خلال فترة زمنية تتراوح بين بضعة عشرات الملايين إلى مئة مليون سنة، نمت أكبر الكويكبات لتصبح كواكب أولية، بينما أصبحت الكويكبات الأصغر منها العديد من الأقمار وغيرها من الأجرام الصغيرة في النظام الشمسي. مع استمرار نمو الكواكب الأولية، ازداد تأثير جاذبيتها. استطاعت جذب كميات أكبر من مادة القرص، مما سرّع نموها، وفي الوقت نفسه نظّف الفضاء بين الكواكب المحيط بها. بعد ذلك، اخترق الإشعاع الشمسي الفضاء بين الشمس والكواكب، جالبًا الضوء والحرارة إلى أسطحها التي لا تزال تتطور. خلال هذه الفترة، بدأت الكواكب تتطور بطرق مختلفة. كان للكوكب الثالث من الشمس، الأرض وجيرانها في النظام الشمسي الداخلي (عطارد والزهرة والمريخ)، مجالات جاذبية ضعيفة نسبيًا، مما أدى، إلى جانب ارتفاع درجات حرارة

[1] Alex N. Halliday & Robin M. Canup, The accretion of planet Earth, Nature Reviews Earth & Environment volume (2023) 4, pages19–35

[2] https://www.ebsco.com/research-starters/science/earths-origin

https://coptic-treasures.com/

سطحها وتعرضها للرياح الشمسية، إلى فقدانها كميات كبيرة من الغازات الأخف وزنًا. هذا الغلاف الجوي الأول، الذي يُحتمل أن يكون مكونًا من الهيدروجين والهيليوم والميثان والأمونيا وثاني أكسيد الكربون وبخار الماء (غازات شائعة في السديم الشمسي)، انفصل عن الكواكب الداخلية ودُفع بعيدًا إلى النظام الشمسي الخارجي. أما الكواكب الخارجية، المشتري وما بعده، فلم تتأثر كثيرًا بسبب انخفاض درجات حرارتها وكتلتها الأكبر، وبالتالي انخفاض تأثير الرياح الشمسية عليها. ونتيجة لذلك، أصبحت كواكب عملاقة منخفضة الكثافة تتكون من الغاز والسائل والجليد، ذات نوى صغيرة صخرية ومعدنية.

مع اقتراب عملية التراكم من نهايتها، تعرضت الأرض (إلى جانب الكواكب الداخلية الأخرى) لقصف أخير مكثف من الكويكبات المصطدمة. ومع كل جسم يصطدم بسطح الأرض، تحولت طاقة حركته إلى طاقة حرارية. علاوة على ذلك، كانت مستويات النشاط الإشعاعي أعلى بكثير في الأرض في مراحلها المبكرة، نظرًا لأن العديد من العناصر المشعة ذات أعمار النصف القصيرة لم تكن قد تحللت بعد. ومع ازدياد حجم الأرض، مالت إلى عزل نفسها، مما صعّب على الطاقة المنبعثة من التحلل الإشعاعي في باطنها الوصول إلى سطحها والهروب. ساهمت كل هذه العوامل في رفع درجة حرارة الأرض في مراحلها المبكرة إلى درجة انصهارها جزئيًا على الأقل، مما سمح بالتمايز الكيميائي وتكوين البنية الداخلية الطبقية للأرض. غاصت كتل منصهرة من المعادن الثقيلة كالحديد والنيكل إلى المركز، مُشكّلةً اللب الغني بالحديد. بينما بقيت معادن السيليكات والأكاسيد الأقل كثافة، مُشكّلةً الوشاح. كما انصهر السطح أيضًا، مُشكّلًا محيطًا من الصهارة ربما بلغ عمقه بضع مئات من الكيلومترات. في نهاية المطاف، بردت السطح وتصلبت لتشكل قشرة بازلتية رقيقة بدائية، ربما تشبه قشرة قاع المحيط الحالية. في الوقت نفسه، أدى انبعاث الغازات إلى إطلاق الغازات المحتبسة في باطن الأرض بوتيرة هائلة، مُنتجًا الغلاف الجوي الثاني للأرض، والذي يُرجح أنه يتكون في معظمه من بخار الماء وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت، مع كميات أقل من النيتروجين وكبريتيد الهيدروجين وغازات أخرى، ولكن دون وجود أكسجين حر. (يستمر انبعاث الغازات اليوم من خلال البراكين والشقوق والفتحات البركانية، ولكن بمعدل أقل بكثير).

مع برودة الأرض، تكثف بخار الماء في الغلاف الجوي، مُشكلاً السحب، ثم هطل مطرًا، مُكوّنًا الجداول والمحيطات الأولى. ونظرًا لوفرة ثاني أكسيد الكربون، إلى جانب ثاني أكسيد الكبريت وكبريتيد الهيدروجين في الغلاف الجوي، كان هذا المطر المبكر شديد الحموضة، مما أدى إلى تجوية كيميائية سريعة للصخور السطحية. حملت الجداول نواتج التجوية إلى المحيطات، مما زاد من ملوحتها بسرعة. وبحلول حوالي أربعة مليارات سنة مضت، وصلت المحيطات إلى حجمها ودرجة ملوحتها الحالية تقريبًا. ذابت كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي في المحيطات، واختلطت بمواد ذائبة أخرى، ثم ترسبت على شكل رواسب (معظمها على شكل معدن الكالسيت، كربونات الكالسيوم). ومع إزالة الغازات الأخرى من الغلاف الجوي، بقي النيتروجين، ليصبح في نهاية المطاف المكون الرئيسي للغلاف الجوي.

https://coptic-treasures.com/

قبل حوالي 3.8 مليار سنة، ظهرت أولى أشكال الحياة. ربما تكونت الجزيئات العضوية، بما فيها الأحماض الأمينية، في الغلاف الجوي والمحيطات البدائية للأرض، حيث وفرت الأشعة فوق البنفسجية الشمسية والبرق والفتحات الحرارية المائية في أعماق البحار الطاقة اللازمة، أو ربما وصلت إلى سطح الأرض بفعل اصطدامات المذنبات والكويكبات والنيازك. كانت الكائنات الحية الأولى لاهوائية (قادرة على البقاء بدون أكسجين) لعدم وجود أكسجين حر في الغلاف الجوي والمحيطات. ثم طورت البكتيريا الزرقاء، وربما كائنات حية بدائية أخرى، عملية التمثيل الضوئي، مستخدمة ضوء الشمس لتحويل الماء وثاني أكسيد الكربون إلى سكريات كغذاء. أدى هذا التفاعل إلى إطلاق الأكسجين الحر في المحيطات والغلاف الجوي، وتطورت الحياة لتستغله في استخلاص الطاقة من الغذاء. وهكذا، تحولت الأرض من مراحل تكوينها الأولى إلى ما هي عليه اليوم، مكان تزدهر فيه الحياة، وتتشكل فيه الصخور وتتعرض للتجوية على سطحه، وحيث يحرك باطنها الديناميكي العمليات التكتونية.



يُظهر هذا التصميم الفني نجمًا فتيًا محاطًا بقرص من الغاز والغبار، وهي المواد الخام التي يُعتقد أن الكواكب الصخرية مثل الأرض تتشكل منها. الصورة مقدمة من وكالة ناسا/مختبر الدفع النفاث التابع لمعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا. NASA/JPL-Caltech



تُظهر هذه الصور الملتقطة بواسطة تلسكوب هابل الفضائي أجزاءً من سديم الجبار، وهي منطقة قريبة نسبيًا حيث تتشكل النجوم حاليًا. تُظهر كل صورة قرصًا نجميًا يدور حول نجم فتيّ. عند النظر إليها من زوايا مختلفة، تبدو بعض هذه الأقراص متوهجة بفعل ضوء نجم قريب، بينما تبدو أخرى داكنة وتظهر كظلال على خلفية الغاز المتوهج لسديم الجبار. كل صورة منها تُعدّ نظيرًا معاصرًا لسديمنا الشمسي، وهو موقع يُحتمل أن تتشكل فيه الكواكب اليوم. credit: modification of work by NASA/ESA, L. Ricci (ESO)

https://coptic-treasures.com/

كيف تتشكل الكواكب؟

يُعدّ الغبار المحيط بالنجم عاملاً حاسماً في تكوين الأجرام السماوية حوله. يحتوي هذا الغبار على عناصر مثل الكربون والحديد، والتي تُسهم في تكوين الأنظمة الكوكبية[1]. عندما يكون النجم في مرحلة تكوّن قرصه، والمعروفة أيضاً بمرحلة تي تاوري، فإنه يقذف رياحاً شديدة الحرارة تهيمن عليها جسيمات موجبة الشحنة تُسمى البروتونات وذرات الهيليوم المتعادلة. ورغم أن معظم مواد القرص لا تزال تتساقط على النجم، فإن مجموعات صغيرة من جزيئات الغبار المحظوظة تتصادم مع بعضها البعض، مُتكتلةً لتُشكّل أجساماً أكبر.

تتحول كتل الغبار إلى حصى، ثم إلى صخور أكبر حجماً تحتك ببعضها لتتمدد. يُساعد وجود الغاز على تماسك جزيئات المادة الصلبة. بعضها يتفتت، بينما يبقى البعض الآخر متماسكاً. هذه هي اللبنات الأساسية للكواكب، والتي تُسمى أحياناً "الكويكبات". في المناطق الباردة من القرص، بعيداً بما يكفي عن النجم ليتجمد الماء، تلتصق شظايا صغيرة من الجليد بالغبار. وقد تتراكم كرات ثلجية متسخة لتُشكّل نوى كوكبية عملاقة. تسمح هذه المناطق الباردة لجزيئات الغاز بالتباطؤ بما يكفي لتنجذب نحو الكواكب. هكذا يُعتقد أن كواكب المشتري وزحل وأورانوس ونبتون، وهي الكواكب الغازية العملاقة في نظامنا الشمسي، قد تشكلت. ويُعتقد أن المشتري وزحل قد تشكلا أولًا وبسرعة خلال العشرة ملايين سنة الأولى من عمر النظام الشمسي.

في الأجزاء الأكثر دفئًا من القرص، الأقرب إلى النجم، تبدأ الكواكب الصخرية بالتشكل. بعد تشكل الكواكب الجليدية العملاقة، لا يتبقى الكثير من الغاز لتتراكم عليه الكواكب الأرضية. قد تستغرق الكواكب الصخرية مثل عطارد والزهرة والأرض والمريخ عشرات الملايين من السنين لتتشكل بعد ولادة النجم. لا تزال تفاصيل أماكن تشكل الكواكب في الأقراص لغزًا ومجالًا بحثيًا مستمرًا.

بمجرد تشكل الكواكب حول نجم، تُسمى هذه الكواكب بالأنظمة الكوكبية، وهي عبارة عن مجموعات من الأجسام المرتبطة جاذبيًا والتي تدور حول نجم. قد تتكون من كوكب واحد أو أكثر، وقد تشمل أيضًا الكواكب القزمة والكويكبات والأقمار الطبيعية والنيازك والمذنبات. تُعرف الشمس وكواكبها، بما فيها الأرض، بالنظام الشمسي. ويشير مصطلحا "النظام خارج المجموعة الشمسية" و"نظام الكواكب الخارجية" إلى الأنظمة الكوكبية الأخرى غير نظامنا الشمسي.

[1] (https://science.nasa.gov/exoplanets/how-do-planets-form/

https://coptic-treasures.com/

العوالم الصالحة للسكن قد تشكلت قبل المجرات الأولى

في أعقاب الانفجار العظيم مباشرةً، لم تكن هناك عناصر ثقيلة. كان هناك الهيدروجين فقط، الذي شكّل حوالي 75% من الكتلة، والهيليوم، الذي شكّل النسبة المتبقية البالغة 25%. (ربما وُجدت أيضًا كميات ضئيلة من الليثيوم، وحتى البريليوم). لم يكن هناك أي شيء أثقل، أي لم يكن هناك ما يُشكّل الكواكب الصخرية. بعد بضع مئات من ملايين السنين، تشكّلت النجوم والمجرات الأولى. مع تعاقب أجيال النجوم، شكّلت عناصر أثقل ونشرتها في أرجاء الكون. بعد ذلك فقط، أمكن للكواكب الصخرية أن تتشكّل، وبالتالي الكواكب الصالحة للسكن. هذا أمرٌ مُسلّم به في علم الفلك[1].

ترتكز الدراسة على المستعرات العظمى البدائية، وهي أول النجوم التي انفجرت في الكون. عاشت هذه النجوم الضخمة حياة قصيرة وماتت في ريعان شبابها في انفجارات هائلة. وبلغت ذروتها عند الانزياح الأحمر 20 تقريبًا، عندما انفجرت نجوم الجيل الثالث، وهي نجوم ضخمة للغاية، كمستعرات عظمى ناتجة عن عدم استقرار الأزواج. تُظهر المحاكاة أن هذه النجوم تشكلت في هالات المادة المظلمة حيث سمحت درجة الحرارة بتجمع كميات كبيرة من الهيدروجين الجزيئي.

ووفقًا لويلين Whalen وزملائه الباحثين، عندما انفجرت هذه النجوم، تشكلت نجوم منخفضة الكتلة في أعقاب ذلك. وتشكلت الكويكبات حول تلك النجوم، مما أدى إلى تكوين عوالم صخرية يُحتمل أن تكون صالحة للسكن. حدث كل هذا قبل تشكل المجرات الأولى. تستند هذه النتائج إلى محاكاة أجراها فريق البحث باستخدام برنامج إنزو Enzo. تبدأ الدراسة بنجم يتشكل بكتلة تعادل حوالي 200 كتلة شمسية. يعيش هذا النجم لحوالي 2.6 مليون سنة فقط قبل أن ينفجر كمستعر أعظم من نوع PI. يُثري الانفجار فقاعة المستعر الأعظم بعناصر غنية. وفي أعقاب ذلك، تتسبب الاضطرابات الهيدروستاتيكية في تكوّن نواة كثيفة بعد حوالي 3 ملايين سنة، بكتلة تعادل 35 كتلة شمسية. ويوضح الباحثون: "تتحقق جميع الشروط المعروفة لتكوّن الكواكب في هذه النواة: نمو الغبار، وتراكمه في منطقة خاملة، وبداية عدم استقرار التدفق، وتحوّل الغبار إلى كويكبات".

هنا يكمن اختلاف هذه الدراسة عن الدراسات السابقة. بما أن المستعر الأعظم من نوع PI ينفجر مُنتجًا غازًا غنيًا بالمعادن، فإن هذا الغاز يبرد بسرعة أكبر. وهذا يُتيح للنجم التالي أن يتشكل في وقت أقرب، وبالتالي، تكوّن الكويكبات والكواكب. في نهاية المطاف، تشكّل نجم أولي بكتلة تُعادل 0.3 كتلة شمسية. ثم تشكّلت الكويكبات على بُعد يتراوح بين 0.46 و1.66

[1] Xing, QF., Zhao, G., Liu, ZW. et al. A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova. Nature (2023) 618, 712–715

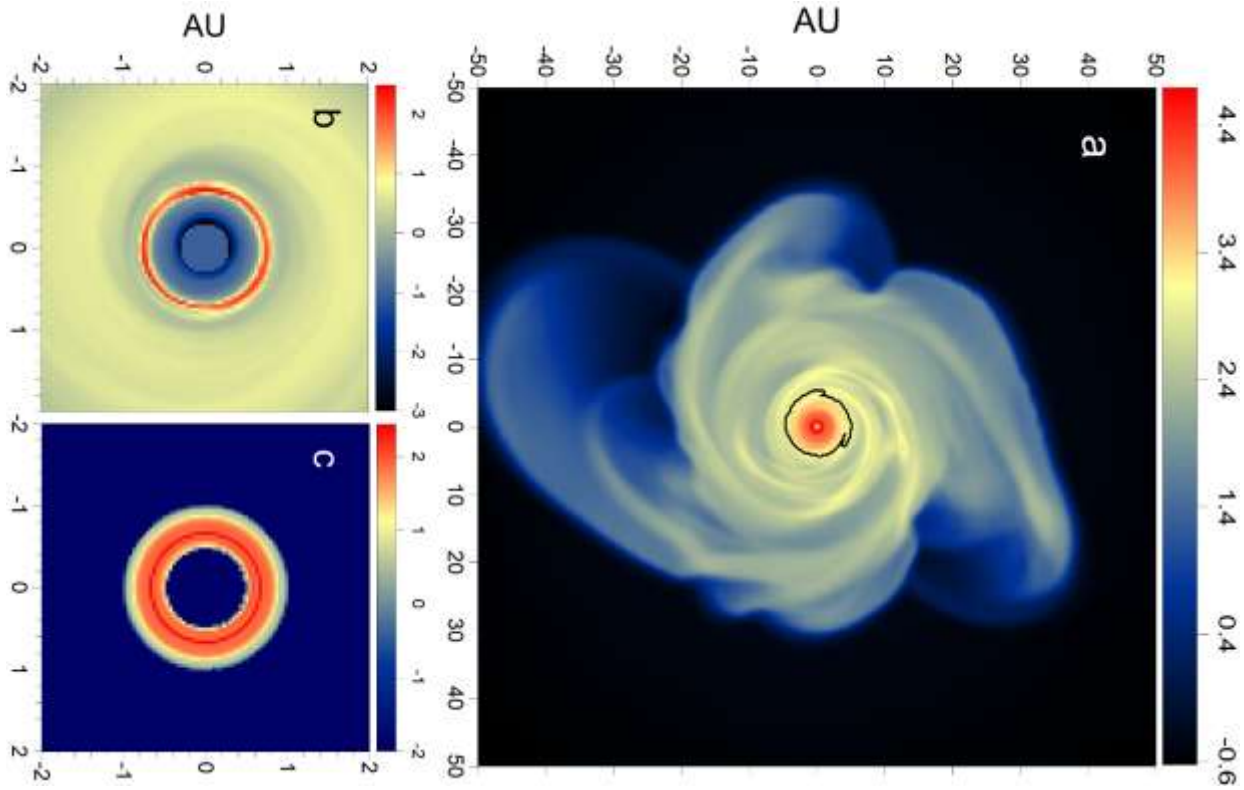
Eduard I. Vorobyov, Daniel J. Whalen, et al. Planetesimals Formed in HO-Rich Disks at Cosmic Dawn, Astrophysics of Galaxies (astro-ph.GA), arXiv:2501.08375v3 [astro-ph.GA] 29 Jul 2025

https://coptic-treasures.com/

وحدة فلكية من نجمها. تحتاج الحياة إلى الماء، وقد أظهرت محاكاة الباحثين أيضًا أن النظام الشمسي الفتيّ احتوى على كمية من الماء تُشابه تلك الموجودة في نظامنا الشمسي.

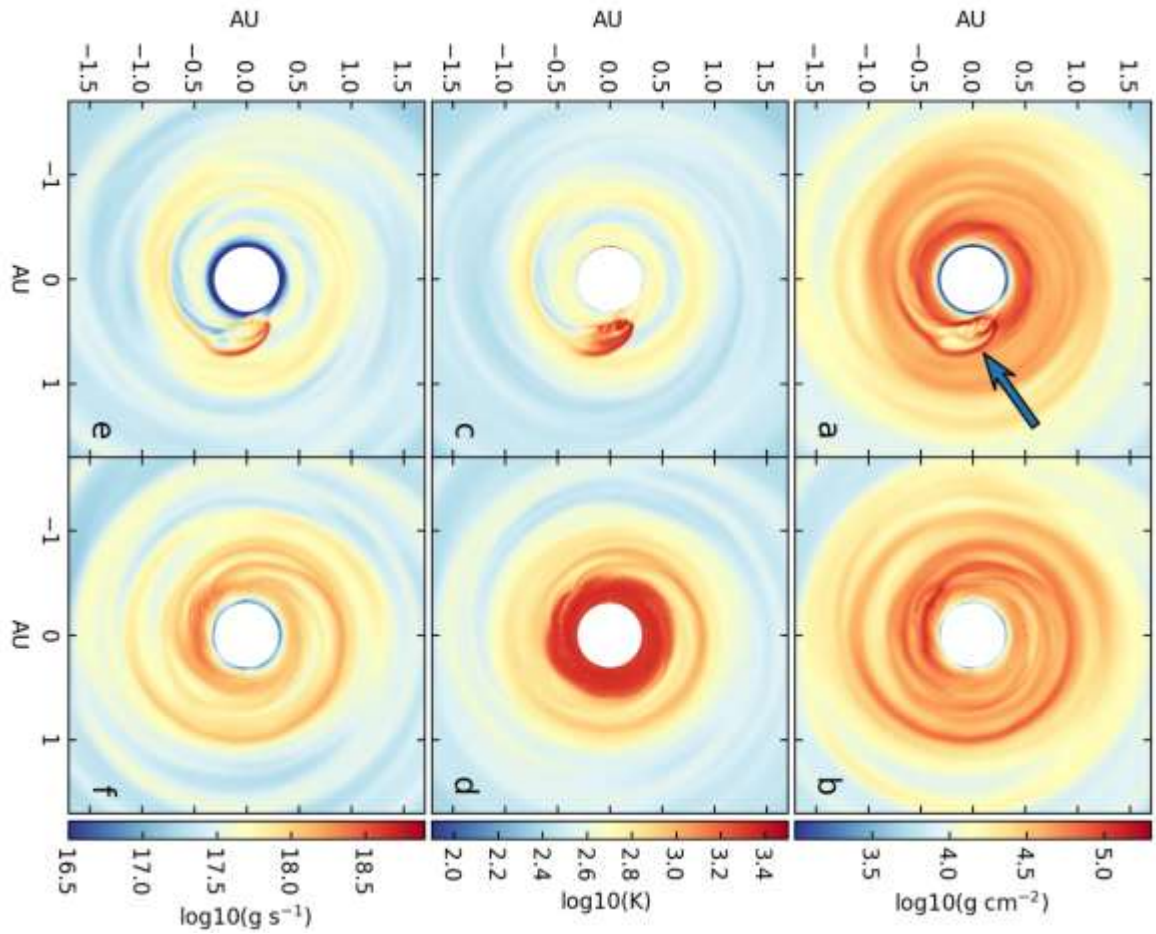
تشكّلت الكويكبات في القرص المحيط بالنجم ذي الكتلة المنخفضة، ومع مرور الوقت، اندمجت لتُشكّل الكواكب. بما أن المستعرات العظمى البدائية الأصلية أنتجت عناصر مثل الكربون والأكسجين والحديد، فمن المُرجّح أن جميع المكونات اللازمة كانت موجودة لتكوين كواكب صخرية، بل وحتى الحياة. الأمر اللافت للنظر هو أن هذا قد يكون حدث قبل تشكّل المجرات الأولى. إذا صحّ ذلك، فسيُغيّر فهمنا للكون وللحياة. مع ذلك، هذه مجرد محاكاة واحدة. كيف يمكن للملاحظات أن تدعم ذلك؟

يكتب ويلان وزملاؤه الباحثون في ورقتهم البحثية: "يمكن رصد هذه الكواكب كعوالم منقرضة تدور حول نجوم قديمة فقيرة بالمعادن في مجرتنا، وذلك في مسوحات الكواكب الخارجية المستقبلية". ووفقًا للمؤلفين، إذا توفرت الظروف المناسبة، فمن المحتمل أن تكون الكواكب الصخرية قد تشكلت في وقت أبكر مما تُظهره محاكاتهم. إذا صحّ ذلك، فإنه سيغير مسار الأحداث في تطور الكون برمته.



كثافات الغاز والغبار والكويكبات السطحية. تُظهر الأشكال من أ إلى ج توزيعات الغاز والغبار والكويكبات بعد 40 ألف سنة من تكوّن النجم الأولي، على التوالي. يُظهر الشكلان ب وج الغبار والكويكبات في المنطقة المركزية من القرص، ضمن نطاق 4 وحدات فلكية، على التوالي. يُشير الخط الأسود في الشكل أ إلى خط تجمد الماء. وحدات قياس الألوان هي لوغاريتم جرام/سم^2.

https://coptic-treasures.com/



على اليسار: منشأ انفجارات اللمعان. الجزء المركزي من القرص، ضمن نطاق 3 وحدات فلكية، قبيل (أ، ج، هـ) وأثناء (ب، د، و) انفجار تراكم النجم الأولي. تُظهر الصفوف من الأعلى إلى الأسفل كثافات سطح الغاز، ودرجات حرارة الغاز، ولزوجة التدفق الديناميكي المضطرب. يشير السهم إلى اضطراب محلي في الكثافة يُنتج تسخينًا لزجًا في القرص الداخلي. على اليمين: إجمالي اللمعان (التراكم بالإضافة إلى الغلاف الضوئي) وكتل الغبار المتبخر كدالة للزمن منذ ولادة النجم الأولي.

مدى صلاحية الأرض الأولى للحياة عليها

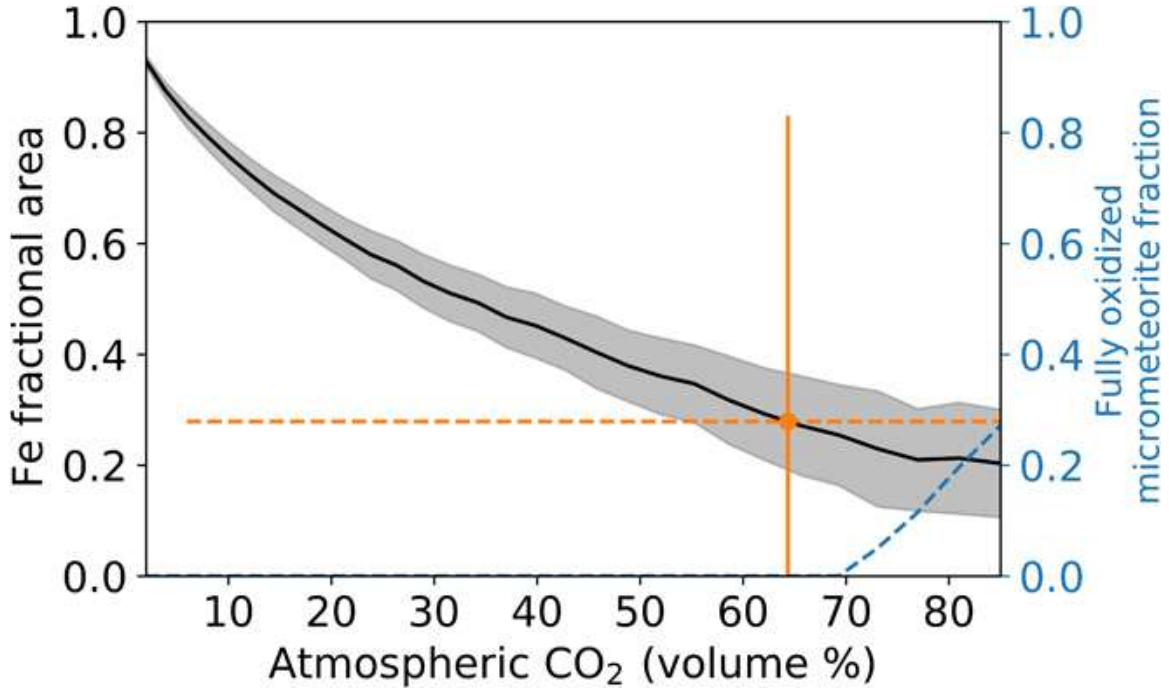
أُجريت أولى هذه الدراسات بقيادة جون تاردونو من جامعة روتشستر، ونُشرت نتائجها في وقائع الأكاديمية الوطنية للعلوم[1]. قدّم الباحثون أدلةً على وجود مجال مغناطيسي قوي حول الأرض، منذ حوالي 4.1 مليار إلى 4 مليارات سنة. ويستند استنتاجهم إلى وجود شوائب من الماغنيتيت في معادن معينة (الزركون)، ولذا يبدو موثوقًا للغاية. كان وجود مجال مغناطيسي قوي أمرًا بالغ الأهمية لنشوء الحياة على الأرض، لأنه كان سيحمي سطحها من الرياح الشمسية. من المعروف أن النجوم،

[1] J.A. Tarduno,R.D. Cottrell,R.K. Bono,H. Oda,W.J. Davis,M. Fayek,O.V.'. Erve,F. Nimmo,W. Huang,E.R. Thern,S. Fearn,G. Mitra,A.V. Smirnov, & E.G. Blackman, Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117 (5) 2309-2318

https://coptic-treasures.com/

مثل شمسنا، تُطلق كميات كبيرة من الإشعاع الضار في مراحلها الأولى، وبدون مجال مغناطيسي، من المشكوك فيه أن تتمكن الحياة على سطح الأرض من النجاة من هذا الكم الهائل من الإشعاع.

كيف كان غلاف الأرض الجوي في ذلك الوقت؟ استنادًا إلى نموذج بحثي نشره أوين ليمر من جامعة واشنطن وزملاؤه في مجلة[1] science Advances، يبدو أنه كان يتكون من 70% على الأقل من ثاني أكسيد الكربون. كنا نعلم مسبقًا من أبحاث سابقة أن الغلاف الجوي للأرض في بداياته كان منخفض الأكسجين للغاية. يزعم الباحثون أن نسبة ثاني أكسيد الكربون التي تبلغ 70% أو أكثر قد تفسر أكسدة الحديد الملحوظة في النيازك الدقيقة التي يبلغ عمرها 2.7 مليار سنة. ومن المرجح أن هذه التركيزات العالية امتدت إلى بداية حقبة الأركي قبل حوالي 4 مليارات سنة، مما يعني أن الحياة ربما نشأت في ظل هذا النوع من الغلاف الجوي.



افترضنا أن الغلاف الجوي يتكون من النيتروجين النقي وثاني أكسيد الكربون. يوضح المنحنى الأسود متوسط تنبؤ النموذج لمساحة المقطع العرضي للحديد غير المؤكسد مقارنةً بمساحة المقطع العرضي الكلية للنيزك الدقيق. افترضنا أن النيازك الدقيقة المحاكاة تحتوي على حبيبات معدنية مركزية كروية الشكل، لذا فإن مساحة المقطع العرضي لحبيبة الحديد غير المؤكسد تكون في أقصى حد لها. تُظهر المنطقة المظللة باللون الرمادي فاصل الثقة σ2 لنموذجنا. تُظهر النقطة البرتقالية وشريط الخطأ المتصل متوسط مساحة الكسر للحديد غير المؤكسد وفاصل الثقة σ2 من نيزكين دقيقين من الحديد وأكسيد الحديد. يُظهر شريط الخطأ البرتقالي المتقطع عدم اليقين المقابل في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من بيانات تومكينز وآخرون. تشير نقطة بيانات تومكينز وآخرون إلى أن مستوى ثاني أكسيد الكربون كان عند % (σ2). يُظهر الخط الأزرق المتقطع نسبة النيازك الدقيقة التي تم نمذجتها والتي تأكسدت بالكامل في الغلاف الجوي دون وجود حديد معدني متبقٍ. قد تؤدي هذه الجسيمات إلى نيازك دقيقة غنية بالمغنيتيت، وتظهر في نموذجنا بمجرد أن يصل تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى حوالي 70%.

[1] O. R. Lehmer et al. ,Atmospheric CO2 levels from 2.7 billion years ago inferred from micrometeorite oxidation. (2020)Science Advances Sci. Adv.6,eaay4644.

https://coptic-treasures.com/

كان قصف النيازك، ليس فقط النيازك الدقيقة بل أيضاً الاصطدامات الأكبر حجماً، عاملاً بيئياً رئيسياً آخر أثر على الأرض في بداياتها، وكلاهما كان أكثر شيوعاً مما هو عليه اليوم. لسوء الحظ، لا نملك سجلاً كاملاً لهذه الاصطدامات، لأن الصخور التي يزيد عمرها عن أربعة مليارات سنة نادرة جداً، إذ طُمست بفعل النشاط الجيولوجي. لا يمكننا سوى الحصول على تقديرات بناءً على معدل تكوّن الفوهات على سطح القمر - في الأماكن التي لا تزال فيها الفوهات القديمة ظاهرة - واستقراء هذا المعدل على الأرض. على الرغم من هذه القيود، أفاد فريق بقيادة تيموتي إريكسون من قسم أبحاث واستكشاف المواد الفضائية في مركز جونسون للفضاء التابع لناسا، مؤخراً في مجلة[1] "Nature Communications"، عن أقدم فوهة نيزكية عُثر عليها على الأرض حتى الآن. وقد تم تحديدها من خلال معادن تعرضت للتغير والصدمة أثناء اصطدام في ما يُعرف الآن بغرب أستراليا قبل حوالي 2.2 مليار سنة. ربما كان لهذا الاصطدام عواقب وخيمة على مناخ الأرض، لأنه تزامن مع خروج الأرض من فترة جليدية. قبل ذلك بقليل، كان كوكبنا مغطى بالكامل أو شبه بالكامل بالجليد، وهو سيناريو يُعرف عادةً باسم "الأرض المتجمدة". كان الاصطدام قويًا لدرجة أنه حوّل الجليد مباشرةً إلى بخار ماء، وهو غاز دفيئة قوي، مما أدى إلى ارتفاع درجة حرارة الكوكب بما يكفي لإنهاء العصر الجليدي. وكان الغلاف الحيوي للأرض، الذي كان آنذاك ميكروبيًا فقط، قادرًا على التكاثر والتنوع.

اكتشف العلماء أن النجوم والكواكب قد تكون أشقاء

اكتشف فريق دولي من العلماء تكوّن الكواكب في نظام نجمي يقل عمره عن 500 ألف عام. ويمثل هذا الاكتشاف، الذي نُشر اليوم في مجلة Nature، تحولًا جذريًا عن النظريات السابقة المقبولة حول تكوّن الكواكب، ويشير إلى أن النجوم والكواكب تنمو معًا كما لو كانت أشقاء[2]. وقد رُصدت حلقات الغبار بأعداد كبيرة في أنظمة يزيد عمرها عن مليون عام، وقبل هذه الدراسة، كان العلماء يعتقدون أن النجوم تصل إلى مرحلة النضج الكامل قبل أن تبدأ الكواكب بالتكوّن. إلا أن رصد النجم IRS 63، وهو نجم أولي شاب يقع على بُعد 470 سنة ضوئية من الأرض، في أعماق سحابة LI709 الكثيفة بين النجوم في كوكبة الحواء، كشف أن هذا الاعتقاد قد لا يكون صحيحًا. فمع عمر يقل عن نصف عمر النجوم الشابة الأخرى التي تحتوي على حلقات غبار، ويقل عمره عن 500 ألف عام، لا يزال أمام IRS 63 طريق طويل لجمع الكتلة، ومع ذلك، فقد بدأت الكواكب بالتكوّن بالفعل. قال إيان ستيفنز Ian Stephens، عالم الفلك في مركز الفيزياء الفلكية بجامعة هارفارد ومؤسسة سميثسونيان Smithsonian (CfA): "رصدنا القرص الكوكبي الأولي الفتيّ المسمى IRS 63، ووجدنا فجوات وحلقات داخله، ما يدل

[1] Erickson, T.M., Kirkland, C.L., Timms, N.E. et al. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, (2020) as Earth's oldest recognised meteorite impact structure. Nature Communications Nat Commun 11, 300

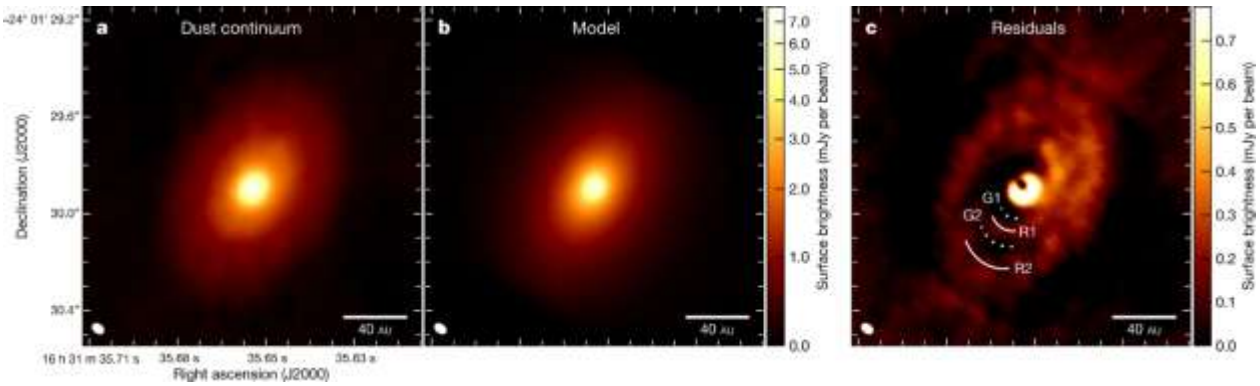
[2] https://www.cfa.harvard.edu/news/growing-stardust-scientists-discover-stars-and-planets-may-be-siblings Segura-Cox, D.M., Schmiedeke, A., Pineda, J.E. et al. Four annular structures in a protostellar disk less than 500,000 (2020) years old. Nature 586, 228–231

https://coptic-treasures.com/

على تكوّن الكواكب. كان يُعتقد تقليديًا أن النجم يُكمل معظم مراحل تكوينه قبل تكوّن الكواكب، لكن رصدنا أظهر أنهما يتكوّنان في الوقت نفسه". وأضافت دومينيك سيغورا كوكس، العالمة في معهد ماكس بلانك للفيزياء الفلكية خارج الأرض (MPE) في ألمانيا والمؤلفة الرئيسية للدراسة: "الحلقات في القرص المحيط بـ IRS 63 حديثة جدًا. كنا نعتقد سابقًا أن النجوم تدخل مرحلة النضج أولًا، وأنها أمهات الكواكب التي تأتي لاحقًا، لكننا نرى الآن أن النجوم الأولية والكواكب تنمو وتتطور معًا منذ المراحل المبكرة كالأشقاء".

كما كشفت عمليات الرصد عن دلالات مهمة لفهم تكوين نظامنا الشمسي. يتطلب تكوين نواة كوكب قادرة على استيعاب كمية كافية من الغاز لتكوين كوكب غازي عملاق ما لا يقل عن عشرة أضعاف كتلة الأرض من المواد الصلبة. وخلال دراسة القرص IRS 63، وجد العلماء أن هذا القرص الفتيّ يحتوي على ما يقارب 150 ضعف كتلة الأرض من الغبار والمواد. وبالاقتران مع الحلقات والفجوات الموجودة في القرص، يكتسب العلماء معلومات قيّمة حول المراحل المبكرة لتكوين الكواكب، بما في ذلك تلك الموجودة في نظامنا الشمسي. يقول ستيفنز: "تشير هذه الحلقات والفجوات إلى أننا نشهد أقدم دليل على تكوين الكواكب، وأن الكواكب تبدأ بالتأكيد في التكوّن خلال النصف مليون سنة الأولى، وربما خلال الـ 150 ألف سنة الأولى". ويضيف: "بدأت الكواكب، وخاصة كواكب مثل المشتري، في التكوّن في إحدى المراحل المبكرة لعملية تكوين النجوم".

وهناك أدلة متزايدة على أن كوكب المشتري ربما يكون قد تكوّن خارج مدار نبتون في نظامنا الشمسي، ثم هاجر بمرور الوقت إلى موقعه الحالي. تشير الملاحظات التي رُصدت حول نظام IRS 63 إلى أن كمية المادة في القرص وحداثة عمر النظام قد تُهيئ ظروفًا مشابهة لتلك الموجودة في نظامنا الشمسي، مما يسمح بتكوّن كواكب مماثلة. وقالت سيغورا-كوكس: "حجم القرص مشابه جدًا لحجم نظامنا الشمسي. حتى كتلة النجم الأولي أصغر بقليل من كتلة شمسنا. إن دراسة مثل هذه الأقراص الفتية التي تُشكّل الكواكب حول النجوم الأولية يمكن أن تُقدّم لنا رؤى مهمة حول أصولنا."



في كل لوحة، يُشار إلى الدقة بدائرة بيضاء في أسفل اليسار، ويوجد شريط مقياس في أسفل اليمين، ويمثل مقياس الألوان سطوع السطح. أ- صورة أصلية متصلة لغبار ALMA عند 1.3 مم، معروضة بدون تحسين التباين. ب- نموذج نقل الإشعاع لقرص IRS 63، بافتراض هندسة سلسة ومُصوَّر بنفس دقة البيانات. ج- الصورة المتبقية للبيانات المرصودة مطروحًا منها النموذج، مما ينتج عنه البنى الفرعية الحلقية R1 وR2 وG1 وG2 المتوافقة مع تلك الموضحة في الشكل 1 (المميزة بمنحنيات بيضاء).

https://coptic-treasures.com/

فقد توصل علماء الفلك إلى أدلة دامغة على أن الكواكب تبدأ بالتشكل بينما لا تزال النجوم الوليدة في طور النمو. تُظهر الصورة عالية الدقة، الملتقطة بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، قرصًا نجميًا أوليًا فتيًا يحتوي على فجوات متعددة وحلقات من الغبار. تُظهر هذه النتيجة الجديدة، التي نُشرت مؤخرًا في مجلة Nature، أحدث مثال وأكثرها تفصيلًا لحلقات الغبار التي تعمل كمهد كوني، حيث تتشكل بذور الكواكب وتترسخ.

استهدف فريق دولي من العلماء بقيادة دومينيك سيغورا كوكس Dominique Segura-Cox من معهد ماكس بلانك Max Planck للفيزياء الفلكية خارج الأرض (MPE) في ألمانيا النجم الأولي IRS 63 باستخدام مرصد ألما الراديوي. يقع هذا النظام على بُعد 470 سنة ضوئية من الأرض، في أعماق سحابة L1709 الكثيفة بين النجوم في كوكبة الحواء. لا تزال النجوم الأولية، مثل IRS 63، مُحاطة بغلاف ضخم من الغاز والغبار، ويتغذى النجم الأولي وقرصه من هذا المخزون من المواد.

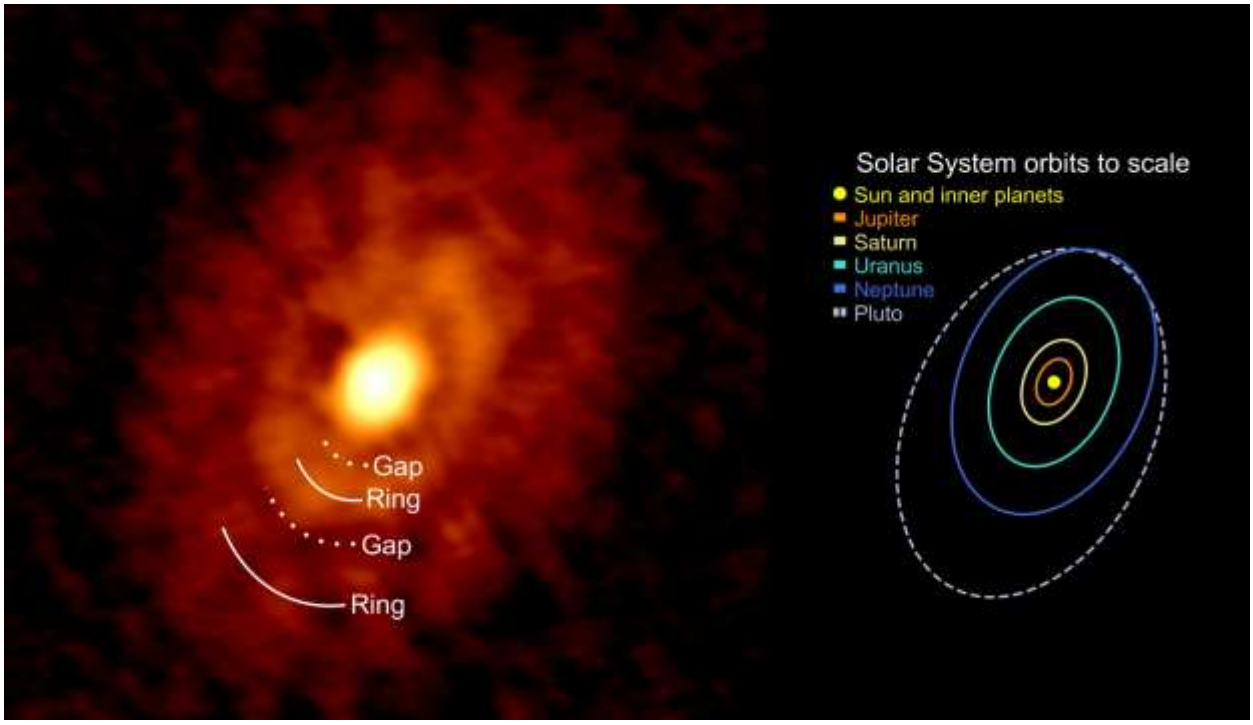
في الأنظمة التي يزيد عمرها عن مليون عام، وبعد أن تُكمل النجوم الأولية تجميع معظم كتلتها، تم رصد حلقات من الغبار بأعداد كبيرة. يختلف IRS 63 عن ذلك: إذ يقل عمره عن 500 ألف عام، أي أقل من نصف عمر النجوم الشابة الأخرى التي تحتوي على حلقات غبار، وسيستمر هذا النجم الأولي في النمو بشكل ملحوظ في الكتلة. يؤكد سيغورا-كوكس قائلاً: "إن الحلقات الموجودة في القرص المحيط بـ IRS 63 حديثة التكوين للغاية. كنا نعتقد سابقاً أن النجوم تدخل مرحلة النضج أولاً ثم تكون أمهات الكواكب التي تأتي لاحقاً. لكننا نرى الآن أن النجوم الأولية والكواكب تنمو وتتطور معاً منذ المراحل المبكرة، مثل الأشقاء."

تواجه الكواكب عقباتٍ جسيمة خلال مراحل تكوينها الأولى. إذ يتعين عليها أن تنمو من جزيئات غبار دقيقة، أصغر من غبار المنازل على الأرض. وتشير أنيكا شميديكي، الباحثة المشاركة في الدراسة من معهد ماكس بلانك للفيزياء الفلكية، إلى أن "الحلقات الموجودة في قرص النجم IRS 63 عبارة عن تراكمات هائلة من الغبار، جاهزة للتطور إلى كواكب". ومع ذلك، حتى بعد أن يتجمع الغبار معًا لتكوين نواة كوكب، قد يختفي الكوكب الذي لا يزال قيد التكوين بفعل دورانه الحلزوني نحو الداخل، ويبتلعه النجم الأولي المركزي. إذا بدأت الكواكب بالتشكل في مراحل مبكرة جدًا وعلى مسافات كبيرة من النجم الأولي، فقد يكون من الأفضل لها أن تنجو من هذه العملية.

وجد فريق الباحثين أن هناك ما يعادل نصف كتلة كوكب المشتري من الغبار في القرص الفتيّ للنجم IRS 63 على بُعد أكثر من 20 وحدة فلكية من مركزه (على مسافة مماثلة لمدار أورانوس في نظامنا الشمسي). هذا دون احتساب كمية الغاز، التي قد تصل إلى 100 ضعف هذه الكمية من المادة. يتطلب تكوين نواة كوكبية قادرة على استيعاب الغاز بكفاءة والنمو لتكوين كوكب غازي عملاق ما لا يقل عن 0.03 من كتلة كوكب المشتري من المواد الصلبة. ويضيف خايمي بينيدا، عضو الفريق في معهد ماكس بلانك للفيزياء الفلكية: "تُظهر هذه النتائج أنه يجب علينا التركيز على الأنظمة الأصغر سنًا لفهم تكوين الكواكب

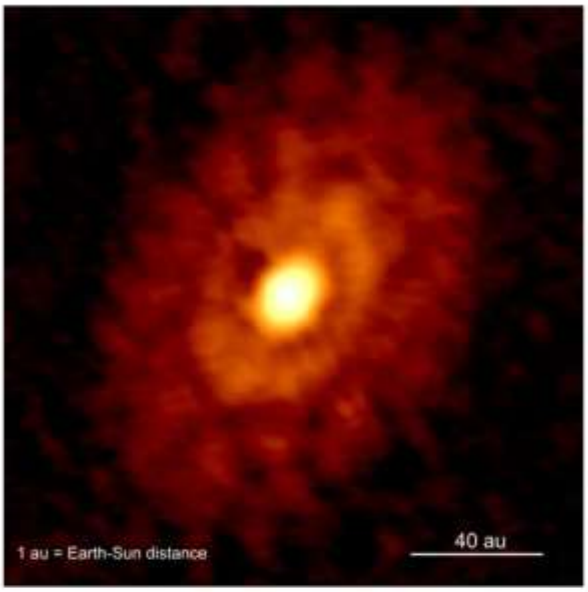
https://coptic-treasures.com/

فهمًا حقيقيًا". فعلى سبيل المثال، تتزايد الأدلة على أن كوكب المشتري ربما يكون قد تشكل في الواقع في منطقة أبعد بكثير في النظام الشمسي، خارج مدار نبتون، ثم هاجر نحو الداخل إلى موقعه الحالي. وبالمثل، يُظهر الغبار المحيط بـ IRS 63 وجود كمية كافية من المواد بعيدًا عن النجم الأولي وفي مرحلة عمرية مبكرة بما يكفي لمنح هذا النظام الشمسي فرصة لتكوين كواكب بالطريقة التي يُشتبه في أن كوكب المشتري قد تشكل بها. يوضح سيغورا-كوكس قائلاً: "حجم القرص مشابه جداً لحجم نظامنا الشمسي. حتى كتلة النجم الأولي أقل بقليل من كتلة شمسنا. إن دراسة هذه الأقراص الفتية التي تتشكل فيها الكواكب حول النجوم الأولية يمكن أن تمنحنا رؤى مهمة حول أصولنا."

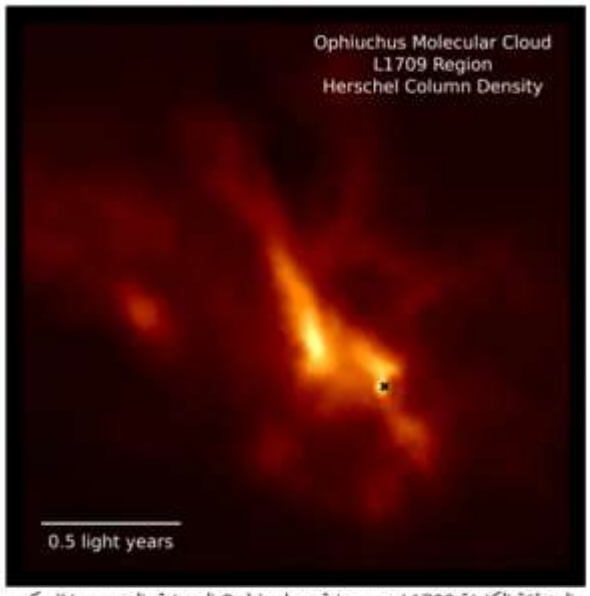


تُظهر هذه الصورة الحلقات والفجوات في قرص الغبار IRS 63 مقارنةً برسم تخطيطي لمدارات الأجرام في نظامنا الشمسي، بنفس المقياس والاتجاه. تتشابه مواقع الحلقات مع مواقع الأجرام في نظامنا الشمسي، حيث يبلغ حجم الحلقة الداخلية تقريبًا حجم مدار نبتون، بينما يزيد حجم الحلقة الخارجية قليلًا عن مدار بلوتو. MPE/D. Segura-Cox

https://coptic-treasures.com/



صورة التقطها مرصد ألما لحلقات الغبار التي تشكل الكواكب الصغيرة المحيطة بالنجم الأولي IRS 63، والذي يقل عمره عن 500 ألف عام. MPE/D. Segura-Cox



المنطقة الكثيفة L1709 من سحابة Ophiuchus الجزيئية، التي رسمها تلسكوب هيرشل الفضائي، والتي تحيط وتغذي قرص IRS 63 الأصغر بكثير لتكوين النجوم والكواكب (الموقع المحدد بالصليب الأسود). MPE/D. Segura-Cox
Herschel data from ESA/Herschel/SPIRE/PACS/D. Arzoumanian

يبدأ تكوين الكواكب قبل اكتمال نمو النجم

اكتشف فريق من علماء الفلك الأوروبيين بقيادة جامعة لايدن Leiden أن جزيئات الغبار حول النجم تتكتل قبل اكتمال نموه. وتُعدّ هذه الجزيئات المتكتلة الخطوة الأولى في تكوين الكواكب[1]. في السنوات الأخيرة، اكتشف علماء الفلك العديد من الأنظمة الكوكبية حول نجوم أخرى غير الشمس. ويُعتقد أن كل نجم تقريبًا محاط بكوكب واحد أو أكثر. ويتساءل العلماء الآن عن كيفية ووقت تكوّن هذه الكواكب، ولماذا يوجد هذا التباين الكبير في عددها وأحجامها. وتشير نتائج بحث أوروبي أُنجز مؤخرًا إلى أن تكوّن الكواكب يبدأ في مراحل مبكرة جدًا من عملية تكوّن النجوم. استخدم العلماء مصفوفة أتاكاما المليمترية الكبيرة (ALMA) في أبحاثهم. وتتكون ALMA من مجموعة تضم ما لا يقل عن 66 تلسكوبًا متصلًا، تمتد على مسافة 16 كيلومترًا في صحراء أتاكاما في تشيلي. ووجّه الباحثون التلسكوب نحو النجم TMC1A، وهو نجم لا يزال في طور التكوين في كوكبة الثور.

درس علماء الفلك القرص الكوكبي الأولي للنجم TMC1A، وهو عبارة عن سحابة مسطحة من المادة تدور حول نجم في طور التكوين. وفي هذه الأقراص من الغاز والغبار، تتشكل الكواكب. ولاحظ الباحثون في المنطقة القرصية الشكل نقصًا ملحوظًا في إشعاع أول أكسيد الكربون. اشتبهوا في أن الإشعاع توقف بفعل جزيئات الغبار الكبيرة. وباستخدام نماذج حاسوبية رقمية،

[1] https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2018/06/planet-formation-starts-before-a-star-is-fully-grown

https://coptic-treasures.com/

أثبت علماء الفلك بالفعل أن جزيئات الغبار في القرص الكوكبي الأولي الفتي قد نمت من جزء من ألف من المليمتر إلى مليمتر كامل.

يشرح الباحث الرئيسي دانيال هارسونو (مرصد لايدن) سبب كون النتائج مفاجئة للغاية: «تشير النتائج إلى أن الكواكب تتشكل في وقت مبكر من تطور النجم. فالنجم الفتي لا يزال يمتلك نصف إلى ثلاثة أرباع كتلته النهائية فقط. وهذا أمر جديد». إضافةً إلى ذلك، قد يكون النمو المبكر للجزيئات تفسيرًا لتكوّن كواكب كبيرة مثل المشتري وزحل. فالأقراص الكوكبية الأولية الفتية فقط هي التي تحتوي على كتلة كافية لتكوين كواكب عملاقة. يعرب الباحث المشارك ماتياس فان دير ويل (معهد أسترون، المعهد الهولندي لعلم الفلك الراديوي) عن سعادته بالملاحظات الواضحة التي لا لبس فيها. «مع أنه من الممكن بالطبع أن يكون نمو الجزيئات هذا حتى الآن مقتصرًا على هذا القرص الكوكبي فقط». ربما يكون هذا القرص الفتيّ مميزًا للغاية.

تبدأ الكواكب في التشكل قبل أن تكتمل نجومها

لطالما اعتُبر تكوين النجوم والكواكب عمليتين منفصلتين ومتتابعتين[1]. لكن في دراسة حديثة، وضع علماء من معهد Southwest للأبحاث (SwRI) نموذجًا لسيناريو مختلف، حيث تبدأ الكواكب بالتشكل مبكرًا - خلال المراحل النهائية لتكوين النجوم - بدلًا من أن تبدأ بعد انتهاء هذه المرحلة، كما كان يُفترض سابقًا. من بين آلاف الكواكب الخارجية المعروفة، يوجد عدد كبير من الأنظمة المدمجة التي تحتوي كل منها على كواكب متعددة تدور على مقربة شديدة من نجمها المركزي. وهذا يتناقض مع نظامنا الشمسي، الذي يفتقر إلى كواكب تدور على مسافة أقرب من عطارد. ومن المثير للاهتمام، أنه في الأنظمة المدمجة، تكون الكتلة الإجمالية للكواكب في كل نظام، نسبةً إلى كتلة النجم المضيف، متسقة بشكل ملحوظ عبر مئات الأنظمة. ولا يزال سبب هذه النسبة المشتركة للكتلة لغزًا.

استخدمت الدكتورة رالوكا روفو Raluca Rufu والدكتور روبن كانوب Robin Canup من قسم علوم واستكشاف النظام الشمسي في معهد ساوث ويست للأبحاث في بولدر، كولورادو Boulder, Colorado، محاكاة متقدمة تُظهر أن الكواكب التي تشكلت مبكرًا تتطابق مع العديد من السمات المرصودة للأنظمة المدمجة، بما في ذلك المدارات الكوكبية الضيقة ونسبة الكتلة المشتركة. يتوافق نمو الكواكب في مراحلها المبكرة مع الملاحظات السابقة للأقراص المحيطة بالنجوم الفتية التي رصدها تلسكوب مصفوفة أتاكاما المليمترية الكبيرة (ALMA).

[1] (https://www.swri.org/newsroom/press-releases/new-swri-model-explains-exoplanetary-systems-compact-orbits

Raluca Rufu, Robin M. Canup, Origin of compact exoplanetary systems during disk infall, Nature Communications (2025) volume 16, Article number: 4853

https://coptic-treasures.com/

يقول روفو Rufu، زميل ساغان Sagan والمؤلف الرئيسي لدراسة نُشرت في مجلة Nature Communications تصف هذا البحث: "تُعدّ الأنظمة المدمجة من أعظم ألغاز علم الكواكب الخارجية. فهي تحتوي على كواكب صخرية متعددة متقاربة الحجم، كحبات البازلاء في قرن واحد، ونسبة كتلة مشتركة تختلف اختلافًا كبيرًا عن نسبة كتلة كواكب مجموعتنا الشمسية". ويضيف كانوب: "من المثير للاهتمام أن نسبة الكتلة المشتركة في الأنظمة الكوكبية الخارجية المدمجة تُشابه تلك الموجودة في أنظمة الأقمار التابعة لكواكبنا الغازية. ويُعتقد أن هذه الأقمار قد تشكلت مع اكتمال تكوين الكواكب الغازية. ويبدو هذا دليلًا قويًا على أن الأنظمة المدمجة قد تعكس عملية أساسية مماثلة".

يتشكل النجم عندما تنهار سحابة جزيئية من الغاز والغبار بفعل جاذبيتها. وعندما تتساقط المواد من السحابة باتجاه النجم المركزي، تترسب أولًا في قرص نجمي يدور حوله. بعد انتهاء سقوط النجوم، يستمر القرص النجمي لبضعة ملايين من السنين قبل أن يتشتت غازه. تتشكل الكواكب داخل القرص، بدءًا من تصادمات وتراكم حبيبات الغبار، وانتهاءً بتجمع الكواكب بفعل الجاذبية. يقول روفو: "كان يُفترض تقليديًا أن تجمع الكواكب يبدأ بعد انتهاء سقوط النجوم. مع ذلك، تُقدم رصدات مرصد ألما الحديثة أدلة قوية على أن تراكم الكواكب، أو تكوينها، قد يبدأ في وقت أبكر. نقترح أن الأنظمة المدمجة هي بقايا متبقية من تراكم الكواكب الذي حدث خلال المراحل الأخيرة من سقوط النجوم."

تُظهر المحاكاة العددية الجديدة أنه خلال سقوط النجوم، تجمع الكواكب النامية مواد صخرية بينما تدور مداراتها تدريجيًا نحو الداخل من خلال التفاعلات مع غاز القرص المحيط. مع ازدياد كتلة الكوكب، تتسارع هجرته المدارية نحو الداخل، بحيث تسقط الكواكب التي تتجاوز كتلة حرجة في النجم وتُستهلك. يميل هذا التوازن بين نمو الكواكب وفقدانها إلى إنتاج كواكب متقاربة الأحجام ذات كتل مميزة تُحددها ظروف سقوط النجوم وظروف القرص. قال كانوب: "وجدنا أن الكواكب التي تتراكم أثناء سقوطها على النجوم يمكنها البقاء حتى يتشتت قرص الغاز وتنتهي الهجرة المدارية. والأهم من ذلك، أنه في ظل ظروف متنوعة، تتناسب كتلة الأنظمة الباقية طرديًا مع كتلة النجم المضيف، مما يوفر أول تفسير لنسب الكتل المتشابهة في الأنظمة الكوكبية المدمجة متعددة الكواكب المرصودة."

تشبه هذه العملية المتوقعة طريقة تكوّن الأقمار حول الكواكب العملاقة مثل المشتري. تنمو الأقمار داخل قرص يحيط بالكوكب ويتغذى من الغاز والغبار المتساقط من القرص المحيط بالنجم. ويكمن الاختلاف الرئيسي في التوقيت: تتشتت الأقراص التي تتشكل فيها الأقمار بسرعة بمجرد توقف سقوط الغاز، بينما يمكن أن تستمر الأقراص التي تتشكل فيها الكواكب حول النجوم لملايين السنين. هذا الاختلاف الدقيق ينتج عنه نسب كتل أقل نوعًا ما للأنظمة الكوكبية المدمجة مقارنةً بأنظمة الأقمار الكوكبية الغازية. ويشير الفريق إلى أنه "من المثير للاهتمام أن نرى أن عملية التجميع المبكر في الأقراص الفتية قد تعمل بطريقة مماثلة عبر نطاقات مختلفة تمامًا."

https://coptic-treasures.com/

الكشف المباشر عن الغاز الجزيئي البارد في مجرة تشكل النجوم

اكتشف علماء الفلك مخزونًا هائلًا من الغاز الجزيئي البارد في مجرة بعد فترة وجيزة من الانفجار العظيم[1]. ويُتيح هذا الاكتشاف فرصة فريدة للاطلاع على الوقود الذي بُنيت منه أولى المجرات الكبيرة. وتشير القياسات إلى أن حوالي 95% من المادة العادية في المجرة المدروسة، REBELS-25، لا تزال موجودة على شكل غاز. وقد استخدم فريق البحث الدولي، بقيادة جامعة لايدن Leiden، بيانات رصد من اثنين من أقوى التلسكوبات الراديوية في العالم لهذا الغرض: VLA في الولايات المتحدة الأمريكية، وALMA في شمال تشيلي.

تقول كارين سيسكون Karin Cescon، الباحثة الرئيسية في الدراسة وطالبة الدكتوراه بجامعة لايدن: "تُظهر نتائجنا أن المجرات كانت تمتلك بالفعل احتياطيات هائلة من الغاز البارد الذي تتشكل منه النجوم الجديدة بعد 700 مليون سنة فقط من الانفجار العظيم. وهذا يعني أن بعض المجرات كانت تمتلك الوقود اللازم للنمو السريع في وقت مبكر جدًا." تُرى المجرة المدروسة، REBELS-25، كما كانت عليه عندما كان عمر الكون حوالي 700 مليون سنة فقط، أي ما يُعادل 5% من عمره الحالي. وبسبب تمدد الكون، ينحرف الضوء القادم من هذه الأجرام البعيدة بشدة نحو الأطوال الموجية الأكثر احمرارًا، وهو تأثير يُطلق عليه علماء الفلك اسم الانزياح الأحمر. بالنسبة للمجرة REBELS-25، يبلغ هذا الانزياح الأحمر 7.3. تقع المجرة في منتصف حقبة إعادة التأين: وهي الفترة التي أحدثت فيها النجوم والمجرات الأولى تغييرًا جذريًا في الكون الفتيّ. يُشكّل الغاز الجزيئي البارد المادة الخام المباشرة لتكوين النجوم. لطالما اشتبه علماء الفلك في أن المجرات الضخمة في الكون المبكر كانت تمتلك احتياطيات كبيرة من الغاز، لكن هذا لم يتم إثباته بشكل مباشر.

باستخدام مصفوفة التلسكوبات الكبيرة جدًا (VLA) في نيو مكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية، بحث الباحثون عن إشارات راديوية خافتة لأول أكسيد الكربون (CO)، وهو جزيء يكشف عن وجود غاز بارد مُكوِّن للنجوم. أسفرت هذه الملاحظات عن أبعد رصد على الإطلاق لشكل منخفض الطاقة من إشعاع أول أكسيد الكربون، وهي إحدى أكثر الطرق موثوقية لقياس كمية الغاز البارد المُكوِّن للنجوم في المجرة. وبناءً على ذلك، تبين أن مجرة REBELS-25 تمتلك بالفعل مخزونًا هائلًا من المواد الخام لتكوين نجوم جديدة بعد 700 مليون سنة من الانفجار العظيم. وبفضل ملاحظات إضافية من مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر /دون المليمتر (ALMA)، تمكن الباحثون لاحقًا من تحديد خصائص الغاز، مثل درجة الحرارة والكثافة.

علاوة على ذلك، تبين أن مجرة REBELS-25 ناضجة بشكلٍ مُثير للدهشة. فقد أظهرت الملاحظات السابقة أن المجرة تحتوي على قرص دوار، وأنها غنية بالغبار، وتحتوي على عدد كبير نسبيًا من العناصر الثقيلة. ويضيف هذا القياس الجديد كمية هائلة من الغاز البارد إلى هذه البيانات. يبلغ احتياطي الغاز المقاس حوالي مئة مليار ضعف كتلة الشمس، أي عشرات المرات أكثر

[1] Karin Cescon , Jacqueline A Hodge, et., Direct detection of cool molecular gas in a star-forming galaxy at z=7.31, (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 549, Issue 3, July 2026, stag924

https://coptic-treasures.com/

من إجمالي كتلة النجوم التي شكلتها مجرة ريبيلز-25 حتى ذلك الحين. وترسم هذه الخصائص مجتمعةً صورةً لمجرة ناضجة بشكل ملحوظ في كون فتيّ للغاية.

يُعدّ رصد الغاز البارد على هذه المسافات الشاسعة أمرًا بالغ الصعوبة. إذ يزداد سطوع إشعاع الخلفية الكونية الناتج عن الانفجار العظيم مع ارتفاع الانزياح الأحمر، مما يُقلّل من التباين الذي يُمكن من خلاله رؤية الغاز البارد. ونتيجةً لذلك، ظلّ من غير المؤكد لفترة طويلة مدى إمكانية رصد هذه الإشارات الضعيفة على هذه المسافات البعيدة. يقول سيسكون: "بفضل هذه القياسات، أثبتنا أن ذلك ممكن بالفعل. حتى الآن، كان على علماء الفلك الاعتماد على آثار غير مباشرة للغاز البارد. أما الآن، وباستخدام التلسكوبات المناسبة، يُمكننا دراسة الوقود نفسه مباشرةً، حتى في المجرات التي تعود إلى عصر إعادة التأين".

كما يُقدّم هذا الاكتشاف لمحةً عمّا ستُتيحه التلسكوبات الراديوية المستقبلية. إذ سيكون الجيل القادم من مصفوفة التلسكوبات الكبيرة جدًا (ngVLA) أكثر حساسيةً بعشر مرات تقريبًا من مصفوفة التلسكوبات الكبيرة جدًا الحالية (VLA). تقول الأستاذة المشاركة جاكلين هودج من جامعة لايدن، المشرفة على سيسكون والمؤلفة المشاركة في الدراسة: "بفضل مصفوفة ngVLA، يمكننا رصد ودراسة الغاز البارد في أعداد أكبر بكثير من المجرات الفتية". وسيكون ذلك بالغ الأهمية لفهم كيفية تشكل المجرات الأولى ونموها.

تتشكل الكواكب في وقت أبكر مما كان يُعتقد حول النجوم الوليدة

يُعدّ تكوّن النجوم حدثًا خفيًا، على الأقل في مراحله المبكرة جدًا. إذ تُحجب حاضنات النجوم بسحب من الغاز والغبار[1]. وتُخفي هذه السحب نفسها أيضًا تكوّن الكواكب، لا سيما في بداياته. لذا، لا يتمكن علماء الفلك دائمًا من رصد هذه الظاهرة إلا بعد انقشاع الغبار. ورغم أن الكواكب حديثة التكوّن صغيرة جدًا بحيث لا تُرى بالعين المجردة، إلا أن جاذبيتها تُثير أنماطًا حلزونية وحلقية في ما يُسمى بالأقراص الكوكبية الأولية حول النجوم الوليدة. فمتى تبدأ هذه الأنماط بالظهور في عملية التكوّن؟

استخدم فريق من علماء الفلك في اليابان، بقيادة أيومو شوشي Ayumu Shoshi من جامعة كيوشو Kyushu ومعهد أكاديميا سينيكا Academia Sinica لعلم الفلك والفيزياء الفلكية، بيانات رصد من مصفوفة أتاكاما المليمترية الكبيرة في تشيلي لإلقاء نظرة فاحصة على أقراص تكوّن النجوم في منطقة الحواء. استخدم الباحثون بيانات من مشروعين: مشروع تكوين الكواكب المبكر في الأقراص المدمجة (eDisk) ومشروع البنى الفرعية للأقراص بدقة زاوية عالية (DSHARP)، بالإضافة

[1] (https://alma-telescope.jp/en/news/press/cradle-202506.html
Ayumu Shoshi, Masayuki Yamaguchi, Takayuki Muto, Naomi Hirano, Ryohei Kawabe, Takashi Tsukagoshi, Masahiro N Machida, ALMA 2D super-resolution imaging survey of Ophiuchus Class I/flat spectrum/II disks. I. Discovery of new disk substructures, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 77, Issue 3, June 2025, Pages 572–606

https://coptic-treasures.com/

إلى بيانات عن مناطق أخرى لدراسة العديد من الأقراص المختلفة. ومن بين نتائجهم، أظهر عملهم أدلة واضحة على وجود بنى حلزونية وحلقية في بعض الأقراص الكوكبية الأولية، وأن الكواكب بدأت تتشكل في أقراص أكبر بعد بضع مئات آلاف السنين من ولادة نجومها.

وقال أيومو شوشي: "هذه النتائج، التي تسد الفجوة بين مشروعي eDisk وDSHARP، أصبحت ممكنة بفضل تقنيات التصوير المبتكرة التي تتيح الحصول على دقة عالية وعدد كبير من العينات". وأضاف: "مع أن هذه النتائج تخص فقط الأقراص في كوكبة الحواء، فإن الدراسات المستقبلية لمناطق تشكل النجوم الأخرى ستكشف ما إذا كان هذا الاتجاه عامًا". وبناءً على عمل إضافي قام به الفريق الياباني لدراسة مناطق أخرى لتكوين النجوم، فإن اكتشاف "البدايات المبكرة" في تكوين الكواكب يُسهم في توضيح المزيد من التفاصيل حول عملية تكوين النجوم والكواكب برمتها. إن تطور البنى الفرعية الحلزونية والحلقية في الأقراص المحيطة بالنجوم يعطي أدلة على تفاعلات الكواكب مع الأقراص مع اندماج العوالم الجديدة.

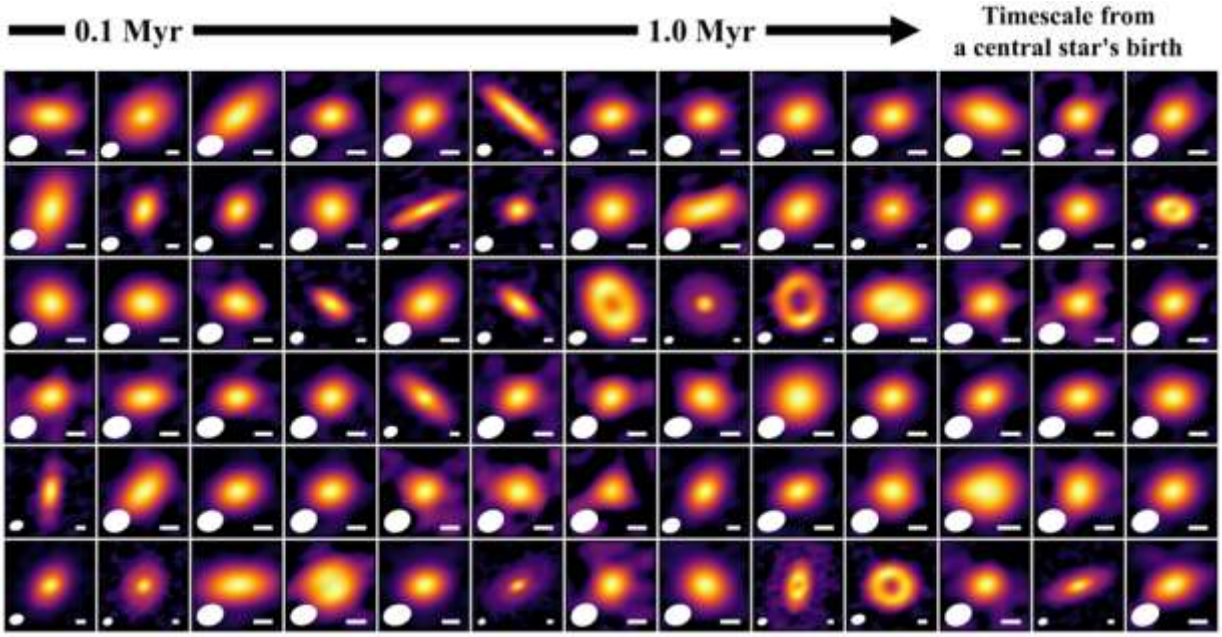
لا يزال علماء الفلك على دراية واسعة بعملية ولادة النجوم، رغم أن بدايتها غامضة. تبدأ العملية عندما تبدأ سحابة من الغاز والغبار (منطقة الهيدروجين المتأين) بالتكتل بفعل جاذبيتها الذاتية التي تجذب المادة نحو نقطة مركزية. في هذه المنطقة "المركزية" يبدأ النجم الأولي بالتشكل. وعندما ترتفع درجات الحرارة والضغط إلى مستوى كافٍ، يبدأ الاندماج النووي في ما يُسمى "لب النجم"، وكما يُقال، يولد النجم. في تلك المرحلة، يكون النجم الوليد لا يزال محاطًا بسحابة كثيفة من الغاز والغبار تُشكل حاضنته. وفي النهاية، إذا توفرت الظروف المناسبة، تبدأ الكواكب بالتشكل داخل هذا القرص الكوكبي الأولي. ويُحدد محتوى السحابة أنواع الكواكب التي ستتشكل، بالإضافة إلى مواقعها. وقد مرّ نظامنا الشمسي بهذه العملية منذ حوالي 4.6 مليار سنة داخل منطقة هيدروجين متأين يبلغ قطرها حوالي 65 سنة ضوئية. تشكلت الشمس في مركز الكتلة المتجمعة، وانهارت بقية السحابة لتشكل القرص الكوكبي الأولي حولها. كانت شظايا المواد المكونة للكواكب عبارة عن حبيبات تشكلت قبل 4.5 مليار سنة على الأقل. قد يكون بعض هذه الحبيبات أقدم بكثير، وربما يعود تاريخها إلى ما قبل بدء تشكل الشمس. ومع دوران القرص، بدأت هذه الحبيبات أيضًا في التجمع، مكونةً كويكبات اصطدمت ببعضها لتشكل الكواكب التي نعرفها اليوم. وفي النهاية، تُستهلك سحابة الولادة أو تتلاشى خلال مراحل تشكل الكواكب.

أحد أهم الأسئلة المتعلقة بهذه العملية هو: متى تبدأ الكواكب بالتشكل من تلك الحبيبات؟ هل يحدث ذلك بالتزامن مع اندماج النجم؟ أم في مرحلة لاحقة؟ يعتمد الأمر بشكل كبير على ظروف السحابة، بالإضافة إلى أي مؤثرات خارجية (مثل النجوم العابرة، وانفجارات المستعرات العظمى القريبة، إلخ). لا يزال التوقيت غير مؤكد إلى حد كبير. لهذا السبب، قرر الفريق الياباني إلقاء نظرة فاحصة على تكوين البنى الفرعية في أقراص الكواكب الأولية الأخرى. قد تُقدم أعمارها أدلةً حول متى تبدأ الكواكب بالتشكل.

https://coptic-treasures.com/

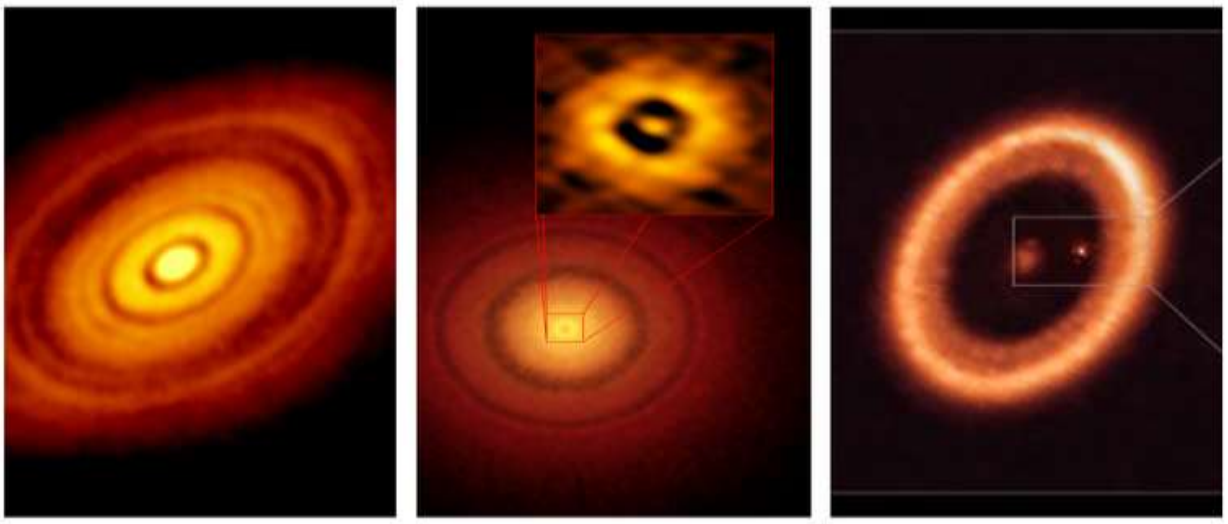
تُعدّ أجهزة الكشف في مرصد ألما (ALMA) خبيرةً في رصد الأقراص الكوكبية الأولية. فعلم الفلك الراديوي والموجات المليمترية مناسبٌ تمامًا لاكتشاف التفاصيل في مناطق ولادة النجوم المليئة بالغبار، ويستخدم علماء الفلك برامج ألما المختلفة لدراسة هذه العملية. وقد رصد برنامج DSHARP هياكل واضحة جدًا في 20 نجمًا فتيًا كانت تتشكل منذ مليون عام على الأقل. كما درس نهجٌ آخر، يُسمى eDisk، الأقراص المحيطة بـ 19 نجمًا أوليًا في مرحلة التراكم (المرحلة التي يكون فيها تراكم الكتلة على النجم والقرص نشطًا). وتحدث هذه المرحلة من تكوين النجوم والكواكب عادةً بعد حوالي 10,000 إلى 100,000 عام من ولادة النجم. وتشير الاختلافات في مراحل تكوين الكواكب في كل مجموعة إلى أن الأقراص لها خصائص متنوعة تبعًا لعمر النجم.

تُثير هذه النتائج تساؤلاً هاماً: متى تحديداً تبدأ البنى الفرعية (التي تُعدّ مؤشرات واضحة لتكوّن الكواكب) بالظهور في الأقراص الكوكبية الأولية؟ قام الفريق بدمج عينة كوكب الحواء مع بيانات مشروع القرص الإلكتروني (eDisk) وتحليلها معاً. ووجدوا أن البنى الفرعية للقرص تظهر في أقراص ذات أنصاف أقطار أكبر من 30 وحدة فلكية خلال المراحل المبكرة لتكوّن النجوم. يحدث هذا في وقت مبكر يصل إلى بضع مئات الآلاف من السنين بعد ولادة النجم، مما يُشير إلى أن الكواكب تبدأ بالتكوّن في مرحلة مبكرة جداً عندما لا يزال القرص غنياً بالغاز والغبار. بعبارة أخرى، تنمو الكواكب جنباً إلى جنب مع نجومها المضيفة الفتية. تتمثل الخطوات التالية في مسح المزيد من الأقراص المحيطة بالنجوم في جميع مراحل تكوّنها. ستوفر هذه المسوحات عينة أكبر من الأنظمة لتوصيفها ولقاء المزيد من الضوء على المراحل الأولى لتكوّن الكواكب.



صور لأقراص الكواكب الأولية في منطقة تكوّن النجوم في كوكبة الحواء، تم إنشاؤها باستخدام تقنية التصوير فائق الدقة مع نمذجة متفرقة مقارنةً بطريقة التصوير التقليدية. يُظهر الشكل البيضاوي الأبيض في أسفل يسار كل لوحة دقة الصورة، حيث يشير الشكل البيضاوي الأصغر إلى دقة أعلى. يشير الخط الأبيض في أسفل يمين كل لوحة إلى مقياس 30 وحدة فلكية. تتطور مراحل تطور النجوم المركزية من اليسار إلى اليمين، ومن الأعلى إلى الأسفل في الصف نفسه. Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), A. Shoshi et al

https://coptic-treasures.com/



صور من مرصد ألما لقرص غباري حول النجم HL Tau، تُظهر بنية حلقية وفجوة على بُعد وحدة فلكية واحدة من النجم المتشكل. من المرجح أن هذه البنية ناتجة عن تفاعلات جاذبية مع كوكب محتمل في القرص. ربما كان نظامنا الشمسي يبدو على هذا النحو قبل حوالي 4.5 مليار سنة. حقوق الصورة: ALMA/ESO.org

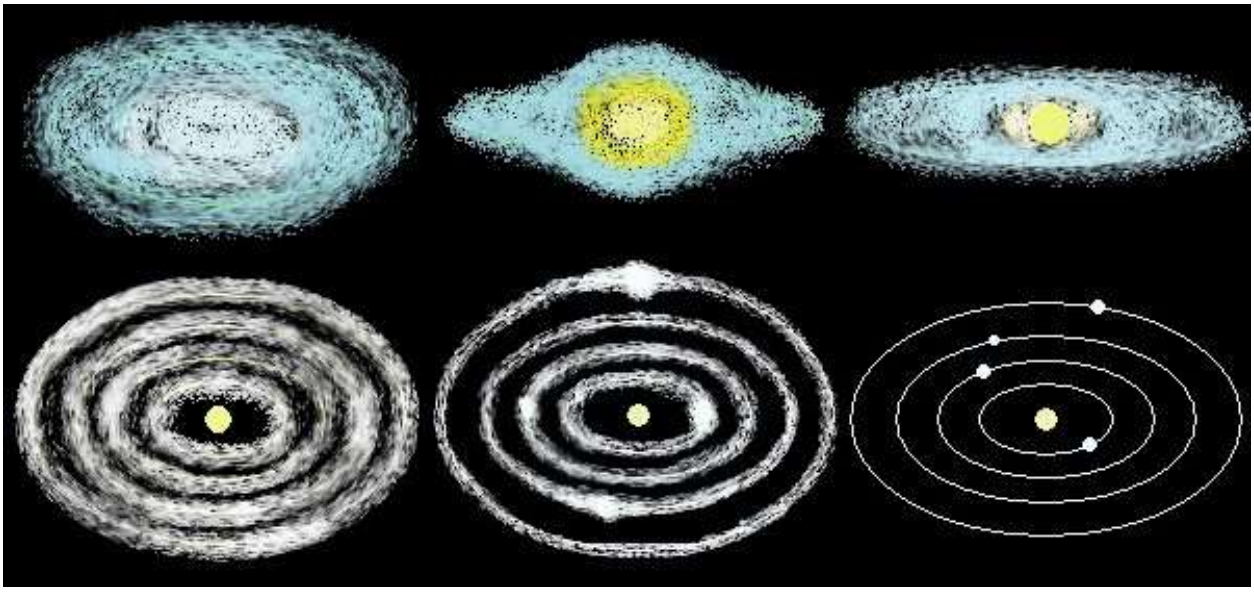
تشير نتائج جديدة لصور عالية الدقة، تم إنتاجها باستخدام تقنيات محسّنة لإعادة تحليل بيانات أرشيف علم الفلك الراديوي، إلى احتمال ظهور علامات تكوّن الكواكب في وقت أبكر مما كان متوقعًا حول النجوم الفتية. ستوفر هذه العلامات المكتشفة حديثًا لتكوّن الكواكب فهمًا أفضل لتوقيت بدء هذه العملية حول النجوم الفتية، مما يُسهم في توضيح العملية التي تؤدي إلى تكوّن الكواكب، بما في ذلك الكواكب الصالحة للسكن مثل الأرض[1].

تتشكل الكواكب في أقراص تتكون من غاز جزيئي منخفض الحرارة وغبار، تُعرف بالأقراص الكوكبية الأولية، وتوجد حول النجوم الأولية. النجوم الأولية هي نجوم لا تزال في طور التكوين. الكواكب الوليدة صغيرة جدًا بحيث لا يمكن رصدها مباشرة، لكن جاذبية الكوكب قادرة على تكوين أنماط قابلة للملاحظة، مثل الحلقات أو اللوالب، في القرص الكوكبي الأولي. مع ذلك، يصعب تحديد وقت ظهور هذه الأنماط لأول مرة نظرًا لقلة عدد الأقراص الكوكبية الأولية القريبة بما يكفي من الأرض لرصدها بدقة عالية. استخدم فريق بحثي بقيادة أيومو شوشي من جامعة كيوشو ومعهد أكاديميا سينيكا لعلم الفلك والفيزياء الفلكية (ASIAA) تقنيات مُحسّنة لمعالجة البيانات للبحث عن دلائل مُغفلة سابقًا لتكوّن الكواكب في بيانات أرشيفية من تلسكوب ALMA (مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر). أعاد الفريق تحليل بيانات 78 قرصًا في منطقة تكوّن النجوم في كوكبة الحواء، الواقعة على بُعد 460 سنة ضوئية باتجاه كوكبة الحواء. وقد حققت أكثر من نصف الصور المُنتجة في هذه الدراسة دقةً أفضل بثلاث مرات من دقة الصور السابقة.

[1]) https://www.nao.ac.jp/en/news/science/2025/20250624-alma.html

https://coptic-treasures.com/

تُظهر الصور الجديدة عالية الدقة أنماطًا حلقية أو حلزونية في 27 قرصًا. من بينها، تم تحديد 15 قرصًا لأول مرة في هذه الدراسة. وبدمج هذه العينة الجديدة مع دراسات سابقة لمنطقة أخرى لتكوّن النجوم، وجد الفريق أن البنى الفرعية المميزة للأقراص تظهر في أقراص أكبر من 30 وحدة فلكية (الوحدة الفلكية الواحدة = 149,597,870,700 متر، وهي المسافة بين الأرض والشمس) حول النجوم في المراحل المبكرة لتكوّن النجوم، بعد بضع مئات الآلاف من السنين فقط من ولادة النجم. يشير هذا إلى أن الكواكب تبدأ بالتكوّن في مرحلة أبكر بكثير مما كان يُعتقد سابقًا، عندما لا يزال القرص يحتوي على كميات وفيرة من الغاز والغبار. بعبارة أخرى، تنمو الكواكب جنبًا إلى جنب مع نجومها المضيفة الفتية جدًا.



المراحل المختلفة لتكوين النظام الشمسي. أعلى اليسار - سحابة من الغاز والغبار - تبدأ السديم الشمسي بالانكماش. أعلى الوسط - تبدأ الشمس الأولية بالتشكل، جاذبةً معظم الكتلة. يزداد دوران القرص بسبب الزخم الزاوي. أعلى اليمين - يتشكل القرص حول الشمس الأولية، التي تزداد سخونتها باستمرار نتيجة الانكماش. أسفل اليسار - تصل درجة حرارة الشمس إلى نقطة تؤثر فيها على المنطقة المحيطة بها وتبدأ بدفع المواد الخفيفة من النظام الشمسي الداخلي، تاركةً وراءها فقط الغبار والمعادن الأثقل (بشكل رئيسي). أسفل الوسط - تبدأ أكبر الكواكب الصغيرة في المواقع المختلفة بجذب المزيد من المواد، مما يؤدي إلى إفراغ المناطق المحيطة بها. أسفل اليمين - في النهاية، تتحد جميع العناصر لتكوين النظام الشمسي الذي نراه اليوم. يبدو من تحليل هذه العملية أنها حدثت بسرعة نسبية، في حدود بضع مئات من ملايين السنين. كما توجد بعض المؤشرات حول هذه العملية من خلال النظر إلى أنظمة نجمية فتية أخرى. إذا عدنا إلى جزء تكوين النجوم من الدورة، فربما تتذكر أننا نرى غالبًا أقراصًا من المواد حول النجوم الفتية. قد تكون هذه الأقراص مؤشرات على بدء عملية تكوين النظام الكوكبي. الأقراص كبيرة نسبيًا، لذا ليس من الصعب رؤيتها، خاصةً باستخدام تقنيات تسمح لنا بحجب ضوء النجم أو رصدها بواسطة تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء. تم اكتشاف العديد من النجوم ذات أقراص جذابة للغاية. رُصد الكثير منها باستخدام تلسكوبات الأشعة تحت الحمراء مثل IRAS وSpitzer، بينما يمكن رؤيتها في بعض الحالات بواسطة تلسكوب هابل الفضائي. في بعض الحالات، يبدو أن ظواهر مشابهة، مثل أحزمة الكويكبات، تُرى أيضًا حول نجوم أخرى، كما هو موضح هنا. يبدو أيضًا أن تكوين الكواكب قد يؤدي إلى تدميرها، وهو ما نراه هنا. كشف رصد حديث بواسطة تلسكوب هيرشل للأشعة تحت الحمراء عن قرص غني ببخار الماء حول نجم في طور التكوين. بالطبع سيتحول بعض هذا الماء إلى أجسام جليدية، وسيبقى بعضه في شكل غازي، ويمكن أن يصبح بعضه ماءً سائلاً - وهذا سيعتمد على مكان وجود المادة في القرص.

https://coptic-treasures.com/

تتشكل الكواكب الصخرية مبكراً

عندما يتشكل نجم فتي، تتشكل حوله حلقة من الغاز والغبار تُسمى القرص الكوكبي الأولي. يشكل النجم والقرص معًا نظامًا شمسيًا فتيًا، ويكشف النظر إلى أنظمة شمسية أصغر بكثير من نظامنا عن أدلة حول كيفية تشكل الكواكب في الأقراص الكوكبية الأولية. يُعد مرصد ألما (ALMA)، وهو مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر /دون المليمتر، أقوى أدواتنا لدراسة هذه الأنظمة الفتية. ألما عبارة عن نظام قوي من التلسكوبات الراديوية القادرة على رصد الانبعاثات الخافتة المنبعثة من الغبار في الأقراص. استخدم برنامج رصد جديد يُسمى AGE-PRO مرصد ألما لتتبع كيفية تطور الأقراص الكوكبية الأولية بمرور الوقت، وكيف تتغير نسبة الغاز إلى الغبار، مما أدى إلى فهم أعمق لتكوين الكواكب[1].

نشر فريق البحث القائم على مشروع AGE-PRO نتائجه الأولية، بعنوان "مسح ألما لتطور الغاز في الأقراص الكوكبية الأولية (AGE-PRO): الجزء الأول: نظرة عامة على البرنامج وملخص النتائج الأولية"، وسيُنشر في مجلة الفيزياء الفلكية. المؤلف الرئيسي للدراسة هو كي تشانغ، أستاذ علم الفلك في جامعة ويسكونسن-ماديسون. يهدف مشروع AGE-PRO إلى تتبع تطور كتلة وحجم أقراص الغاز بشكل منهجي طوال عمر الأقراص الكوكبية الأولية، كما ذكر المؤلفون. ولتحقيق هذا الهدف، رصد المشروع عينة من 30 قرصًا شابًا في ثلاث مناطق لتكوّن النجوم قريبة من نظامنا الشمسي. هذه المناطق هي: الحواء (Ophiuchus)، الذي يتراوح عمره بين 0.5 و1 مليون سنة، والذئب (Lupus)، الذي يتراوح عمره بين 1 و3 ملايين سنة، والعقرب العلوي (Upper Scorpius)، الذي يتراوح عمره بين 2 و6 ملايين سنة. وتمر كل منطقة من هذه المناطق الثلاث بمراحل مختلفة من تطور القرص.

على الرغم من قوة مرصد ألما، إلا أن قياس كتل الغاز في الأقراص الكوكبية الأولية لا يزال يُمثل تحديًا. فالغاز السائد هو الهيدروجين الجزيئي (H2)، لكن انبعاثاته غير قابلة للكشف إلى حد كبير. يوضح الباحثون أن "أول أكسيد الكربون (CO) هو الجزيء الأكثر شيوعًا في الأقراص الكوكبية، ويُعتبر الأكثر موثوقية لتحديد توزيع الغازات، نظرًا لانخفاض درجة تكثيفه واستقرار تركيبه الكيميائي". ويضيفون: "لكن تحويل كتلة غاز أول أكسيد الكربون إلى إجمالي كتلة الغاز في القرص يعاني من عدم دقة عالية في نسبة أول أكسيد الكربون إلى الهيدروجين".

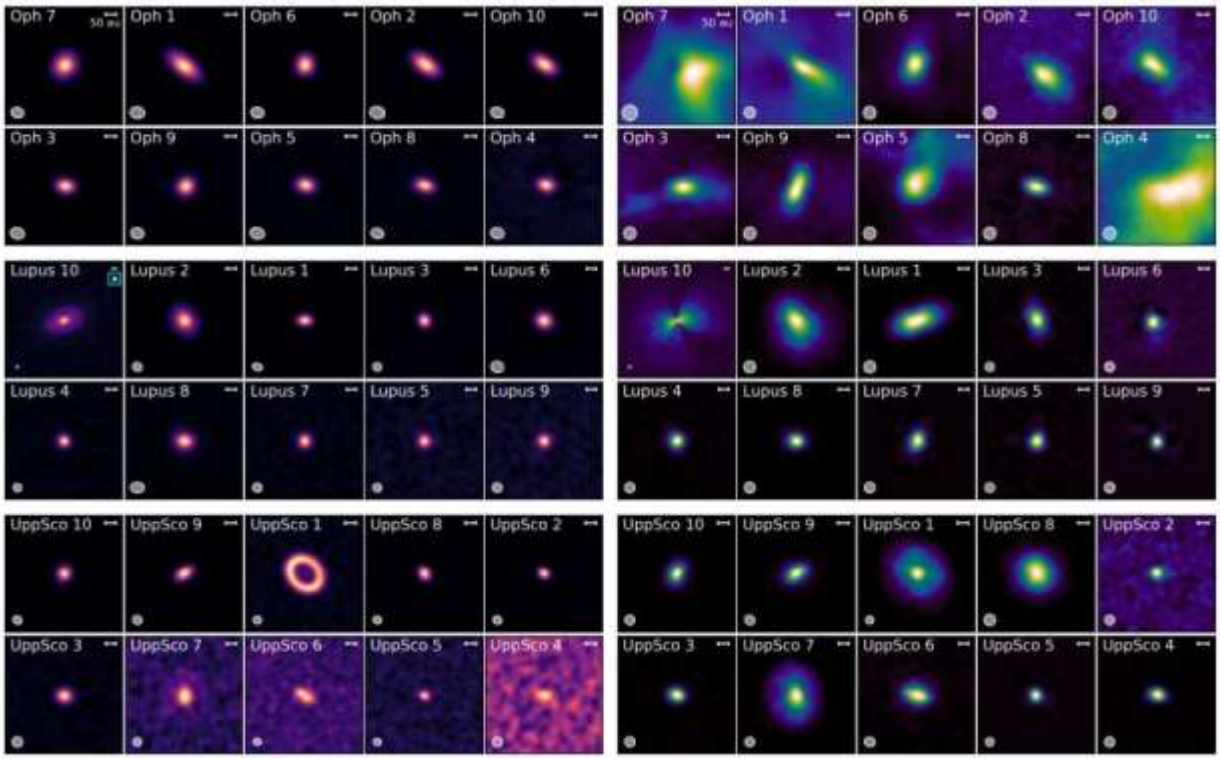
تتكون الأقراص الكوكبية الأولية من حوالي 99% غاز، و1% فقط غبار. ورغم أن الهيدروجين هو الغاز السائد، إلا أن هناك غازات أخرى يسهل رصدها. لكل جزيء من هذه الجزيئات الغازية "بصمة" خاصة به يمكن لتلسكوب ألما رصدها. يُرصد أول أكسيد الكربون بسهولة بواسطة ألما، لكن لا يمكن استخدامه كبديل. في هذا البحث، قارن الفريق بصمات جزيء معين ببصمات أول أكسيد الكربون. مع مرور الوقت في القرص، يقل تركيز أول أكسيد الكربون، وتزداد جزيئات أيون N2H+.

[1] Ke Zhang, Laura M. Pérez, etc, The ALMA Survey of Gas Evolution of PROtoplanetary Disks (AGE-PRO). I. Program Overview and Summary of First Results, The Astrophysical Journal, Volume 989, Number 1 (2025),

https://coptic-treasures.com/

سمح هذا للباحثين بفهم كيفية تغير محتوى الغاز في الأقراص الفتية الثلاثين في مناطق تكوّن النجوم الثلاث خلال الملايين القليلة الأولى من السنين. وخلال هذه الفترة، يمر القرص بثلاث مراحل. وتتمثل النتيجة الرئيسية في أن نسبة الغاز إلى الغبار لا تبقى ثابتة مع مرور الوقت. ويكتب الباحثون في دراستهم: "تتيح قياسات كتل الغاز باستخدام جهاز AGE-PRO إجراء أول مقارنة لتطور كتلة الغاز والغبار في الأقراص. ويبدو أن الغاز والغبار يتطوران على نطاقات زمنية مختلفة، كما أن نسبة كتلة الغاز إلى الغبار لا تتناقص بشكل مطرد مع مرور الوقت." ويضيف الباحثون: "بافتراض أن المناطق الثلاث كانت لها ظروف أولية ومسارات تطورية متشابهة، وجدنا أن متوسط كتلة قرص الغاز يبدو أنه يتناقص مع تقدم العمر."

قال تشانغ: "نلاحظ الآن أن كتلة الغاز تتناقص بسرعة كبيرة خلال المليون سنة الأولى من عمر الأقراص الكوكبية الأولية، ثم تتناقص ببطء، بينما تتناقص كتلة الغبار على الأرجح بثبات مع مرور الوقت. لذا، إذا أردنا تكوين كواكب غازية عملاقة مثل المشتري، فعلينا البدء في ذلك بينما لا يزال هناك كمية أكبر من الغاز، وهذا لا يتجاوز بضعة ملايين من السنين". تُظهر الأبحاث أنه عندما تعبر جزيئات الغاز خطوط المجال المغناطيسي التي يُنشئها النجم الفتي، يمكن تسريعها ودفعها خارج الأقراص. أما الكواكب الصخرية، فتسلك مسارًا أبطأ، لأن الغبار الذي تتكون منه لا يتبدد بالسرعة نفسها. وقد يستغرق تكوينها عشرات الملايين من السنين، وفقًا للأبحاث.



يُظهر هذا الشكل أطيافًا متصلة عند طول موجي 1.3 مم على اليسار، وعزومًا صفرية لأول أكسيد الكربون على اليمين، وذلك لستين قرصًا شابًا في عينة AGE-PRO. ينبعث الطيف المتصل عند 1.3 مم من الغبار، مما يسمح لعلماء الفلك بتحديد الكتلة الإجمالية للغبار في القرص. يكشف العزم الصفري لأول أكسيد الكربون عن إجمالي الغاز والغبار، بالإضافة إلى حجم القرص وبنيته. مصدر الصورة: Zhang et al. 2025. The Astrophysical Journal.

https://coptic-treasures.com/

ألما ALMA تقدم رؤى غير مسبوقة لولادة الكواكب

قام علماء الفلك بتصنيف ما يقارب 4000 كوكب خارج المجموعة الشمسية يدور حول نجوم بعيدة. ورغم أننا تعلمنا الكثير عن هذه العوالم المكتشفة حديثًا، إلا أن هناك الكثير مما نجهله حول مراحل تكوين الكواكب والوصفات الكونية الدقيقة التي تُنتج هذا التنوع الواسع من الأجرام الكوكبية التي اكتشفناها، بما في ذلك ما يُسمى بالكواكب العملاقة الحارة، والكواكب الصخرية الضخمة، والكواكب القزمة الجليدية، ونأمل أن نكتشف قريبًا نظائر بعيدة للأرض. للمساعدة في الإجابة على هذه الأسئلة وغيرها من الأسئلة المثيرة للاهتمام حول نشأة الكواكب، أجرى فريق من علماء الفلك، باستخدام مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، أحد أعمق المسوحات على الإطلاق للأقراص الكوكبية الأولية، وهي أحزمة الغبار التي تُشكل الكواكب حول النجوم الفتية[1].

يقول ستيوارت كوردر Stuartt Corder ، نائب مدير مرصد ألما: "يُعدّ هذا البرنامج الكبير تحديدًا بالغ الأهمية لأنه يُركّز على أحد الأهداف العلمية الأساسية لمرصد ألما، ألا وهو فهم عملية تكوّن الكواكب، وينقلها من الدراسات السابقة التي اقتصرت على عينات صغيرة جدًا أو أجسام منفردة، إلى سياق جديد تمامًا، مما يُتيح رؤى إحصائية. هل هذه الأنواع من البنى شائعة أم نادرة؟ يُتيح هذا النهج الإحصائي للباحثين الإجابة عن أسئلة جوهرية تتعلق بعملية تكوّن الكواكب." وقد أسفر هذا البرنامج الكبير، المعروف باسم مشروع البنى الفرعية للأقراص بدقة زاوية عالية (DSHARP)، التابع لمرصد ألما، عن صور مذهلة عالية الدقة لعشرين قرصًا كوكبيًا أوليًا قريبًا، ومنح علماء الفلك رؤى جديدة حول تنوّع السمات التي تحتويها وسرعة نشوء الكواكب. وتُعرض نتائج هذه الدراسة في سلسلة من عشر أوراق بحثية قُبلت للنشر في مجلة Astrophysical Journal Letters.

بحسب الباحثين، فإن التفسير الأكثر إقناعًا لهذه الملاحظات هو أن الكواكب الكبيرة، التي يُحتمل أن تكون مشابهة في الحجم والتركيب لكوكبي نبتون أو زحل، تتشكل بسرعة، أسرع بكثير مما تشير إليه النظرية الحالية. كما أنها تميل إلى التكوّن في الأطراف الخارجية لأنظمتها الشمسية على مسافات هائلة من نجومها المضيفة. قد يُساعد هذا التكوّن المبكر أيضًا في تفسير كيفية تمكّن العوالم الصخرية، بحجم الأرض، من التطور والنمو، والنجاة من مرحلة المراهقة التي يُفترض أنها مدمرة ذاتيًا.

يقول شون أندروز Sean Andrews، عالم الفلك في مركز هارفارد-سميثسونيان للفيزياء الفلكية (CfA) وقائد حملة رصد مرصد ألما (ALMA) إلى جانب أندريا إيسيلا من جامعة رايس، ولورا بيريز Laura Pérez من جامعة تشيلي، وكورنيليس دوليموند Cornelis Dullemond من جامعة هايدلبرغ Heidelberg: "كان الهدف من حملة الرصد هذه، التي استمرت لأشهر، هو البحث عن أوجه التشابه والاختلاف في بنية الأقراص الكوكبية الأولية. وقد كشفت الرؤية فائقة الدقة لمرصد ألما

[1] (https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/alma-campaign-provides-unprecedented-views-of-the-/birth-of-planets

https://coptic-treasures.com/

عن هياكل لم يسبق لها مثيل وأنماط معقدة بشكل غير متوقع". نلاحظ تفاصيل دقيقة حول مجموعة واسعة من النجوم الفتية ذات الكتل المختلفة. التفسير الأرجح لهذه السمات الصغيرة والمتنوعة للغاية هو وجود كواكب غير مرئية تتفاعل مع مادة القرص.

تفترض النماذج الرائدة لتكوين الكواكب أن الكواكب تتشكل من خلال التراكم التدريجي للغبار والغاز داخل قرص كوكبي أولي، بدءًا بحبيبات الغبار التي تتحد لتشكل صخورًا أكبر فأكبر، حتى تظهر الكويكبات والكواكب الصغيرة والكواكب. من المفترض أن تستغرق هذه العملية الهرمية ملايين السنين، مما يشير إلى أن تأثيرها على الأقراص الكوكبية الأولية سيكون أكثر وضوحًا في الأنظمة الأقدم والأكثر نضجًا. ومع ذلك، تشير الأدلة المتزايدة إلى أن هذا ليس هو الحال دائمًا. تكشف الملاحظات المبكرة التي أجراها مرصد ألما للأقراص الكوكبية الأولية الفتية، والتي لا يتجاوز عمر بعضها مليون عام، عن هياكل مذهلة ومثيرة للدهشة، بما في ذلك حلقات وفجوات بارزة، والتي تبدو أنها من السمات المميزة للكواكب. كان علماء الفلك حذرين في البداية من عزو هذه الخصائص إلى نشاط الكواكب، لاحتمالية وجود عوامل طبيعية أخرى مؤثرة. وقالت جين هوانغ Jane Huang، طالبة الدراسات العليا في مركز هارفارد-سميثسونيان للفيزياء الفلكية وعضو فريق البحث: "كان من المثير للدهشة رؤية مؤشرات محتملة لتكوّن الكواكب في أولى الصور عالية الدقة للأقراص الكوكبية الفتية. وكان من المهم معرفة ما إذا كانت هذه المؤشرات شاذة أم أنها شائعة في الأقراص".

ونظرًا لصغر حجم العينة، تعذر استخلاص أي استنتاجات شاملة. فقد يكون علماء الفلك يرصدون أنظمة غير نمطية. لذا، كانت هناك حاجة إلى مزيد من عمليات الرصد على مجموعة متنوعة من الأقراص الكوكبية الأولية لتحديد السبب الأرجح لهذه الخصائص التي رصدناها. وقد صُممت حملة DSHARP خصيصًا لهذا الغرض، من خلال دراسة التوزيع الدقيق نسبيًا لجزيئات الغبار حول 20 قرصًا كوكبيًا أوليًا قريبًا. تتوهج جزيئات الغبار هذه بشكل طبيعي في ضوء الموجات المليمترية، مما يمكّن مرصد ألما من رسم خريطة دقيقة لتوزيع كثافة الجزيئات الصلبة الصغيرة حول النجوم الفتية.

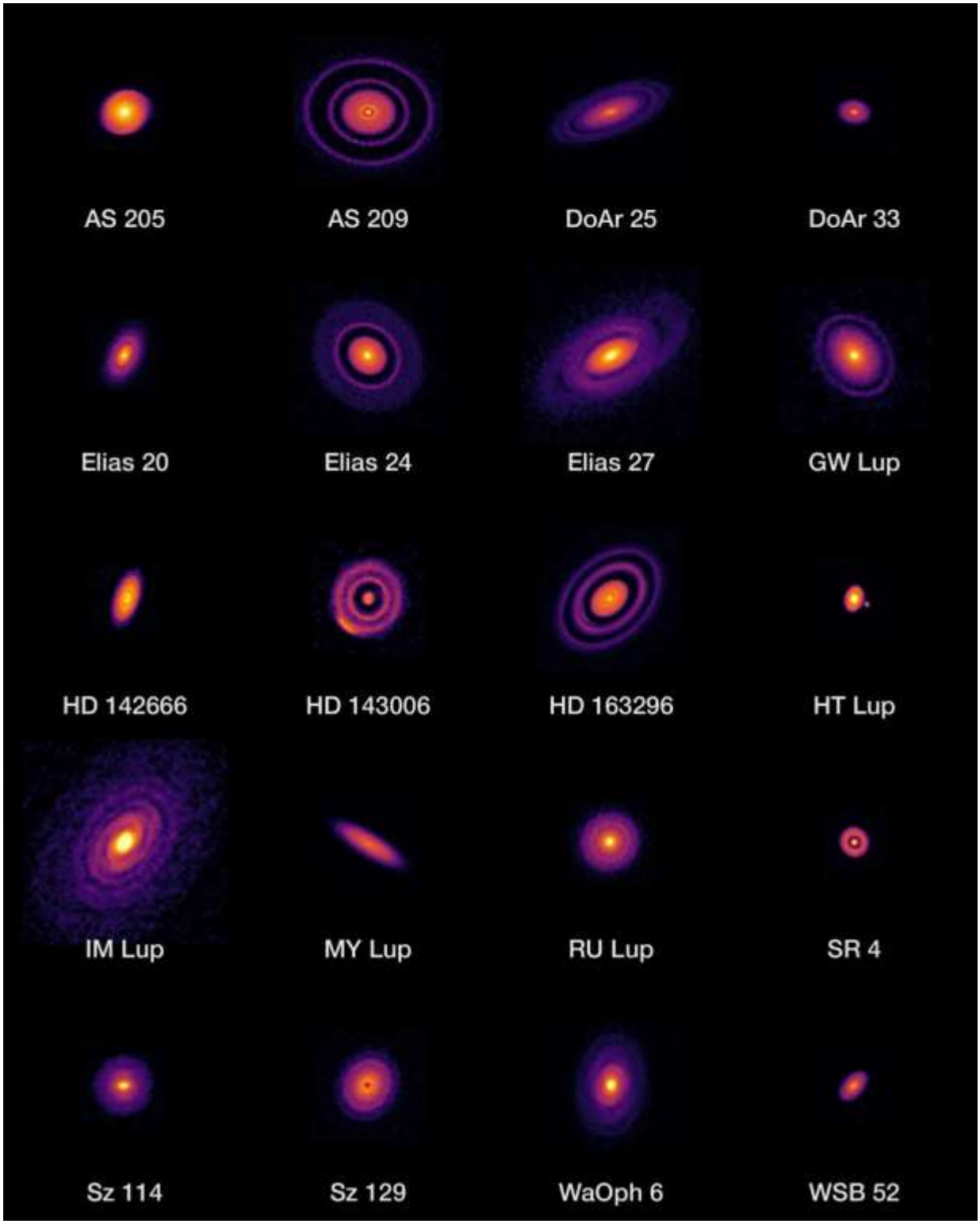
اعتمادًا على بُعد النجم عن الأرض، تمكّن مرصد ألما من رصد تفاصيل دقيقة تصل إلى بضع وحدات فلكية (الوحدة الفلكية هي متوسط المسافة بين الأرض والشمس، حوالي 150 مليون كيلومتر، وهي وحدة قياس مفيدة لقياس المسافات على مستوى الأنظمة النجمية). وباستخدام هذه الملاحظات، تمكّن الباحثون من تصوير مجموعة كاملة من الأقراص الكوكبية الأولية القريبة ودراسة خصائصها على مستوى الوحدة الفلكية. وجد الباحثون أن العديد من البنى الفرعية - كالفجوات متحدة المركز والحلقات الضيقة - مشتركة بين جميع الأقراص تقريبًا، بينما توجد أنماط حلزونية واسعة النطاق وخصائص تشبه الأقواس في بعض الحالات. كما تتواجد الأقراص والفجوات على نطاق واسع من المسافات من نجومها المضيفة، من بضع وحدات فلكية إلى أكثر من 100 وحدة فلكية، أي أكثر من ثلاثة أضعاف المسافة بين نبتون وشمسنا. قد تُفسّر هذه الخصائص، التي يُحتمل أن تكون بصمات كواكب ضخمة، كيفية تكوّن الكواكب الصخرية الشبيهة بالأرض ونموها. لعقودٍ طويلة، حيّرت هذه العقبة الرئيسية في نظرية تكوين الكواكب علماء الفلك: فبمجرد أن تنمو الكويكبات إلى حجمٍ معين - يبلغ قطره حوالي كيلومتر واحد - فإن ديناميكيات

https://coptic-treasures.com/

القرص الكوكبي الأولي الأملس تدفعها إلى السقوط على نجمها المضيف، دون أن تكتسب الكتلة اللازمة لتكوين كواكب مثل المريخ والزهرة والأرض.

وتُوفّر حلقات الغبار الكثيفة التي نراها الآن بواسطة مرصد ألما ملاذًا آمنًا للكواكب الصخرية لتنضج تمامًا. إذ تُحدث كثافتها العالية وتركيز جزيئات الغبار اضطراباتٍ في القرص، مُشكّلةً مناطق تُتيح للكواكب وقتًا أطول للنمو لتصبح كواكب كاملة. وأشارت لورا بيريز، من جامعة تشيلي وعضو فريق البحث، قائلةً: "عندما كشف مرصد ألما عن قدراته الحقيقية من خلال صورته الشهيرة لنجم HL Tau، تساءلنا عما إذا كانت هذه الصورة حالةً شاذة، نظرًا لأن القرص كان ضخمًا نسبيًا وحديث التكوين". "توضح هذه الملاحظات الأخيرة أنه على الرغم من كونها لافتة للنظر، فإن HL Tau ليس أمراً غير عادي على الإطلاق، وقد يمثل في الواقع التطور الطبيعي للكواكب حول النجوم الشابة."

https://coptic-treasures.com/



صور عالية الدقة التقطها مرصد ألما لأقراص كوكبية أولية قريبة، وهي نتاج مشروع دراسة البنى الفرعية للأقراص بدقة زاوية عالية (DSHARP).
حقوق الصورة: ألما (ESO/NAOJ/NRAO)

https://coptic-treasures.com/

تكوّن الحلقات عن طريق تكتل تجمعات الغبار في المرحلة المبكرة من تطور القرص حول النجم الأولي

تبدأ الكواكب الضخمة حياتها كذرات غبار متناهية الصغر لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة. يقول ساتوشي أوهاشي Satoshi Ohashi من مختبر ريكين RIKEN لتكوين النجوم والكواكب: "تطورت كواكب مثل الأرض، التي يبلغ قطرها آلاف الكيلومترات، من جزيئات غبار بين النجوم دون الميكرون، وهذا يُعدّ قفزة هائلة في الحجم". ويضيف: "نحن مهتمون باكتشاف كيفية تجمع حبيبات الغبار لتشكيل أجسام يصل حجمها إلى آلاف الكيلومترات". تتشكل الكواكب من الأقراص الكوكبية الأولية، وهي أقراص دوّارة من الغاز والغبار تدور حول النجوم الوليدة. وقد رُصدت هياكل حلقية الشكل في هذه الأقراص، ويُعتقد أن هذه الحلقات تندمج مع مرور الوقت لتشكل هياكل أكبر فأكبر، مما يؤدي في النهاية إلى تكوين الكواكب. ولكن لا يزال الكثير مجهولاً عن هذه العملية[1].

وقد درس أوهاشي وزملاؤه الآن سيناريو محتملاً لتكوين هذه الحلقات من خلال إجراء محاكاة حاسوبية. تشير النتائج التي توصلوا إليها إلى أن الغبار قد يتجمع في جزيئات أكبر خلال المرحلة النجمية الأولية، بينما لا يزال النجم نفسه في طور التكوين، وذلك في وقت أبكر بكثير مما تنبأت به النظريات الحالية لتكوين الكواكب. يقول أوهاشي: "وجدنا أن الهياكل الحلقية ظهرت حتى في المراحل المبكرة من تكوين القرص. وهذا يشير إلى أن حبيبات الغبار قد تصبح أكبر حجماً في وقت أبكر مما كنا نعتقد سابقاً".

هذا اكتشاف غير متوقع، لأن قرص الغبار لا يزال في حالة تغير مستمر خلال المرحلة النجمية الأولية، وهو ما لا يُعدّ بيئة مناسبة لتكتل الغبار. يقول أوهاشي: "إنه لأمرٌ مُثير للدهشة حقًا، لأنه خلال مرحلة تكوين الكواكب، من المفترض أن تبقى حبيبات الغبار في القرص، لكن المادة لا تزال تتساقط باتجاه النجم المركزي خلال المرحلة النجمية الأولية. لذلك نعتقد أن تكوين الكواكب قد يكون عملية ديناميكية للغاية". وجد الفريق توافقًا جيدًا بين نتائج محاكاتهم ورصد 23 بنية حلقية في الأقراص بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA) في تشيلي وتلسكوبات أخرى. كما يُمكن أن تُفسر نتائجهم الرصد الأخير للحلقات في الأقراص النجمية الأولية. ويشير أوهاشي إلى أن "رصد ALMA الأخير كشف عن أربع بنى حلقية على الأقل في الأقراص النجمية الأولية، وهو ما يتوافق مع محاكاتنا".

[1] Satoshi Ohashi, Hiroshi Kobayashi, Riouhei Nakatani, Satoshi Okuzumi, Hidekazu Tanaka, Koji Murakawa, Yichen Zhang, Hauyu Baobab Liu, and Nami Sakai, Ring Formation by Coagulation of Dust Aggregates in the Early Phase of Disk Evolution around a Protostar, The Astrophysical Journal, Volume 907, Number 2 (2021)

https://coptic-treasures.com/

وتكتمل الكواكب ولازالت نجومها في مرحلة النمو

تشير نتائج جديدة لصور عالية الدقة، تم إنتاجها باستخدام تقنيات محسّنة لإعادة تحليل بيانات أرشيف علم الفلك الراديوي، إلى احتمال ظهور علامات تكوّن الكواكب في وقت أبكر مما كان متوقعًا حول النجوم الفتية. ستوفر هذه العلامات المكتشفة حديثًا لتكوّن الكواكب فهمًا أفضل لتوقيت بدء هذه العملية حول النجوم الفتية، مما يُسهم في توضيح العملية التي تؤدي إلى تكوّن الكواكب، بما في ذلك الكواكب الصالحة للسكن مثل الأرض.

تتشكل الكواكب في أقراص تتكون من غاز جزيئي منخفض الحرارة وغبار، تُعرف بالأقراص الكوكبية الأولية، وتوجد حول النجوم الأولية. النجوم الأولية هي نجوم لا تزال في طور التكوين. الكواكب الوليدة صغيرة جدًا بحيث لا يمكن رصدها مباشرة، لكن جاذبية الكوكب قادرة على تكوين أنماط قابلة للملاحظة، مثل الحلقات أو اللوالب، في القرص الكوكبي الأولي. مع ذلك، يصعب تحديد وقت ظهور هذه الأنماط لأول مرة نظرًا لقلة عدد الأقراص الكوكبية الأولية القريبة بما يكفي من الأرض لرصدها بدقة عالية.

استخدم فريق بحثي بقيادة أيومو شوشي من جامعة كيوشو ومعهد أكاديميا سينيكا لعلم الفلك والفيزياء الفلكية (ASIAA) تقنيات مُحسّنة لمعالجة البيانات للبحث عن دلائل مُغفلة سابقًا لتكوّن الكواكب في بيانات أرشيفية من تلسكوب ALMA (مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر). أعاد الفريق تحليل بيانات 78 قرصًا في منطقة تكوّن النجوم في كوكبة الحواء، الواقعة على بُعد 460 سنة ضوئية باتجاه كوكبة الحواء. وقد حققت أكثر من نصف الصور المُنتجة في هذه الدراسة دقةً أفضل بثلاث مرات من دقة الصور السابقة.

تُظهر الصور الجديدة عالية الدقة أنماطًا حلقية أو حلزونية في 27 قرصًا. من بينها، تم تحديد 15 قرصًا لأول مرة في هذه الدراسة. وبدمج هذه العينة الجديدة مع دراسات سابقة لمنطقة أخرى لتكوّن النجوم، وجد الفريق أن البنى الفرعية المميزة للأقراص تظهر في أقراص أكبر من 30 وحدة فلكية (الوحدة الفلكية الواحدة = 149,597,870,700 متر، وهي المسافة بين الأرض والشمس) حول النجوم في المراحل المبكرة لتكوّن النجوم، بعد بضع مئات الآلاف من السنين فقط من ولادة النجم. يشير هذا إلى أن الكواكب تبدأ بالتكوّن في مرحلة أبكر بكثير مما كان يُعتقد سابقًا، عندما لا يزال القرص يحتوي على كميات وفيرة من الغاز والغبار. بعبارة أخرى، تنمو الكواكب جنبًا إلى جنب مع نجومها المضيفة الفتية جدًا.

https://coptic-treasures.com/

كوكبان أوليان يتراكمان حول النجم الشاب PDS 70

على بُعد 370 سنة ضوئية منا، يُشكّل نظام شمسي كواكبَ وليدة. النجمُ الذي يقع في مركز هذا النظام شابٌ، إذ يبلغ عمره حوالي 6 ملايين سنة فقط. أما وليداه فهما كوكبان عملاقان، يُرجّح أنهما عملاقان غازيان، يتغذيان على المادة الغازية من قرص النجم المحيط بالشمس. يُطلق على النجم المضيف في هذا النظام اسم PDS 70. يُعدّ PDS 70 أصغر حجمًا وأقل كتلةً من شمسنا، ولا يزال يكتسب المادة. هذا النجم الشاب هو نجم من نوع T Tauri، ما يعني أنه نجمٌ فتيّ في بداية حياته. ولأنه نجمٌ فتيّ، لا تزال الكواكب في طور التكوّن في مداره. ورؤية الكواكب الوليدة وهي لا تزال في طور التكوّن هو أمرٌ بدأ علماء الفلك يتقنونه مؤخرًا. "هذا هو أول رصدٍ واضح لنظامٍ كوكبيّ ثنائيّ يُشكّل فجوةً في القرص." جوليان جيرارد Julien Girard، معهد علوم تلسكوب الفضاء Space Telescope Science Institute. ما يجعل صور هذه الكواكب الفتية التي لا تزال في طور التكوين مثيرة للاهتمام هو أنها دليل يدعم النظرية الراسخة حول كيفية تشكل الكواكب في الأنظمة الشمسية الفتية. تُعرف هذه النظرية باسم فرضية السديم، وهي مطروحة منذ عقود، ولكن دون وجود أدلة رصدية تدعمها[1].

تتشكل النجوم من سحب هائلة تتكون في معظمها من الهيدروجين، تُسمى السحب الجزيئية. هذه السحب غير مستقرة جاذبياً، ويميل الغاز فيها إلى التكتل. مع مرور الوقت، يبدأ أحد هذه التكتلات بالتضخم والنمو بشكل مطرد. ومع استمراره في ذلك، تتسطح السحابة كالفطيرة، وتبدأ بالدوران، وعندما يصبح التكتل المركزي كثيفاً بما يكفي، يندمج ويبدأ نجم بالولادة. العديد من النجوم موجودة في أنظمة ثنائية، حيث يتشكل نجمان من السحابة الجزيئية. لكن النجم الموجود في المركز ليس التكتل الوحيد. تتشكل تكتلات أخرى أصغر حجماً في الغاز الدوار، ويمكن أن تتطور إلى كواكب. بعض الكواكب الغازية، مثل المشتري وزحل في نظامنا الشمسي، يمكن أن تصل إلى أحجام هائلة. (يُطلق علماء الفلك أحيانًا على كوكبي المشتري وزحل اسم "النجوم الفاشلة" لأنهما كانا في طريقهما ليصبحا نجمين، لكنهما لم يُكملا هذه المرحلة).

لو أمكننا إيقاف هذه العملية عند تلك النقطة، لرأينا نجمًا فتيًا في مركز سحابة غازية مسطحة دوارة. لكن في هذا الغاز، سنرى فجوات حلقية الشكل، حيث تنشغل الكواكب بجمع المواد وتكوّن الكواكب. تُسمى هذه العملية بالتراكم. ولم تعد سحابة جزيئية، بل تُسمى الآن "قرصًا كوكبيًا أوليًا"، لأنها قرصية الشكل وتتشكل فيها الكواكب الأولية. ما يُميز هذه الصور الجديدة هو أننا لا نرى فقط الفجوات والحلقات التي تُشير إلى وجود كوكب، بل نرى الكواكب نفسها. وهذه هي المرة الثانية فقط التي نرصد فيها نظامًا كوكبيًا ثنائيًا يُحدث فجوات في القرص. (تم تصوير نظام رباعي الكواكب يُسمى HR 8799 في عام 2008).

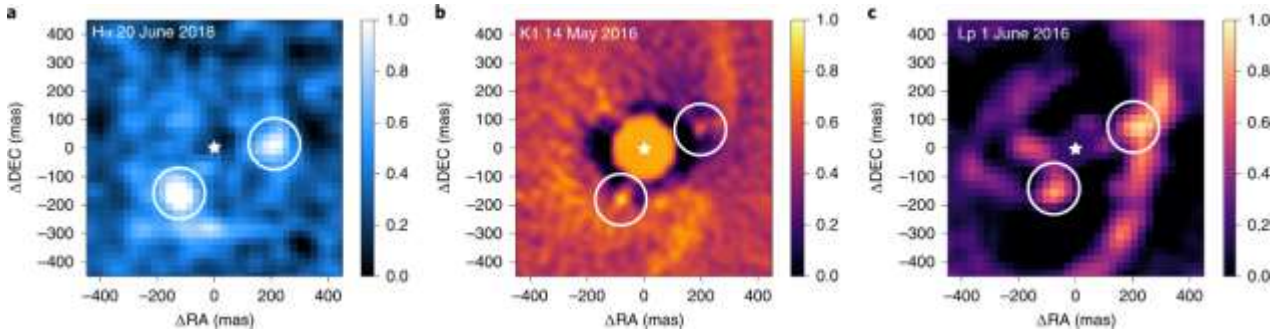
استخدم فريق الفلكيين مطياف MUSE على التلسكوب الكبير جدًا (VLT) التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي. إن رؤية ما بداخل قرص كوكبي أولي مهمة صعبة. ليس النجم ساطعًا فحسب، بل يهيمن على الصورة، كما أن كل الغاز والغبار في القرص

[1] Haffert, S.Y., Bohn, A.J., de Boer, J. et al. Two accreting protoplanets around the young star PDS 70. Nat Astron 3, (2019) 749–754

https://coptic-treasures.com/

قادر على حجب الضوء القادم من الكواكب المتشكلة. يتمتع جهاز MUSE بقدرة على التركيز على الضوء المنبعث من الهيدروجين في السحابة، وهو ما يُعد مؤشرًا على تراكم الهيدروجين في الكواكب التي لا تزال قيد التكوين. "لقد فوجئنا جدًا عندما اكتشفوا الكوكب الثاني"، كما صرّح سيباستيان هافرت Sebastiaan Haffert من مرصد لايدن Leiden، المؤلف الرئيسي للدراسة. وأوضح جيرارد: "باستخدام مرافق مثل مرصد ألما، وتلسكوب هابل، أو التلسكوبات البصرية الأرضية الكبيرة المزودة ببصريات تكيفية، نرى أقراصًا تحتوي على حلقات وفجوات في كل مكان. كان السؤال المطروح دائمًا: هل توجد كواكب هناك؟ في هذه الحالة، الإجابة هي نعم".

رصد الفريق كوكبًا يُدعى PDS 70c. (وقد رُصد كوكب آخر في النظام نفسه، يُدعى PDS 70b، لأول مرة قبل نحو عام). يقع الكوكب الجديد، PDS 70c، بالقرب من الحافة الخارجية للقرص النجمي، ويبعد حوالي 3.3 مليار ميل عن النجم. وهذه المسافة تُقارب المسافة بين نبتون والشمس. لا يملك علماء الفلك سوى تقديرات أولية لكتلة الكوكب، لكنهم يُقدّرون أن كتلة PDS 70c تتراوح بين مرة واحدة وعشر مرات كتلة المشتري. أما الكوكب المكتشف سابقًا، PDS 70b، فيقع على بُعد حوالي ملياري ميل من النجم، أي ما يُقارب المسافة بين أورانوس في نظامنا الشمسي. وتتراوح كتلته بين 4 و17 مرة كتلة المشتري. يُعدّ الحصول على صور لهذه الكواكب الخارجية الفتية بمثابة مصادفة سعيدة لجهاز مطياف MUSE. فقد طُوّر هذا الجهاز في البداية لدراسة المجرات والتجمعات النجمية، ولكن تبيّن أنه بارع في رصد الكواكب الخارجية أثناء تشكّلها. وقد ساهمت هذه المصادفة في تحويل فرضية السديم من مجرد فرضية إلى نظرية مُعتمدة. يقول هافرت: "طُوّر نمط الرصد الجديد هذا لدراسة المجرات والتجمعات النجمية بدقة مكانية أعلى. ولكن هذا النمط الجديد يجعله مناسبًا أيضًا لتصوير الكواكب الخارجية، وهو ما لم يكن الدافع العلمي الأصلي وراء تطوير جهاز MUSE".



a- خريطة كشف خط انبعاث الهيدروجين ألفا (Hα) للنجم PDS 70 بعد إزالة جميع أشعة الشمس المباشرة والمشتتة. تم تحديد موقعي النجمين PDS 70 b و c بدوائر بيضاء. يشير النجم الأبيض في المنتصف إلى موقع النجم. من المرجح أن يكون التشويه الواقع جنوب النجم PDS 70 b ناتجًا عن تقطيع الصورة في برنامج MUSE، حيث تتطابق الإشارة تمامًا مع محور التقطيع وفصل المجال، ولا نراه في مجموعات البيانات الأخرى. b- رصد النجم PDS 70 في نطاق K1 باستخدام جهاز SPHERE/IRDIS بعد معالجة ADI. تم استعادة كلا النجمين المرافقين، اللذين تم تحديد موقعيهما بدوائر بيضاء، في البيانات. يشير النجم الأبيض إلى موقع النجم. c- رصد NACO في نطاق L. يظهر النجم PDS 70 b بوضوح، بينما يرتبط النجم PDS 70 c بالقرص. ويعود ذلك إلى اتساع نصف القيمة القصوى (FWHM) لدالة انتشار النقطة في نطاق L. تشير الأبحاث السابقة إلى أن القرص يجب أن يكون حلقة ملساء، لذا يُرجح أن يكون الامتداد عند موقع PDS 70 c ناتجًا عن الكوكب نفسه. ويُحدد موقع النجم بالنجم الأبيض.

https://coptic-treasures.com/

صورة مؤكدة لكوكب حديث الولادة التقطتها تلسكوبات VLT التابعة للمرصد الأوروبي الجنوبي

التقط جهاز SPHERE، وهو أداة لرصد الكواكب مثبتة على التلسكوب الكبير جدًا التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي (ESO)، أول صورة مؤكدة لكوكب في طور التكوين ضمن القرص الغباري المحيط بنجم فتي. يشق هذا الكوكب الفتي طريقه عبر القرص البدائي من الغاز والغبار المحيط بالنجم الفتي PDS 70. وتشير البيانات إلى أن غلافه الجوي غائم. تمكن علماء فلك بقيادة فريق من معهد ماكس بلانك لعلم الفلك في هايدلبرغ، ألمانيا، من التقاط صورة مذهلة لتكوين كوكب حول النجم القزم الفتي PDS 70. وباستخدام جهاز SPHERE على التلسكوب الكبير جدًا (VLT) التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) - أحد أقوى أجهزة رصد الكواكب الموجودة - حقق الفريق الدولي أول رصد دقيق لكوكب فتي، أُطلق عليه اسم PDS 70b، وهو يشق طريقه عبر المادة المُكوِّنة للكواكب المحيطة بالنجم الفتي. مكّن جهاز SPHERE الفريق من قياس سطوع الكوكب بأطوال موجية مختلفة، مما سمح باستنتاج خصائص غلافه الجوي[1].

يظهر الكوكب بوضوح تام في الصور الجديدة، كنقطة ساطعة على يمين مركز الصورة المظلم. يقع على بُعد حوالي ثلاثة مليارات كيلومتر من النجم المركزي، أي ما يُعادل تقريبًا المسافة بين أورانوس والشمس. يُشير التحليل إلى أن PDS 70b كوكب غازي عملاق تبلغ كتلته أضعاف كتلة المشتري. تصل درجة حرارة سطحه إلى حوالي 1000 درجة مئوية، مما يجعله أكثر سخونة من أي كوكب في نظامنا الشمسي. يعود سبب المنطقة المظلمة في مركز الصورة إلى جهاز الكورونوغراف coronagraph، وهو قناع يحجب الضوء الساطع للنجم المركزي، مما يسمح لعلماء الفلك برصد قرصه الخافت وكوكبه المرافق. لولا هذا القناع، لكان الضوء الخافت المنبعث من الكوكب قد طغى عليه تمامًا سطوع النجم PDS 70 الشديد. توضح ميريام كيبلر Miriam Keppler، التي قادت الفريق الذي اكتشف الكوكب الذي لا يزال يتشكل حول النجم PDS 70: "تُعدّ هذه الأقراص المحيطة بالنجوم الفتية مهدًا للكواكب، ولكن حتى الآن لم ترصد سوى بضع عمليات رصد مؤشرات على وجود كواكب وليدة فيها. تكمن المشكلة في أن معظم هذه الكواكب المرشحة، حتى الآن، قد تكون مجرد معالم في القرص".

يُعدّ اكتشاف الكوكب المرافق الشاب للنجم PDS 70 نتيجة علمية مثيرة تستحق المزيد من البحث. وقد قام فريق ثانٍ، يضمّ العديد من علماء الفلك أنفسهم الذين شاركوا في فريق الاكتشاف، بمن فيهم كيبلر، خلال الأشهر الماضية بمتابعة عمليات الرصد الأولية لدراسة الكوكب المرافق الوليد للنجم PDS 70 بمزيد من التفصيل. لم يكتفوا بالتقاط صورة فائقة الوضوح للكوكب الموضحة هنا، بل تمكنوا أيضًا من الحصول على طيف له. وأظهر تحليل هذا الطيف أن غلافه الجوي غائم.

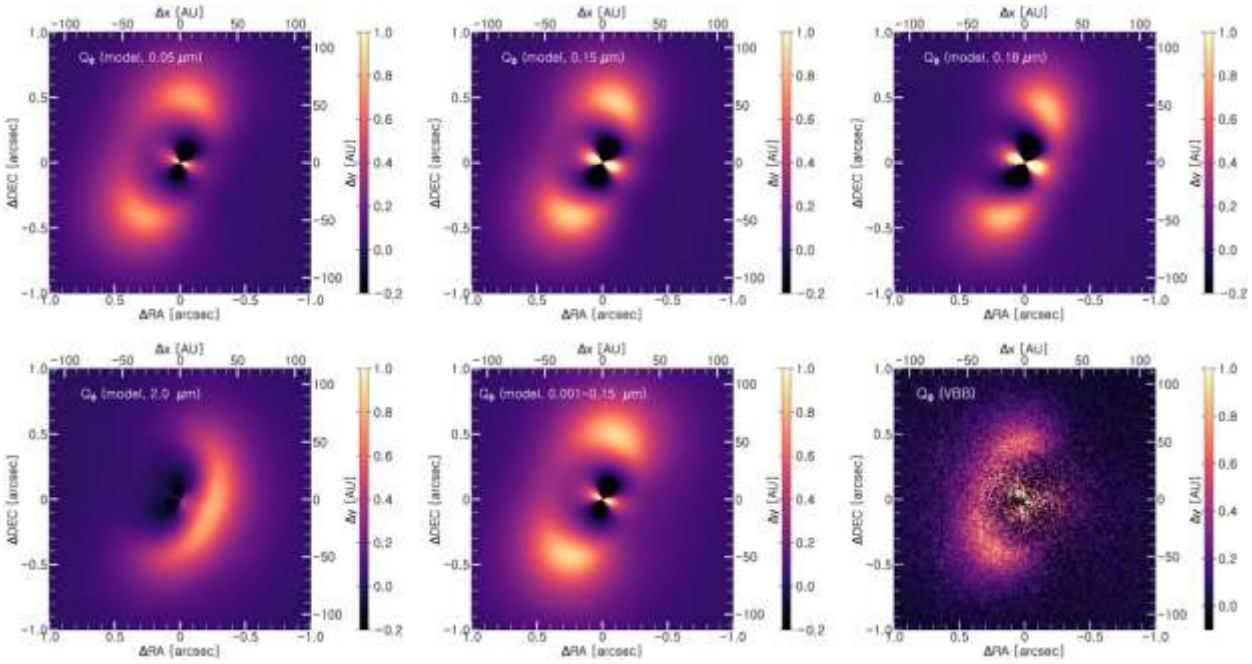
[1] M. Keppler, M. Benisty, A. Müller, et al., Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70., Astronomy & Astrophysics A&A, Volume 617 (2018), 617 (2018) A44
A. Müller, M. Keppler, Th. Henning, et al., Orbital and atmospheric characterization of the planet within the gap of the PDS 70 transition disk., Astronomy & Astrophysics (A&A) Volume 617 (2018) L2

https://coptic-treasures.com/

شكّل الكوكب المرافق لنجم PDS 70 قرصًا انتقاليًا - قرصًا كوكبيًا أوليًا يحتوي على "ثقب" عملاق في مركزه. عُرفت هذه الفجوات الداخلية لعقود، وكان يُعتقد أنها ناتجة عن تفاعل القرص مع الكوكب. والآن، أصبح بإمكاننا رؤية الكوكب لأول مرة. يعلق أندريه مولر، قائد الفريق الثاني الذي يدرس هذا الكوكب الفتيّ، قائلاً: "تمنحنا نتائج كيبلر نافذة جديدة على المراحل المبكرة المعقدة وغير المفهومة جيدًا لتطور الكواكب. كنا بحاجة إلى رصد كوكب في قرص نجم فتيّ لفهم العمليات الكامنة وراء تكوين الكواكب فهمًا حقيقيًا". ومن خلال تحديد الخصائص الجوية والفيزيائية للكوكب، يتمكن علماء الفلك من اختبار النماذج النظرية لتكوين الكواكب.

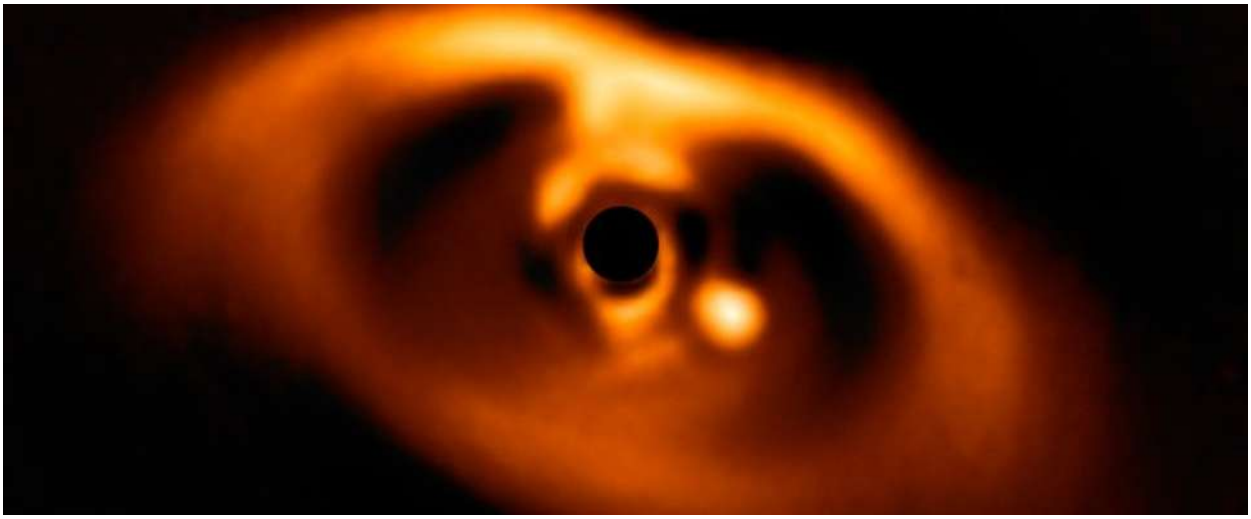
لم يكن من الممكن الحصول على هذه اللمحة عن ولادة كوكب مُحاط بالغبار إلا بفضل القدرات التكنولوجية المذهلة لجهاز SPHERE التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي، والذي يدرس الكواكب الخارجية والأقراص حول النجوم القريبة باستخدام تقنية تُعرف بالتصوير عالي التباين - وهو إنجاز بالغ الصعوبة. حتى عند حجب ضوء النجم باستخدام الكورونوغراف، لا يزال على مرصد SPHERE استخدام استراتيجيات رصد متطورة وتقنيات معالجة بيانات متقدمة لتصفية إشارة الكواكب الخافتة المصاحبة للنجوم الفتية الساطعة عند أطوال موجية وفترات زمنية متعددة.

يلخص توماس هينينغ، مدير معهد ماكس بلانك لعلم الفلك وقائد الفرق، هذه المغامرة العلمية قائلاً: "بعد أكثر من عقد من الجهود الجبارة لبناء هذه الآلة عالية التقنية، يُمكّننا مرصد SPHERE الآن من جني ثمار اكتشاف الكواكب الوليدة!"



صور Qϕ المُحسوبة بتقنية تتبع الأشعة، والمُقاسة عند 0.7 ميكرومتر باستخدام توزيعات مختلفة لأحجام الحبيبات. بعد ذلك، تم طرح استقطاب المصدر المركزي الناتج عن القرص الداخلي غير المُحلَّل (نصف قطره 2 وحدة فلكية) باستخدام تقنية تقليل Uϕ. تُظهر اللوحة السفلية اليمنى رصد VBB للمقارنة. الشمال للأعلى والشرق لليسار.

https://coptic-treasures.com/



صورة مُدمجة من جهاز IRDIS لكوكب PDS 70 باستخدام تقنية معالجة الصور الكلاسيكية ADI، تُظهر الكوكب داخل فجوة القرص المحيط به. تم إخفاء الجزء المركزي من الصورة لتحسين العرض. الشمال للأعلى، والشرق لليسار.

وجاء على موقع[1] Max Planck Institute for Astronomy: يُظهر التحليل أن الكوكب PDS 70 b هو كوكب غازي عملاق، تبلغ كتلته أضعاف كتلة كوكب المشتري. تصل درجة حرارة سطحه إلى حوالي 1200 كلفن، مما يجعله أكثر سخونة من أي كوكب في نظامنا الشمسي. من المرجح أن يكون الكوكب أصغر عمرًا من نجمه، وربما لا يزال في طور النمو. تشير البيانات أيضًا إلى أن الكوكب مُحاط بسحب تُغير الإشعاع المنبعث من نواته وغلافه الجوي. توضح السيدة كيبلر: "لقد صححنا حساباتنا لمراعاة البيانات الجديدة التي نشرها قمر غايا الصناعي حول المسافات النجمية. وفقًا لغايا، يقع الكوكب PDS 70 على بُعد 370 سنة ضوئية". يؤكد PDS 70 b التوقع القائل بأن الكواكب الغازية، مثل كوكب المشتري، تتشكل بالفعل على مسافات شاسعة من نجمها.

في دراسة لاحقة بقيادة أندريه مولر، تمكن فريق من علماء الفلك من الحصول على صورة مذهلة لنظام PDS 70، حيث يظهر الكوكب بوضوح على الحافة الداخلية لفجوة القرص. **يستغرق الكوكب حوالي 120 عامًا للدوران حول نجمه المضيف**. وقد مكّن طيف PDS 70 b علماء الفلك من تحديد خصائص الغلاف الجوي والخصائص الفيزيائية للكوكب. ويوضح الدكتور مولر بحماس: "يوفر لنا هذا الاكتشاف فرصة غير مسبوقة لاختبار النماذج النظرية لتكوين الكواكب".

يحتاج العلماء إلى تطبيق تقنيات رصد وتحليل متطورة للحصول على صورة لقرص كوكبي أولي. في الصور التقليدية، تختفي جميع الأجسام القريبة من النجم المضيف وسط وهج ضوء النجم الساطع. لكن باستخدام جهاز SPHERE، يمكن التخلص من تأثير النجم. ولتحقيق ذلك، تستخدم الكاميرا خاصية للضوء تُعرف بالاستقطاب. تتذبذب موجات الضوء المستقطبة خطيًا في مستوى واحد فقط. أما ضوء النجم، فهو في الغالب غير مستقطب. في المقابل، يصبح الضوء المنعكس من قرص النجم

[1] (https://www.mpia.de/news/science/2018-06-PDS70

https://coptic-treasures.com/

مستقطبًا خطيًا عند تشتته بواسطة جزيئات الغبار الموجودة فيه. باستخدام مرشح استقطاب مناسب، ينقل موجات الضوء في مستوى تذبذب واحد فقط، يتم رصد الضوء القادم من مناطق مختلفة من القرص أو إلغاؤه، وذلك بحسب اتجاه المرشح. ومن الجدير بالذكر أن المصورين يستخدمون تأثيرًا مشابهًا لكبح الانعكاسات من الأسطح الملساء.

أما ضوء النجم، فيُرصد بغض النظر عن اتجاه المرشح. وباستغلال هذا الفرق بين ضوء النجم المباشر والضوء المنعكس من القرص، يستطيع علماء الفلك إزالة ضوء النجم المباشر. ولتأكيد دقة قياساتهم، قام المراقبون بتغطية النجم بقناع، ولم يتبقَّ سوى صورة للقرص. ويختتم البروفيسور توماس هينينغ، مدير معهد ماكس بلانك لعلم الفلك، والمؤلف الرئيسي للدراستين، والباحث الألماني المشارك في تطوير جهاز SPHERE، قائلاً: "بعد عشر سنوات من تطوير أدوات فلكية متطورة مثل SPHERE، يُظهر لنا هذا الاكتشاف أننا أصبحنا قادرين أخيرًا على رصد الكواكب ودراستها في مرحلة تكوينها. إنه تحقيق لحلم طال انتظاره".

صلاحية الأرض في بداياتها للحياة: وجود الماء السائل تحت شمس فتية خافتة

تشير الأدلة الجيولوجية إلى وجود ماء سائل بالقرب من سطح الأرض منذ 4.4 مليار سنة، عندما كانت الشمس الفتية الخافتة تشع حوالي 70% فقط من طاقتها الحالية. في ذلك الوقت، كان من المفترض أن تكون الأرض كرة ثلجية عالمية لو كانت تمتلك خصائص جوية مشابهة لخصائص الأرض الحالية. وقد طُرحت عدة فرضيات، منها تأثير الاحتباس الحراري الجوي الشديد، وكبر كتلة الشمس في البداية، وانبعاث الحرارة المكتسبة خلال عملية تراكم المواد الكوكبية الأولية، والنشاط الإشعاعي لمواد الأرض المبكرة، كمستودعات أو مصائد للحرارة. وحتى الآن، لا تزال مفارقة الشمس الفتية الخافتة تشكل مشكلة مهمة في فهم أصل الحياة على الأرض. تستخدم نظرية المد والجزر ذات الطور الثابت لاستكشاف إمكانية أن يكون القمر الوليد، الذي تشكل بعد حوالي 69 مليون سنة من اشتعال الشمس، قد ولّد احتكاكًا مدّيًا شديدًا - وبالتالي حرارة - في حقبة الهاديان، وربما في حقبة الأركي[1].

لقد تبين أن نظام الأرض والقمر الحديث لا يحتوي إلا على حوالي 1% من طاقة دورانه المداري الأولية، عندما كانت الأرض تدور بسرعة وكان القمر في مدار ضيق للغاية. وقد تبددت معظم هذه الطاقة عبر المد والجزر، ونوضح أن التسخين الناتج عن المد والجزر ربما كان له تأثير أكبر بكثير على متوسط درجة حرارة سطح الأرض مما كان يُعتقد سابقًا. ويتوقع نموذج للغلاف الجوي الرمادي، المُدمج مع نموذج مُخصص لتطور معدل تسخين الأرض بفعل المد والجزر، والمتوافق مع إجمالي الطاقة المنبعثة

[1] Heller, R., Duda, JP., Winkler, M. et al. Habitability of the early Earth: liquid water under a faint young Sun facilitated by strong tidal heating due to a closer Moon. Paläontologische Zeitschrift PalZ 95, 563–575 (2021)

https://coptic-treasures.com/

في نظام الأرض والقمر، أن تسخين المد والجزر ربما ساهم في ارتفاع درجة حرارة الأرض بعدة درجات مئوية خلال المليون سنة الأولى من عمرها.

وعلى الرغم من أن تسخين الأرض بفعل المد والجزر الناتج عن اقتراب القمر لا يمكنه وحده حل مفارقة خفوت الشمس الفتية، إلا أن نتائجنا تشير إلى أنه ربما لعب دورًا هامًا في الحفاظ على الماء السائل على السطح. إضافةً إلى ذلك، قد يكون التسخين المدّي، كمصدر حراري أرضي، قد ساهم في الحفاظ على درجات حرارة مرتفعة في الوشاح، على سبيل المثال عن طريق تحفيز دوران السوائل الحرارية المائية في قشرة الأرض المبكرة. يتوافق هذا التفسير مع مفهوم "المضخة الحرارية المائية" المذكور سابقًا، والذي يتطلب وجود مصدر حرارة داخلي وقوى هائلة في قشرة الأرض في حقبة الأركي لتفسير وجود عروق الصوان الأسود التي يبلغ عمرها 3.49 مليار سنة في تكوين دريسر (غرب أستراليا). قد يتمكن نموذج موحد يشمل التأثيرات الجيوفيزيائية والجوية والمدّية والفيزيائية الفلكية من حل مفارقة الشمس الفتية الخافتة التي طال أمدها.

كيف تحولت الأرض من كتلة منصهرة إلى كوكب صالح للسكن؟

لم تكن حقبة الهاديان Hadean غامضة فحسب، بل كانت ديناميكية أيضًا. فقد شهد كوكب الأرض تغيرات هائلة خلال تلك الـ 600 مليون سنة. لكن الأدلة الجيولوجية تُشير إلى أن بيئة سطح الأرض كانت تُشبه بيئة الأرض الحالية بحلول منتصف حقبة الهاديان. وكتب الباحثون في ورقتهم البحثية: "لا تزال الظروف التي يُمكن في ظلها تحويل بيئة سطحية قاسية إلى بيئة صالحة للسكن غير مؤكدة". كان لا بد من حدوث عدة أمور قبل أن تُصبح الأرض صالحة للسكن. كان لا بد من تكوّن المحيطات، وبدء حركة الصفائح التكتونية، وإزالة غازات الاحتباس الحراري بسرعة من الغلاف الجوي. وقال ميازاكي: "كان لا بد من إزالة كمية هائلة من الكربون من الغلاف الجوي بطريقة ما. ولأنه لا يوجد سجل صخري محفوظ من الأرض في بداياتها، فقد شرعنا في بناء نموذج نظري للأرض في بداياتها من الصفر". في بدايات الأرض، كانت عبارة عن محيط من الصهارة، كرة من الصخور المنصهرة لا غير. وخلال هذه المرحلة، كان الكوكب يتشكل عبر التراكم. في عملية التراكم، تتكتل المواد معًا لتشكل جسمًا ضخمًا بمرور الوقت. استغرقت الأرض ما بين 70 و100 مليون سنة لتتشكل. خلال تلك الفترة، اصطدمت الكويكبات بالأرض التي كانت على وشك التكوين، مولدةً حرارةً أبقت الأرض في حالة منصهرة[1]. يُعدّ محيط الصهارة مرحلةً أساسيةً في حياة الكواكب الصخرية. تسمح الحالة السائلة للعناصر الأثقل بالغوص إلى النواة، بينما تطفو العناصر الأخف على السطح.

[1] Miyazaki, Y., Korenaga, J. A wet heterogeneous mantle creates a habitable world in the Hadean. Nature 603, 86–90 (2022)

https://coptic-treasures.com/

هكذا تتمايز كواكب مثل الأرض إلى نواة ووشاح وقشرة. لا تزال النواة الخارجية منصهرةً حتى يومنا هذا، ولولاها لما كان للأرض غلاف مغناطيسي واقٍ، وربما لما وُجدت حياة.

عندما تصلّب محيط الصهارة على الأرض، أطلق كميات هائلة من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي. ونتيجةً لذلك، احتوى الغلاف الجوي للأرض في بداياته على كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون والماء. ساعدت هذه الغازات في الحفاظ على مناخ الكوكب الفتيّ القاسي. ولكي يصبح هذا المناخ أكثر اعتدالًا خلال حقبة الهاديان، كان لا بدّ من حدوث تغييرات سريعة، من الناحية الجيولوجية. كان لا بدّ من إزالة غازات الدفيئة، وكان الصخر هو المستودع الوحيد لها. وكجزء من دورة الكربون على الأرض، يُخزّن الكربون في الصخور من خلال تحوّله إلى معادن كربوناتية في أحواض المحيطات. من هناك، تصبح الكربونات جزءًا من الوشاح الأرضي. (سيُدفن جزء من الكربون الذي نُطلقه الآن تحت سطح الأرض، ليتحول في المستقبل البعيد إلى ألماس). لكن السؤال يدور حول الفترة الزمنية اللازمة. إذا كان المناخ معتدلًا ومماثلًا لمناخ الأرض الحالي قبل 4 مليارات سنة، فلا بد أن عملية عزل الكربون كانت فعّالة للغاية. كيف حدث كل هذا؟ وفقًا لكورياناغا Korenaga وميازاكي Miyazaki ، لعب نوع من الصخور ما قبل التاريخ دورًا في جعل الأرض صالحة للسكن. تُسمى هذه الصخور بالبيروكسينيت عالي المغنيسيوم. يقول الباحثان إنه لا يوجد أي من هذه الصخور على الأرض اليوم. لكن نموذج إزالة الكربون السريع الذي طوراه - استنادًا إلى الديناميكا الحرارية، وميكانيكا الموائع، وفيزياء الغلاف الجوي - يُظهر أن هذه الصخور لا بد أنها كانت موجودة. بل إنهم يعرفون شكلها. يقول ميازاكي: "كانت هذه الصخور غنية بمعدن يُسمى البيروكسين، ومن المرجح أنها كانت ذات لون أخضر داكن". والأهم من ذلك، أنها كانت غنية للغاية بالمغنيسيوم، بتركيز نادرًا ما يُلاحظ في صخور العصر الحالي.

تتميز معادن المغنيسيوم بميلها للتفاعل مع ثاني أكسيد الكربون، حيث تُشكّل الكربونات التي تُخزّن لاحقًا في وشاح الأرض. لو وُجدت كميات كافية من البيروكسينيت pyroxenites الغني بالمغنيسيوم، لكان من الممكن أن تُفسّر الإزالة السريعة للكربون من الغلاف الجوي للأرض. لكن هذا ليس سوى جزء من تفسير التحول الجيولوجي السريع للغلاف الجوي للأرض خلال حقبة الهاديان. فمع وفرة المعادن الغنية بالمغنيسيوم، كان لا بد من حدوث شيء آخر. تذكر أن تراكم الكربون في الغلاف الجوي نتج عن تبريد محيط الصهارة، الذي أطلق كميات هائلة من غازات الدفيئة في الغلاف الجوي أثناء تبريده وتصلبه.

خلال حقبة الهاديان، كان للأرض ما يُسمى بالوشاح الرطب، وهو طبقة صخرية سميكة يبلغ سمكها 3000 كيلومتر (1900 ميل). الوشاح الرطب هو الوشاح الذي يحتوي على نسبة عالية من الماء، ويؤثر هذا الماء على تيارات الحمل الحراري. يحتوي وشاح الأرض على كميات كبيرة من معادن السيليكات، التي كانت منصهرة خلال حقبة الهاديان. يخفض الماء درجة انصهار السيليكات، مما يُبقي المزيد منها منصهرًا. تيارات الحمل الحراري في المادة المنصهرة تعني أن الوشاح تعرض لتيارات حمل حراري. هذا يعني أن الوشاح الرطب تعرض لتيارات حمل حراري أكثر، مما جلب المزيد من المعادن الغنية بالمغنيسيوم إلى السطح حيث تفاعلت مع الكربون. في الواقع، أعاد سطح الوشاح تدوير نفسه بسرعة أكبر، مما أدى إلى زيادة سرعة تفاعل المغنيسيوم

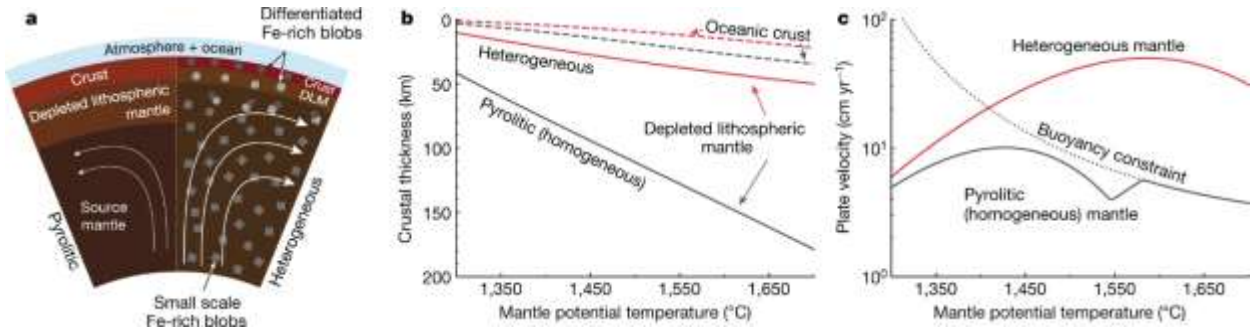
https://coptic-treasures.com/

مع الكربون. في النهاية، أُزيل هذا الكربون من الغلاف الجوي واحتُجز في الوشاح. لكي ينجح هذا، كان لا بد أن يكون الوشاح غير متجانس كيميائيًا. وهذا يعني أن تركيبه لم يكن موحدًا، بل كان يتألف من مكونات مختلفة ومتنوعة. يكتب الباحثون في ورقتهم البحثية: "بالنظر إلى ظهور بيئة صالحة للسكن بحلول 4 مليارات سنة مضت، فإن تطور حقبة الهاديان يُفسَّر بشكل طبيعي أكثر بوجود وشاح ذي بنية غير متجانسة كيميائيًا". ويضيفون: "نقترح أن إعادة التدوير السريع ممكنة مع وشاح غير متجانس كيميائيًا...". لو كان الوشاح أكثر تجانسًا، لربما لم يبرد الغلاف الجوي بهذه السرعة. ذلك لأن الوشاح الأكثر تجانسًا لم يكن ليُكوِّن نفس نوع الغطاء الليثوسفيري الذي عزز حركة الصفائح السريعة. كان الوشاح المتجانس سيُكوِّن غطاءً ليثوسفيريًا مستنفدًا، ولكنه كان سيكون أكثر سمكًا. وكان الغطاء الأكثر سمكًا سيُبطئ حركة الصفائح، مما كان سيُبطئ بدوره عملية احتجاز الكربون. وكتب المؤلفون: "تشير نتائجنا إلى أن الوشاح غير المتجانس كيميائياً أكثر توافقاً مع خلق بيئة صالحة للسكن بحلول نهاية حقبة الهاديان". كان لا بد من حدوث أمر ثالث لكي تصبح الأرض صالحة للسكن. لم تكن صلاحية السكن تتطلب فقط نشاط الصفائح التكتونية وإزالة غازات الدفيئة من الغلاف الجوي، بل تطلبت أيضًا وجود محيطات. يُراعي النموذج الذي طوره الباحثون أيضًا تكوّن المحيطات. فالوشاح غير المتجانس يتميز بزيادة تيارات الحمل الحراري، مما يُعرّض المزيد من الصخور الغنية بالمغنيسيوم للغلاف الجوي. وهذا ما يُزيل غازات الدفيئة من الغلاف الجوي، مُبرّدًا إياها إلى درجات حرارة أقرب إلى درجات الحرارة الحالية. لكن تيارات الحمل الحراري الأسرع في الوشاح تُطلق أيضًا المزيد من المواد المتطايرة في الغلاف الجوي. ويوضح الباحثون أن كمية المواد المتطايرة المنبعثة "تتجاوز عتبة 0.05 من كتلة المحيط لتكوين محيطات مائية عندما يحتوي الغلاف الجوي على 200 بار من ثاني أكسيد الكربون، لذا فإن وجود محيط أمر وارد مباشرة بعد تصلب محيط الصهارة".

هل كانت درجات الحرارة المرتفعة مشكلة؟ كانت درجة الحرارة مرتفعة بما يكفي لتبخير الماء، لكن الضغط كان مرتفعًا أيضًا. يوضح الباحثون أن "درجة حرارة السطح تتجاوز 100 درجة مئوية بسبب ظاهرة الاحتباس الحراري، ومع ذلك، يبقى الماء السائل مستقرًا بفضل الضغط الجوي المرتفع". وهناك نتيجة أخرى مثيرة للاهتمام لهذه الدراسة: لا يُظهر النموذج فقط كيف برد الغلاف الجوي وأصبح صالحًا للسكن بسرعة أكبر، بل يُظهر أيضًا كيف أنتجت الصخور الغنية بالمغنيسيوم، والتي تُوصف بأنها "غريبة"، كميات أكبر من المواد الكيميائية الضرورية للحياة في مراحل مبكرة من تاريخ الأرض. ويضيف كوريناغا Korenaga: "كميزة إضافية، تتفاعل هذه الصخور "الغريبة" على الأرض في بداياتها بسهولة مع مياه البحر لتوليد تدفق كبير من الهيدروجين، والذي يُعتقد على نطاق واسع أنه ضروري لتكوين الجزيئات الحيوية". ويقول الباحثون: "إن المحتوى العالي من الأوليفين الغني بالحديد في قشرة الوشاح غير المتجانس كيميائيًا يُعزز تفاعلات السربنتنة، وهو ما له دلالة مهمة على الحياة الأولى على الأرض". وتحدث السربنتنة عندما تتلامس مياه البحر مع الصخور فوق المافية. تُنتج عملية التمعدن السربنتيني الهيدروجين، الذي بدوره يُختزل ثاني أكسيد الكربون الجوي إلى ميثان. وقد اعتمدت أشكال الحياة المبكرة على الميثان. وجاء

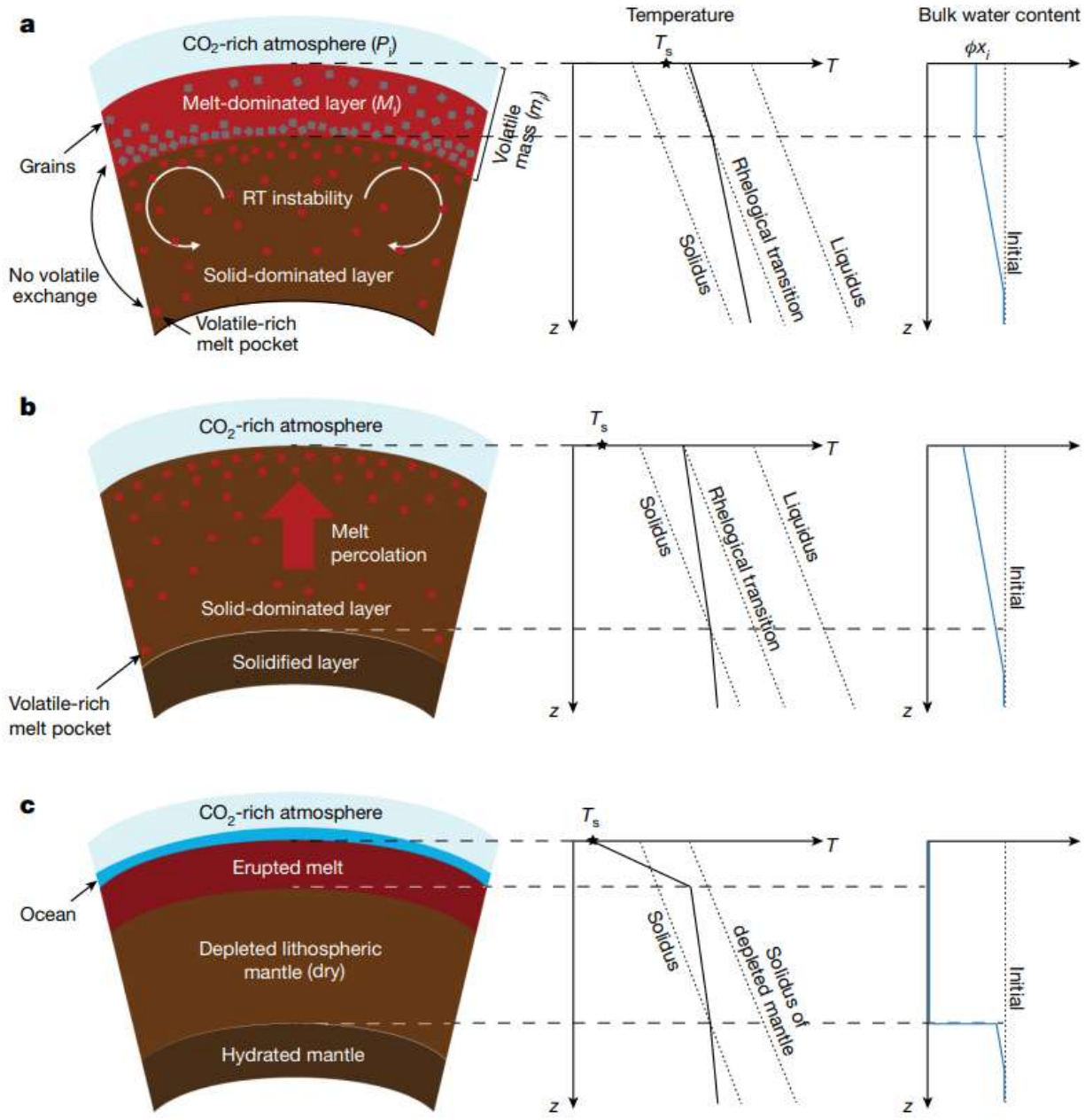
https://coptic-treasures.com/

في الورقة البحثية: "تُطلق عملية التمعدن السربنتيني الهيدروجين والميثان عن طريق اختزال الماء، ويُعتقد أن الأكسدة اللاهوائية للميثان قد دعمت أشكال الحياة الناشئة قبل بدء عملية التمثيل الضوئي".



أ- رسم تخطيطي لبنية الطبقات القريبة من السطح للوشاح البيروليتي (يسار) والوشاح غير المتجانس كيميائيًا (يمين). ب- السماكات المقدرة للقشرة المحيطية (متقطعة) والوشاح الليثوسفيري المستنفد (خطوط متصلة) لدرجات حرارة كامنة مختلفة للوشاح. يشير اللون إلى الوشاح غير المتجانس كيميائيًا (أحمر) والوشاح البيروليتي المتجانس (رمادي). ج- سرعات الصفائح لدرجات حرارة كامنة مختلفة للوشاح. يكون الوشاح الليثوسفيري المستنفد الصلب أكثر سمكًا في حالة الوشاح البيروليتي المتجانس، مما يؤدي إلى حركة أبطأ للصفائح في الوشاح الأكثر سخونة. ستكون سرعة الصفيحة في الوشاح الذي تزيد درجة حرارته عن 1590 درجة مئوية محدودة بشكل أكبر بسبب قيد الطفو (منقط). مع زيادة سمك القشرة المحيطية، يلزم وقت تبريد أطول أو طبقة حدودية حرارية أكثر سمكًا حتى تصبح الصفيحة سالبة الطفو. يفترض هنا أن محتوى الماء في الوشاح يبلغ 0.1% من الوزن.

https://coptic-treasures.com/



يُوضَّح هنا فقط الوشاح الضحل. أ- يتصلب محيط الصهارة من الأسفل، وتظهر المرحلة المسامية المنصهرة في المناطق التي ينخفض فيها جزء الانصهار عن قيمة حرجة. تُخزَّن المواد المتطايرة في الوشاح العميق في هذه المرحلة المتبقية من الانصهار بدلاً من تركيزها بالقرب من السطح. لاحظ أن محيط الصهارة يتكون من طبقتين متميزتين ريولوجيًا، طبقة يهيمن عليها الانصهار وطبقة يهيمن عليها الصلابة. تختلط الأولى بفعل الحمل الحراري السريع، بينما تختلط الثانية بفعل عدم استقرار رايلي-تايلور، وكلاهما يُنشئ توزيعًا حراريًا ثابتًا. ب- عندما تتضاءل الطبقة التي يهيمن عليها الانصهار، ينخفض تدفق الحرارة بالحمل الحراري انخفاضًا حادًا، وتنخفض درجة حرارة السطح (النجمة) إلى ما دون درجة انصهار الوشاح. يتحكم ترشيح الانصهار في التطور اللاحق لأن الحمل الحراري في الحالة الصلبة بطيء. ج- يشكّل الصهارة المتفجرة من الطور المتبقي غطاءً متصلبًا، تاركًا وراءه وشاحًا جافًا مستنفدًا. وبإطلاقها للمواد المتطايرة المذابة إلى الغلاف الجوي، يحتوي الغلاف الجوي على كمية كافية من المواد المتطايرة لتكوين محيطات على سطح بارد. المنطقة الأعمق من الوشاح متصلبة تمامًا، وبالتالي لا تتسرب منها الغازات عن طريق الترشيح. على الرغم من عدم ظهورها هنا، إلا أن المنطقة الأعمق تحتوي على كتل صغيرة غنية بالحديد، لأننا نعتبر وشاحًا غير متجانس كيميائيًا في هذه الدراسة.

https://coptic-treasures.com/

تُعدّ الأنظمة الحرارية المائية بيئات أساسية لنشأة الحياة وتطورها، إذ توفر الحرارة، وتدرجات الأكسدة والاختزال، وتنوعًا في المواد الخام القيّمة للحياة المبكرة والكيمياء ما قبل الحيوية. ويخلق التفاعل بين السائل الساخن والمواد الصخرية اختلالات كيميائية استغلتها الحياة القديمة والحديثة على الأرض. ويُعتقد أيضًا أن هذه البيئات الديناميكية تُشكّل منصات مثالية للكيمياء ما قبل الحيوية ونشأة الحياة. كما تُتيح الطبيعة الجيوكيميائية الفريدة للأنظمة الحرارية المائية حفظًا ممتازًا للبصمات الحيوية. علاوة على ذلك، يبدو أنها شائعة في جميع أنحاء نظامنا الشمسي، مما يزيد من أهميتها في نشأة الحياة واستمرارها على الكواكب الأخرى في نظامنا الشمسي[1].

هناك ثلاثة مصادر رئيسية للأنظمة الحرارية المائية على الأجرام السماوية: تلك الناتجة عن الاصطدامات، وتلك التي تُثير إليها البراكين الجليدية، وتلك الناتجة عن البراكين. تُعدّ الأنظمة الحرارية المائية الناتجة عن الاصطدامات نتاجًا لأحداث اصطدام فائقة السرعة قادرة على تشكيل فوهات معقدة الشكل (مثل فوهات يزيد قطرها عن 2-4 كيلومترات على الأرض، وعن 5-10 كيلومترات على المريخ) في أسطح الكواكب الصلبة الغنية بالماء. وتؤدي ضغوط الصدمات والحرارة المتولدة عن هذه الاصطدامات إلى انصهار و/أو تسخين الصخور وتفاعلها مع الماء لتكوين أنظمة حرارية مائية والحفاظ عليها. وبحسب خصائص النظام، يمكن أن تستمر هذه الأنظمة لمدة تتراوح بين 1500 عام و2.3 مليون عام تقريبًا. يوجد على الأرض حوالي 70 فوهة صدمية معروفة (من أصل 180 فوهة على الكوكب) تحمل دلائل على نشاط حراري مائي، وهناك العديد من الدراسات حول أنظمة حرارية مائية يُحتمل أن تكون ناتجة عن الاصطدامات على المريخ وعوالم أخرى صالحة للسكن في نظامنا الشمسي.

يمكن أن يكون النشاط البركاني الجليدي مؤشرًا على وجود أنظمة حرارية مائية محتملة على العوالم الجليدية. على الرغم من إمكانية وجود أنظمة حرارية مائية ناتجة عن اصطدامات على سطح العوالم الجليدية، إلا أنه يُعتقد عمومًا أن هذه الأنظمة موجودة/كانت موجودة في العوالم الجليدية نتيجة التسخين المدّي أو الإشعاعي لمواد الوشاح. يحدث النشاط الحراري المائي الناتج عن البراكين عندما تتفاعل الصهارة السيليكاتية (سواء كانت تدفقات حمم بركانية أو تداخلات صخرية كالسدود والطبقات المتداخلة والكتل النارية) مع القشرة الأرضية، فتسخنها لتحريك أي سوائل موجودة (كالماء السائل، أو المحلول الملحي، أو الجليد داخل مسام الصخور المحيطة، أو الجليد داخل الغلاف الجليدي، أو المرتبط بالمعادن المائية). يؤدي هذا التفاعل إلى تحول تماسي مع الصخور المحيطة، مُولِّدًا نظامًا حراريًا مائيًا مع أي سوائل موجودة. يعتمد النطاق الزمني والامتداد الجانبي لهذه الأنظمة على معدل تبريد الجسم الصهاري، والطبيعة الفيزيائية للرواسب الصخرية المحيطة التي تتلامس معها الحمم البركانية -

[1] Rivera-Valentín EG, Filiberto J, Lynch KL, et al. Introduction-First Billion Years: Habitability. Astrobiology. (2021;21(8):893-905

https://coptic-treasures.com/

وتحديدًا ما إذا كانت المادة متماسكة أم غير متماسكة ومساميتها - وأي تغذية للسوائل. تمثل هذه الأنظمة الحرارية المائية بيئات صالحة للسكن، وربما تكون هي المكان الذي بدأت فيه الحياة على الأرض.

نظراً لهذه الإمكانية للحياة، تُعدّ دراسة النشاط الحراري المائي أولوية قصوى لاستكشاف قشرة المريخ. على سطح المريخ، نلاحظ تزايداً في الأدلة على وجود ظواهر حرارية مائية سابقة في مواقع عديدة، بما في ذلك فوهة غوسيف، ومنطقة أرابيا تيرا، وحتى موقع هبوط مركبة المريخ 2020: فوهة جيزيرو. كما نلاحظ أيضاً تزايداً في الأدلة على إمكانية وجود أنظمة حرارية مائية على عوالم جليدية/محيطية في نظامنا الشمسي.

يوفر تنوع البيئات الحرارية المائية الأرضية فرصاً ممتازة لإجراء دراسات مماثلة، ما يُسهم في فهم الظروف الكيميائية المحتملة على عوالم أخرى. علاوة على ذلك، يمكن لدراسات النظم البيئية الحرارية المائية، والتفاعلات الكيميائية التي تحدث في هذه البيئات، أن تُقدّم أدلة على إمكانية الحياة على عوالم مثل المريخ وإنسيلادوس. على سبيل المثال، تُستخدم الفتحات الحرارية المائية عادةً كبيئات مماثلة للعوالم الجليدية/المحيطية. وبالطبع، تُعدّ الظواهر الحرارية المائية في منتزه يلوستون الوطني نماذج مماثلة لجوانب متعددة من الحياة على كواكب أخرى. ندرس الجيومورفولوجيا للينابيع الحارة، والينابيع الفوّارة، والبرك الطينية، لنتعلم كيفية تحديدها على أجرام سماوية أخرى. كما ندرس العمليات في يلوستون لفهم كيفية حفظ الميكروبات والمؤشرات الحيوية داخل رواسب الينابيع الحارة، والفتحات البركانية، والبراكين الطينية. وأخيرًا، ندرس الميكروبات التي تعيش في بيئات يلوستون القاسية لفهم الأدوات والاستراتيجيات التي تستخدمها الكائنات الدقيقة للبقاء على قيد الحياة في بيئات حرارية مائية متنوعة. لكل هذه الأسباب، مثّلت حديقة يلوستون الوطنية نظامًا بيئيًا رائدًا لعلماء الأحياء الفلكية الناشئين ليتعلموا علم بيئات الأحياء الفلكية المشابهة.

يُسهم فهم الظروف البيئية (مثل تركيب الغلاف الجوي، والبيئة النجمية) التي كانت سائدة خلال مرحلة التكوين الأولى للأرض قبل ظهور الحياة، في تحديد الكواكب الخارجية التي يُحتمل أن تكون صالحة للحياة. وبالمثل، فإن فهم الظروف التي تُحدد البيئات الصالحة للسكن وتلك التي تُحيط بملاءمتها، بالإضافة إلى المؤشرات الحيوية المحلية والعالمية الناتجة، يُساعدنا على البحث بشكل أفضل عن الكواكب الخارجية الصالحة للسكن.

تمتلك معظم النجوم كوكبًا واحدًا أو أكثر، تتراوح أحجامها من صغيرة بحجم الأرض إلى كبيرة بحجم المشتري. تعيش النجوم من الأنواع الطيفية F وG (مثل شمسنا) وK وM فقط لفترة كافية لتكوّن الحياة وتطورها وازدهارها على كواكبها، بافتراض أن هذه العملية تستغرق حوالي مليار سنة. وتُعدّ النجوم القزمة الحمراء الأصغر حجمًا (من النوع M) هي الأكثر شيوعًا (75%)، وتعيش لفترة أطول، كما أنها أكثر عرضة لاحتواء كواكب أصغر حجمًا بحجم الأرض مقارنةً بالنجوم الشبيهة بالشمس.

https://coptic-treasures.com/

لسوء الحظ، عند المسافات بين النجم والكوكب التي تسمح بوجود الماء السائل على سطحها، فإن الكواكب التي تدور حول النجوم القزمة الحمراء تكون أيضًا عرضة للتقييد المدّي (حيث يكون أحد أوجهها دائمًا مواجهًا للنجم) وتتعرض لتقلبات كبيرة في الإشعاع النجمي، خاصةً خلال مراحلها المبكرة، مما قد يؤدي إلى تآكل غلافها الجوي أو تجريده منه تمامًا. كذلك، قد لا تُصدر النجوم القزمة الحمراء كمية كافية من الأشعة فوق البنفسجية لبدء التفاعلات الكيميائية الضوئية والتخليق الحيوي الأولي اللازم لنشوء الحياة. لذا، يدور نقاش واسع حول إمكانية سكن النجوم القزمة الحمراء.

يمتلك حوالي 30% من هذه النجوم كوكبًا يحتمل أن يكون صالحًا للسكن (أي كوكب بحجم الأرض يقع في المنطقة الصالحة للسكن)، بل إن بعضها (2%) يمتلك أكثر من كوكب واحد في هذه المنطقة. وتندر هذه الكواكب حول النجوم الشبيهة بالشمس (20%)، بينما تكثر حول النجوم القزمة الحمراء (50%). وحتى الآن، تم رصد ما يصل إلى 60 كوكبًا يحتمل أن يكون صالحًا للسكن (كتالوج الكواكب الخارجية الصالحة للسكن التابع لمرصد PHL)، معظمها حول النجوم القزمة الحمراء. تُقسّم هذه الكواكب إلى 24 كوكبًا بحجم الأرض (أي نصف قطرها ≥ 1.5 نصف قطر الأرض أو كتلتها ≥ 5 كتل الأرض) و36 كوكبًا عملاقًا (أي نصف قطرها > 1.5 نصف قطر الأرض أو كتلتها > 5 كتل الأرض). غالبًا ما تكون الكواكب بحجم الأرض صخرية التركيب، بينما تشمل الكواكب العملاقة مرحلة انتقالية من الكواكب الصخرية إلى الكواكب المحيطية وصولًا إلى الكواكب الغازية الصغيرة (أي كواكب نبتون مصغرة).

يُعدّ مدى صلاحية الكواكب العملاقة الصخرية للحياة موضوعًا مثيرًا للجدل، إذ يُثار التساؤل حول ما إذا كانت ستخضع لحركة تكتونية شبيهة بالأرض، أو غطاءً ثابتًا، أو حالة تكتونية غير معروفة، مع احتمال أن تكون إعادة تدوير الصفائح ضرورية للحياة كما نعرفها. يُعدّ نظام TRAPPIST-1 أشهر نظام كواكب خارج المجموعة الشمسية، ومختبرًا مثاليًا لدراسة قابلية الكواكب التي تدور حول النجوم القزمة الحمراء للحياة. ويُعتقد أن ما يصل إلى ثلاثة أو أربعة من كواكبه السبعة، التي تُشبه الأرض في حجمها، قابلة للسكن.

مهمة إلى كوكب الأرض: أول ملياري سنة

ساهم الإشعاع الشمسي والعمليات الجيولوجية التي جرت خلال الملايين القليلة الأولى من تاريخ الأرض، والتي أعقبها بفترة وجيزة نشأة الحياة، في توجيه كوكبنا نحو مسار تطوري نحو قابلية السكن طويلة الأمد، مما أتاح في نهاية المطاف ظهور أشكال حياة معقدة. نستعرض في هذا المقال أهم الظروف والتفاعلات خلال أول ملياري سنة من هذا المسار، والتي ربما تمثل أفضل

https://coptic-treasures.com/

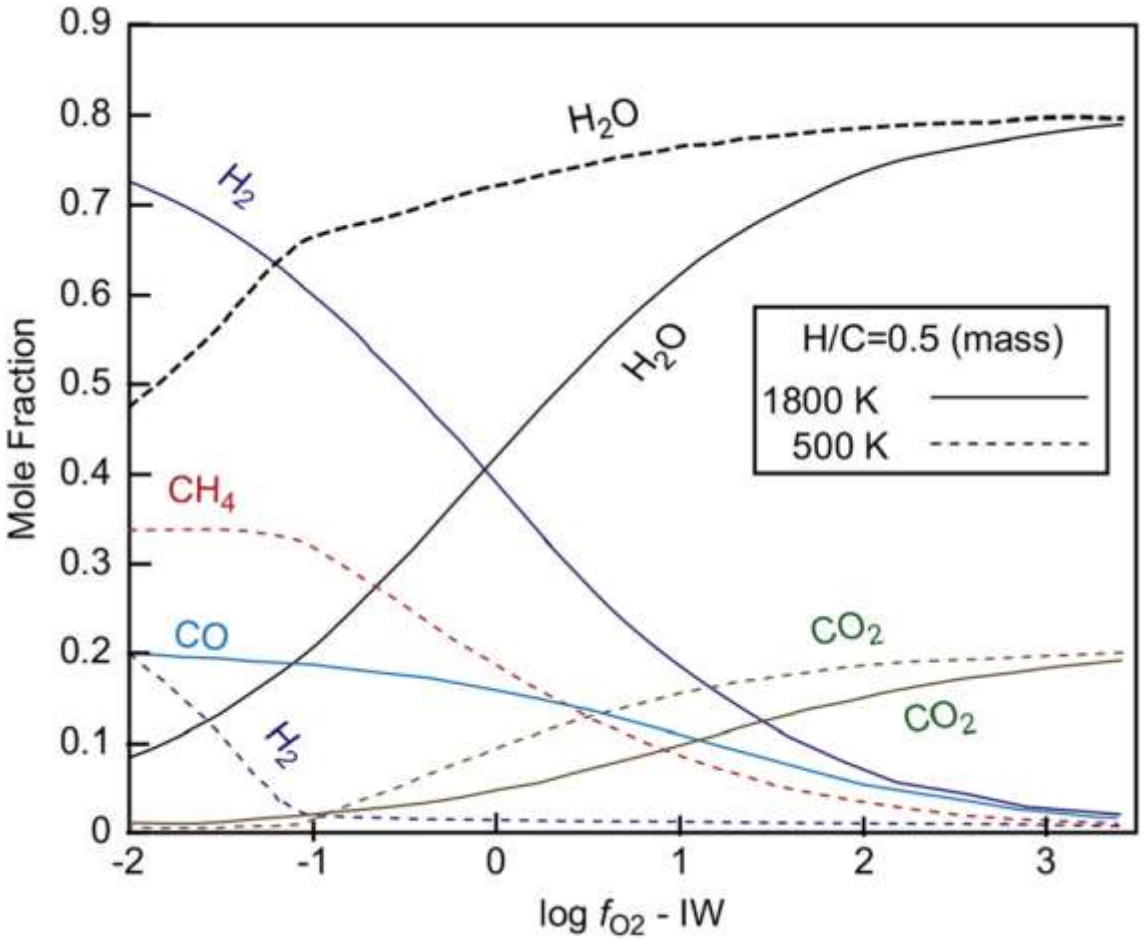
نموذج لعوالم أخرى صالحة للسكن في المجرة[1]. ومن بين الجوانب الحاسمة: (1) حالة الأكسدة والاختزال ومحتوى المواد المتطايرة في مكونات الأرض، والتي حددت عمر محيط الصهارة وقدرته على إطلاق غازات الماء (H_2O) وغيرها من غازات الدفيئة، وخاصة ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، مما سمح بتكثيف محيط مائي؛ (2) الخصائص الكيميائية للغلاف الأرضي الناتج بعد إطلاق الغازات، بما في ذلك فاعلية الأكسجين، والتي لم تؤثر فقط على خصائصه الفيزيائية وبالتالي قدرته على إعادة تدوير المواد المتطايرة والمغذيات عبر حركة الصفائح التكتونية، بل ساهمت أيضًا في تحديد المدة الزمنية لأكسجة الغلاف الجوي. (3) ظهور الحياة، ولا سيما نشأة التغذية الذاتية، وتثبيت النيتروجين الحيوي، والتمثيل الضوئي الأكسجيني، مما سرّع العمليات غير الحيوية البطيئة لنقل بعض المواد المتطايرة إلى الغلاف الصخري؛ (4) الإشعاع النجمي القوي فوق البنفسجي على الأرض في بداياتها، والذي ربما يكون قد أدى إلى تآكل كميات كبيرة من المواد المتطايرة في الغلاف الجوي، اعتمادًا على نسب ثاني أكسيد الكربون إلى النيتروجين في الغلاف الجوي، وبالتالي أثر على حالة الأكسدة والاختزال في الوشاح، بالإضافة إلى توقيت نشأة الحياة؛ (5) وجود أدلة على تأثيرات كيميائية ضوئية قوية على دورة الكبريت على الأرض، محفوظة في شكل تجزئة نظائر الكبريت غير المعتمدة على الكتلة، والتي يُحتمل ارتباطها بالتجزئة في نظائر الكربون العضوي. تُقدّم الأرض في بداياتها نفسها كنموذج لكوكب خارج المجموعة الشمسية يمكن استكشافه من خلال السجل الصخري الموجود، مما يسمح لنا بتحديد البصمات الجوية التي تُشخّص عمليات الأيض البيولوجية التي قد تكون قابلة للكشف على كواكب أخرى مأهولة باستخدام تلسكوبات الجيل القادم. نستنتج أن التحقيق في تطور الظروف الصالحة للسكن على الكواكب الأرضية، وهي مشكلة معقدة بطبيعتها، يتطلب تعاونًا متعدد التخصصات وحلولًا إبداعية.

يعتمد تطور واستمرار الظروف الصالحة للحياة على الأرض على العديد من العوامل الجيولوجية والشمسية والبيولوجية. في البداية، حدد تركيب ومحتوى المواد المتطايرة في مكونات الأرض كمية المياه والغازات الدفيئة التي يمكن إطلاقها والحفاظ عليها بعد تكوين القمر. وكان هذا الإطلاق بدوره يعتمد على مدة بقاء طور محيط الصهارة، والذي كان بدوره مرتبطًا بدرجة حرارة الأرض الداخلية، أي محتواها من العناصر المشعة، وتمايز الكواكب، وانكماشها بفعل الجاذبية. علاوة على ذلك، ربما كان تراكم الغازات داخل الغلاف الجوي محدودًا بفعل التآكل النجمي، إذا كانت الشمس الفتية تشع بقوة أكبر في نطاق الأشعة فوق البنفسجية الشديدة مما هي عليه اليوم، وإذا لم يكن الغلاف الجوي العلوي قد تم تبريده بشكل كافٍ بمستويات عالية من ثاني أكسيد الكربون. من المحتمل أيضًا أن بعض المواد المتطايرة قد تحولت مرة أخرى إلى جزيئات قابلة للذوبان في الصهارة (مثل تحول النيتروجين N_2 إلى أمونياNH_3). بفعل العمليات الجوية. وتُحفظ الأدلة المباشرة على الكيمياء الضوئية على الأرض في بداياتها في سجل نظائر الكبريت، وربما في سجل نظائر الكربون العضوي. وقد يكون تدفق المواد المتطايرة العائدة إلى الوشاح قد تسارع مع بدء حركة الصفائح التكتونية، وربما تحدد توقيت هذا البدء بدرجة فقدان المواد المتطايرة خلال مرحلة محيط

[1] Stüeken, E.E., Som, S.M., Claire, M. et al. Mission to Planet Earth: The First Two Billion Years. Space Science Reviews, Volume 216, article number 31 (2020)

https://coptic-treasures.com/

الصهارة. ومن المرجح أن ظهور الحياة قد عزز من انخفاض تركيز كل من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين، مع تأثيره أيضًا على حالة الأكسدة والاختزال في الغلاف الجوي من خلال إنتاج الميثان والأكسجين. وربما كان لهذه البصمات البيولوجية تأثير كبير على تطور كوكبنا، وقد تُستخدم كمؤشرات حيوية على عوالم أرضية أخرى.



تركيب الغازات المنبعثة من محيط الصهارة تبعًا لحالة الأكسدة ودرجة الحرارة. نسبة الهيدروجين إلى الكربون في الغاز ثابتة عند 0.5. يصف IW فاعلية الأكسجين عبر الطبقة العازلة في الحديد النقي والوستيت المتواجدين معًا.

من غبار النجوم إلى الخلايا الأولى

تشكّل نظامنا الشمسي خلال انفجار مستعر أعظم قبل حوالي 4.6 مليار سنة. تحوّل الهيدروجين الموجود داخل النجم المحتضر إلى هيليوم وكربون ونيتروجين وأكسجين وحديد وكبريت وفوسفور أثناء الانفجار عبر عملية التخليق النووي[1]. أدت الموجة الصدمية الناتجة عن انهيار المستعر الأعظم إلى تشتيت غبار النجوم في السديم الشمسي الذي تجمّع ليشكّل النظام الشمسي والشمس والكواكب الثمانية وأقمارها والكويكبات والمذنبات. الكويكبات هي بقايا صخرية من عصر تكوّن الكواكب،

[1] Chatterjee, S. (2023). Cosmic Connections. In: From Stardust to First Cells. Springer, Cham pp 31-42 (

https://coptic-treasures.com/

قبل حوالي 4.5 مليار سنة، وهي توفّر سجلات مفقودة عن بدايات الأرض. اليوم، يدور أكثر من مليون كويكب حول الشمس في حزام مكتظ بين المريخ والمشتري. من بين الكويكبات، تحتوي النيازك الكربونية (الكوندريتات من النوع C) على أسرار الحياة - الماء والمكونات العضوية. نشأت لبنات الحياة الأساسية في مناطق شاسعة وباردة (90-100 كلفن) من الغاز والغبار منخفض الكثافة في الوسط بين النجوم. لم يكن كوكبنا الفتيّ مُهيّأً لتكوين هذا التجمع الغني من الجزيئات الحيوية. بدأ التاريخ المبكر للأرض في حقبة الهاديان، عندما كانت اصطدامات النيازك هي العملية الجيولوجية السائدة. كانت الأرض كرة منصهرة، تتعرض باستمرار لاصطدامات النيازك. بعد فترة وجيزة من تكوين الأرض، اصطدم بها كوكب بحجم المريخ، مُكوّنًا القمر من حطام الاصطدام. أدى الاصطدام المُكوّن للقمر إلى انصهار واسع النطاق للأرض، مما نتج عنه تمايز الأرض إلى ثلاث طبقات بفعل الترسيب الجاذبي: اللب الغني بالحديد، والوشاح، والقشرة. بردت الأرض في حقبة الأركي بشكل كبير مع تكوين القشرة الجرانيتية والمحيطات العالمية. تحتوي بعض الكويكبات الكربونية والمذنبات والغبار بين النجوم على تشكيلات غنية من لبنات الحياة الأساسية التي وفرت البذور الذرية والجزيئية للحياة للأرض الفتية. أدت اصطدامات الكويكبات خلال فترة القصف الشديد المتأخر (منذ حوالي 4.1 إلى 3.8 مليار سنة) إلى تغييرات جذرية في ظروف سطح الأرض والقمر وعطارد والمريخ، كما يتضح من فوهاتها العديدة. الحياة ظاهرة كوكبية، وقد أصبح سطح الأرض الفتية ملائمًا للحياة. جلبت الكويكبات كميات وفيرة من الماء ومكونات الحياة الأساسية إلى الأرض الفتية خلال فترة القصف التي أشعلت شرارة الحياة. وقدّم نيزك مورشيسون سجلًا غنيًا بالمواد المتطايرة ومكونات الحياة الأساسية. أما المذنبات فهي كرات ثلجية متسخة تتكون من الجليد وثاني أكسيد الكربون وغبار المعادن السيليكاتية. وتوجد في منطقة سحابة أورت التي تحيط بالحافة الخارجية للنظام الشمسي. كما تحتوي المذنبات على مجموعة متنوعة من المركبات العضوية التي ربما تكون قد نقلت مركبات حيوية أساسية إلى الأرض في بداياتها. من انفجار المستعر الأعظم إلى ظهور الحياة، يظل الارتباط الكوني واسع الانتشار. إن وضع الأرض باعتبارها الكوكب الوحيد القادر على دعم الحياة في النظام الشمسي ناتج عن توقيت وآلية توصيل اللبنات الأساسية للحياة والماء إلى القشرة السيليكاتية لكوكبنا الصالح للحياة.

يتكهن علماء الفلك بأن موجة صدمية ناتجة عن انفجار مستعر أعظم كارثي قبل حوالي 4.6 مليار سنة ربما تكون قد أشعلت شرارة نشأة نظامنا الشمسي - كواكبه وأقماره وكويكباته ومذنباته - عندما اصطدم بسحابة دوامية من الغاز والغبار بين النجوم. ويُعتقد أن النظام الشمسي قد تشكّل من هذه السحابة الهائلة الدوارة الكثيفة من الغاز والغبار. ولا تزال بقايا المادة المقذوفة من الانفجار القديم موجودة حتى اليوم في عينات من الغبار بين النجوم، والكويكبات البدائية مثل النيازك الكربونية، والمذنبات. كما أنها تحتوي على البذور الذرية والجزيئية للحياة. وتدعم النظائر المشعة قصيرة العمر من النظام الشمسي المبكر، الموجودة في الكويكبات، سيناريو انفجار المستعر الأعظم هذا. الكويكبات هي بقايا صخرية من عصر تكوين الكواكب؛ فهي تحتوي على المواد التي تشكلت منها الأرض والكواكب الأخرى في البداية، متجمدة في الزمن. وهي تحمل أسرار الحياة. يبلغ عمر أقدم المواد

https://coptic-treasures.com/

الموجودة داخل هذه الكويكبات 4.5 مليار سنة، وهو ما يمكّن علماء الفلك من تقدير المدة التي انقضت منذ بدء تشكّل السديم الذي شكّل النظام الشمسي. لا تزال الكويكبات تدور حول الشمس في حزام كثيف بين المريخ والمشتري. أما المذنبات، فتقع في سحابة أورت التي تحيط بالحافة الخارجية للنظام الشمسي. وهي عبارة عن كرات من الجليد والصخور تنمو لها ذيول كلما اقتربت من الشمس خلال مداراتها الإهليلجية. كل من النيازك الكربونية والمذنبات غنية بالمركبات العضوية، وهي اللبنات الأساسية للحياة. يشير وجود مركبات عضوية معقدة في الكويكبات والمذنبات إلى وجود مواد ما قبل الحياة في النيازك والغبار بين النجوم، وهي هبة من انفجار المستعر الأعظم.

حدثت المرحلة الأولى من تطور الأرض خلال حقبة الهاديان Hadean Eon التي امتدت لخمسمائة مليون سنة. كانت الأرض آنذاك كرة منصهرة تتعرض باستمرار لقصف النيازك وانبعاث الحرارة الناتج عن التحلل الإشعاعي. خلال هذه الفترة، بدأ لب الأرض ووشاحها وقشرتها الأولى بالانقسام إلى ثلاث طبقات بفعل الترسيب الجاذبي. تشكل اللب عندما غاص الحديد والنيكل عبر معادن السيليكات الأخف وزنًا في القشرة إلى مركز الكوكب، مما أدى إلى تكوين مجال مغناطيسي حول كوكبنا. يمتد هذا المجال المغناطيسي من لب الكوكب إلى الفضاء، ويحمي الأرض من الرياح الشمسية المدمرة عالية الطاقة المنبعثة من الشمس. نشأ القمر أيضًا خلال حقبة الهاديان، على الأرجح نتيجة اصطدام بين الأرض وكوكب يُدعى ثيا، والذي فُني جراء هذا الاصطدام. لم يبقَ من صخور الهاديان سوى بعض بلورات الزركون الفتاتية التي يعود عمرها إلى 4.4 مليار سنة، والتي تُقدم دليلًا مثيرًا على وجود قشرة جرانيتية وماء سائل في تلك الحقبة.

بدأت لبنات الحياة الأساسية في غبار النجوم في الفضاء بين النجوم خلال انفجار مستعر أعظم، ثم هبطت إلى الأرض بواسطة النيازك. وقد رُصدت بعض هذه اللبنات في كويكب مورشيسون Murchison وفي الغبار بين النجوم، بما في ذلك الدهون والأحماض الأمينية والقواعد النيتروجينية والسكريات والفوسفات والهيدروكربونات ومركبات الكربونيل - وهي المكونات الأساسية والمهمة للحياة. تحتوي المذنبات على كميات هائلة من المركبات العضوية. ويبدو أن الحياة نشأت في نهاية أكثر الفترات الجيولوجية عنفًا في تاريخ الأرض، وهي فترة القصف الشديد المتأخر (حوالي 4.1-3.8 مليار سنة)، عندما كانت الكويكبات تضرب الأرض بوتيرة تزيد بنحو ألف مرة عما هي عليه اليوم، حاملةً معها جزيئات عضوية حيوية وماءً لبدء التفاعلات الكيميائية الحيوية.

إن صلتنا بالكون محفوظة في تركيبنا الكيميائي الحيوي. فقد حدث التخليق النووي لعنصرين بدائيين - الهيدروجين والهيليوم - خلال نشأة الكون. لم تظهر العناصر الأثقل الأخرى إلا لاحقًا مع الاندماج النووي وانهيار الأجيال الأولى من النجوم. خلال انفجار المستعر الأعظم، يُنتج النجم المحتضر ستة عناصر أساسية للحياة موجودة في جميع أشكالها - الكربون، والهيدروجين، والأكسجين، والنيتروجين، والفوسفور، والكبريت - ثم ينثرها في الوسط بين النجوم. في حين أن هيدروجين عالمنا ربما يكون قد أتى من حدث الانفجار العظيم قبل حوالي 14 مليار سنة، إلا أن النيازك والغبار بين النجوم نقلت معظم هذه العناصر

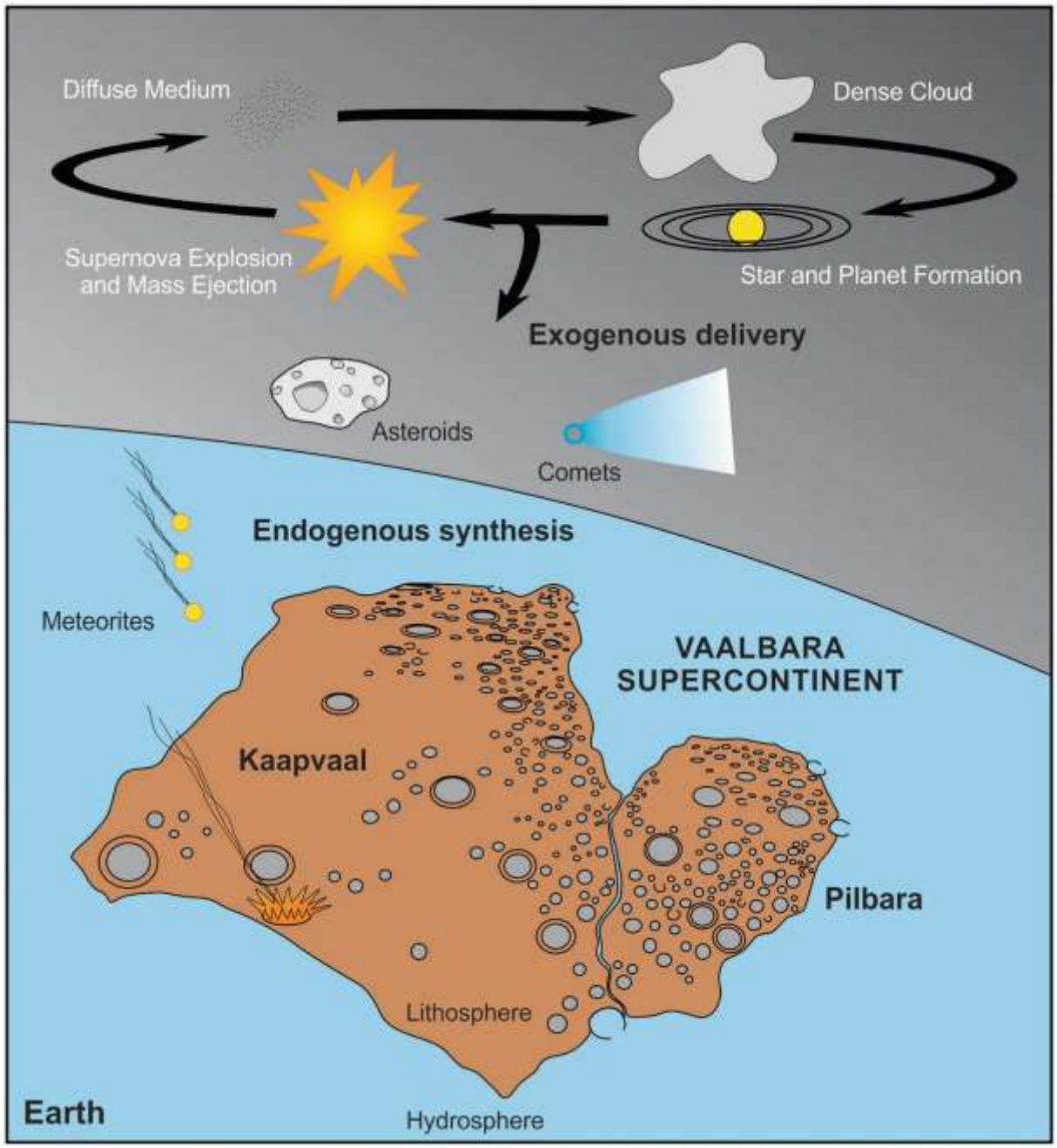
https://coptic-treasures.com/

الأساسية، إلى جانب المركبات العضوية والماء اللازمين لتكوين الحياة، مباشرة إلى الأرض. لا يمكن فك الروابط التي تجمع الكون والحياة على الأرض. أجسامنا عبارة عن غبار نجمي قديم قدم الكون، ولكنه ازداد ثراءً خلال انفجار مستعر أعظم قبل حوالي 4.6 مليار سنة.

يشمل أصل الحياة طيفًا واسعًا من الظواهر الكونية. ولعقود، اشتبه العلماء في أن الموت الانفجاري لنجم صغير - أثقل من شمسنا بنحو 12 ضعفًا - في نهاية دورة حياته - وهو حدث يُعرف باسم المستعر الأعظم - ساهم في بدء تكوين نظامنا الشمسي قبل حوالي 4.6 مليار سنة. تُشبه النجوم قنابل هيدروجينية عملاقة، حيث تُعدّ عملية التخليق النووي مصدر الطاقة الرئيسي. تُحوّل هذه العملية الهيدروجين إلى هيليوم من خلال الاندماج النووي، ويُطلق هذا التحوّل طاقة ذرية هائلة. يتحوّل الهيليوم داخل النجوم إلى كربون ونيتروجين وأكسجين وحديد وكبريت وفوسفور - أي جميع العناصر التي تتكون منها الحياة. عندما يصل لبّ نجم عملاق (أثقل من الشمس بنحو 8 إلى 15 ضعفًا) إلى مرحلة إنتاج الحديد، ينفد منه وقود الهيدروجين. عندها تنهار الطبقات الخارجية للنجم لتُشكّل اللبّ الغني بالحديد. يُؤدي هذا الحدث إلى انفجار مستعر أعظم. يُؤدي الفناء الكارثي لنجمٍ يحتضر إلى تكوين عناصر جديدة أثقل، ويقذف معظم مادته إلى الفضاء المحيط.

في حالتنا، أطلقت الموجة الصدمية الناتجة عن انفجار مستعر أعظم غبارًا نجميًا إلى السديم الشمسي، الذي تسبب انهياره الجذبي في دوران نظامنا الشمسي. فقد النجم المحتضر جزءًا كبيرًا من كتلته على شكل غبار معدني سيليكاتي، مُشكلاً سحبًا جزيئية هائلة في جميع أنحاء مجرتنا. وهكذا، تطور النظام الشمسي من سحابة من الغبار والغاز؛ حيث جمّد الغاز بين النجوم إلى جزيئات جليد وغبار تحتوي الآن على جزيئات عضوية غنية. نمت هذه الجزيئات من خلال التصادم والتراكم. نعتقد أن النظام الشمسي قد تبلور من السديم الشمسي، وهو سحابة عملاقة دوارة من الغاز والغبار، انكمشت في النهاية عند مركزها الكثيف لتُنتج نجمًا جديدًا أصغر حجمًا، ألا وهو الشمس، مُحاطًا بنظامه الكوكبي. نشأ نجم جديد من رماد النجم المحتضر. تجمعت جزيئات غبار سديه لتُشكل كويكبات، والتي تراكمت في النهاية لتُصبح كواكب. بعد تكوّن الشمس، تلاها كوكبا المشتري وزحل الغازيان العملاقان، ثمّ اكتسبت الكواكب الصخرية معظم أحجامها الحالية. أما الكويكبات والمذنبات الموجودة اليوم فهي كويكبات صغيرة لم تشارك في تكوين الكواكب. منذ ملايين السنين، وبينما كانت الكواكب الصخرية، التي كانت كويكبات صغيرة في الأصل، تتراكم عليها المواد المحيطة بها، تعرّضت أيضًا لاصطدامات عنيفة متزايدة مع الكويكبات والمذنبات وغيرها من الكويكبات الصغيرة. ويُعتقد أن أحد هذه الأحداث الهائلة التأثير في نهاية مرحلة تراكم المواد على الأرض قد حطّم جزءًا من الأرض الوليدة أثناء تكوين قمرنا الضخم نسبيًا.

https://coptic-treasures.com/



انطلاقًا من تدفقات انفجار مستعر أعظم، وتفاعلات وإشعاعات الوسط بين النجوم، مرورًا بالكيمياء السديمية والنظام الشمسي، وصلت لبنات البناء الكونية إلى الأرض الفتية عبر اصطدامات النيازك خلال نهاية فترة القصف الشديد (نقل خارجي). مع ذلك، حدثت عملية التولد التلقائي للحياة في بحيرات الفوهات الحرارية المائية على القارة البدائية الأركية مثل فالبارا (إنتاج داخلي)، مما أدى إلى تكوين الخلايا الأولى.

https://coptic-treasures.com/

كانت الشمس أقل سطوعاً في البداية

كانت الشمس في بداياتها، تمامًا كالأرض في بداياتها، مختلفة تمامًا عما هي عليه الآن. لفهم السبب، نحتاج إلى معرفة بعض المعلومات حول كيفية انبعاث هذه الكمية الهائلة من الطاقة من الشمس والنجوم الأخرى. تُنتج النجوم كل ضوئها وحرارتها من خلال عملية الاندماج النووي. في هذه العملية، تندمج ذرات عنصر ما لتكوين ذرات عنصر آخر! قد تتذكر أن قانون حفظ الطاقة ينص على أن الطاقة لا تُستحدث ولا تُفنى، ولكنها تتحول من شكل إلى آخر. كما نعلم من النظرية النسبية الخاصة أن للطاقة والكتلة علاقة خاصة جدًا. نسميها "تكافؤ الكتلة والطاقة"، ولكن ربما سمعتها غالبًا بالمعادلة الشهيرة $E=mc^2$. تُخبرنا هذه المعادلة أن أي كمية من الكتلة لها كمية مكافئة من الطاقة، والعكس صحيح. حسنًا، اتضح أن عملية الاندماج النووي هي أيضًا عملية تحويل الكتلة إلى طاقة. عندما تندمج العناصر في النجوم، فإنها تُنتج كميات هائلة من الطاقة، ولكنها تُنتج أيضًا عناصر كيميائية أكبر حجمًا في هذه العملية[1].

تُعدّ تفاعلات الاندماج النووي التي تُحوّل الهيدروجين إلى هيليوم من أكثر تفاعلات الاندماج النووي شيوعًا في النجوم. وهذه هي الطريقة التي يُنتج بها معظم الطاقة القادمة من الشمس. إلا أن النجوم تُدمج أيضًا ذرات الهيليوم معًا لتكوين عناصر مثل الكربون والأكسجين والنيتروجين. وتُصنع العديد من العناصر الكيميائية بهذه الطريقة. إنها عملية بالغة الأهمية لدرجة أنها تُعرف باسم "التخليق النووي النجمي"، وهي المسؤولة عن انبعاث هذا الكم الهائل من الضوء والحرارة من شمسنا. مع مرور الوقت، ومع استمرار التخليق النووي النجمي في الشمس، مُنتجًا المزيد والمزيد من الهيليوم والكربون وغيرهما، أصبحت الشمس أكثر سخونة وإشراقًا تدريجيًا. والسبب الرئيسي في ذلك هو أنه مع تكوّن هذه العناصر الأثقل وبدء تفاعلات التخليق النووي النجمي، يبدأ لبّ الشمس بالانكماش (يتقلص حجمه وتزداد كثافته)، مما يزيد من درجات الحرارة والضغط في داخله، الأمر الذي يُحفّز بدوره المزيد من التفاعلات لإطلاق المزيد من الطاقة.

كانت الشمس في بداياتها أقل إشراقًا بنحو 30% مما هي عليه الآن، لكن العلماء يعلمون أيضًا بوجود ماء سائل على سطح الأرض في ذلك الوقت (من خلال دراسة السجل الصخري). كيف بقي الماء سائلًا على سطح الأرض مع هذا القدر الضئيل من الضوء والحرارة القادمة من الشمس؟ كيف نشأت الحياة - التي تتطلب الماء السائل - على الأرض الفتية في ظروف التجمد؟ يُطلق العلماء على هذه الظاهرة اسم "مفارقة الشمس الفتية الخافتة". يُعدّ حلّ هذه المعضلة مجالًا بحثيًا نشطًا، ومن المرجح وجود العديد من العوامل المساهمة. إحدى طرق حلّ هذا التناقض هي فرضية الاحتباس الحراري، التي تنصّ على أن الغلاف الجوي للأرض في بداياته كان يحتوي على مستويات أعلى من غازات الاحتباس الحراري، وخاصة الميثان وثاني أكسيد الكربون وبخار الماء. كانت هذه الغازات وغيرها تنبعث من عمليات إطلاق الغازات والعمليات البركانية التي أعقبت تراكم

[1] https://eos.org/features/the-young-earth-under-the-cool-sun (/https://science.nasa.gov/astrobiology/learning-resources/alp/sun-when-it-formed

https://coptic-treasures.com/

الجزيئات الصخرية أثناء تكوين الأرض. على الأرض اليوم، يتم تحويل ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء إلى أكسجين بواسطة الكائنات الحية التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي، مثل النباتات والطحالب. في بدايات الأرض، لم تكن هناك كائنات حية تقوم بهذا التحويل، لذلك بقي ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي وساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري، مما أبقى الماء سائلاً على السطح على الرغم من خفوت الشمس وقلة إضاءتها.

ارتفاع درجات الحرارة الكرة الأرضية في البداية

قبل ما بين 57 و55 مليون سنة، انتهى العصر الجيولوجي المعروف باسم الباليوسين، ليحل محله الإيوسين. في ذلك الوقت، كان الغلاف الجوي مشبعًا بغاز ثاني أكسيد الكربون، أحد غازات الدفيئة، حيث بلغت تركيزاته ما بين 1400 و4000 جزء في المليون. لذا، ليس من الصعب تخيل أن درجات الحرارة على الأرض كانت أشبه بدرجات حرارة الساونا. كان الجو حارًا ورطبًا، وقد اختفى الجليد عن القطبين تمامًا. يوفر مناخ تلك الحقبة للباحثين مؤشرًا على كيفية تطور مناخ اليوم. فبينما كانت مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي قبل الثورة الصناعية تبلغ 280 جزءًا في المليون، تصل اليوم إلى 412 جزءًا في المليون. ويعتقد علماء المناخ أن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن النشاط البشري قد ترفع هذا الرقم إلى 1000 جزء في المليون بحلول نهاية القرن[1].

باستخدام معادن السديريت siderite الدقيقة في عينات التربة المأخوذة من مستنقعات قديمة، أعاد فريق من الباحثين من المعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ، وجامعة ولاية بنسلفانيا، ومركز دراسات المناخ والفيزياء الفلكية في كامبريدج (المملكة المتحدة) بناء المناخ السائد في نهاية العصر الباليوسيني وبداية العصر الإيوسيني. تكوّنت معادن السديريت في بيئة تربة خالية من الأكسجين، نشأت تحت غطاء نباتي كثيف في المستنقعات التي كانت منتشرة بكثرة على طول السواحل الحارة والرطبة خلال العصرين الباليوسيني والإيوسيني. ولإعادة بناء الظروف المناخية من خط الاستواء إلى المناطق القطبية، درس الباحثون معادن السديريت من 13 موقعًا مختلفًا. تقع جميع هذه المواقع في نصف الكرة الشمالي، وتغطي جميع خطوط العرض الجغرافية من المناطق الاستوائية إلى القطبية الشمالية.

يقول المؤلف الرئيسي للدراسة، جويب فان دايك Joep van Dijk، الحاصل على الدكتوراه من مجموعة البروفيسور ستيفانو برناسكوني Stefano Bernasconi في المعهد الجيولوجي التابع للمعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ: "تُظهر إعادة بناء المناخ التي أجريناها استنادًا إلى عينات السديريت أن الغلاف الجوي الحار يترافق مع مستويات عالية من الرطوبة".

[1] van Dijk, J., Fernandez, A., Bernasconi, S.M. et al. Spatial pattern of super-greenhouse warmth controlled by elevated specific humidity. Nature Geoscience Nat. Geosci. 13, 739–744 (2020)

https://coptic-treasures.com/

وبناءً على ذلك، بين 57 و55 مليون سنة مضت، كان متوسط درجة حرارة الهواء السنوية عند خط الاستواء، حيث تقع كولومبيا اليوم، حوالي 41 درجة مئوية. أما في سيبيريا القطبية الشمالية، فكان متوسط درجة حرارة الصيف 23 درجة مئوية. وباستخدام "مقياس الرطوبة" الخاص بالسديريت، أثبت الباحثون أيضًا أن محتوى الرطوبة العالمي في الغلاف الجوي، أو الرطوبة النوعية، كان أعلى بكثير في عصرَي الباليوسين والإيوسين مما هو عليه اليوم. إضافةً إلى ذلك، بقي بخار الماء في الهواء لفترة أطول لأن الرطوبة النوعية زادت بمعدل أكبر من التبخر والهطول. مع ذلك، لم تكن الزيادة في الرطوبة النوعية متساوية في كل مكان. وبفضل توفر عينات السديريت من جميع خطوط العرض، تمكن الباحثون أيضًا من دراسة النمط المكاني للرطوبة النوعية. وجد الباحثون أن المناطق الاستوائية وخطوط العرض العليا كانت تتميز بمستويات رطوبة عالية جدًا.

ويعزو الباحثون هذه الظاهرة إلى بخار الماء الذي انتقل إلى هذه المناطق من المناطق شبه الاستوائية. وقد سجلت الرطوبة النوعية أقل ارتفاع في المناطق شبه الاستوائية. وبينما ازداد التبخر، انخفض الهطول. نتج عن ذلك ارتفاع مستوى بخار الماء في الغلاف الجوي، والذي وصل في نهاية المطاف إلى القطبين وخط الاستواء. وحمل بخار الماء معه الحرارة. ولا يزال علماء المناخ يرصدون تدفق بخار الماء والحرارة من المناطق شبه الاستوائية إلى المناطق الاستوائية حتى اليوم. ويقول فان دايك: "من المرجح أن يكون انتقال الحرارة الكامنة أكبر خلال العصر الإيوسيني". ويضيف: "ربما ساهمت الزيادة في انتقال الحرارة إلى خطوط العرض العليا في تفاقم الاحترار في المناطق القطبية".

تاريخ درجة حرارة سطح الأرض

دُرست تاريخ درجة حرارة الأرض على مدى مليارات السنين في العديد من الدراسات باستخدام الزركون والكوارتز في أقدم الصخور، ونظائر الأكسجين من الصوان والفوسفات، ونظائر الكربونات البحرية، ونظائر السيليكون في الصوان، والبروتينات المُعاد تكوينها، والحدود العليا لدرجة الحرارة اللازمة لنمو الكائنات الحية. بالنسبة لحقبة الهاديان Hadean eon (منذ 4.5 إلى 4 مليارات سنة)، اكتشف واتسون وهاريسون Harrison، باستخدام الزركون القديم من تلال جاك في غرب أستراليا، أن درجة حرارة سطح الأرض قد انخفضت إلى حوالي 700 درجة مئوية، بينما وجد أكيرسون Ackerson وآخرون أن بلورات الكوارتز في عينات تولومني تُسجل درجات حرارة تبلور تتراوح بين 474 و561 درجة مئوية. بالنسبة لعصور الأركي Archean والبروتيروزوي Proterozoic والفانيروزوي Phanerozoic، قدّم كناوث Knauth وإبستين Epstein أول تقدير لدرجة الحرارة باستخدام نظائر الأكسجين من الصخور الصوانية، واقترحا أن متوسط درجات الحرارة المناخية بلغ حوالي 70 درجة مئوية عند 3 مليارات سنة، ثم انخفض إلى حوالي 52 درجة مئوية عند 1.3 مليار سنة، وانخفض من حوالي 34 درجة مئوية إلى 20 درجة مئوية خلال حقبة الحياة القديمة، ثم ارتفع إلى 35-40 درجة مئوية في العصر الترياسي، ثم انخفض

https://coptic-treasures.com/

خلال حقبة الحياة الوسطى إلى قيم حوالي 17 درجة مئوية في العصر الثالث. حلّل روبرت وشوسيدون نظائر السيليكون في الصخور الصوانية، واقترحا أن درجة حرارة مياه البحر تتغير من حوالي 70 درجة مئوية عند 3.5 مليار سنة إلى حوالي 20 درجة مئوية عند 0.8 مليار سنة، ولكن بتفاوت أكبر بكثير من ذلك المستمد من نظائر الأكسجين. (غوشيه Gaucher وآخرون). استُخدمت البروتينات المُعاد تنشيطها لاستنتاج درجة حرارة ما قبل الكمبري، واقترحت أن درجة الحرارة انخفضت من حوالي 72 درجة مئوية عند 3.6 مليار سنة إلى 39 درجة مئوية عند 0.8 مليار سنة. أجرى هرن وزملاؤه تحليلًا مُشتركًا لنظائر الأكسجين والهيدروجين في الصوان، واقترحوا أن درجة حرارة الأركي عند 3.42 مليار سنة كانت أقل من 40 درجة مئوية. وقد أيّد بليك وزملاؤه هذا السيناريو لانخفاض درجة حرارة الأركي، حيث فحصوا نظائر الأكسجين في الفوسفات ووجدوا أن درجة حرارة مياه البحر تراوحت بين 26 و35 درجة مئوية في الفترة ما بين 3.2 و3.5 مليار سنة، وهي قريبة من درجة الحرارة الحالية[1].

دُرِسَ تاريخ درجة حرارة حقبة الحياة الظاهرة باستخدام نظائر الأكسجين في الكربونات والفوسفات. ووجد فايزر وبروكوف أن درجة حرارة مياه البحر كانت أعلى بنحو 30 درجة مئوية من قيمتها الحالية عند 480 مليون سنة، مما يُشير إلى اتجاه عام نحو التبريد منذ ذلك الحين، ولكن مع تباين ملحوظ. وسُجِّلَت تذبذبات بسعة تتراوح بين 5 و10 درجات مئوية. ووجد فايزر وآخرون تذبذبًا بارزًا عند حوالي 140 مليون سنة، والذي رُبِطَ بتذبذب تدفق الأشعة الكونية المجرية. وأفاد شافيف وآخرون بوجود تذبذب كبير عند 32 مليون سنة مع تعديل تردد ثانوي عند 175 مليون سنة، وهو ما يتوافق مع المعايير المفترضة للحركة الرأسية للنظام الشمسي عبر مستوى المجرة، والتي تتأثر بالحركة الدورانية الشعاعية.

خضعت دورة درجات الحرارة في العصر الرباعي لدراسات عديدة باستخدام رواسب المحيطات، وعينات الجليد، ورواسب البحيرات، والرواسب الكهفية. وقد اكتُشفت الدورات بين الجليدية لأول مرة في عينات رواسب المحيطات. اقترح شاكلتون وأوبديك وضع نظام رسمي لمراحل النظائر البحرية (MIS) من 1 إلى 22، باستخدام نظير الأكسجين-18 (δ18O) في المنخربات في العينة اللبية V28-238 من شرق المحيط الهادئ الاستوائي، وهو منهج تم توسيعه تدريجيًا ليشمل العصر البليستوسيني Pleistocene بأكمله، والعصر البليوسيني Pleistocene ، وما بعدهما في دراسات لاحقة مثل دراسة إمبري وآخرون، ودراسة ليسيكي ورايمو. اقترح هايز وآخرون أن الدورات بين الجليدية مرتبطة بدورات ميلانكوفيتش Milankovitch - دورات الانحراف المداري، والميل المحوري (41000 سنة)، والترنح (23000 سنة) لمدار الأرض. أكد رايمو هذه العلاقة باستخدام مقياس زمني لمعدل ترسيب ثابت غير مضبوط. تُظهر عينات الجليد من أنتاركتيكا وغرينلاند

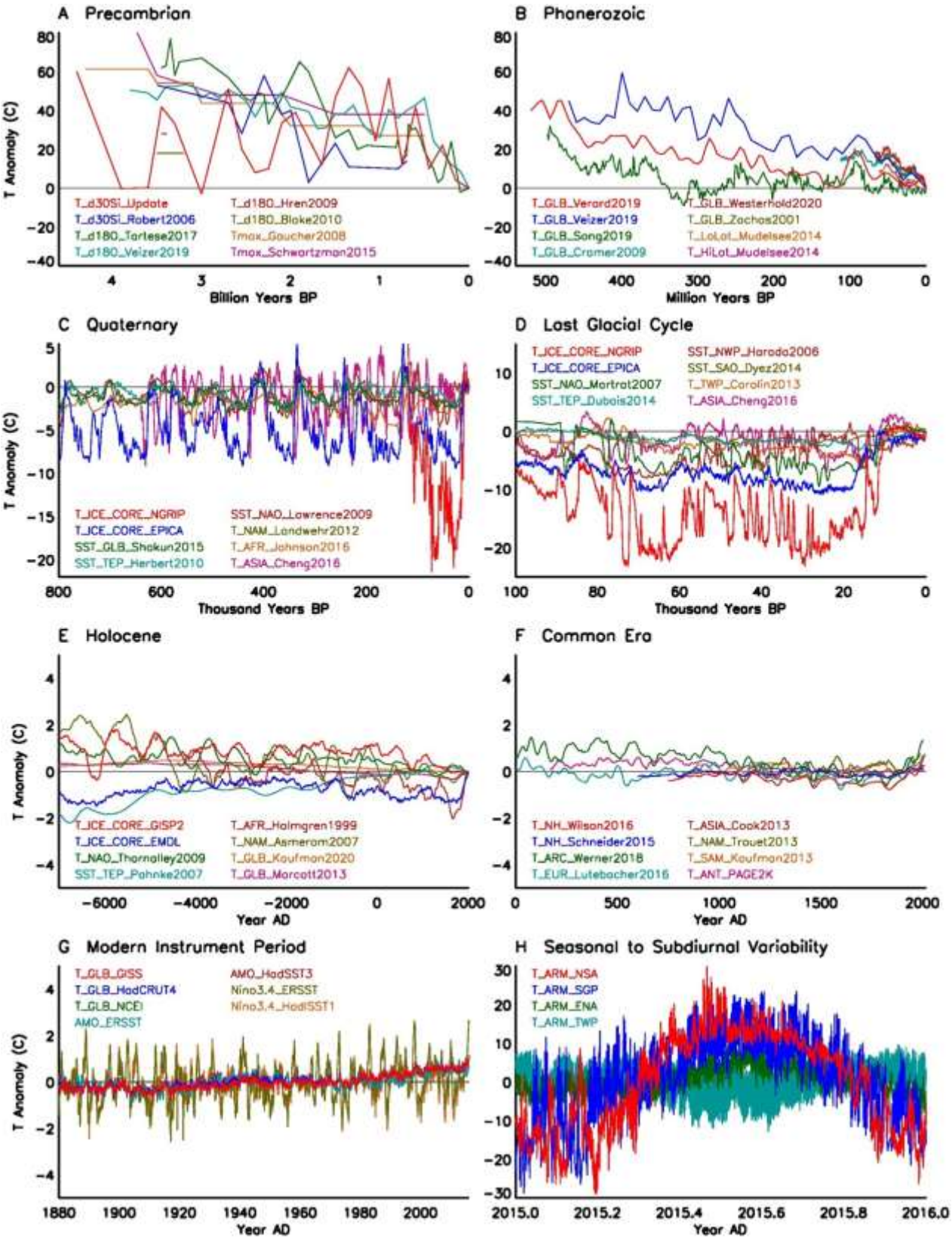
[1] Lin, J., & Qian, T. (2022). Earth's Climate History from 4.5 Billion Years to One Minute. Atmosphere-Ocean, Vol 60 (3–4), Page 188–232

https://coptic-treasures.com/

دورات متشابهة. ومن خلال تجميع البيانات، أوضح فريق عمل الفترات الجليدية الماضية التابع لـ PAGES أنه على الرغم من التباين المكاني، كانت الفترتان الجليديتان الأخيرتان (MIS 5e) و c11 (منذ حوالي 400 ألف سنة) قويتين عالميًا (دافئتين)، بينما كانت الفترة الجليدية الأخيرة (MIS 13a) (منذ حوالي 500 ألف سنة) باردة في العديد من المواقع. ويظهر تغير مفاجئ في قوة الفترات الجليدية عند 450 ألف سنة فقط في درجة حرارة أنتاركتيكا Antarctica وأعماق المحيط. ويبلغ نطاق تغير درجة الحرارة حوالي 3 درجات مئوية لمتوسط المحيط العالمي، ولكنه قد يصل إلى 14 درجة مئوية في مواقع محددة في المحيط و20 درجة مئوية في غرينلاند. وتبلغ فترة التذبذب السائدة حوالي 100 ألف سنة في المليون سنة الأخيرة، ولكنها كانت كذلك قبل 41 ألف سنة. غالبًا ما تختلف دورات الفترات الجليدية فوق اليابسة عن تلك الموجودة في المحيطات والمناطق القطبية. وباستخدام سجلات حبوب اللقاح من أوروبا، قام تزداكيس وآخرون... أظهرت الدراسات أن الدورات الأرضية تتميز بتقلبات عالية التردد أقوى. وباستخدام سجلات التكوينات الكهفية من الصين، وجد تشنغ وزملاؤه دورات ترنح قوية بدلاً من دورات الانحراف المداري خلال الـ 640 ألف سنة الماضية.

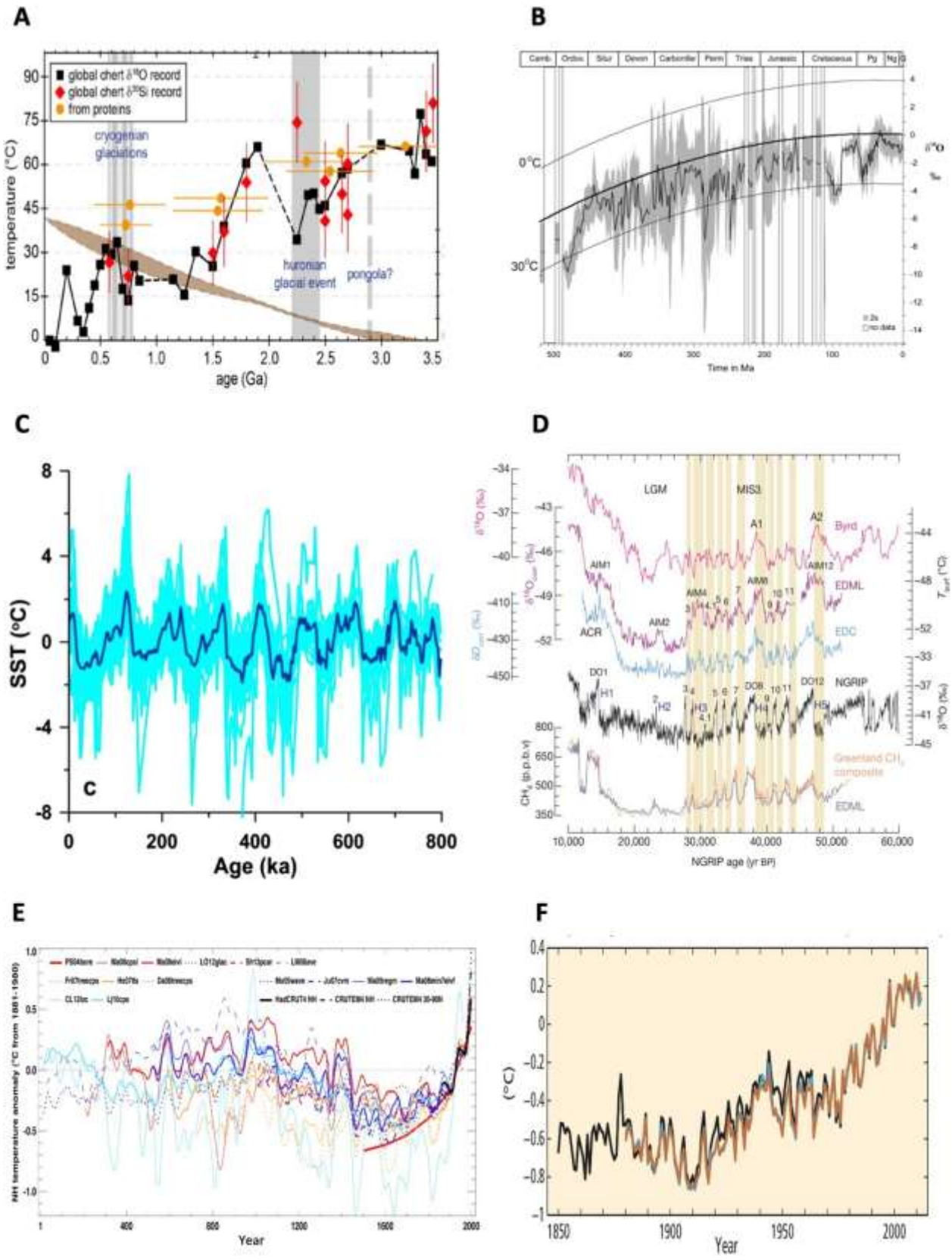
يلخص الشكل تاريخ درجة حرارة الأرض من 4.5 مليار سنة إلى دقيقة واحدة. تتذبذب درجة حرارة ما قبل الكمبري مع دورة القارات العظمى - وهي عملية تتابع تكوّن القارات العظمى وتفككها. تُظهر درجة حرارة حقبة الحياة الظاهرة دورة تتراوح بين 100 و200 مليون سنة، بينما تهيمن على درجة حرارة العصر الرباعي دورة بين جليدية مدتها 100 ألف سنة. تُظهر درجة حرارة أواخر العصر الرباعي، خلال الدورة الجليدية الأخيرة، دورات تمتد لآلاف السنين، مثل أحداث هاينريش Heinrich وأحداث دانس-أوبنهايمر D–O ، بينما تُظهر درجة حرارة الهولوسين دورات تمتد من مئات إلى آلاف السنين. تهيمن على درجة حرارة العصر الميلادي تذبذبات تمتد لعقود متعددة. أما بالنسبة لفترة الأجهزة الحديثة، فإن مقدار الاحترار العالمي يبلغ حوالي درجة مئوية واحدة لكل قرن. توجد أيضًا إشارات لمتوسط درجة الحرارة العالمية مرتبطة بظاهرتي التذبذب الأطلسي متعدد العقود (AMO) والتذبذب النينيو الجنوبي (ENSO). تتناقص سعة التذبذب من نطاق زمني يبلغ مليارات السنين إلى نطاق زمني يبلغ قرونًا، لكنها تزداد بشكل ملحوظ على النطاقين الزمنيّين الموسمي واليومي. يوضح الشكل قياسات درجة حرارة سطح الأرض كل دقيقة في نطاقات خطوط العرض المختلفة، والتي تشمل الدورة الموسمية والدورة اليومية، بالإضافة إلى ظواهر أخرى عالية التردد مثل تذبذب مادن-جوليان (MJO)، والموجات الاستوائية، وأنظمة الحمل الحراري متوسطة النطاق، والعواصف الرعدية. تتراوح سعة التذبذب من 10 إلى 20 درجة مئوية فوق المحيطات الاستوائية ومتوسطة خطوط العرض، إلى 40 إلى 50 درجة مئوية فوق القارات متوسطة وعالية خطوط العرض. تُظهر الخريطة العالمية لنطاقات درجات الحرارة الموسمية نطاقًا يبلغ 10 درجات مئوية فوق القارات الاستوائية، ونطاقًا يتراوح بين 20 و60 درجة مئوية فوق القارات خارج المدارية (البيانات غير معروضة). يكون نطاق درجة الحرارة اليومية أكثر تجانسًا (8-16 درجة مئوية) حول العالم باستثناء جرينلاند، التي يبلغ فرق درجة الحرارة فيها بين النهار والليل أكثر من 20 درجة مئوية.

https://coptic-treasures.com/



تاريخ درجة حرارة سطح الأرض خلال (A) ما قبل الكمبري، (B) حقبة الحياة الظاهرة، (C) العصر الرباعي، (D) أواخر العصر الرباعي، (E) الهولوسين، (F) العصر الميلادي

https://coptic-treasures.com/



https://coptic-treasures.com/

(A) درجة حرارة ما قبل الكمبري المستمدة من نظائر الأكسجين والسيليكون في الصخور الصوانية. (B) درجة حرارة حقبة الحياة الظاهرة المستمدة من نظائر الأكسجين البحرية. (C) درجة حرارة سطح البحر في العصر الرباعي من السجلات الفردية (باللون السماوي) والمجمعة (باللون الأزرق). (D) درجة حرارة أواخر العصر الرباعي من عينات الجليد في جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية. (E) متوسط درجة حرارة سطح نصف الكرة الشمالي في العصر الميلادي. (F) شذوذات متوسط درجة حرارة سطح الأرض العالمية الحديثة.

تاريخ درجة حرارة سطح الأرض على مدى 485 مليون سنة

تقدم دراسة جديدة، بقيادة مشتركة من جامعة أريزونا ومؤسسة سميثسونيان، أدقّ نظرة حتى الآن على كيفية تغير درجة حرارة سطح الأرض على مدى 485 مليون سنة الماضية. الدراسة تعرض منحنى متوسط درجة حرارة سطح الأرض، يكشف أن درجة حرارة الأرض قد تباينت بشكل أكبر مما كان يُعتقد سابقًا خلال معظم حقبة البشائر، وهي فترة جيولوجية شهدت تنوعًا في الحياة، وانتشارًا للبابسة، وتعرضًا لانقراضات جماعية متعددة. كما يؤكد المنحنى وجود ارتباط وثيق بين درجة حرارة الأرض وكمية ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. بدأت حقبة البشائر قبل 540 مليون سنة مع الانفجار الكامبري، وهي الفترة التي ظهرت فيها الكائنات الحية المعقدة ذات الأصداف الصلبة لأول مرة في السجل الأحفوري. ورغم قدرة الباحثين على إنشاء نماذج محاكاة تعود إلى 540 مليون سنة، إلا أن منحنى درجة الحرارة في الدراسة يركز على آخر 485 مليون سنة، نظرًا لمحدودية البيانات الجيولوجية المتاحة عن درجة الحرارة قبل ذلك. «من الصعب العثور على صخور قديمة كهذه تحتفظ بمؤشرات درجة الحرارة، فحتى قبل 485 مليون سنة، لا نملك الكثير منها. لقد كانت حدودنا محدودة في مدى قدرتنا على الرجوع إلى الماضي»، هذا ما قالته جيسيكا تيرني، عالمة المناخ القديم وأستاذة علوم الأرض في جامعة أريزونا، والمشاركة في إعداد الدراسة. استخدم الباحثون منهجية تُعرف باسم دمج البيانات لإنشاء منحنى درجة الحرارة. وقد مكّنهم ذلك من دمج البيانات من السجل الجيولوجي ونماذج المناخ، ما أدى إلى فهم أكثر شمولية للمناخات القديمة[1].

قالت إميلي جود Emily Judd، المؤلفة الرئيسية للدراسة والباحثة السابقة في مرحلة ما بعد الدكتوراه في المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي التابع لمؤسسة سميثسونيان وجامعة أريزونا: "طُوّرت هذه الطريقة في الأصل للتنبؤ بالطقس. وبدلاً من استخدامها للتنبؤ بالطقس المستقبلي، نستخدمها هنا لإعادة بناء المناخات القديمة". يُوفّر تحسين فهم العلماء لكيفية تقلب درجة حرارة الأرض عبر الزمن سياقًا بالغ الأهمية لفهم تغير المناخ الحديث. يقول سكوت وينغ Scott Wing، المؤلف المشارك في الدراسة وأمين قسم علم النباتات القديمة في المتحف الوطني للتاريخ الطبيعي التابع لمؤسسة سميثسونيان Smithsonian: "إذا درسنا المليوني سنة الماضية، فلن نجد شيئًا يُشبه ما نتوقعه في عامي 2100 أو 2500. علينا العودة إلى فترات أقدم، إلى فترات كانت فيها الأرض دافئة حقًا، لأن هذه هي الطريقة الوحيدة التي ستُمكّننا من فهم أفضل لكيفية تغير المناخ في المستقبل". يكشف المنحنى الجديد أن درجة الحرارة تباينت بشكل أكبر خلال الـ 485 مليون سنة الماضية مما كان يُعتقد سابقًا. على مرّ

[1] (https://news.arizona.edu/news/study-over-nearly-half-billion-years-earths-temperature-has-changed-drastically-driven-carbon

https://coptic-treasures.com/

العصور، تراوحت درجة الحرارة العالمية بين 52 و97 درجة فهرنهايت. وارتبطت فترات الحر الشديد في أغلب الأحيان بارتفاع مستويات غاز ثاني أكسيد الكربون، أحد غازات الدفيئة، في الغلاف الجوي.

وقال تيرني Tierney: "يوضح هذا البحث بجلاء أن ثاني أكسيد الكربون هو العامل المهيمن على درجات الحرارة العالمية عبر الزمن الجيولوجي. فعندما يكون تركيز ثاني أكسيد الكربون منخفضًا، تكون درجة الحرارة باردة؛ وعندما يكون مرتفعًا، تكون درجة الحرارة دافئة". وتكشف النتائج أيضًا أن درجة حرارة الأرض العالمية الحالية، البالغة 59 درجة فهرنهايت، أقل مما كانت عليه خلال معظم حقبة البشائر. لكن انبعاثات غازات الدفيئة الناتجة عن تغير المناخ بفعل الإنسان تُسخّن الكوكب حاليًا بوتيرة أسرع بكثير من أسرع موجات الاحترار التي شهدتها حقبة البشائر، وفقًا للباحثين. وتُعرّض هذه السرعة في الاحترار الأنواع والنظم البيئية حول العالم للخطر، وتتسبب في ارتفاع سريع لمستوى سطح البحر. وقد أدت بعض موجات التغير المناخي السريع الأخرى خلال حقبة البشائر إلى انقراضات جماعية. يقول الباحثون إنّ التحوّل السريع نحو مناخ أكثر دفئًا قد يُشكّل خطرًا على البشر الذين عاشوا في الغالب ضمن نطاق 10 درجات فهرنهايت لدرجات الحرارة العالمية، مقارنةً بنطاق 45 درجة خلال الـ 485 مليون سنة الماضية.

وقال تيرني: "تطوّر جنسنا البشري بأكمله ليتناسب مع مناخ أشبه بالبيوت الجليدية، وهو ما لا يعكس معظم التاريخ الجيولوجي. إننا نُغيّر المناخ إلى مناخ غريب تمامًا عن بيئة البشر. لقد كان كوكب الأرض، ولا يزال بإمكانه أن يكون، أكثر دفئًا، لكن البشر والحيوانات لا يستطيعون التكيّف بهذه السرعة". بدأ التعاون بين تيرني وباحثين من مؤسسة سميثسونيان عام 2018. وكان هدف الفريق تزويد زوار المتحف بمنحنى يُصوّر درجة حرارة الأرض العالمية خلال حقبة البشائر، التي بدأت قبل حوالي 540 مليون سنة وتستمر حتى يومنا هذا. جمع الفريق أكثر من 150 ألف تقدير لدرجات الحرارة القديمة، محسوبة من خمسة مؤشرات كيميائية مختلفة لدرجة الحرارة، محفوظة في أصداف متحجرة وأنواع أخرى من المواد العضوية القديمة. ابتكر زملاؤهم في جامعة بريستول أكثر من 850 نموذج محاكاة لما كان عليه مناخ الأرض في فترات مختلفة من الماضي البعيد، استنادًا إلى موقع القارات وتكوين الغلاف الجوي. ثم جمع الباحثون هذين الدليلين لإنشاء أدق منحنى يوضح كيفية تغير درجة حرارة الأرض على مدى 485 مليون سنة الماضية. ومن النتائج الأخرى للدراسة ما يتعلق بحساسية المناخ، وهو مقياس لمدى ارتفاع درجة حرارة المناخ عند مضاعفة تركيز ثاني أكسيد الكربون. وقال تيرني: "وجدنا أن ثاني أكسيد الكربون ودرجة الحرارة ليسا مرتبطين ارتباطًا وثيقًا فحسب، بل إنهما مرتبطان بالطريقة نفسها على مدى 485 مليون سنة. لم نلحظ أن المناخ أكثر حساسية عندما يكون الجو حارًا أو باردًا".

يُعدّ فهم كيفية تغيّر متوسط درجة حرارة سطح الأرض (GMST) على مدى نصف مليار سنة الماضية، وهي فترة كان لأنماط تطور النباتات والحيوانات فيها تأثير بالغ الأهمية على تطور المناخ، أمرًا أساسيًا لفهم العمليات التي تُحرّك المناخ خلال تلك الفترة. قدّم جود وزملاؤه سجلًا لمتوسط درجة حرارة سطح الأرض على مدى 485 مليون سنة الماضية، قاموا ببنائه من

https://coptic-treasures.com/

خلال دمج بيانات غير مباشرة مع نماذج مناخية. ووجدوا أن متوسط درجة حرارة سطح الأرض تراوح بين 11 و36 درجة مئوية، مع حساسية مناخية "ظاهرية" تبلغ حوالي 8 درجات مئوية، أي ما يُعادل ضعفين إلى ثلاثة أضعاف ما هي عليه اليوم. يُعدّ السجل الجيولوجي طويل الأمد لمتوسط درجة حرارة سطح الأرض (GMST) بالغ الأهمية لفهم تاريخ كوكبنا ووضع تغير المناخ الحالي في سياقه الصحيح. هذا السجل ضروري لتحديد العلاقة بين المناخ وجوانب أخرى من نظام الأرض، بما في ذلك تطور الحياة وانقراضها، وكيمياء الغلاف الجوي والمحيطات. علاوة على ذلك، فإن تحديد العلاقة بين متوسط درجة حرارة سطح الأرض وتركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي يُمكن أن يُحسّن فهمنا لحساسية مناخ الأرض ويُعزز التنبؤات المستقبلية في ظل الاحتباس الحراري الناتج عن الأنشطة البشرية[1].

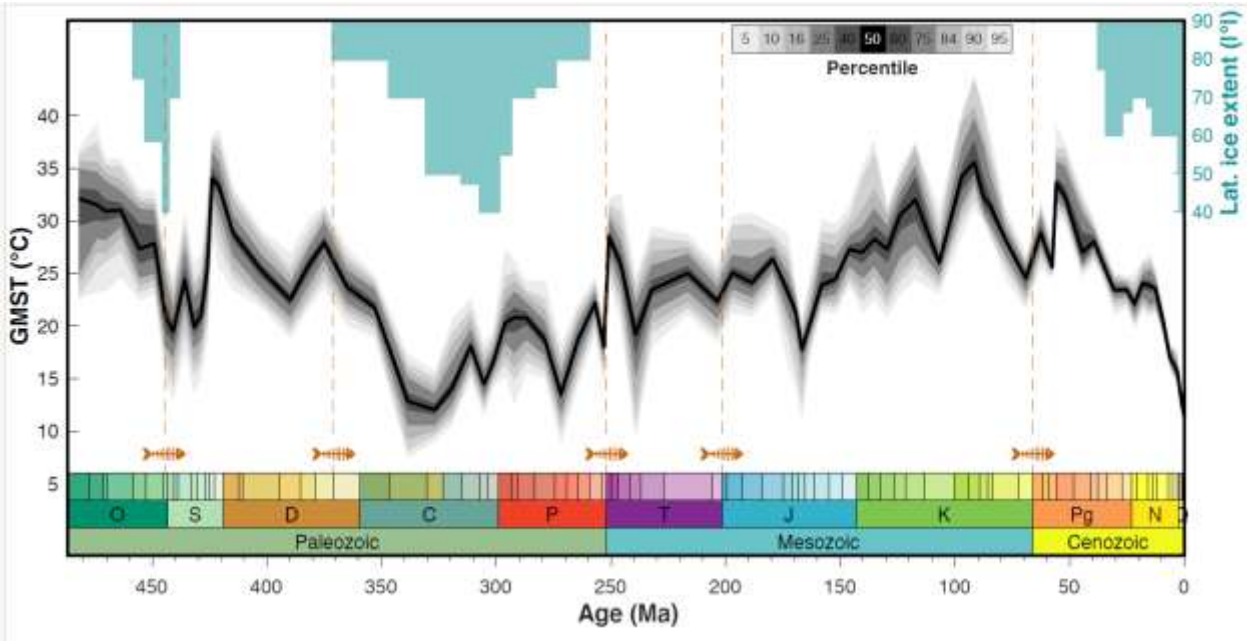
على الرغم من وجود العديد من عمليات إعادة بناء درجات الحرارة خلال حقبة الحياة الظاهرة (آخر 539 مليون سنة)، إلا أنها خلال حقبة الحياة الحديثة (آخر 66 مليون سنة) التي خضعت لدراسات مكثفة، تُشير إلى درجات حرارة أبرد وأقل تقلبًا من التقديرات الفردية لفترات زمنية رئيسية، لا سيما خلال الفترات الخالية من الجليد (فترات الاحتباس الحراري). ويُشير هذا التباين إلى أن سجلات درجات الحرارة الحالية لحقبة الحياة الظاهرة قد تُقلل من تقدير التغيرات المناخية السابقة، مما يستدعي إجراء المزيد من البحث باستخدام منهجية جديدة.

نقدم هنا نموذج PhanDA، وهو إعادة بناء لمتوسط درجة حرارة سطح الأرض (GMST) يغطي معظم حقبة البشائر. تم إنشاء PhanDA باستخدام دمج البيانات، وهي طريقة تدمج البيانات الجيولوجية إحصائيًا مع محاكاة نماذج المناخ. يشير PhanDA إلى أن درجة حرارة الأرض تراوحت بين 11 و36 درجة مئوية على مدى 485 مليون سنة الماضية. هذا النطاق أوسع من عمليات إعادة البناء السابقة؛ ومع ذلك، يتوافق PhanDA بشكل جيد مع تقديرات GMST المستقلة من حقبة الحياة الحديثة، مما يعزز الثقة في نطاقه الديناميكي الأوسع. يكشف PhanDA عن سمات رئيسية في العلاقة بين GMST وتدرج درجة الحرارة من القطب إلى خط الاستواء، بما في ذلك التضخيم القطبي (أي تغيرات أكبر في درجة الحرارة عند خطوط العرض العليا) وانخفاض التدرج مع ازدياد GMST. تتراوح درجات الحرارة الاستوائية بين 22 و42 درجة مئوية، مما يدحض فكرة وجود حد أقصى ثابت للدفء الاستوائي، ويشير إلى أن الحياة القديمة لا بد أنها تطورت لتحمل الحرارة الشديدة. قمنا بتحليل بيانات PhanDA إلى خمس حالات مناخية، ووجدنا أن الأرض قضت، بشكل عام، فترة أطول في مناخات دافئة مقارنةً بالمناخات الباردة خلال حقبة البشائر. توجد علاقة قوية بين متوسط درجة حرارة سطح الأرض (GMST) في PhanDA وتركيز ثاني أكسيد الكربون (CO2)، مما يشير إلى أن ثاني أكسيد الكربون هو العامل المهيمن على مناخ حقبة البشائر. يُعد ثبات هذه العلاقة مفاجئًا، لأنه على هذا النطاق الزمني، نتوقع أن يؤثر الإشعاع الشمسي على

[1] Emily J. Judd, Jessica E. Tierney, Daniel J. Lunt, Isabel P. Montañez, Brian T. Huber, Scott L. Wing, and Paul J. Valdes., A 485-million-year history of Earth's surface temperature., Science (2024) Vol 385, Issue 6715

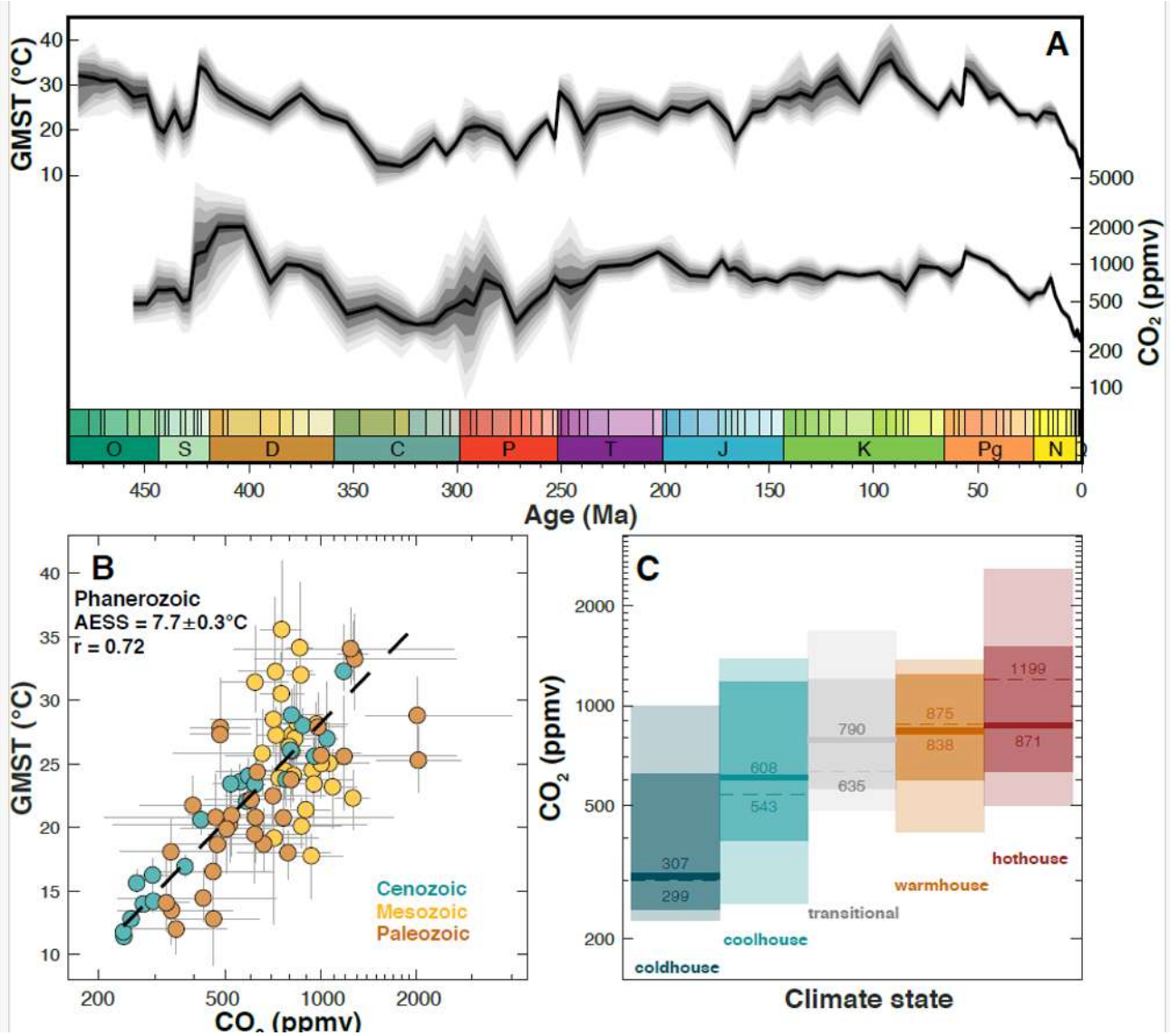
https://coptic-treasures.com/

المناخ. نفترض أن التغيرات في بياض الكوكب وغازات الدفيئة الأخرى (مثل الميثان) ساهمت في تعويض الزيادة في الإشعاع الشمسي مع مرور الوقت. تشير العلاقة بين متوسط درجة حرارة سطح الأرض وتركيز ثاني أكسيد الكربون إلى حساسية "ظاهرية" ثابتة بشكل ملحوظ لنظام الأرض (أي استجابة درجة الحرارة لمضاعفة تركيز ثاني أكسيد الكربون، بما في ذلك التغذية الراجعة السريعة والبطيئة) تبلغ حوالي 8 درجات مئوية، دون أي اعتماد ملحوظ على ما إذا كان المناخ دافئًا أم باردًا.



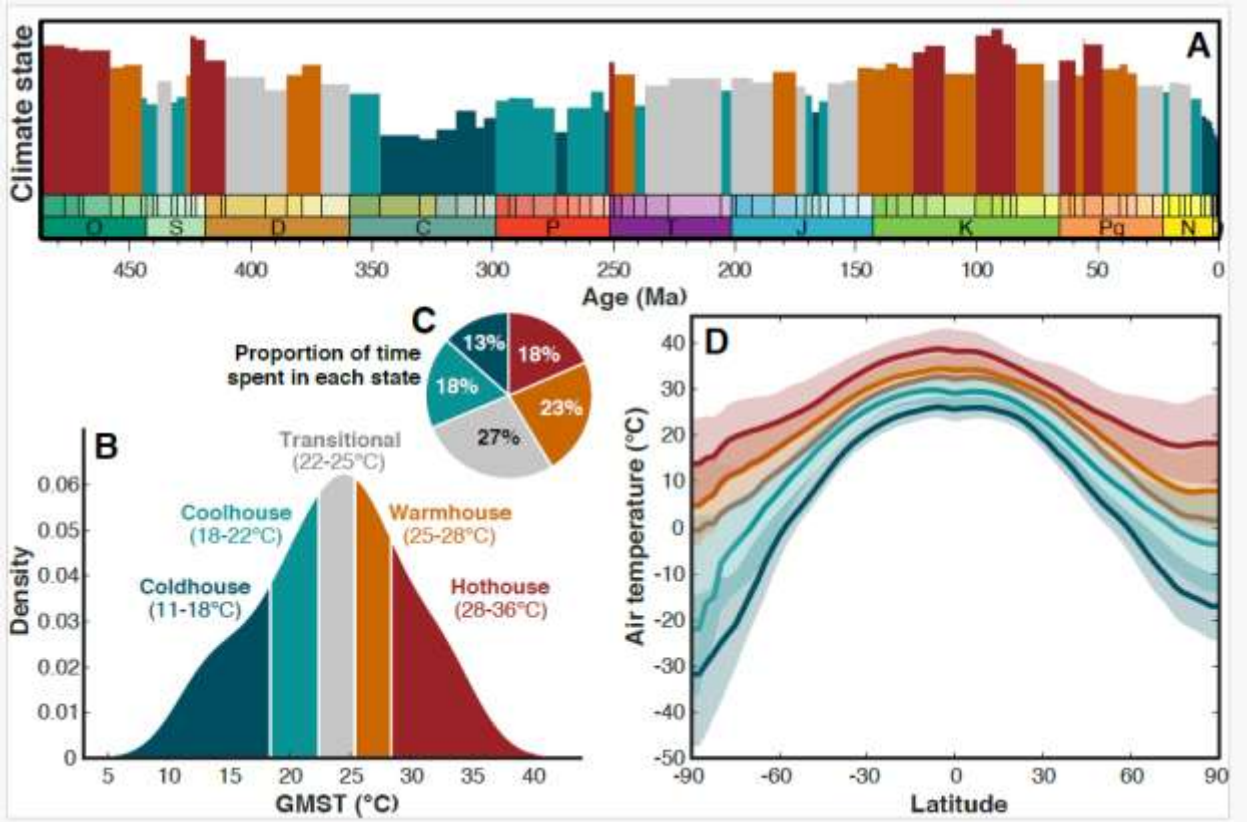
تاريخ درجات الحرارة خلال حقبة Phanerozoic. أعاد برنامج PhanDA بناء متوسط درجة حرارة سطح الأرض العالمي (GMST) خلال الـ 485 مليون سنة الماضية. يُظهر الخط الأسود الوسيط، بينما يُمثل التظليل النسبة المئوية للمجموعة. تُظهر المستطيلات الزرقاء أقصى امتداد للجليد عند خطوط العرض، وتُظهر الخطوط البرتقالية المتقطعة توقيت الانقراضات الجماعية الخمسة الكبرى خلال حقبة الحياة الظاهرة.

https://coptic-treasures.com/



العلاقة بين درجة حرارة حقبة Phanerozoic وثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. (A) متوسط درجة حرارة الأرض العالمي (GMST) المُستخلص من بيانات Phanerozoic (أعلى) وثاني أكسيد الكربون المُعاد بناؤه في الغلاف الجوي (أسفل)، مُفصّلًا حسب المرحلة. يتركز إعادة بناء ثاني أكسيد الكربون بشكل أساسي في حقبتي الحياة القديمة والوسطى، بينما يتركز في حقبة الحياة الحديثة. يُشير التظليل إلى النسب المئوية. (B) العلاقة بين متوسط درجة حرارة الأرض العالمي (GMST) المُستخلص من بيانات Phanerozoic وثاني أكسيد الكربون، مُرمّزة بالألوان حسب الحقبة الجيولوجية. يُظهر الخط الأسود المتقطع انحدار يورك، الذي يأخذ في الحسبان عدم اليقين في كل من المتغيرات التنبؤية والمتغيرات المستجيبة. (C) نطاقات ثاني أكسيد الكربون لكل حالة من حالات المناخ. تُظهر الأشرطة الفاتحة والداكنة النسب المئوية من 5 إلى 95 ومن 16 إلى 84 على التوالي. يُظهر الخط السميك المتصل القيمة الوسيطة، بينما يُظهر الخط المتقطع القيمة الوسيطة، باستثناء بيانات حقبة الحياة الوسطى، حيث يكون ثاني أكسيد الكربون أكثر عرضة لعدم اليقين.

https://coptic-treasures.com/



حالات المناخ عبر حقبة Phanerozoic. (A) سلسلة زمنية لحالة مناخ الأرض، حيث تم تخصيص حالة لكل مرحلة وفقًا للكميات المحددة في اللوحة (B)، وتم قياس ارتفاع كل مستطيل وفقًا لمتوسط درجة حرارة سطح الأرض العالمية (GMST) لتلك المرحلة. (ب) مخطط كثافة النواة لتوزيع قيم متوسط درجة حرارة سطح الأرض العالمية (GMST)، مع تحديد الكميات الخمس لكل منها (يُشار إلى نطاقها بين قوسين أسفل تسمية كل حالة). (C) مخطط دائري يوضح نسبة الوقت الذي قضاه الإنسان في كل حالة مناخية عبر حقبة الحياة الظاهرة. (D) تدرج درجة حرارة الهواء السطحي العرضي المرتبط بكل حالة من حالات المناخ (أشرطة ملونة تُظهر النسب المئوية من 16 إلى 84، وخطوط ملونة تُظهر القيمة الوسيطة).

على الأرض القديمة انهمرت الأمطار بغزارة

قال جاكوب سيلي Jacob Seeley، زميل ما بعد الدكتوراه في علوم وهندسة البيئة في كلية جون أ. بولسون John A. Paulson للهندسة والعلوم التطبيقية بجامعة هارفارد (SEAS) وقسم علوم الأرض والكواكب في هارفارد والمؤلف الأول للدراسة: "لو نظرنا اليوم إلى رقعة واسعة من المناطق الاستوائية العميقة، لوجدنا أن المطر يهطل باستمرار في مكان ما". وأضاف: "لكننا وجدنا أنه في المناخات شديدة الحرارة، قد تمر أيام عديدة دون هطول أمطار في أي مكان فوق جزء كبير من المحيط. ثم فجأة، تهطل عاصفة مطرية هائلة على المنطقة بأكملها تقريبًا، مُسقطةً كميات هائلة من الأمطار. ثم يهدأ الجو لبضعة أيام، وتتكرر هذه الدورة"[1].

[1] (https://www.environment.harvard.edu/news/ancient-earth-it-never-rained-it-poured

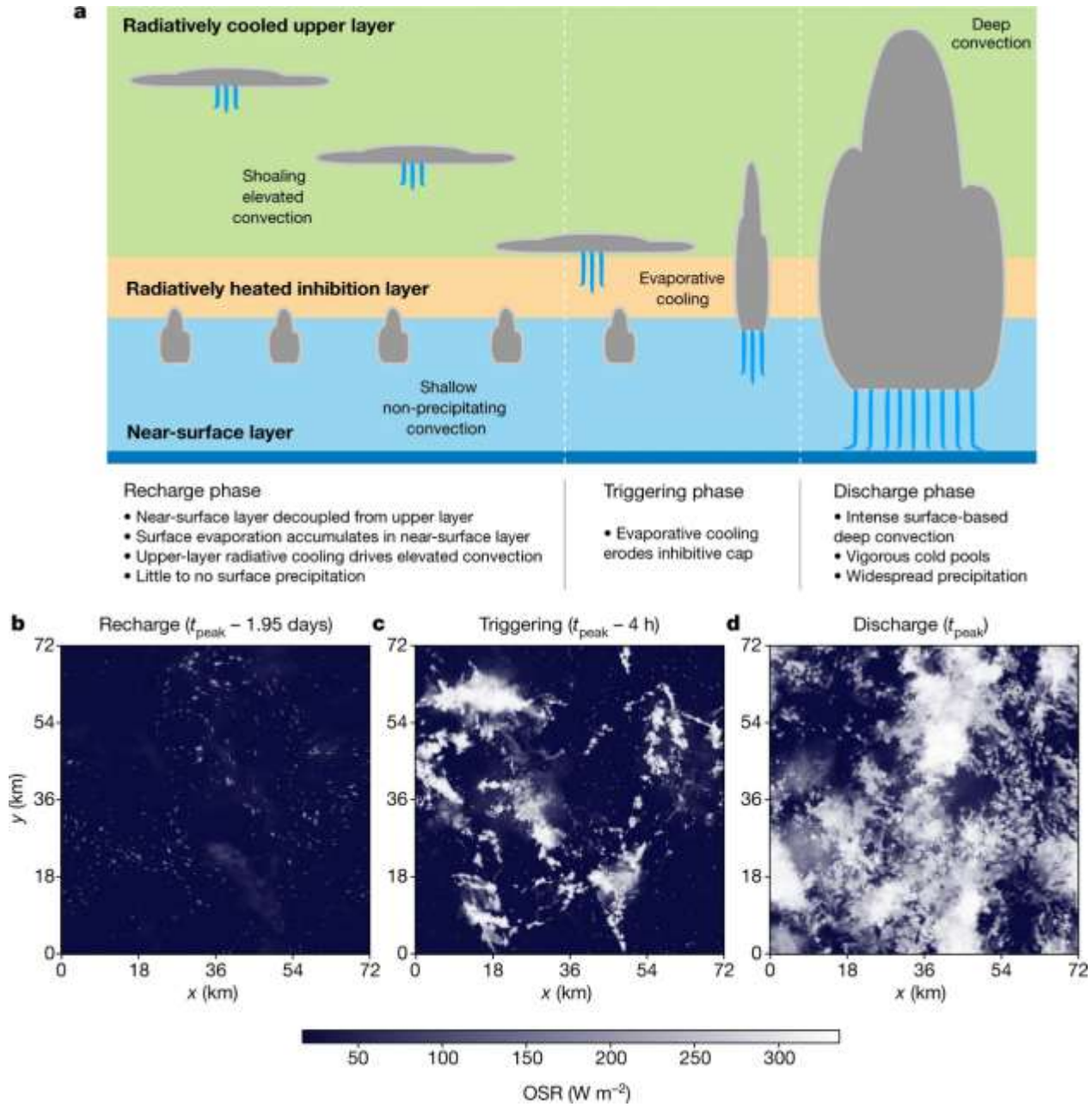
https://coptic-treasures.com/

وقال روبن ووردزورث Robin Wordsworth، أستاذ غوردون مكاي Gordon McKay لعلوم وهندسة البيئة في كلية SEAS والمؤلف الرئيسي للدراسة: "هذه الدورة الدورية من الفيضانات حالة جوية جديدة وغير متوقعة على الإطلاق". لا يُسلط هذا البحث الضوء على ماضي الأرض البعيد ومستقبلها البعيد فحسب، بل قد يُساعد أيضًا في فهم مناخات الكواكب الخارجية التي تدور حول نجوم بعيدة. في نموذج جوي، رفع سيلي ووردزورث درجة حرارة سطح البحر إلى 130 درجة فهرنهايت، إما بإضافة المزيد من ثاني أكسيد الكربون - حوالي 64 ضعف الكمية الموجودة حاليًا في الغلاف الجوي - أو بزيادة سطوع الشمس بنسبة 10% تقريبًا. عند هذه الدرجات، تبدأ ظواهر غريبة بالحدوث في الغلاف الجوي. فعندما يصبح الهواء القريب من السطح دافئًا للغاية، يمتص بخار الماء في الغلاف الجوي ضوء الشمس، مما يؤدي إلى تسخين الهواء فوق السطح وتكوين ما يُعرف بـ"طبقة التثبيط"، وهي حاجز يمنع السحب الركامية من الصعود إلى طبقات الجو العليا وتكوين السحب الماطرة. بدلًا من ذلك، يعلق كل هذا التبخر في طبقات الجو القريبة من السطح. في الوقت نفسه، تتشكل السحب في طبقات الجو العليا، فوق طبقة التثبيط، نتيجة فقدان الحرارة إلى الفضاء. ويتبخر المطر المتكون في هذه السحب العلوية قبل وصوله إلى السطح، ليعود كل هذا الماء إلى النظام.

قال سيلي: "الأمر أشبه بشحن بطارية ضخمة. هناك كمية هائلة من التبريد في طبقات الجو العليا، وكمية هائلة من التبخر والتسخين قرب سطح الأرض، يفصل بينهما حاجز. إذا تمكن شيء ما من اختراق هذا الحاجز والسماح للحرارة والرطوبة السطحية بالوصول إلى طبقات الجو العليا الباردة، فسيؤدي ذلك إلى عاصفة مطرية هائلة." وهذا ما يحدث بالفعل. فبعد عدة أيام، يؤدي التبريد الناتج عن العواصف المطرية في طبقات الجو العليا إلى تآكل الحاجز، مما يتسبب في هطول أمطار غزيرة تستمر لساعات. وفي إحدى المحاكاة، لاحظ الباحثون هطول أمطار في ست ساعات أكثر مما تهطله بعض الأعاصير المدارية في الولايات المتحدة على مدى عدة أيام. وبعد العاصفة، تتلاشى الغيوم، ويتوقف الهطول لعدة أيام بينما تُعاد شحن بطارية الغلاف الجوي وتستمر الدورة. وأضاف سيلي: "يُظهر بحثنا أن هناك الكثير من المفاجآت في النظام المناخي." على الرغم من أن ارتفاع درجة حرارة سطح البحر بمقدار 30 درجة مئوية يتجاوز بكثير ما هو متوقع لتغير المناخ الناتج عن النشاط البشري، إلا أن دفع نماذج الغلاف الجوي إلى مناطق غير مألوفة قد يكشف عن لمحات مما يمكن أن يحدث على كوكب الأرض. وقال ووردزورث: "كشفت هذه الدراسة عن فيزياء جديدة ثرية في مناخ لا يختلف كثيرًا عن مناخ الأرض الحالي من منظور كوكبي. إنها تثير تساؤلات جديدة هامة حول تطور مناخ الأرض والكواكب الأخرى، وهي تساؤلات سنعمل على إيجاد إجابات لها لسنوات عديدة قادمة."

Seeley, J.T., Wordsworth, R.D. Episodic deluges in simulated hothouse climates. Nature 599, 74–79 (2021)

https://coptic-treasures.com/



a- رسم تخطيطي لمراحل نظام الحمل الحراري لمذبذب الاسترخاء. b–d- لقطات للإشعاع الشمسي الصادر (OSR) خلال مراحل إعادة الشحن (b)، والتحفيز (c)، والتفريغ (d)، تم الحصول عليها قبل 1.95 يوم، و4 ساعات، و0 ساعة من الساعة التالية لذروة الهطول (tpeak)، على التوالي. هذه اللقطات مأخوذة من محاكاة عالية الدقة لدرجة حرارة سطح البحر الثابتة عند درجة حرارة سطحية تبلغ 330 كلفن. تشير القيم العالية للإشعاع الشمسي الصادر إلى وجود غطاء سحابي. لا يتناسب كل من العرض البياني للمراحل والسمك الرأسي للطبقات الجوية في هذا الرسم التخطيطي مع مقدار الوقت أو المساحة التي تشغلها.

https://coptic-treasures.com/

مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي عبر الزمن

كان غلاف الأرض في حقبة الأركي فقيرًا بالأكسجين. مع ذلك، تشير النماذج الكيميائية الضوئية للكواكب الشبيهة بالأرض حول نجوم شبيهة بالشمس إلى إمكانية الحفاظ على كميات ضئيلة من الأكسجين في الغلاف الجوي العلوي عبر التحلل الضوئي لثاني أكسيد الكربون. وبناءً على هذه النماذج، قد يصل مستوى الأكسجين في الغلاف الجوي العلوي إلى حوالي 1% حجميًا في غلاف جوي غني بثاني أكسيد الكربون (90% حجميًا)، بينما يبقى غازًا ضئيلاً على سطح الكوكب. هذا التركيز من الأكسجين أقل بكثير من المستويات الحالية اللازمة لتفسير أكسدة النيازك الدقيقة في حقبة الأركي[1].

لدراسة إمكانية الأكسدة بفعل ثاني أكسيد الكربون بكميات كبيرة وأكسجين بكميات ضئيلة في حقبة الأركي، قمنا بتشغيل نموذجنا باستخدام غلاف جوي مكون من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والأكسجين. تمت محاكاة كل نيزك من النيازك الدقيقة البالغ عددها 15000 نيزكًا في النموذج، حيث دخل كل منها غلافًا جويًا مكونًا من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين فقط، وغلافًا جويًا مكونًا من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والأكسجين (1%). كقيمة قصوى، تم تثبيت نسبة الأكسجين الجوي عند 1%، ولم تنخفض مع الارتفاع ضمن نطاق الارتفاعات اللازمة لانصهار النيازك الدقيقة. تُظهر النتائج يُبين المنحنى الأسود في الشكل متوسط المساحة الجزئية للحديد غير المؤكسد في النيازك الدقيقة التي تم نمذجتها مع ازدياد نسبة ثاني أكسيد الكربون الجوي في الغلاف الجوي CO_2-N_2، بينما يُبين المنحنى البرتقالي نفس النسبة للنيازك الدقيقة التي دخلت الغلاف الجوي CO2-N2-O2 (1%). يُعد الفرق في المساحة الجزئية النهائية للحديد بين الغلافين الجويين ضئيلاً، خاصةً عند تركيزات ثاني أكسيد الكربون العالية، مما يُشير إلى أن ثاني أكسيد الكربون هو العامل المؤكسد الرئيسي عندما تكون نسبة الأكسجين حوالي 1% أو أقل.

تقديرات ثاني أكسيد الكربون في حقبة الأركي من النمذجة. في المتوسط، وجدنا أن المساحة الجزئية للحديد غير المؤكسد في مقاطع النيازك الدقيقة تنخفض بشكل مطرد مع ازدياد تركيزات ثاني أكسيد الكربون الجوي. يُظهر المنحنى الأسود المتصل في الشكل 3 متوسط مساحة الحديد غير المؤكسد في النيازك الدقيقة التي قمنا بنمذجتها مع ازدياد تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. أما المنطقة المظللة باللون الرمادي فتمثل هامش الخطأ $\sigma 2$ في النموذج، والناجم عن عدم اليقين في الكتلة الأولية والسرعة وزاوية الاصطدام. وتشير النقطة البرتقالية وشريط الخطأ إلى متوسط مساحة الحديد الجزئية التي قاسها تومكينز وآخرون.

[1] O. R. Lehmer et al. ,Atmospheric CO2 levels from 2.7 billion years ago inferred from micrometeorite oxidation. (Science Advances Sci. Adv.6,eaay4644(2020)

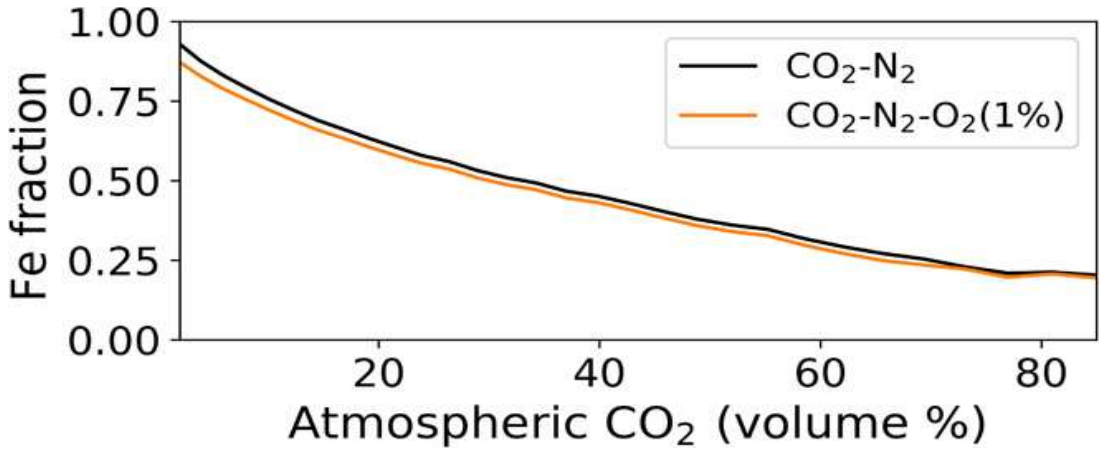
https://coptic-treasures.com/

يُعدّ تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للأرض خلال حقبة الأركي غير مؤكد إلى حد كبير. ففي تلك الحقبة، كانت الشمس أقل سطوعًا بنسبة تتراوح بين 20 و30%، وكان من الضروري أن تكون مستويات ثاني أكسيد الكربون أعلى بكثير من مستوياتها الحالية للحفاظ على مناخ ملائم لوجود الماء السائل، ربما بمقدار يتراوح بين 10^2 و10^3 ضعفًا، وذلك اعتمادًا على تركيز غازات الدفيئة الأخرى، مثل الميثان. وبالإضافة إلى النماذج الجوية، دُرست التربة القديمة في حقبة الأركي وغيرها من المؤشرات لتحديد مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وتتراوح التقديرات المستخلصة من هذه الدراسات بين 3×10^{-3}~ و0.75 بار من ثاني أكسيد الكربون خلال حقبة الأركي. وبالتالي، يمتد مستوى ثاني أكسيد الكربون المُقدّر في الغلاف الجوي خلال حقبة الأركي على مدى ثلاثة رتب مقدارية.

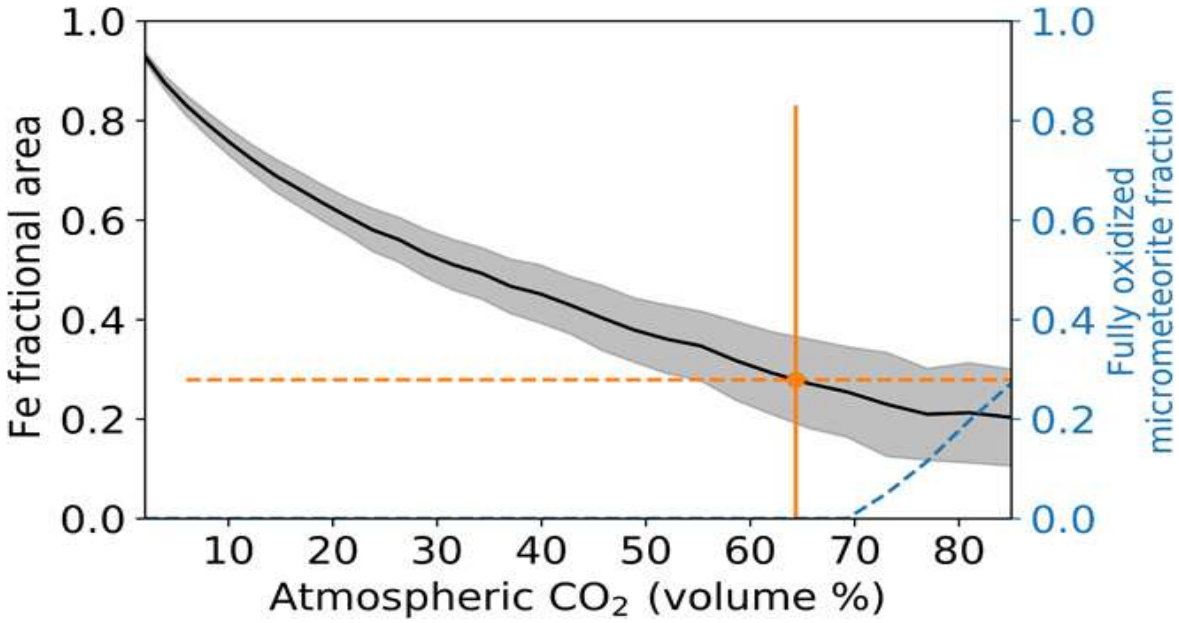
ويُعدّ هذا التباين في تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي خلال حقبة الأركي جزءًا من نقاش حول مناخ الأرض في بداياتها. وتشير التحليلات النظائرية للفوسفات والديوتيريوم إلى أن درجة حرارة سطح الأرض في حقبة الأركي كانت معتدلة وأقل من 40 درجة مئوية. بالإضافة إلى ذلك، يشير وجود رواسب جليدية من العصر الأركي إلى أن الأرض في بداياتها كانت باردة بشكل دوري على الأقل. ومع ذلك، فقد اقتُرح وجود عصر أركي ذي درجة حرارة عالية، حيث بلغت درجة حرارة سطح الأرض 70 ± 15 درجة مئوية، استنادًا إلى قياسات نظائر الأكسجين في صخور الصوان الأركية. كما يُستعان باحتمالية وجود محيط أركي منخفض اللزوجة، والثبات الحراري للبروتينات الأركية المُعاد تكوينها، لدعم فرضية ارتفاع درجة حرارة العصر الأركي. ويمكن أن تُسهم تقديرات إضافية لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي الأركي في حسم هذا الغموض المتعلق بدرجة الحرارة، وتقديم رؤى ثاقبة حول ظروف الحياة على الأرض في بداياتها.

وقد اقتُرح مؤخرًا أن النيازك الدقيقة الأركية الكروية الغنية بالحديد (النوع الأول) ربما تكون قد تأكسدت بفعل مستويات الأكسجين الحالية في الغلاف الجوي العلوي. ومع ذلك، فإن المستويات المنخفضة جدًا من الأكسجين في الغلاف الجوي الأركي، والمستنتجة من مجموعة واسعة من المؤشرات، تُحفز النظر في الأكسدة بواسطة ثاني أكسيد الكربون كبديل. وبالتالي، يُمكن أن تُوفر النيازك الدقيقة قيدًا جديدًا على مستويات ثاني أكسيد الكربون في العصر الأركي. عندما تدخل النيازك الدقيقة المعدنية من الحديد والنيكل الغلاف الجوي بسرعة فائقة، فإنها قد تنصهر، وأثناء انصهارها تتفاعل بسهولة مع الغلاف الجوي المحيط. خلال هذا التفاعل، يمكن للنيازك الدقيقة الحديدية المعرضة للأكسجين أو ثاني أكسيد الكربون أن تؤكسد بعضًا من المعدن أو كله إلى مركبات مثل الوستيت [$Fe_{(1-x)}O$] والماغنيتيت (Fe_3O_4). اعتمادًا على الحجم وسرعة الدخول وزاوية الدخول، تنصهر النيازك الدقيقة وتتأكسد في طبقات الجو العليا لبضع ثوانٍ فقط على ارتفاع يتراوح بين 75 و90 كيلومترًا تقريبًا فوق سطح الأرض في العصر الحديث، ثم تتصلب قبل وصولها إلى طبقات الجو السفلى. بعد تصلبها في طبقات الجو العليا، تصبح النيازك الدقيقة الغنية بالحديد خاملة إلى حد كبير، ويمكنها الحفاظ على حالة أكسدتها عبر الزمن الجيولوجي.

https://coptic-treasures.com/



مقارنة مساحة الحديد غير المؤكسد في جو من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين، وجو من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والأكسجين، مع زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون. يوضح المنحنى الأسود متوسط مساحة المقطع العرضي للنموذج للحديد غير المؤكسد مقارنةً بمساحة المقطع العرضي الكلية للنيزك الدقيق في جو من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. وهو نفس المنحنى الموضح في الشكل 3. يوضح الخط البرتقالي نفس النيازك الدقيقة المحاكاة، ولكنها تدخل جوًا من ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين والأكسجين، حيث يمثل الأكسجين 1% من الحجم. إن إضافة 1% من الأكسجين إلى الجو ليس لها تأثير يُذكر على المتوسط.



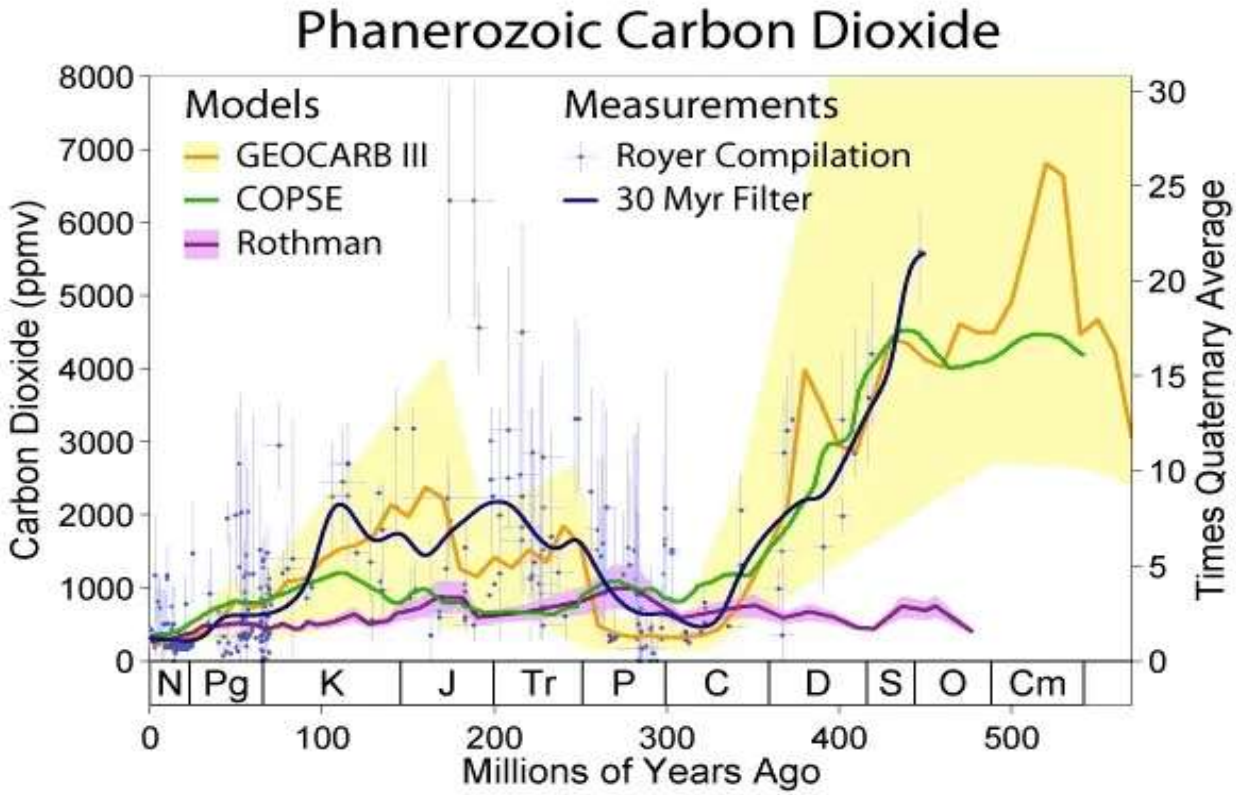
تمت محاكاة المساحة الجزئية للحديد غير المؤكسد مع زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وافترضنا أن الغلاف الجوي يتكون من النيتروجين وثاني أكسيد الكربون النقيين. يوضح المنحنى الأسود متوسط تنبؤ النموذج للمساحة المقطعية للحديد غير المؤكسد مقارنةً بالمساحة المقطعية الكلية للنيزك الدقيق. وافترضنا أن النيازك الدقيقة المحاكاة تحتوي على حبيبات معدنية مركزية كروية الشكل، لذا فإن المساحة المقطعية لحبيبة الحديد غير المؤكسد تكون في أقصى حد لها. وتشير المنطقة المظللة باللون الرمادي إلى فاصل الثقة 2σ لنموذجنا. وتوضح النقطة البرتقالية وشريط الخطأ المتصل متوسط المساحة الجزئية للحديد غير المؤكسد وفاصل الثقة 2σ من نيزكين دقيقين من الحديد وأكسيد الحديد (Fe-FeO) كما ورد في دراسة تومكينز وآخرون. ويُظهر شريط الخطأ البرتقالي المتقطع عدم اليقين المقابل في بيانات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. وتشير نقطة بيانات تومكينز وآخرون إلى مستوى ثاني أكسيد الكربون. ويوضح الخط الأزرق المتقطع نسبة النيازك الدقيقة التي تم نمذجتها والتي تأكسدت بالكامل في الغلاف الجوي دون وجود حديد معدني متبقٍ. يمكن أن تؤدي هذه الجسيمات إلى تكوين نيازك دقيقة غنية بالمغنيتيت وتظهر في نموذجنا بمجرد أن يصل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى حوالي 70٪.

https://coptic-treasures.com/

على الجانب الأيسر من الرسم البياني، يوجد "متوسط العصر الرباعي". العصر الرباعي هو الفترة الزمنية الممتدة من 2.6 مليون سنة مضت وحتى اليوم. لذا، يوضح لنا هذا المحور مقدار الزيادة (أو النقصان) في تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في أي وقت على الرسم البياني. على سبيل المثال، قبل 300 مليون سنة، كان تركيز ثاني أكسيد الكربون يعادل تقريبًا متوسط قيمة العصر الرباعي.

والآن، ننتقل إلى صلب الرسم البياني: تمثل الخطوط الملونة المختلفة المرسومة مقابل تركيز ثاني أكسيد الكربون (جزء في المليون)، والزمن الجيولوجي، ومتوسط العصر الرباعي، نماذج مناخية مختلفة تستخدم بيانات حقيقية، وتربط نقاط البيانات عبر الزمن، ثم تحدد هامش خطأ للبيانات. يُمثل الخطأ داخل كل نموذج بـ"الغلاف" ذي اللون الفاتح المحيط بالخطوط ذات اللون الداكن لكل نموذج. بعض هذا الخطأ كبير جدًا (على سبيل المثال، انظر إلى الغلاف الكبير المحيط بنموذج GEOCARB III في العصر الكامبري). ويعود ذلك إلى قلة نقاط البيانات المتاحة للعلماء من هذه الفترة الزمنية. كلما زادت نقاط البيانات المتوفرة لدينا، قلّ هامش الخطأ؛ على سبيل المثال، لاحظ كيف يتقلص هامش الخطأ كلما اقتربنا من الزمن صفر. وإذا كانت البيانات تحتوي على هامش خطأ كبير، فهذا لا يعني أنها غير مفيدة. لا يزال بإمكاننا استخلاص الاتجاهات والأنماط طويلة الأجل من البيانات. بالإضافة إلى النماذج الثلاثة المختلفة، تمثل النقاط الزرقاء ذات الخطوط الرأسية المرسومة على الرسم البياني نقاط بيانات حقيقية (من مصادر بديلة)، وهي مُصنّفة باسم "مجموعة رويير" في الرسم البياني. ويعود ذلك إلى دراسة رويير وآخرون (2004)، الذين جمعوا عدة قياسات مختلفة لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من مصادر بديلة مختلفة، ورسموها بيانيًا مقابل الزمن الجيولوجي للكشف عن الاتجاه العام لثاني أكسيد الكربون في الماضي.

https://coptic-treasures.com/



يوضح هذا الشكل كمية ثاني أكسيد الكربون من العصر الكامبري حتى اليوم. يمثل الجزء السفلي من الرسم البياني الزمن الجيولوجي، من حوالي 542 مليون سنة مضت (العصر الكامبري) إلى صفر مليون سنة (اليوم). تشير الاختصارات إلى الفترات المختلفة: Cm، الكامبري؛ O، الأوردوفيشي؛ S، السيلوري؛ D، الديفوني؛ C، الكربوني؛ P، البنسلفاني؛ Tr، الترياسي؛ J، الجوراسي؛ K، الطباشيري؛ Pg، الباليوجيني؛ وN، النيوجيني. على المحور الأيسر من الرسم البياني، توجد كمية ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، مقاسة بأجزاء في المليون حجميًا (ppmv). لنفترض أنك أخذت حجمًا معينًا من الهواء، على سبيل المثال، سنتيمترًا مكعبًا واحدًا. إذا قمت بقياس كمية ثاني أكسيد الكربون في هذا السنتيمتر المكعب وكانت النتيجة 1500 جزء في المليون حجميًا، فهذا يعني أنه من بين كل مليون جزيء في هذا السنتيمتر المكعب، يوجد 1500 جزيء من ثاني أكسيد الكربون.

لاحظ أنه خلال الفترة ما بين 500 و400 مليون سنة مضت، في العصرين الأوردوفيسي Ordovician والسيلوري Silurian، كان تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي مرتفعًا للغاية، حيث تراوح بين 2500 و6000 جزء في المليون، أي ما يعادل 10 إلى 23 ضعف متوسط تركيزه خلال العصر الرباعي. خلال هذه الفترة، حدث أحد أكبر الأحداث التطورية: حدث التنوع البيولوجي الأوردوفيسي العظيم. استمر هذا الحدث لملايين السنين، وشمل ظهور أنواع جديدة في البيئة البحرية، لدرجة أن عدد الأنواع الجديدة تضاعف ثلاث مرات تقريبًا. كانت أجزاء أجسام وأصداف العديد من هذه الأنواع الجديدة مصنوعة من الكالسيت. إذا كان تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي مرتفعًا، ألا يعني ذلك أن المحيط كان حمضيًا نتيجة امتصاصه كل هذا ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى ذوبان أصداف الكالسيت؟ في هذه الحالة، أن للمحيط قدرة هائلة على معادلة الحموضة، أي أنه قادر على امتصاص كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي دون أن يصبح شديد الحموضة وبالتالي ضارًا بالحياة البحرية. ولكن، تذكر من صفحة "طبقات المحيطات والاختلاط"

https://coptic-treasures.com/

أن سطح المحيط، الذي يتبادل الغازات مع الغلاف الجوي بسرعة نسبية (10-100 سنة)، يختلط تمامًا مع أعماق المحيط خلال 1000 سنة. وإذا أصبحت أعماق المحيط شديدة الحموضة، فإنها تستطيع أيضًا معادلة الحموضة برواسبها الكربونية.

الخلاصة هنا هي: إذا ارتفع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ببطء كافٍ، فإن المحيط بأكمله يملك الوقت الكافي للاختلاط ومعادلة ثاني أكسيد الكربون الذي يمتصه، دون أن يصبح شديد الحموضة. ولهذا السبب، خلال فترات أخرى من تاريخ الأرض عندما كان ثاني أكسيد الكربون مرتفعًا جدًا، كما هو الحال في العصر الأوردوفيسي، أو خلال حقبة الحياة الوسطى (منذ 200 إلى 100 مليون سنة)، ازدهرت الحياة وكانت المحيطات صالحة لسكن الكائنات البحرية. من المهم الإشارة هنا إلى أن الأرض كانت مختلفة تمامًا خلال فترات ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون، إذ لم تكن هناك أنهار جليدية قارية أو كانت صغيرة جدًا، وكان متوسط درجة الحرارة العالمية أعلى بكثير. وتُعزى هذه التغيرات واسعة النطاق في مستويات ثاني أكسيد الكربون جزئيًا إلى التغيرات الطبيعية للأرض. يُطلق العلماء على فترات ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون، وبالتالي ارتفاع متوسط درجات الحرارة العالمية، اسم "فترات الاحتباس الحراري" أو "عالم الاحتباس الحراري". في المقابل، تُسمى الفترات التي تنخفض فيها مستويات ثاني أكسيد الكربون وتنخفض فيها متوسط درجات الحرارة العالمية "فترات العصر الجليدي" أو "عالم العصر الجليدي".

تاريخ الأكسجين الجوي

عندما بدأ نظامنا الشمسي بالتشكل قبل حوالي 4-5 مليارات سنة، كان يتألف على ما يبدو من عدد من المكونات الصلبة مصحوبة ببعض الغازات. وكان النظام متماسكًا بفعل الجاذبية. كان الأكسجين الحر نادرًا أو معدومًا في الغاز، الذي يُعتقد أنه كان مزيجًا من النيتروجين والهيدروجين والهيليوم والميثان وبعض العناصر الأخرى ذات الأعداد الذرية المنخفضة. استمر هذا الوضع لملايين السنين بينما تطور نظامنا الشمسي بكواكبه الثمانية (وبلوتو) تدريجيًا، ولكن دون وجود كميات كبيرة من الأكسجين في الغلاف الجوي. ثم حدث تغيير استثنائي. ويعود ذلك إلى معجزة التمثيل الضوئي التي مكّنت بعض الكائنات الحية من استخدام طاقة ضوء الشمس لتحليل الماء إلى جزيئاته المكونة له، الأكسجين والهيدروجين. وكانت إحدى نتائج ذلك ظهور بعض الأكسجين الغازي. وأدى هذا في نهاية المطاف إلى تغيير جذري لسكان كوكب الأرض في المستقبل كما نراه اليوم. وقد نتج هذا الأكسجين الأولي عن ظهور عائلة من الكائنات الدقيقة تُسمى البكتيريا الزرقاء. كلمة "زرقاء" تعني "أزرق"، وتتميز هذه الخلايا بلونها الأزرق المخضر. ولا يزال أصل هذه الكائنات مجهولًا. مع ذلك، امتلكت هذه الخلايا القدرة على التمثيل الضوئي، أي أنها استطاعت حفظ الطاقة الضوئية واستغلالها. ولتحقيق ذلك، احتوت على أصباغ التمثيل الضوئي المرتبطة

https://coptic-treasures.com/

بالكلوروفيل، المعروف بدوره المحوري في استقلاب النباتات. في الواقع، يُعتقد أن الكلوروفيل الموجود في النباتات اليوم قد تطور من هذه الأصباغ في البكتيريا الزرقاء[1].

كانت البكتيريا الزرقاء قادرة على استخدام ثاني أكسيد الكربون، وتحليل الماء إلى جزيئاته المكونة له، الهيدروجين والأكسجين. معادلة نموذجية هي: $6CO_2 + 6H_2O + energy = C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ يتحد الهيدروجين مع الكربون لتكوين مجموعة متنوعة من الهيدروكربونات، بينما يُطرح الأكسجين كناتج ثانوي غير مرغوب فيه. من هذا الأصل غير المتوقع، تطورت عائلات هائلة من أشكال الحياة المعتمدة على الأكسجين التي نعرفها اليوم، بما في ذلك نحن. أين نجد أكبر مخزون للأكسجين على كوكب الأرض اليوم؟ بما أن الغلاف الجوي يتكون من 21% أكسجين، ويحيط هذا الغلاف بالكرة الأرضية بأكملها حتى ارتفاع يزيد عن 80 كيلومترًا، فمن الطبيعي أن نفترض أن معظم الأكسجين موجود هنا. ومع ذلك، هذا ليس صحيحًا. توجد أكبر كمية من الأكسجين من حيث الوزن (أكثر من 90%) في أشكال كيميائية صلبة مثل الأكاسيد والسيليكات. في الواقع، إذا جمعنا كميات الأكسجين في الغلاف الجوي والمحيطات والكائنات الحية، فإن المجموع يقل عن 0.05% من إجمالي كتلة الأكسجين على كوكب الأرض.

أطلقت البكتيريا الزرقاء بعض الأكسجين في بدايات تاريخ الأرض. مع ذلك، ظل تركيز الأكسجين في الغلاف الجوي منخفضًا لملايين السنين، ربما أقل من 10 ملم زئبق. أسباب هذا الانخفاض غير مؤكدة، ولكن يُعتقد أنه ناتج عن امتصاص المحيطات وبعض أسطح اليابسة للأكسجين. ولكن قبل حوالي ملياري سنة، في حقبة ما قبل الكامبري، حدث ارتفاع هائل في تركيز الأكسجين في الغلاف الجوي. وكما يُظهر الشكل، ارتفع الضغط الجزئي للأكسجين من قيمة منخفضة للغاية إلى حوالي 150 ملم زئبق. ورغم أن كوكبنا شهد أحداثًا جسيمة كالعصور الجليدية، إلا أن هذا التغير الهائل في تركيب الغلاف الجوي كان غير مسبوق. كان لهذا التغير البيئي الجذري عواقب وخيمة. فقد ساهم، من بين أمور أخرى، في ظهور التنوع الهائل للكائنات الحية التي تعتمد على الأكسجين والتي نراها على الأرض اليوم. ولكن كان له أيضًا جانب سلبي كبير. كان للزيادة الهائلة في تركيز الأكسجين عواقب وخيمة على العديد من الكائنات الحية اللاهوائية. في الواقع، كان الانقراض الذي أعقب ذلك أحد أكثر الأحداث البيولوجية كارثية التي شهدها كوكبنا على الإطلاق.

ما هي أسباب هذه الزيادة الهائلة في نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي؟ من المحرج أن نذكر أنه على الرغم من الكم الهائل من الأبحاث والكم الهائل من المقالات، ما زلنا نجهل الكثير في هذا المجال. على سبيل المثال، هناك مقال بعنوان "اللغز المستمر لحدث الأكسدة العظيم" يناقش المصادر والمصارف المفترضة للأكسجين، ولكنه لا يتوصل إلى أي استنتاجات مقنعة حول الآليات المحتملة. يتناول المقال بعض المؤشرات الدالة على وجود الأكسجين أو غيابه، مثل تكوينات الحديد المخططة الشائعة

[1] West JB. The strange history of atmospheric oxygen. Physiological Reports Physiol Rep. 2022;10(6):e15214 (

https://coptic-treasures.com/

نسبيًا. هذه التكوينات عبارة عن طبقات أفقية حمراء يسهل رؤيتها في التضاريس الصخرية، وتُعد من أفضل المؤشرات الجيولوجية المعروفة ذات الصلة. تشير المقالة إلى أن هذه المؤشرات تدل على ظروف نقص الأكسجين في العصر الأركي، لكن هذه المعلومات لا تُفيد كثيرًا في تفسير آليات حدث الأكسدة العظيم.

تم اكتشاف مصدر كبير آخر للأكسجين في المحيطات مؤخرًا. هذا المصدر هو الكائن الحي الدقيق البحري، البروكلوروكوكس Prochlorococcus، الذي يعتقد بعض الباحثين، نظرًا لوفرته، أنه ينتج كمية من الأكسجين تفوق ما تنتجه البكتيريا الزرقاء. وقد عُثر على كميات هائلة من هذا الكائن الحي، الذي لم يُدرس سابقًا، في المحيطات الرئيسية حول العالم، بما في ذلك المحيط الهادئ والمحيط الأطلسي والمحيط الجنوبي. يُعتقد حاليًا أن البروكلوروكوكس هو أكثر الكائنات الحية الضوئية وفرةً في المحيطات اليوم. وقد وُجدت أعداد كبيرة منه في المحيطات الهادئ والأطلسي والجنوبي، وخاصةً في المناطق شبه الاستوائية. يتميز هذا الكائن بصغر حجمه الشديد، حيث يتراوح قطره بين 0.4 و0.6 ميكرون. وهذا يعني أنه قريب من الحد الأقصى لدقة المجهر الضوئي، على الرغم من أنه يُظهر إشارة في قياس التدفق الخلوي. ويُقدر العدد الإجمالي لهذه الكائنات بـ 3×10^{27}. ويحتوي ماء البحر في المناطق التي ينتشر فيها البروكلوروكوكس عادةً على تركيز يزيد عن 10^5 خلية لكل مل. وبسبب هذا العدد الهائل من الخلايا، فإن المساحة السطحية الإجمالية للخلايا في المحيطات فلكية. وتعود خصائص التمثيل الضوئي لهذه الخلايا، التي تُمكّنها من امتصاص الضوء، إلى مُركبات الكلوروفيل ألفا وبيتا ثنائية الفينيل عبر الغشاء. ويوجد الكلوروفيل في صورتي ألفا وبيتا. يقوم الكلوروفيل ألفا بمعظم نقل الطاقة من الضوء، بينما يساعد الكلوروفيل بيتا في بعض الأطوال الموجية. يُعد الفينيل أو الإيثانيل مكونًا آخر للكلوروفيل. ثنائي الفينيل خاص ببكتيريا البروكلوروكوكس، بينما الشكل الشائع هو أحادي الفينيل. يُعتقد أن كلوروفيل البروكلوروكوكس يتميز بكفاءة استثنائية في امتصاص الضوء.



خلايا بكتيريا البروكلوروكوكس Prochlorococcus البحرية. هذه الخلايا صغيرة جدًا، إذ يبلغ قطرها حوالي 0.6 ميكرومتر. وتوجد بأعداد هائلة في العديد من محيطات العالم. ومن المثير للدهشة أنها لم تُكتشف إلا منذ أقل من 40 عامًا. ويُعتقد أنها مسؤولة عن جزء كبير من الأكسجين الموجود في الغلاف الجوي اليوم.

https://coptic-treasures.com/

الأكسجين والميثان في الغلاف الجوي على الأرض في بداياتها

تأثرت صلاحية الأرض للحياة في بداياتها بعوامل عديدة. نركز هنا على الأكسجين (O_2) والميثان (CH_4) في الغلاف الجوي. يُعدّ الأكسجين ضروريًا لدعم الحياة حقيقية النواة، بما في ذلك النباتات والحيوانات. أما الميثان، إلى جانب ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والماء (H_2O)، فهو غاز دفيئة قوي ربما ساهم في تعويض انخفاض إضاءة الشمس في بداياتها. مع ذلك، لا يزال تركيزه محل جدل في كل من حقبة الأركي Archean وحقبة البروتيروزويك Proterozoic. يعتمد تركيز الميثان بشكل كبير على الأكسجين في الغلاف الجوي، الذي بدأ إنتاجه بيولوجيًا بكميات ذات دلالة جيولوجية كيميائية خلال حقبة الأركي، على الأرجح حوالي 2.7 مليار سنة، استنادًا إلى سجل نظائر الكبريت غير المعتمد على الكتلة وبيانات نظائرية أخرى (الكربون والنيتروجين). وقد أنتجت البكتيريا الزرقاء التي تعيش في الحصائر الأرضية وفي سطح المحيط خلال هذه الفترة الأكسجين، مُولِّدةً واحات أكسجين محلية تُطلق الأكسجين إلى الغلاف الجوي. في الفترة ما بين 2.2 و2.4 مليار سنة، حدث حدث أكسدة عظيم، مما أدى إلى زيادة كبيرة في نسبة الأكسجين، لتصل على الأرجح إلى حوالي 10% من مستوياتها الحالية. وقد تكون الزيادة في نسبة الأكسجين قرب بداية ونهاية حقبة البروتيروزويك قد تسببت في انخفاض نسبة الميثان، مما أدى إلى حدوث التجلدات المعروفة باسم "كرة الثلج الأرضية" التي لوحظت خلال هاتين الفترتين الزمنيتين[1].

كانت حالة الأكسدة والاختزال للغلاف الجوي والمائي أساسية لنشأة الحياة على الأرض واستمرار صلاحيتها للحياة على المدى الطويل. في هذه المراجعة، نستكشف تكوين الغلاف الجوي والمائي للأرض في مراحلها المبكرة وتطور حالة الأكسدة والاختزال فيها، جامعًا بين الأدلة المستقاة من النيازك والسجل الصخري القديم والنماذج العددية. تشكل الغلاف الجوي الأولي من خلال تراكم المواد المتطايرة البدائية، وانبعاث الغازات من المحيطات الصهارية الأولية، وانبعاث الغازات المتطايرة الثانوية بعد تبلور المحيطات الصهارية خلال حقبة الهاديان (4.567-4.0 مليار سنة). من المحتمل أن يكون الغلاف المائي الأولي قد تشكل في وقت مبكر يعود إلى 4.4 مليار سنة، ولكنه على الأرجح تعرض لتبخر متقطع خلال مراحل التراكم المتأخرة. يعود تاريخ أقدم دليل قوي على وجود بيئات تحت الماء إلى حوالي 3.7 مليار سنة. وصل الوشاح إلى حالته التأكسدية المختزلة الحالية بين 4.4 مليار سنة و2.7 مليار سنة. ظهر الأكسجين الحر في الغلاف المائي عند 3.0 مليار سنة، بينما حدث الارتفاع الأولي للأكسجين في الغلاف الجوي (حدث الأكسدة العظيم) لاحقًا، بين 2.5 و2.3 مليار سنة. يُعزى هذا التأخير في أكسدة السطح على الأرجح إلى تضافر آليات جيوديناميكية وماغماتية وجيوكيميائية (حيوية) تُعدّل مصادر الأكسجين ومصارفه. بدورها، غيّرت هذه العمليات ديناميكيات دورات العناصر المتطايرة الأخرى المهمة لتطور الحياة، مثل النيتروجين والكربون والهيدروجين. ينبغي

[1] James F. Kasting, Aoshuang Ji; Atmospheric oxygen and methane on the early Earth. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci August 2025; 380 (1931): 20240093.

https://coptic-treasures.com/

أن تُعطي الدراسات المستقبلية الأولوية لتحديد المزيد من القيود الكمية على مصادر الأكسجين ومصارفه على الأرض عبر الزمن لفهم مدى صلاحية الأرض للحياة في بداياتها[1].

التأثير البيوجيوكيميائي للنيكل واليوريا في حدث الأكسدة العظيم

يمثل حدث الأكسدة العظيم أول زيادة ملحوظة في نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي للأرض. ورغم ظهور عملية التمثيل الضوئي المؤكسج قبل مئات الملايين من السنين من هذا الحدث، لا تزال الآليات البيوجيوكيميائية المسؤولة عن الحفاظ على مستويات منخفضة من الأكسجين لفترة طويلة غير واضحة[2]. في هذه الدراسة، نُبين الدور الحاسم لليوريا كمصدر للنيتروجين للبكتيريا الزرقاء، والتأثير المتتالي للنيكل على إنتاج اليوريا غير الحيوي، وتأثيراتهما المُجتمعة على تكاثر البكتيريا الزرقاء مما أدى إلى حدث الأكسدة العظيم. تم تقييم تكوين اليوريا تجريبيًا في ظل ظروف مُحاكاة لعصر الأركي، ورُصد نمو البكتيريا الزرقاء التي وفرت اليوريا كمصدر للنيتروجين. تُظهر نتائجنا إمكانية إنتاج اليوريا في بيئات البكتيريا الزرقاء في عصر الأركي باستخدام الأشعة فوق البنفسجية من نوع C، مما يُلقي الضوء على الجدل الدائر حول تطور إنزيمات تثبيت النيتروجين في البكتيريا الزرقاء البدائية. نقترح أن الظروف البيئية في العصر الأركي المبكر، والتي تميزت بارتفاع تركيز اليوريا والنيكل، ربما تكون قد أعاقت انتشار البكتيريا الزرقاء، مما ساهم في التأخير بين تطور عملية التمثيل الضوئي الأكسجيني وبداية حدث الأكسدة العظيم.

يرتبط أصل وتطور البكتيريا الزرقاء ارتباطًا وثيقًا بتطور الغلاف الجوي، فهي الكائنات الحية الوحيدة المعروفة المنتجة للأكسجين التي وُجدت على الأرض في بداياتها. يُعد فهم العوامل البيوجيوكيميائية التي أثرت على نمو هذه الكائنات الدقيقة أمرًا بالغ الأهمية لفهم أفضل لأسباب وديناميكيات حدث الأكسدة العظيم (GOE)، الذي وقع قبل 2.4-2.1 مليار سنة. يلعب توافر المغذيات، وخاصة النيتروجين، دورًا هامًا في النظم البيئية الميكروبية، إذ يؤثر على نموها، وبالتالي على صافي إنتاج الأكسجين في البكتيريا الزرقاء. على الرغم من أن الأدلة الجيوكيميائية تشير إلى تطور مبكر (حوالي 3.2 مليار سنة) لتثبيت النيتروجين (تحويل النيتروجين الجوي N2 إلى NH3) عبر إنزيم النيتروجيناز، تشير البيانات الوراثية إلى تطوره في البكتيريا الزرقاء بعد حدث الأكسدة العظيم. ربما شكّل منع تعطيل إنزيم النيتروجيناز بواسطة الأكسجين تحديًا كبيرًا للبكتيريا الزرقاء البدائية، نظرًا للنقاشات الدائرة حول توقيت تطور استراتيجيات حماية النيتروجيناز، مثل تكوين الخلايا المتغايرة. فضلًا عن حماية النيتروجيناز، تُحسّن الخلايا المتغايرة أيضًا قدرة الخلايا على العمل في ظل تركيزات منخفضة من الموليبدينوم (Mo3)،

[1] Vulpius, S., Runge, E., Herwartz, D. et al. Formation and redox evolution of Earth's early atmosphere and hydrosphere. Nat Rev Earth Environ 7, 412–426 (2026)

[2] Ratnayake, D.M., Tanaka, R. & Nakamura, E. Biogeochemical impact of nickel and urea in the great oxidation event. Communications Earth & Environment volume 6, Article number: 654 (2025)

https://coptic-treasures.com/

وهو عنصر أساسي لعمل النيتروجيناز. مع ذلك، يُثير ندرة الموليبدينوم في البيئات اللاهوائية تساؤلات حول الاستخدام المبكر لنظير الموليبدينوم من النيتروجيناز خلال التطور، وهو ما تدعمه تجارب الاسترزاع التي تُظهر انخفاض معدلات نمو البكتيريا الزرقاء المثبتة للنيتروجين في ظل مستويات منخفضة من الموليبدينوم. ومع ذلك، تُشير الدراسات الوراثية والأدلة الجيوكيميائية إلى أن تطور نظير الموليبدينوم من النيتروجيناز سبق نظائره المعتمدة على الفاناديوم والحديد.

بدلاً من ذلك، ربما يكون التحويل غير الحيوي للنيتروجين الجوي (N2) إلى أشكال نيتروجينية ثابتة، مثل الأمونيوم (NH4+) أو سيانيد الهيدروجين (HCN) أو أكاسيد النيتروجين (NOx)، قد وفّر نيتروجينًا متاحًا بيولوجيًا خلال حقبة الأركي. يُفترض أن نقص أكسيد النيتروجين (NO) المُنتَج لا حيويًا كان دافعًا لتطور تثبيت النيتروجين الحيوي، أو يُفترض أن تثبيت النيتروجين الحيوي قد تطور كآلية وقائية ضد الضرر الناجم عن السيانيد. وبالنظر إلى الوفرة العالية المحتملة لليوريا (H2NCONH2) في الأرض القديمة، والنشاط التكويني الموثق لإنزيم اليورياز في البكتيريا الزرقاء المتباعدة وراثيًا، تبرز اليوريا أيضًا كمصدر نيتروجين محتمل للكائنات الحية البدائية. إذا كانت اليوريا بالفعل مصدرًا للنيتروجين، فقد يكون توافر النيكل قد لعب دورًا حاسمًا نظرًا لأهميته في عمل إنزيم اليورياز، المسؤول عن تحويل اليوريا داخل الخلايا إلى أيون الأمونيوم (NH4+) المفيد بيولوجيًا. لذلك، وبالنظر إلى الانخفاض الموثق في تدفق النيكل إلى محيط ما قبل الكمبري، فإن إجراء تقييم بشأن التأثيرات المشتركة للنيكل واليوريا على نمو البكتيريا الزرقاء أمر ضروري.

يُعتقد أن الأشعة فوق البنفسجية من النوع C (200-280 نانومتر)، التي كانت أكثر كثافة قبل تكوّن طبقة الأوزون (حوالي 2.4 مليار سنة)، تُثبّط التوسع المحدود للبكتيريا الزرقاء. ورغم الآثار الضارة لهذه الأشعة على الكائنات الحية البدائية، فمن المحتمل أن تكون المركبات الكيميائية قد استغلت طاقة الفوتونات القيّمة هذه لإنتاج مركبات حيوية. وقد أظهرت الدراسات التجريبية أن تعريض محاليل سيانيد الأمونيوم المركزة للأشعة فوق البنفسجية من النوع C يؤدي إلى تكوين اليوريا، مع أن انتشار هذه المحاليل المركزة في بيئات البكتيريا الزرقاء في العصر الأركي محل شك.

تشير هذه الدراسة إلى أن وفرة النيكل واليوريا في العصر الأركي المبكر ربما كبحت نمو البكتيريا الزرقاء، بينما عززت عملية إنتاج الميثان، مما ساهم في الحفاظ على جو غني بالميثان ملائم لإنتاج سيانيد الهيدروجين واليوريا. وتشير الأدلة على إنتاج الميثان إلى ما يزيد عن 3.46 مليار سنة، أو حتى 4.1 مليار سنة، كما تدعم الأدلة على وجود الأكسجين الحر وجود البكتيريا الزرقاء منذ 2.9 مليار سنة. وبناءً على ذلك، يُحتمل أن تكون اليوريا قد تشكلت وتراكمت لمدة تتراوح بين 0.6 و1.2 مليار سنة منذ بدء إنتاج الميثان. وتشير حساباتنا إلى أن هذه المدة كافية لتراكم مستويات عالية من اليوريا (≥2 ملليمول/لتر). وفي نهاية المطاف، ربما يكون انخفاض تدفق النيكل إلى المحيط، مع بداية العصر الأركي الحديث، قد خفض معدلات ترسب سيانيد الهيدروجين، مما أدى في النهاية إلى انخفاض إنتاج اليوريا. ربما ساهم الانخفاض التدريجي في تركيزات اليوريا والنيكل في تسهيل النمو طويل الأمد لأنواع البكتيريا الزرقاء القاعية القديمة. وقد تكون هذه الكائنات قد التصقت بالأسطح التي كانت تغمرها

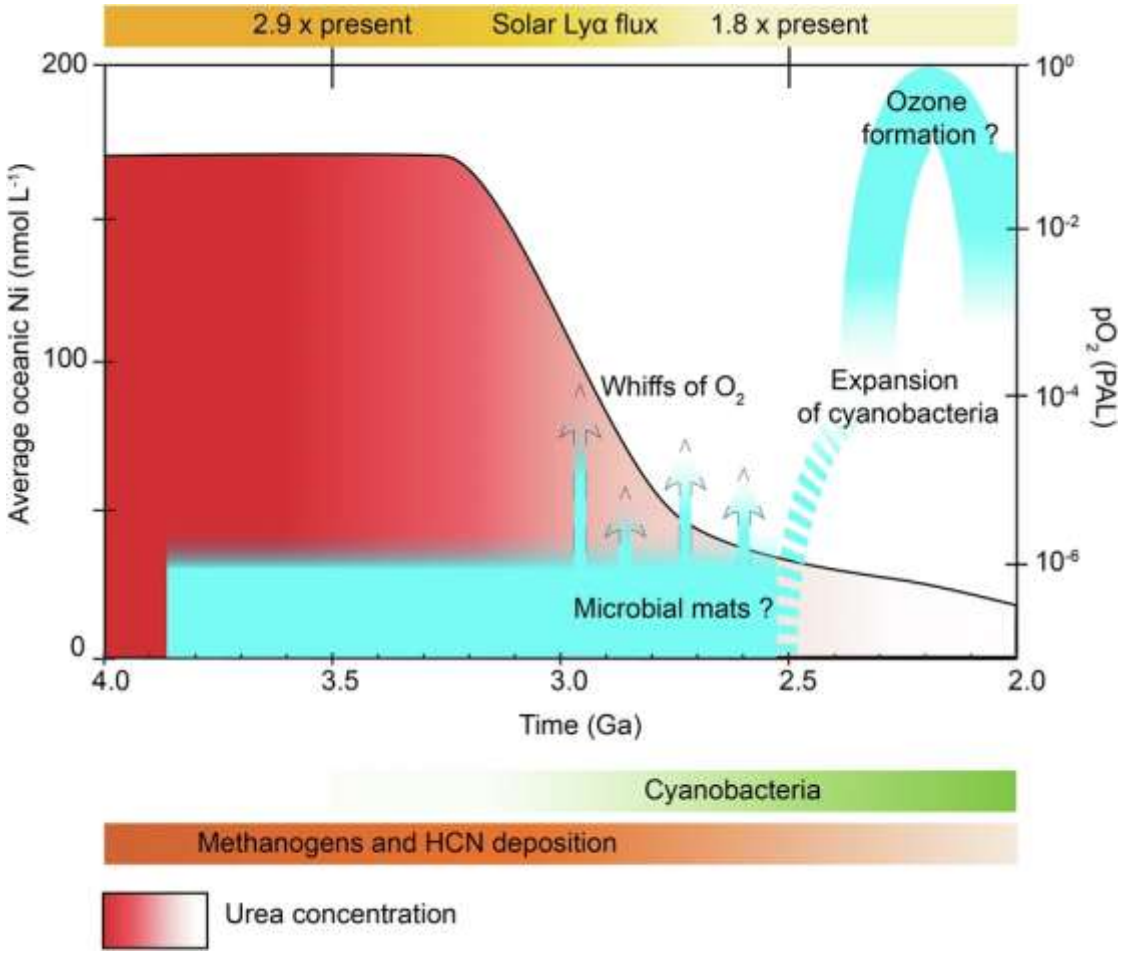
https://coptic-treasures.com/

المياه أحيانًا في البيئات البحرية الضحلة، متأثرةً بالتغيرات الزمنية والمكانية في التوافر الحيوي لليوريا. وقد تكون هذه الظاهرة قد حدثت حتى في ظل مستويات عالية من اليوريا، كما أظهرت تجاربنا على نمو البكتيريا على أطباق الآجار. يدعم هذا فكرة أن البكتيريا الزرقاء القديمة كانت تعيش في المقام الأول ككائنات ملتصقة وليست كائنات طافية حرة.

في الواقع، هناك أدلة على وجود أنواع من البكتيريا الزرقاء القاعية القديمة التي تُشكّل طبقات ميكروبية، والتي ربما ساهمت بكميات صغيرة ولكنها ذات دلالة إحصائية من الأكسجين على مستوى العالم قبل حدث الأكسدة العظيم، في وقت كانت فيه مستويات اليوريا لا تزال مرتفعة بما يكفي لتثبيط النمو غير الملتصق (العوالق). مع استمرار انخفاض تركيزات اليوريا (على سبيل المثال، إلى 4 ملي مول/لتر)، ربما سمح ذلك بحدوث ازدهار مؤقت وعابر للطحالب الزرقاء العائمة، مما زاد بدوره من تراكم المواد العضوية. بشكل عام، يمكن لهذه السيناريوهات أن تفسر الأدلة على وجود ظروف مؤكسجة عابرة وموضعية سبقت حدث الأكسدة العظيم (أي قبل 3 إلى 2.5 مليار سنة). ومن المرجح أن فترات نمو الطحالب الزرقاء الممتدة، المصحوبة بزيادة الكتلة الحيوية، أصبحت أكثر احتمالًا مع انخفاض تركيزات اليوريا إلى أقل من 4 ملي مول/لتر تقريبًا، مما ساهم في نهاية المطاف في زيادة إنتاج الأكسجين وبداية حدث الأكسدة العظيم.

بعد بداية حدث الأكسدة العظيم، ربما سهّل الارتفاع التدريجي في مستويات الأكسجين أكسدة أيونات الأمونيوم، مما حدّ من إنتاج اليوريا. بالإضافة إلى ذلك، فإن تكوّن طبقة الأوزون نتيجة لتراكم الأكسجين في الغلاف الجوي قد يكون قلّل من كمية الأشعة فوق البنفسجية من نوع C التي تصل إلى سطح الأرض، مما أدى إلى تثبيط التفاعلات الكيميائية الضوئية اللازمة لإنتاج اليوريا. ومع انخفاض كمية اليوريا المتاحة بفعل هذه العمليات، ازداد معدل استهلاكها من قِبل الكتلة الحيوية الأكبر للبكتيريا الزرقاء، مما حدّ في نهاية المطاف من النيتروجين المتاح بيولوجيًا. وقد يكون هذا قد خلق ضغطًا تطوريًا للبحث عن مصادر نيتروجين بديلة، وربما دفع إلى تطور تثبيت النيتروجين عبر إنزيم النيتروجيناز أو تكيّف إنزيم النيتروجيناز/ديتوكسياز الموجود في البكتيريا الزرقاء. إذا كان إنزيم النيتروجيناز قد تطوّر بالفعل في البكتيريا الزرقاء، فربما يكون نشاطه قد انخفض بسبب امتصاص اليوريا بشكل تفضيلي. وبمجرد استنفاد مصدر اليوريا، كان من الممكن أن يستأنف نشاطه؛ إلا أنه ربما يكون قد تأثر بالأكسجين في غياب آليات الحماية. وقد يكون هذا الوضع قد أدى إلى ركود الأكسجين لفترة طويلة خلال معظم حقبة ما قبل الكامبري.

https://coptic-treasures.com/



يمثل المنحنى المتصل متوسط تركيز النيكل المذاب في المحيط (نانومول/لتر). يشير اللون الأزرق الفاتح إلى مستوى الأكسجين في الغلاف الجوي الحالي. أما التغيرات في تركيز اليوريا فتُشار إليها بتدرج لوني أحمر (يمثل اللون الأحمر الداكن تركيزات أعلى).

حدث الأكسدة العظيم والأرض المتجمدة

كان غلاف الأرض الجوي في بداياتها يحتوي على كمية ضئيلة من الأكسجين الجزيئي. وحدثت زيادة ملحوظة في نسبة الأكسجين قبل حوالي 2.4 إلى 2.0 مليار سنة، فيما يُعرف بحدث الأكسدة العظيم. ومن المعروف أن ارتفاعًا كبيرًا في التركيب النظائري للكربون في الكربونات الرسوبية قد حدث قبل 2.2 إلى 2.0 مليار سنة (حدث لوماغوندي-جاتولي)، مما يُشير إلى زيادة معدل دفن الكربون العضوي، أي زيادة صافي إنتاج الأكسجين. وحدثت ظاهرة الأرض المتجمدة في حقبة البروتيروزويك (التجلد العالمي) قبل 2.3 إلى 2.2 مليار سنة، بالتزامن تقريبًا مع حدث الأكسدة العظيم. وبناءً على ذلك، تم اقتراح وجود علاقة سببية بين حدث الأكسدة العظيم وظاهرة الأرض المتجمدة. ويُحتمل أن تكون ظاهرة الأرض المتجمدة قد نتجت عن زيادة في نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي، لأنها كانت ستؤدي إلى انخفاض كبير في مستوى غاز الميثان في الغلاف الجوي، مما يُقلل من تأثير الاحتباس الحراري للغلاف الجوي ويُسبب التجلد العالمي. من جهة أخرى، ربما يكون انتهاء حدث الأرض

https://coptic-treasures.com/

الجليدية قد حفّز إنتاج كميات كبيرة من الأكسجين، إذ لا بد أن المناخ شديد الحرارة (حوالي 60 درجة مئوية) الذي أعقب انتهاء هذا الحدث قد زاد بشكل ملحوظ من إمداد المحيطات بالفوسفات، مما أدى إلى ازدهار واسع النطاق للبكتيريا الزرقاء، التي يُحتمل أنها أنتجت كميات كبيرة من الأكسجين. وقد يكون التحول الذي طرأ على مستويات الأكسجين في الغلاف الجوي بعد العصر الجليدي قد عزز تحولاً بيئياً وابتكارات بيولوجية للحياة المعتمدة على الأكسجين[1].

يشكل الأكسجين الجزيئي (O_2) اليوم 20.9% من حجم الغلاف الجوي. مع ذلك، لم يكن تركيزه في الغلاف الجوي على الأرض في بداياتها يتجاوز 10^{-12} ضعف مستواه الحالي. يُعتقد أن البكتيريا الزرقاء أنتجت الأكسجين وغيرت حالة الأكسدة والاختزال في بيئة سطح الأرض. لا شك أن الانتقال من بيئة لاهوائية إلى بيئة هوائية قد أثر بشكل كبير على الحياة وتطورها. هذه إحدى القضايا المحورية المتعلقة بالتطور المشترك للأرض والحياة.

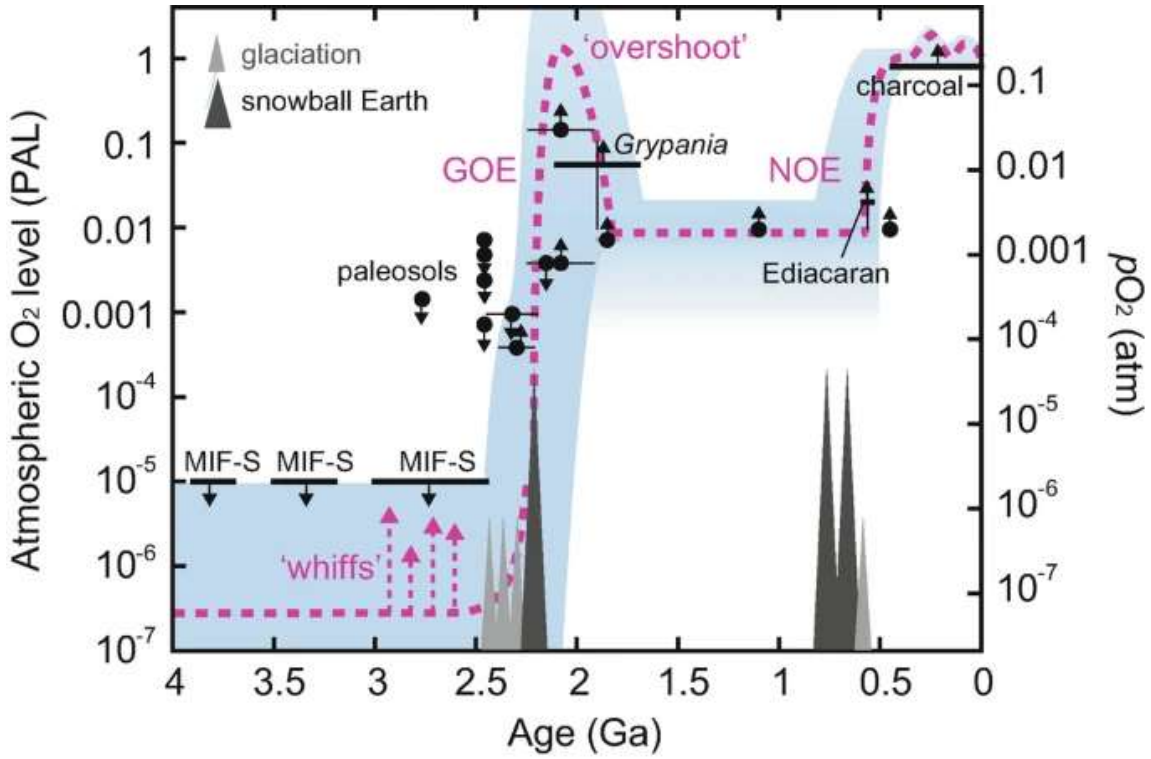
لطالما كان تطور مستوى الأكسجين في الغلاف الجوي موضع نقاش لعقود طويلة. استنادًا إلى السجل الجيولوجي والتحليلات الجيوكيميائية، تم التوصل إلى وجود حدثين لارتفاع ملحوظ في مستوى الأكسجين في الغلاف الجوي عبر تاريخ الأرض: أحدهما يُعرف باسم "حدث الأكسدة العظيم" (GOE)، والذي حدث في حقبة ما قبل الكامبري (الباليوبوروتيروزويك Paleoproterozoic) وحدثان رئيسيان وقعا قبل 2.4 و2.0 مليار سنة (Ga)، والآخر يُعرف باسم "حدث أكسجة العصر النيوبروتيروزويNeoproterozoic " (NOE)، والذي حدث خلال العصر النيوبروتيروزوي، قبل حوالي 800-600 مليون سنة (Ma). ارتفعت مستويات الأكسجين في الغلاف الجوي من أقل من 10^{-5} إلى 0.001-0.01 من المستوى الحالي للضغط الجوي خلال حدث أكسجة العصر النيوبروتيروزوي، مما أدى إلى أكبر تغير بيئي في تاريخ الأرض. ولا يزال سبب ارتفاع مستويات الأكسجين في الغلاف الجوي في ذلك الوقت غير معروف، على الرغم من وجود العديد من الفرضيات المطروحة حتى الآن.

من أنواع التغيرات البيئية الأخرى التي ربما كان لها تأثير كبير على تطور الحياة، التجلدات العالمية، أو ما يُعرف بظاهرة "الأرض المتجمدة". خلال هذه الظاهرة، انخفضت درجة حرارة سطح الأرض إلى -40 درجة مئوية، وغطى الجليد سطحها بالكامل. كانت الحياة ستواجه أزمة حقيقية لأن الماء السائل ضروري للحياة. من المعروف أن ظاهرة الأرض المتجمدة حدثت ثلاث مرات على الأقل في تاريخ الأرض: بين 2.3 و2.2 مليار سنة، وبين 720 و663 مليون سنة، وبين 639 و635 مليون سنة. ومن المثير للاهتمام أن الارتفاعات المفاجئة في مستويات الأكسجين في الغلاف الجوي تزامنت تقريبًا مع ظاهرة الأرض المتجمدة، سواء في حقبة ما قبل الكامبري القديمة أو حقبة ما قبل الكامبري الحديثة. لذا، قد تكون هناك علاقة سببية بينهما. وعلى وجه الخصوص، يُحتمل أن تكون ظاهرة الأرض المتجمدة في حقبة ما قبل الكامبري القديمة ناتجة عن ارتفاع في مستويات

[1] Tajika, E., Harada, M. (2019). Great Oxidation Event and Snowball Earth. In: Yamagishi, A., Kakegawa, T., Usui, T. (eds) Astrobiology. Springer, Singapore

https://coptic-treasures.com/

الأكسجين. بدلاً من ذلك، ربما يكون الارتفاع الكبير في نسبة الأكسجين في الغلاف الجوي قد حدث بسبب حدث الأرض الجليدية في العصر الباليوبوروتيروزوي.



مخطط توضيحي لتغير متوسط درجة حرارة سطح الأرض خلال حدث "الأرض المتجمدة". انخفضت درجة حرارة السطح إلى -40 درجة مئوية عندما غطت الأرض بالكامل بالجليد، ثم ارتفعت تدريجيًا نتيجة لتراكم ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بفعل النشاط البركاني، لتصل إلى 60 درجة مئوية مباشرة بعد ذوبان الجليد بسبب ارتفاع ضغط ثاني أكسيد الكربون (حوالي 0.1 بار) المتراكم في الغلاف الجوي.

الغلاف الجوى خلال العصر الهادى Hadean

خلال عملية تراكم الكواكب، يُرجح أن الغلاف الجوي البدائي للأرض والكواكب الأرضية الأخرى كان يتألف من غازات انجذبت بفعل الجاذبية من السديم الشمسي، وتحديدًا الهيدروجين (H_2) والهيليوم (He). مع ذلك، عندما اصطدمت الكويكبات، سخّنت طاقتها الحركية المادة المتراكمة، مما أدى إلى انبعاث غازات متطايرة مثل الماء (H_2O) وثاني أكسيد الكربون (CO_2) إلى الغلاف الجوي للأرض. من المحتمل أن مصادر الطاقة العالية، مثل القصف الشديد ودرجات الحرارة المرتفعة والنشاط الشمسي، تسببت في هروب الهيدروجين (H_2) إلى الفضاء عبر التدفق الهيدروديناميكي. في هذا التدفق الخارج، خضع ثاني أكسيد الكربون (CO_2) لتحلل ضوئي سريع إلى أول أكسيد الكربون (CO) والأكسجين (O)، مما أدى إلى أكسدة الهيدروجين (H_2) إلى جذر الهيدروكسيل (HO) والماء (H_2O)، وهذا بدوره قلل من معدل فقدان الهيدروجين. ربما يكون الغلاف

https://coptic-treasures.com/

الجوي الثانوي للأرض قد تشكل بفعل انبعاثات بركانية يهيمن عليها ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وغاز النيتروجين (N_2) وبخار الماء (H_2O)، وبالتالي فهو مؤكسد بشكل طفيف[1].

بُذلت بعض الجهود لاستنتاج الغلاف الجوي الثانوي في حقبة الهاديان من حالة الأكسدة والاختزال في الوشاح. أظهرت البيانات التجريبية أنه تحت ضغط عالٍ، يمكن أن يخضع أيون الحديد الثنائي (Fe^{2+}) لتفاعل عدم تناسب إلى أيون الحديد الثلاثي (Fe^{3+}) والحديد المعدني (Fe^0). وقد سمح هذا باقتراح أنه خلال تمايز الأرض، انتقل الحديد المعدني الكثيف (Fe^0) إلى اللب بينما بقي الحديد الثلاثي (Fe^{3+}) في الوشاح. ربما يكون هذا قد زاد من حالة أكسدة الوشاح العلوي وتسبب في تحول الغلاف الجوي المختزل إلى غلاف جوي مؤكسد قليلاً. سمح قياس فاعلية الأكسجين (fO_2) في الصهارة الصهارية، من خلال تحديد الكميات النسبية للحديد في حالات الأكسدة المختلفة داخل معادن مثل الفاياليت [$(Mg,Fe)_2SiO_4$] والماغنيتيت ($Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$) ومقارنتها مع مُخزن الكوارتز-الفاياليت-الماغنيتيت (QFM)، بتقييد حالة الأكسدة والاختزال للصهارة في حقبة الهاديان وتأكيد أنها قد تكون مؤكسدة نسبيًا. من المحتمل أن يكون غلاف الأرض قد تأكسد نسبيًا بعد فترة وجيزة من اصطدام النيزك الذي شكّل القمر، والذي حدث بين 4.50 و4.35 مليار سنة تقريبًا. في ذلك الوقت، ربما يكون انبعاث الغازات المتطايرة، بما في ذلك ثاني أكسيد الكربون (CO_2) الذي كان مذابًا جزئيًا في الغلاف، قد شكّل غلافًا جويًا كثيفًا وعميقًا حول الأرض. في هذا الغلاف الجوي، بدأ ثاني أكسيد الكربون (CO_2) يهيمن على أول أكسيد الكربون (CO)، بينما بدأ الماء (H_2O) يهيمن على الهيدروجين (H_2).

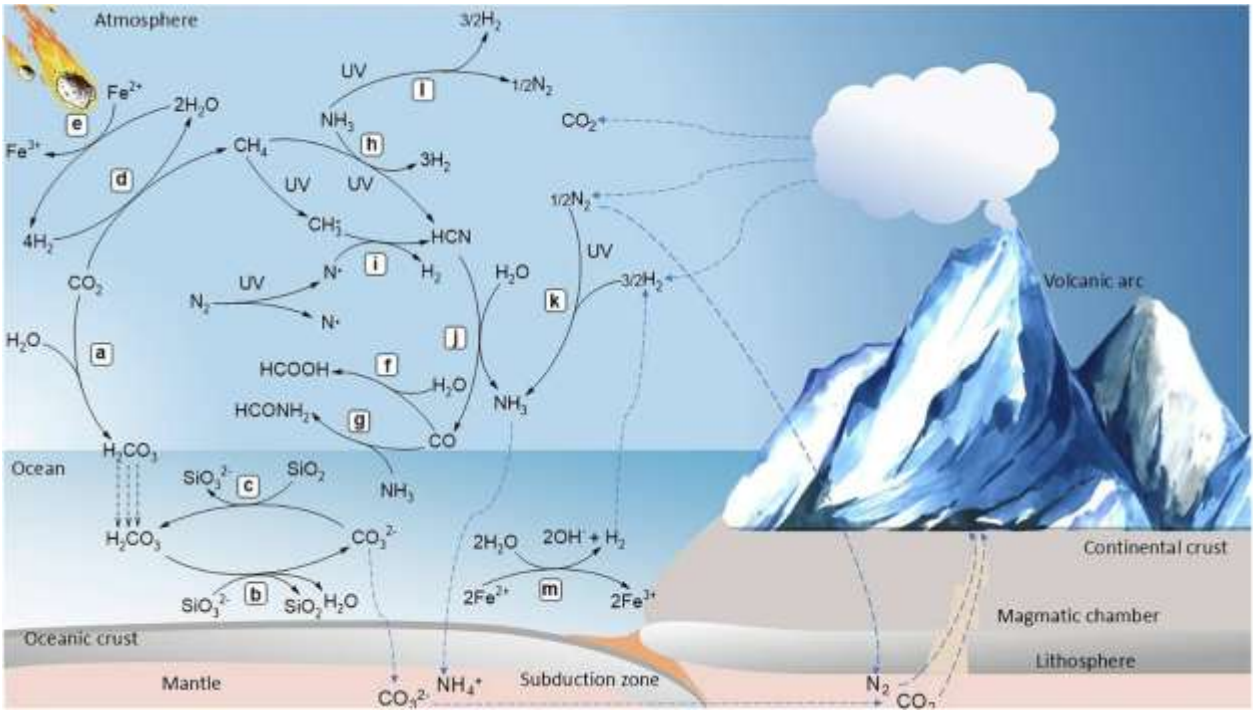
ربما تراوح الضغط الجزئي لثاني أكسيد الكربون (pCO_2) في الغلاف الجوي بين عدة بارات وعشرات البارات، أو حتى وصل إلى 100 بار في حقبة الهاديان المبكرة، قبل أن ينخفض بمرور الوقت. وقد خضع هذا الضغط لسيطرة مجموعة من العمليات المختلفة، بما في ذلك اصطدامات الكويكبات، وإعادة تدوير ثاني أكسيد الكربون إلى الوشاح، وذوبانه في مياه المحيطات، وتفاعلاته مع المعادن، والتفاعلات الكيميائية الضوئية في الغلاف الجوي، والتي أدت إلى اختزال ثاني أكسيد الكربون إلى أول أكسيد الكربون والميثان ومركبات عضوية أخرى. وقد قام سوسي Sossi وزملاؤه بحساب تركيز الأكسجين في سوائل مُبرّدة ذات تركيبات سيليكاتية شبيهة بتركيبات الأرض، وأثبتوا أن حالة الأكسدة والاختزال لمحيط الصهارة على الأرض أنتجت في البداية غلافًا جويًا غنيًا بثاني أكسيد الكربون، والذي تحوّل، مع التبريد وتكثف الماء، إلى غلاف جوي شبيه بغلاف كوكب الزهرة، يهيمن عليه ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. ومع ذلك، وعلى عكس كوكب الزهرة، مع تبريد الأرض، تكثف بخار الماء ليشكل محيطات، مما أدى إلى إزالة ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي، وبالتالي ارتفاع تركيز الأكسجين. لذا، يُحتمل أن يكون باطن الأرض قد اكتسب حالة الأكسدة الحالية في وقت مبكر من حقبة الهاديان، قبل حوالي 3.9 مليار سنة على

[1] Moldogazieva, N.T., Terentiev, A.A., Mokhosoev, I.M. et al. Redox chemistry of early Earth and the origin of life. (2026) Communications Chemistry volume 9, Article number: 143

https://coptic-treasures.com/

الأقل، مما أدى إلى انبعاث غازات متطايرة مؤكسدة مثل الماء وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت من البراكين، بدلاً من الميثان والهيدروجين والأمونيا، إلى الغلاف الجوي للأرض.

على الرغم من أن البيانات الجيوكيميائية تشير إلى أن البراكين لم تُصدر غازات مُختزلة خلال حقبة الهاديان، إلا أن تجارب النمذجة التي أُجريت بدمج بيانات العناصر النزرة من الزركون الموجود في الصخور النارية تُظهر أن القشرة القارية في حقبة الهاديان ربما كانت أكثر اختزالًا من القشرة الحالية، مع أكسدة تدريجية باتجاه بداية حقبة الأركي، حوالي 3.6 مليار سنة. وقد يكون هذا قد ساهم في زيادة النشاط البركاني المُختزل، بينما ساهم انبعاث الغازات من الصهارة البازلتية الساخنة المُختزلة في تكوين الغلاف الجوي الغني بالهيدروجين خلال حقبة الهاديان. وتأتي أدلة إضافية على إمكانية وجود غلاف جوي مُختزل مؤقت خلال حقبة الهاديان من حسابات نظرية تُشير إلى أن اصطدام الكويكبات والنيازك بعد اكتمال تراكم الكواكب ربما تسبب في انبعاث الغازات من مواد الاصطدام، مما أدى إلى تكوين جزء كبير من الغلاف الجوي المبكر. وأظهرت هذه الحسابات أن الغلاف الجوي الناتج عن المقذوفات الناتجة عن الاصطدامات على الأرض المُغطاة بالمحيطات ربما كان غنيًا بالهيدروجين والميثان والأمونيا. قد يكون انبعاث الغازات من المواد الموجودة في النيازك الكوندريتية العادية قد أطلق مواد متطايرة مثل N2 و NH_3 و H_2 و CH_4 بالإضافة إلى كميات كبيرة من الحديد المعدني وكبريتيدات الحديد.



تفاعلات الأكسدة والاختزال ما قبل الحيوية في الغلاف الجوي الهادياني. تشمل دورة الكربون والسيليكات ما يلي: A- ذوبان ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في مياه الأمطار لتكوين حمض الكربونيك (H_2CO_3) الذي يسقط على اليابسة والمحيطات؛ B- تفاعل حمض الكربونيك مع السيليكات (SiO_3^{2-}) لتكوين ثاني أكسيد السيليكون (SiO2) والكربونات (CO_3^{2-})، والتي تُخزن في القشرة المحيطية لإعادة تدويرها إلى الوشاح، ثم تُطلق إلى الغلاف الجوي من خلال النشاط البركاني؛ C- إعادة توليد ثاني أكسيد الكربون من خلال التفاعل بين ثاني أكسيد السيليكون والكربونات. يشمل تثبيت الكربون ما يلي: D- اختزال ثاني أكسيد الكربون إلى الميثان (CH_4) من خلال E- إنتاج الهيدروجين (H_2) من الماء (H_2O) على سطح معادن كبريتيد الحديد التي تعمل

https://coptic-treasures.com/

كمصادر لأيونات الحديدوز المذابة (Fe^{2+})، والتي تتأكسد ضوئيًا إلى أيونات الحديديك (Fe^{3+})في بخار الماء. يتفاعل أول أكسيد الكربون (CO) إما مع الماء (H_2O) لتكوين حمض الفورميك (HCOOH)، أو مع الأمونيا (NH_3) لتكوين الفورماميد ($HCONH_2$). قد يتكون سيانيد الهيدروجين (HCN) إما من خلال تفاعل الميثان (CH_4) مع الأمونيا (NH_3)، أو من خلال تفاعل جذر الميثان •CH_3 مع النيتروجين •N عبر آلية الجذور الحرة. يتفاعل سيانيد الهيدروجين (HCN) بدوره مع الماء (H_2O) لإنتاج أول أكسيد الكربون (CO) والأمونيا (NH_3). يُنتج سيانيد الهيدروجين (HCN) أيضًا من خلال K-تثبيت النيتروجين (N_2) تحت درجات حرارة عالية، ويمكن عزل كليهما في الوشاح الأرضي. يؤدي التحلل الضوئي للأمونيا (NH_3) بواسطة الأشعة فوق البنفسجية إلى إنتاج النيتروجين (N2) والهيدروجين (H_2). يحدث إنتاج الهيدروجين الحراري المائي من خلال أكسدة الماء (H_2O) بواسطة أيونات الحديد الثنائي Fe^{2+} إلى هيدروجين (H_2) يُستخدم لتثبيت النيتروجين (N2) في الغلاف الجوي.

الغلاف الجوي السام للأرض في بداياتها

في بحث أُجري جزئيًا في مصدر الفوتونات المتقدم التابع لوزارة الطاقة الأمريكية، كشف العلماء أن الغلاف الجوي للأرض في بداياته كان يُشبه الغلاف الجوي الموجود على كوكب الزهرة اليوم (97% ثاني أكسيد الكربون، 3% نيتروجين، وبعض بخار الماء)، ولكنه تطور لاحقًا بشكل مختلف بسبب كتلته الأكبر وبعده عن الشمس. تكوّنت كواكب نظامنا الشمسي بفعل جاذبية المواد الكونية التي كانت تدور حول الشمس البدائية. مع ازدياد حجم الأجرام، اصطدمت لتشكل أولًا كويكبات (كواكب صغيرة الحجم، قادرة على الاندماج مع العديد من الكويكبات الأخرى بفعل الجاذبية لتكوين كوكب)، ثم اصطدمت لتشكل كواكب أولية (أجنة كوكبية بحجم القمر). قبل حوالي 4.5 مليار سنة، يُفترض أن جنينًا كوكبيًا بحجم المريخ اصطدم بالأرض البدائية. دارت بعض المواد التي قُذفت للخارج نتيجة هذا الاصطدام حول الأرض، ثم تجمعت في النهاية لتشكل القمر. من المرجح أن هذا الاصطدام قد قذف الغلاف الجوي الأول للأرض إلى الفضاء. كما أدى إطلاق الطاقة الهائلة من الانفجار إلى انصهار الكوكب، تاركًا سطحه مغطى بمحيط من الصهارة، يتكون في معظمه من البيريدوتيت، وهو صخر سيليكاتي يتألف في الغالب من معادن غنية بالحديد والمغنيسيوم، مثل الأوليفين والبيروكسين. يُعتقد أن البيريدوتيت يعكس بدقة تكوين وشاح الأرض، وغالبًا ما تُنقل عينات من وشاح الأرض إلى السطح مع الصهارة المنبعثة أثناء الانفجارات البركانية أو بفعل العمليات التكتونية[1].

مع غليان محيط الصهارة، تصاعدت غازات الهيدروجين والكربون والأكسجين والنيتروجين لتشكل غلافًا جويًا ثانيًا جديدًا. ومع مرور الوقت، بردت الأرض أكثر وتكثف بخار الماء ليشكل المحيطات. امتصت المحيطات ثاني أكسيد الكربون، الذي اندمج جزء منه في القشرة المحيطية ودخل إلى الوشاح العلوي. أدى انخفاض ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى تقليل ظاهرة الاحتباس الحراري، مما جعل الكوكب بيئةً ملائمةً للحياة البدائية. للكشف عن تركيب هذا الغلاف الجوي، من الضروري فهم سلوك الأكسجين في محيط الصهارة. تكشف حالة أكسدة الحديد في المعادن المتبلورة من محيط الصهارة عن الغازات التي تُمثل هذا الغلاف الجوي البدائي على أفضل وجه. عندما يكون الأكسجين متوفراً بكثرة، يرتبط الحديد بنسبة 3:2 (Fe_2O_3) مُنتجاً غلافاً جوياً غنياً ببخار الماء وثاني أكسيد الكربون والنيتروجين. أما في حال نقص الأكسجين، فيرتبط الحديد بنسبة 1:1

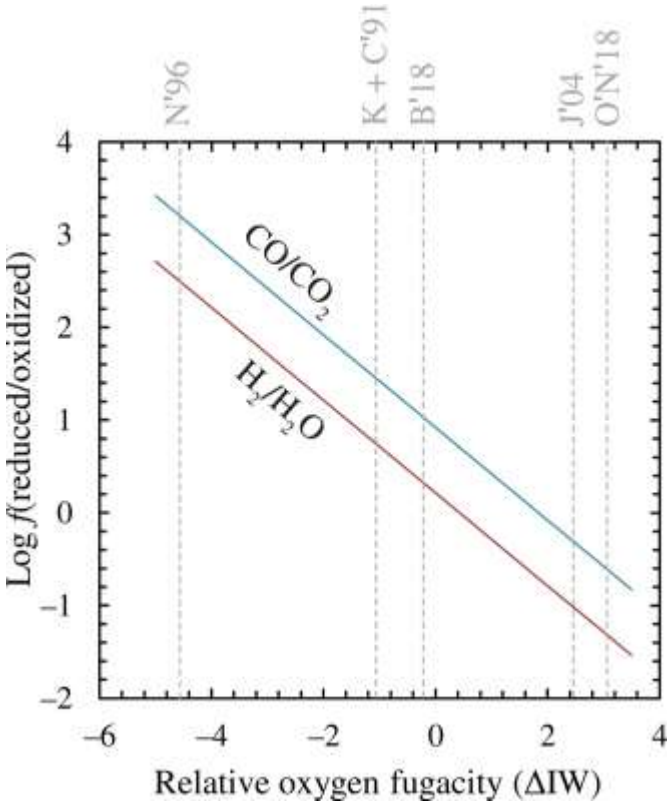
[1] Paolo A. Sossi et al. ,Redox state of Earth's magma ocean and its Venus-like early atmosphere.Sci. Science Advances Nov 2020 Vol 6, Issue 48

https://coptic-treasures.com/

(FeO) مُنتجاً غلافاً جوياً غنياً بالهيدروجين والأمونيا وأول أكسيد الكربون. تقع النسبة الفعلية للأكسجين إلى الحديد في صخور البريدوتيت peridotites الطبيعية في الوشاح الأرضي بين هاتين القيمتين.

في هذه الدراسة، قام باحثون من معهد الجيوكيمياء وعلم الصخور (سويسرا)، ومعهد فيزياء الأرض في باريس (فرنسا)، والجامعة الوطنية الأسترالية، بتحديد تركيب الغلاف الجوي للأرض في بداياتها من خلال إجراء تجارب بالغة الصعوبة. في البداية، قاموا بصهر مسحوق البريدوتيت peridotites في حجرة مُحكمة الإغلاق عند درجة حرارة تُعادل سطح محيط الصهارة البدائي، أي 1900 درجة مئوية. بعد ذلك، قاموا بدفع تيارات من مخاليط غازية مختلفة حول حبة البريدوتيت المنصهرة، مما جعلها تطفو فوق تيار الغاز. كانت النتيجة نموذجًا مصغرًا للأرض المنصهرة يطفو في غلاف جوي رقيق. تُمكّن هذه التقنية - الرفع الديناميكي الهوائي - من التبريد السريع للغاية للحفاظ على تركيب الصهارة على أفضل وجه. ثم حدد الفريق نسبة Fe_3+/Fe_2+ في الزجاج باستخدام مطيافية امتصاص الأشعة السينية القريبة من حافة K للحديد (XANES). وبالتعاون مع زملاء من جامعة شيكاغو، جمع الباحثون هذه الأطياف في خط شعاع GeoSoilEnviroCARS 13-ID-E في مُسرّع الفوتونات المتقدم (APS). وقد وُجد أن تركيبة غازية واحدة فقط - غنية بثاني أكسيد الكربون مع قليل من النيتروجين - تُعيد تكوين نسبة أكاسيد الحديد الموجودة في صخور البريدوتيت في الوشاح.

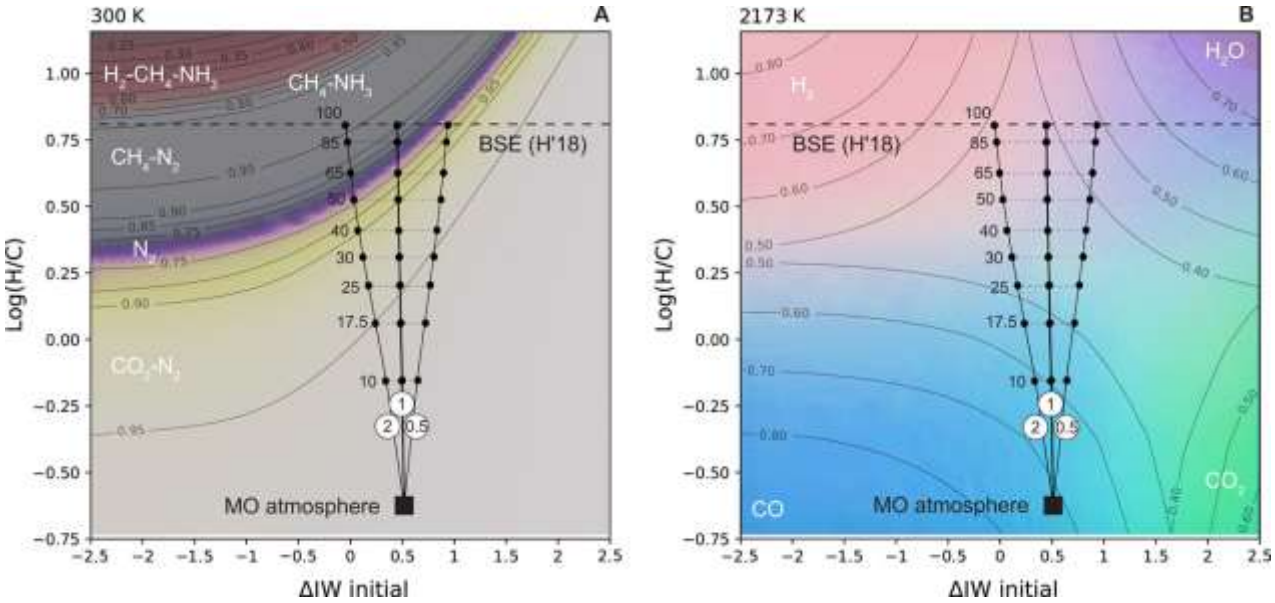
يُقدّم هذا البحث استنتاجين هامين. أولًا، على الرغم من أن الأرض والزهرة والمريخ كانت تمتلك أغلفة جوية متشابهة في الماضي، فإن الاختلافات في أغلفتها الجوية الحالية تعود إلى اختلاف كتلها ومسافاتها عن الشمس. فالزهرة، الأقرب إلى الشمس، لم تبرد بما يكفي لتكثيف بخار الماء وتكوين المحيطات، مما ترك ثاني أكسيد الكربون في غلافها الجوي وأدى إلى ظاهرة الاحتباس الحراري الجامح. أدى انخفاض جاذبية المريخ إلى انخفاض الضغط الجوي. ويُخزَّن الماء الموجود عليه في غطائه الجليدي القطبي. ثانيًا. ويعلم العلماء الآن أن خليط الغازات المستخدم كان سيكون أكثر دقة لو احتوى على ثاني أكسيد الكربون والنيتروجين بدلًا من الميثان والأمونيا.



تأثير فاعلية الأكسجين على الوفرة النسبية لأنواع الغازات الرئيسية. نسب H_2/H_2O (باللون الأحمر) وCO/CO_2 (باللون الأزرق) المحسوبة لغاز مثالي عند 2173 كلفن كدالة لفاعلية الأكسجين مُعبرًا عنها بالنسبة إلى ΔIW. هذه النسب مستقلة عن نسبة H/C المولية في الطور الغازي، وكذلك ضغطه الكلي (بشرط أن يظل مثاليًا)،

https://coptic-treasures.com/

وتتحكم بها فقط درجة الحرارة (التي تحدد نقطة التقاطع، المقابلة للوغاريتم ثابت اتزان التفاعل) و0.5(fO_2) (حيث يمثل الأس ميل الخط). تشير الخطوط الرمادية المتقطعة إلى fO_2 لسائل البيريدوتيت ذي التركيب BSE ونسبة $Fe_3+/\Sigma Fe$ تساوي 0.037، محسوبة وفقًا لمعاملات نموذجية مختلفة للعلاقة بين fO_2 وFe_3+/Fe_2+ في مصهورات السيليكات.



تأثيرات فاعلية الأكسجين ونسبة الهيدروجين إلى الكربون على أنواع الغازات في الغلاف الجوي. أُجري ما يقارب 21000 عملية تقليل طاقة غيبس الحرة باستخدام برنامج FactSage 7.3، عند ضغط 100 بار ودرجتي حرارة (A) 300 كلفن و(B) 2173 كلفن. تم حساب الكسور المولية لأنواع الغازات باستخدام الاستيفاء الخطي على شبكة، مع متغيرات (H/C) log و$\log fO_2$ مُعبر عنها نسبةً إلى مُخزن IW. الألوان المعروضة هي مزيج بين المكونات النهائية في (A): أخضر فاتح = ثاني أكسيد الكربون؛ بنفسجي = نيتروجين؛ رمادي = ميثان؛ أبيض = أمونيا؛ أحمر = هيدروجين، حيث تُشير خطوط الكفاف إلى الكسور المولية لثاني أكسيد الكربون أسفل نطاق النيتروجين والميثان أعلاه؛ وفي (B): أحمر = هيدروجين؛ بنفسجي = ماء؛ أخضر = ثاني أكسيد الكربون؛ أزرق = أول أكسيد الكربون. تُظهر خطوط الكفاف الكسور المولية لكل نوع مُدرج في كل زاوية. تظهر فوق هذه الحسابات خطوط توضح نسبة لوغاريتم الهيدروجين إلى الكربون في الغلاف الجوي (-0.66) وΔIW (+0.5) المحسوبة في حالة توازن مع محيط الصهارة الأرضية عند درجة حرارة 2173 كلفن، مع نسبة $Fe3+/\Sigma Fe = 0.037$. وتُعرض نماذج إطلاق غاز الهيدروجين (المنحنيات السوداء) لثلاث نسب مختلفة من H2/H2O، مُدرجة قيمها في الدوائر البيضاء. تشير الأرقام بجوار الخطوط الأفقية المتقطعة إلى النسبة المئوية للهيدروجين المُطلق من تركيبة BSE (H'18). تُمثل BSE حدًا أعلى صارمًا لأنها تُهمل الذوبانية الضئيلة للهيدروجين في المعادن الجافة اسميًا و/أو عدم كفاءة إطلاق الغاز.

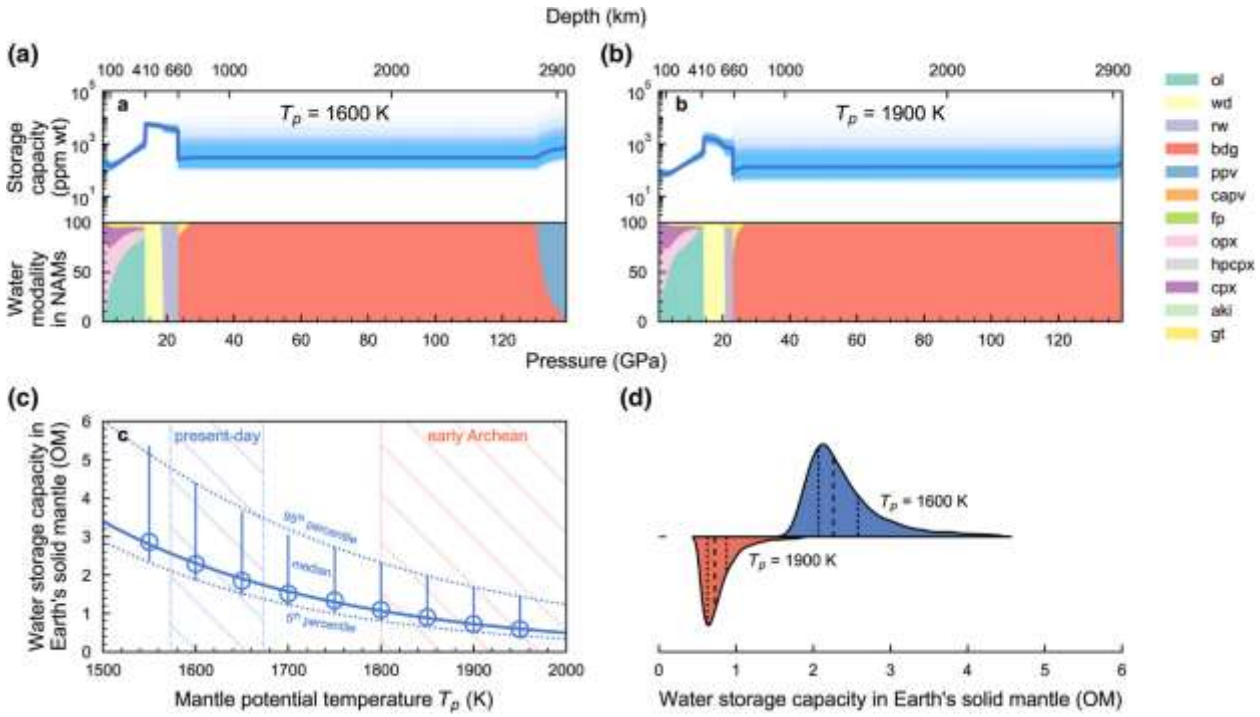
كانت الأرض القديمة عالماً مائياً

على مر العصور، ارتفعت وانخفضت مستويات سطح البحر تبعًا لتغير درجات الحرارة، ولكن كان يُفترض دائمًا أن إجمالي المياه السطحية للأرض ثابت. والآن، تتزايد الأدلة على أن محيطات الكوكب كانت تحوي قبل نحو 3 إلى 4 مليارات سنة ما يقارب ضعف كمية المياه الحالية، وهي كمية كافية لغمر قارات ما فوق قمة جبل إيفرست. ربما يكون هذا الفيضان قد حفّز حركة الصفائح التكتونية وجعل نشأة الحياة على اليابسة أكثر صعوبة.

يُعتقد أن الصخور الموجودة في الوشاح الحالي، وهو الطبقة الصخرية السميكة أسفل القشرة الأرضية، تخزن في تركيبها المعدني ما يعادل محيطًا من الماء أو أكثر. ولكن في بدايات تاريخ الأرض، كان الوشاح، بفعل الإشعاع، أشد حرارة بأربعة أضعاف.

https://coptic-treasures.com/

وقد أظهرت دراسات حديثة باستخدام مكابس هيدروليكية أن العديد من المعادن لن تتمكن من الاحتفاظ بنفس كمية الهيدروجين والأكسجين عند درجات حرارة وضغوط الوشاح. يقول جونجي دونغ، طالب الدراسات العليا في فيزياء المعادن بجامعة هارفارد، والذي قاد نموذجًا، استنادًا إلى تلك التجارب المخبرية، "يشير ذلك إلى أن الماء كان موجودًا في مكان آخر، وأن الخزان الأكثر ترجيحًا هو السطح". ويقول مايكل والتر، عالم الصخور التجريبي في مؤسسة كارنيجي للعلوم، إن الورقة البحثية منطقية بديهيًا، "إنها فكرة بسيطة قد يكون لها آثار مهمة"[1].



سعة تخزين الماء في الوشاح الصلب للأرض تبعًا لدرجة الحرارة. (a, b) في اللوحات العلوية، تمثل المنحنيات الزرقاء السميكة ملامح سعة تخزين الماء الكلية على طول منحنى حراري للوشاح عند (a) T_p = 1600 كلفن و(b) T_p = 1900 كلفن، والتي حُسبت باستخدام أفضل معلمات مُلائمة مُدرجة في الجدولين S4 وS5. تمثل المنحنيات الزرقاء الفاتحة 104 عينات في مجموعة تمثيلية من محاكاة مونت كارلو. في اللوحات السفلية، تظهر مساهمات كل من NAMs في سعة تخزين الماء الكلية. (c) سعة تخزين الماء في وشاح الأرض كدالة لدرجة الحرارة Tp. تمثل الدوائر الزرقاء المفتوحة والمنحنى الأزرق السميك متوسطات 104 محاكاة مونت كارلو لسعات تخزين الماء الكلية في الوشاح عند كل درجة حرارة T_p. تمثل أشرطة الخطأ المئين الخامس والخامس والتسعين لكل توزيع. تمثل المستطيلات المتقطعة النطاقات المُقدرة لدرجات حرارة الوشاح الكامنة في الوقت الحاضر (الأزرق) وفي بداية العصر الأركي (الأحمر). تنخفض سعة تخزين الماء في الوشاح بشكل ملحوظ مع ارتفاع درجة الحرارة، وذلك بسبب اعتماد سعة تخزين الماء في طبقات الوشاح غير المتجانسة (NAMs) بشكل كبير على درجة الحرارة. (d) تم رسم توزيعات وفروقات سعة تخزين الماء في الوشاح، الناتجة عن أخذ عينات مونت كارلو، على شكل مخططات كمانية. يوضح كل مدرج تكراري التوزيع الإحصائي لسعات تخزين الماء الكلية المأخوذة من العينات. تمثل الخطوط الرأسية المتقطعة والمنقطة الوسيط والمدى الربيعي، على التوالي، لدرجة حرارة 1600 كلفن (أعلى، أزرق) أو T_p = 1900 K كلفن (أسفل، أحمر).

[1] Dong, J., Fischer, R. A., Stixrude, L. P., & Lithgow-Bertelloni, C. R. (2021). Constraining the volume of Earth's early oceans with a temperature-dependent mantle water storage capacity model. American Geophysical Union AGU Advances, 2, e2020AV000323

https://coptic-treasures.com/

يخزن معدنان موجودان في أعماق الوشاح معظم مياه الأرض اليوم: الوادسلييت والرينغوووديت، وهما نوعان من معدن الأوليفين البركاني يتكونان تحت ضغط عالٍ. تشكل الصخور الغنية بهذين المعدنين 7% من كتلة الكوكب، ورغم أن الماء لا يمثل سوى 2% من وزنها اليوم، إلا أن "القليل يتراكم ليصبح كثيرًا"، كما يقول ستيفن جاكوبسن، عالم المعادن التجريبي في جامعة نورث وسترن. وقد قام جاكوبسن Jacobsen وزملاؤه بتحضير هذين المعدنين الوشاحيين عن طريق ضغط مساحيق الصخور إلى عشرات الآلاف من الأجواء وتسخينها إلى 1600 درجة مئوية أو أكثر. وقد جمع فريق دونغ نتائج التجارب ليُظهر أن الوادسلييت wadsleyite والرينغوووديت ringwoodite يحتفظان بكمية أقل من الماء عند درجات حرارة أعلى. علاوة على ذلك، يتوقع الفريق أنه مع برودة الوشاح، ستصبح هذه المعادن نفسها أكثر وفرة، مما يزيد من قدرتها على امتصاص الماء مع تقدم عمر الأرض.

كان العالم عبارة عن عالم مائي بدون قارات على الإطلاق

ولا تُعد هذه التجارب وحدها التي تشير إلى وجود كوكب محاط بالماء. يقول بنجامين جونسون، عالم الجيوكيمياء في جامعة ولاية أيوا: "هناك أدلة جيولوجية واضحة للغاية". تشير تركيزات التيتانيوم في بلورات الزركون التي يبلغ عمرها 4 مليارات عام من غرب أستراليا إلى أنها تشكلت تحت الماء. كما أن بعض أقدم الصخور المعروفة على وجه الأرض، وهي تكوينات عمرها 3 مليارات عام في أستراليا وغرينلاند، هي بازلت وسائدي، وهي صخور منتفخة لا تتشكل إلا عندما تبرد الصهارة تحت الماء.

يقدم بحثٌ أجراه جونسون وبوسويل وينغ Boswell Wing ، عالم الجيولوجيا الحيوية في جامعة كولورادو بولدر، مزيدًا من الأدلة. فقد وُجدت عيناتٌ من قطعةٍ من القشرة المحيطية عمرها 3.24 مليار سنة، متبقية على البر الرئيسي لأستراليا، أغنى بكثير بنظيرٍ ثقيلٍ للأكسجين من المحيطات الحالية. ونظرًا لأن الماء يفقد هذا الأكسجين الثقيل عندما يتفاعل المطر مع القشرة القارية لتكوين الطين، فإن وفرته في المحيط القديم تشير إلى أن القارات كانت بالكاد قد ظهرت في ذلك الوقت، كما خلص جونسون ووينغ. ويشير جونسون إلى أن هذه النتيجة لا تعني بالضرورة أن المحيطات كانت أكبر حجمًا، ولكن "من الأسهل أن تكون القارات مغمورةً إذا كانت المحيطات أكبر"[1].

وعلى الرغم من أن المحيط الأكبر كان سيجعل من الصعب على القارات أن تبرز، إلا أنه قد يفسر سبب ظهورها وكأنها كانت في حالة حركةٍ في وقتٍ مبكرٍ من تاريخ الأرض، كما تقول ريبيكا فيشر Rebecca Fischer، عالمة الصخور التجريبية في جامعة هارفارد والمؤلفة المشاركة في دراسة "AGU Advances" الصادرة عن الاتحاد الجيوفيزيائي الأمريكي. ربما ساهمت

[1] Johnson, B.W., Wing, B.A. Limited Archaean continental emergence reflected in an early Archaean 18O-enriched ocean. Nature Geoscience Nat. Geosci. 13, 243–248 (2020)

https://coptic-treasures.com/

المحيطات الأكبر حجمًا في بدء حركة الصفائح التكتونية، حيث تغلغلت المياه في الشقوق وأضعفت القشرة الأرضية، مما أدى إلى تكوين مناطق اندساس تنزلق فيها صفيحة قشرية أسفل أخرى. وبمجرد أن تبدأ الصفيحة المندسة بالانزلاق، كان الوشاح الأكثر جفافًا وقوة بطبيعته سيساعد في ثنيها، مما يضمن استمرار انزلاقها، كما يقول جون كوريناغا، عالم الجيوفيزياء في جامعة ييل. ويضيف: "إذا لم يكن بالإمكان ثني الصفائح، فلا يمكن أن تحدث حركة الصفائح التكتونية".

ويقول توماس كاريل، عالم الكيمياء الحيوية في جامعة لودفيغ ماكسيميليان في ميونيخ، إن الأدلة على وجود محيطات أكبر حجمًا تُشكك في سيناريوهات نشأة الحياة على الأرض. يعتقد بعض الباحثين أنها بدأت في فتحات حرارية مائية غنية بالمغذيات في المحيط، بينما يرجح آخرون أنها بدأت في برك ضحلة على اليابسة، والتي كانت تتبخر باستمرار، مما يخلق بيئة غنية بالمواد الكيميائية. ويزيد وجود محيط أكبر حجمًا من حدة أكبر عائق أمام سيناريو نشأة الحياة تحت الماء: وهو أن المحيط نفسه كان سيخفف تركيز أي جزيئات حيوية ناشئة إلى حد كبير. لكن غمر معظم اليابسة يُعقّد سيناريو البركة الضحلة. يقول كاريل، أحد دعاة فكرة البرك، في ضوء الدراسة الجديدة، إنه يُفكّر الآن في ممدٍ مختلفٍ للحياة: جيوبٌ مائيةٌ محميةٌ داخل الصخور المحيطية التي انبثقت من الجبال البحرية البركانية. ويضيف: "ربما كانت لدينا كهوفٌ صغيرةٌ حدث فيها كل شيء". يُذكّرنا عالم الماء القديم أيضًا بمدى هشاشة تطور الأرض. فمن المُرجّح أن الكوكب كان قاحلًا حتى قصفته الكويكبات الغنية بالماء بعد فترةٍ وجيزةٍ من نشأته. ولو أن الكويكبات رسبت ضعف كمية الماء، أو لو أن غلاف الأرض الحالي كان أقلّ احتياجًا للماء، لما ظهرت القارات، الضرورية جدًا لحياة الكوكب ومناخه. يقول دونغ: "إن الأرض نظامٌ دقيقٌ للغاية. فوجود الكثير من الماء، أو القليل منه، سيُؤدّي إلى انهياره".

"لقد تشكل أصل وتطور الغلاف الحيوي للأرض من خلال التاريخ الفيزيائي والكيميائي للمحيطات." من الورقة البحثية "ظهور محدود للقارات في العصر الأركي ينعكس في محيط غني بنظير الأكسجين-18 في أوائل العصر الأركي". أراد المؤلفون إعادة إطلاق النقاش حول شكل الأرض القديمة، وفتح آفاق جديدة في هذا النقاش. يقول المؤلفان في مقدمة بحثهما: "لقد تشكل أصل وتطور الغلاف الحيوي للأرض بفعل التاريخ الفيزيائي والكيميائي للمحيطات. وتحتفظ الرواسب الكيميائية البحرية والقشرة المحيطية المتغيرة بسجل جيولوجي كيميائي لهذه الأحداث التاريخية. فعلى سبيل المثال، تُظهر الرواسب الكيميائية البحرية زيادة في نسبة نظير الأكسجين-18 إلى نظير الأكسجين-16 بمرور الوقت."

على الرغم من الدراسات الكثيرة التي أُجريت على الرواسب البحرية عبر الزمن، إلا أن مؤلفي هذه الدراسة ركزوا على القشرة الأرضية القديمة. احتوت المحيطات القديمة على أنواع مختلفة من الأكسجين ترسبت لاحقًا في القشرة الأرضية. جمع العلماء أكثر من 100 عينة من الصخور القديمة وحللوها بحثًا عن نظيرين للأكسجين: الأكسجين-16 والأكسجين-18. كان هدفهم تحديد النسبة المئوية لكل نظير في القشرة الأرضية القديمة، لمقارنتها بالنسب الموجودة في الرواسب.

https://coptic-treasures.com/

أظهرت نتائجهم وجود كمية أكبر من الأكسجين-18 في القشرة الأرضية عند تشكلها قبل 3.2 مليار سنة، مما يعني أن المحيط في ذلك الوقت كان يحتوي على كمية أكبر من الأكسجين-18. ويقول الباحثان إن هذا يعني أنه عند تشكل تلك القشرة، لم تكن هناك قارات. ويعود ذلك إلى أن القارات، عند تشكلها، تحتوي على طين، وهذا الطين كان سيمتص الأكسجين-18 الأثقل. لذا، لو كانت هناك قارات قبل 3.2 مليار سنة، لكانت عينات القشرة الأرضية التي تم جمعها تحتوي على كمية أقل من الأكسجين-18. ويخلص البحث إلى أن محيطات الأرض مرت بمرحلتين متميزتين: الأولى قبل تشكل القارات، والثانية بعد تشكلها. وقد خضعت الرواسب الكيميائية البحرية لدراسات مكثفة في محاولة لفهم كيفية تشكل القارات على الأرض القديمة. وكما ورد في الدراسة، تشمل هذه الرواسب القديمة "الكربونات والفوسفات والسيليكا الميكروكريستالية وأكاسيد الحديد. وبما أن هذه المعادن تتشكل مباشرة من المواد المائية، فإنها تعكس نسبة الأكسجين-18 في الماء الذي تتواجد فيه". تُشبه الرواسب سجلاً تاريخياً للأرض في ذلك الوقت، وتُظهر الرواسب الأقدم ارتفاعاً مطرداً في قيم الأكسجين-18 عبر الزمن، وصولاً إلى يومنا هذا. لكن هذه الدراسة تُخالف ذلك، إذ يُشير الباحثون إلى انخفاض نسبة الأكسجين-18 في مياه البحر مع مرور الوقت.

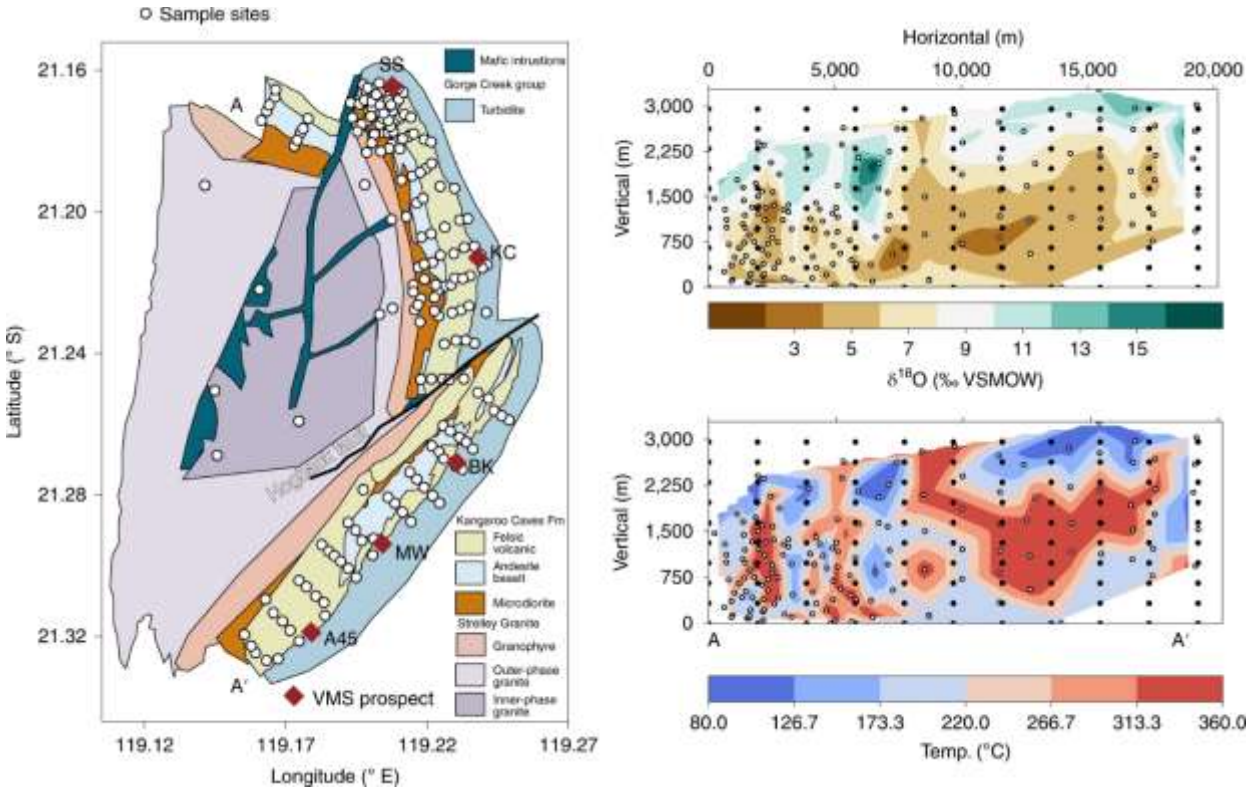
قام عالمان بوضع نموذج للأرض القديمة، موضحين أن "بدء التجوية القارية في أواخر العصر الأركي، بين 3 و2.5 مليار سنة مضت، كان من شأنه أن يُخفض تركيز نظير الأكسجين-18 في محيط العصر الأركي المبكر، الغني بهذا النظير، إلى قيم مشابهة لتلك الموجودة في مياه البحر الحديثة". وبالتالي، لم تبدأ قيم الأكسجين-18 في الاقتراب من القيم الحديثة إلا بعد تشكل القارات. ورغم أن هذه الدراسة تشير إلى احتمال كون الأرض القديمة عالماً مائياً، إلا أن هذا لا يعني أن الكوكب كان خالياً من التضاريس. فربما كانت هناك مساحات من اليابسة بحجم الجزر، أو حتى قارات صغيرة، ذات طبيعة بركانية وصخرية للغاية. لكن أنواع التضاريس الشاسعة التي تغطي الأرض اليوم، الغنية بالتربة وذات السلاسل الجبلية الشاهقة، ربما لم تكن موجودة آنذاك. ولو كانت موجودة، لكان محتوى الأكسجين-18 فيها أقرب إلى محتواه الحالي. قال وينغ Wing في بيان صحفي: "لا يوجد في نتائج دراستنا ما ينفي إمكانية وجود قارات صغيرة جدًا بارزة من المحيطات. لكننا لا نعتقد بوجود تكوّن واسع النطاق للتربة القارية كما هو الحال اليوم."

لا يدّعي الباحثون أن دراستهم تُشكّل الدليل القاطع في النقاش الدائر حول نشأة الأرض، بل يشيرون إلى وجود أسباب أخرى محتملة لنتائجهم. فإذا تشكّلت القارات القديمة بوتيرة أبطأ بكثير من القارات الحديثة، فقد يُفسّر ذلك التباين في نسبة الأكسجين-18. ومن المحتمل أيضًا أن تكون الطينات التي تمتص الأكسجين-18 قد تشكّلت في المحيط نفسه، وليس على سطح القارات. تشير بعض الأدلة إلى أن القارات لم تتشكل إلا عندما فقدت نواة الأرض حرارتها وبردت. على أي حال، لم تتشكل القارات الحديثة إلا بعد العصر الجوراسي. قبل ذلك، غطت قارة غوندوانا العظمى ما يقارب خُمس سطح الأرض. يسعى وينغ إلى دراسة مناطق أحدث من قشرة الأرض لتحديد وقت تشكل القارات الحديثة بدقة أكبر. تتناول هذه الدراسة أيضًا الحياة المبكرة على الأرض، وكيف ومتى تشكلت. عملت محيطات الأرض المبكرة، كما هو الحال في المحيطات الحديثة، كحاجز مناخي،

https://coptic-treasures.com/

حيث "نظمت التفاعلات المناخية بين الغلاف الحيوي والغلاف الجوي والغلاف الأرضي عبر الزمن الجيولوجي، مما ساعد على ضمان صلاحية الكوكب للحياة على المدى الطويل".

رسم العلم صورة لما قد تكون عليه الأرض في بداياتها، وما كانت عليه طبيعة محيطاتها. لكن هذه الصورة لا تزال غير مكتملة. فالأدلة كلها مدفونة في الصخور وعبر الزمن. وبينما نسعى لفهم تغير المناخ هنا على الأرض، ومع تحسن رؤيتنا للكواكب الخارجية، تكتسب كل هذه التساؤلات حول الأرض القديمة والمحيطات والغلاف الحيوي أهمية بالغة. وكما ذكر الباحثون في ورقتهم البحثية: "ربما كانت الأرض في بداياتها، دون قارات ناشئة، أشبه بعالم مائي، مما شكل قيدًا بيئيًا هامًا على نشأة الحياة وتطورها على الأرض، فضلًا عن إمكانية وجودها في أماكن أخرى". وأضاف وينغ: "إن تاريخ الحياة على الأرض يتتبع البيئات المتاحة. فإذا كان لديك عالم مائي، أي عالم مغطى بالمحيطات، فلن تجد بيئات جافة متاحة".



على اليسار: خريطة جيولوجية مُغطاة بمواقع أخذ العينات لتحديد نظائر الأكسجين. قياسات نظائر الأكسجين في الصخور الكاملة مأخوذة من عملية الفلورة باستخدام قنبلة النيكل. تمثل مناطق التكوّن المحتملة للصخور البركانية الكبريتية الضخمة (المعينات الحمراء) مناطق التصريف المُستنتجة للخلايا الحرارية المائية: ينابيع الكبريت (SS)، كهوف الكنغر (KC)، بريكرز (BK)، مان أو وور (MW)، والشذوذ 45 (A45). على اليمين: المقاطع العرضية المُعاد بناؤها لنظائر الأكسجين ودرجة الحرارة تمتد من الشمال (A) على اليسار إلى الجنوب (A') على اليمين، وتبدأ من قاعدة الكتلة البركانية. تمثل النقاط البيضاء في جميع اللوحات مواقع أخذ العينات، بينما تمثل النقاط السوداء في المخططات الفرعية على اليمين زوايا مربعات الشبكة المستخدمة في عكس البيانات.

https://coptic-treasures.com/

تشكل الستروماتوليت في البحيرات الحرارية المائية

عندما تراكم الأكسجين الحر في الغلاف الجوي للأرض خلال حدث الأكسدة العظيم، تغير مسار الحياة على الأرض إلى الأبد. فقد خلق ذلك مسارًا جديدًا للطاقة استغلته الكائنات الحية، واستغلته بالفعل. لم تظهر الحياة المعقدة إلا بوجود الأكسجين، وهي إحدى السمات المميزة للأرض. كانت البكتيريا الزرقاء أول الكائنات الحية التي أنتجت الأكسجين، مما أدى تدريجيًا إلى تكوين غلاف جوي مؤكسد على مدى مليارات السنين. شكلت هذه البكتيريا مجتمعات ميكروبية تُسمى ستروماتوليت stromatolites، وتُعد أحافير الستروماتوليت جزءًا رئيسيًا من سجل الحياة على الأرض. في بحث جديد، عثر علماء من المعهد الكوري لعلوم الأرض والموارد المعدنية (KIGAM) على ستروماتوليت متحجرة في فوهة هابتشون Hapcheon النيزكية، وهي الموقع الوحيد المؤكد لسقوط نيزك في شبه الجزيرة الكورية. على الرغم من أن عمر فوهة هابتشون لا يتجاوز 42,000 عام، إلا أن العثور على الستروماتوليت فيها يُتيح لنا نافذة على بدايات الأرض، عندما كانت البكتيريا الزرقاء الستروماتوليتية تُؤكسج الغلاف الجوي للأرض ببطء[1].

يقول الباحثون: "يُعدّ فهم البيئات القاسية الناتجة عن اصطدام الكويكبات، بما في ذلك النشاط الحراري المائي، أمرًا بالغ الأهمية لاكتساب رؤى ثاقبة حول التطور البيولوجي على الأرض في بداياتها". ويُظهرون في ورقتهم البحثية أن الستروماتوليت قد تشكّلت على هوامش البحيرة الحرارية المائية التي تكوّنت في الفوهة. ويوضحون: "بالنظر إلى تواتر اصطدامات الكويكبات خلال بدايات الأرض، يُمكن أن تكون تجمعات الستروماتوليت في فوهات الاصطدام إحدى واحات الأكسجين النشطة التي أدّت إلى خلق بيئات صالحة للسكن على الأرض في بداياتها". وقد عثر الباحثون على العديد من الستروماتوليت التي يتراوح حجمها بين 10 و20 سم في فوهة هابتشون. يفسرون هذه النتائج على أنها دليل على وجود "واحات أكسجين" مبكرة، وهي مناطق ازدهرت فيها الستروماتوليتات وأنتجت الأكسجين. لم يكن من الممكن وجود هذا النوع من الواحات إلا في فوهات النيازك.

عانت الأرض من فترة طويلة من النشاط النيزكي المكثف خلال فترة القصف الشديد المتأخر (LHB). يُفترض أن هذه الفترة حدثت بين 4.1 و3.8 مليار سنة مضت، وأثرت أيضًا على المريخ والزهرة والقمر. تشير بعض الأبحاث إلى أن فترة القصف الشديد المتأخر امتدت حتى نهاية حقبة الأركي، أي قبل حوالي 2.5 مليار سنة. تُظهر الأبحاث أن هذه الفترة خلّفت عشرات الآلاف من الفوهات على الأرض، أكبرها يبلغ قطرها حوالي 5000 كيلومتر، على الرغم من أن آثار هذه الفوهات قد اختفت منذ زمن بعيد. على الرغم من أن الاصطدامات تحدث بسرعة، إلا أن آثارها تبقى. يكتب الباحثون: "بعد أحداث الاصطدام المدمرة، تمر الفوهات الناتجة عن الاصطدام الأولي بعدة مراحل متميزة، تشمل المرحلة الحرارية الضغطية، والمرحلة الحرارية

[1] Lim, J., Kim, Y., Park, S. et al. Discovery of stromatolite formation in post-impact hydrothermal lacustrine environments and its implications for early Earth. Communications Earth & Environment 7, 334 (2026)

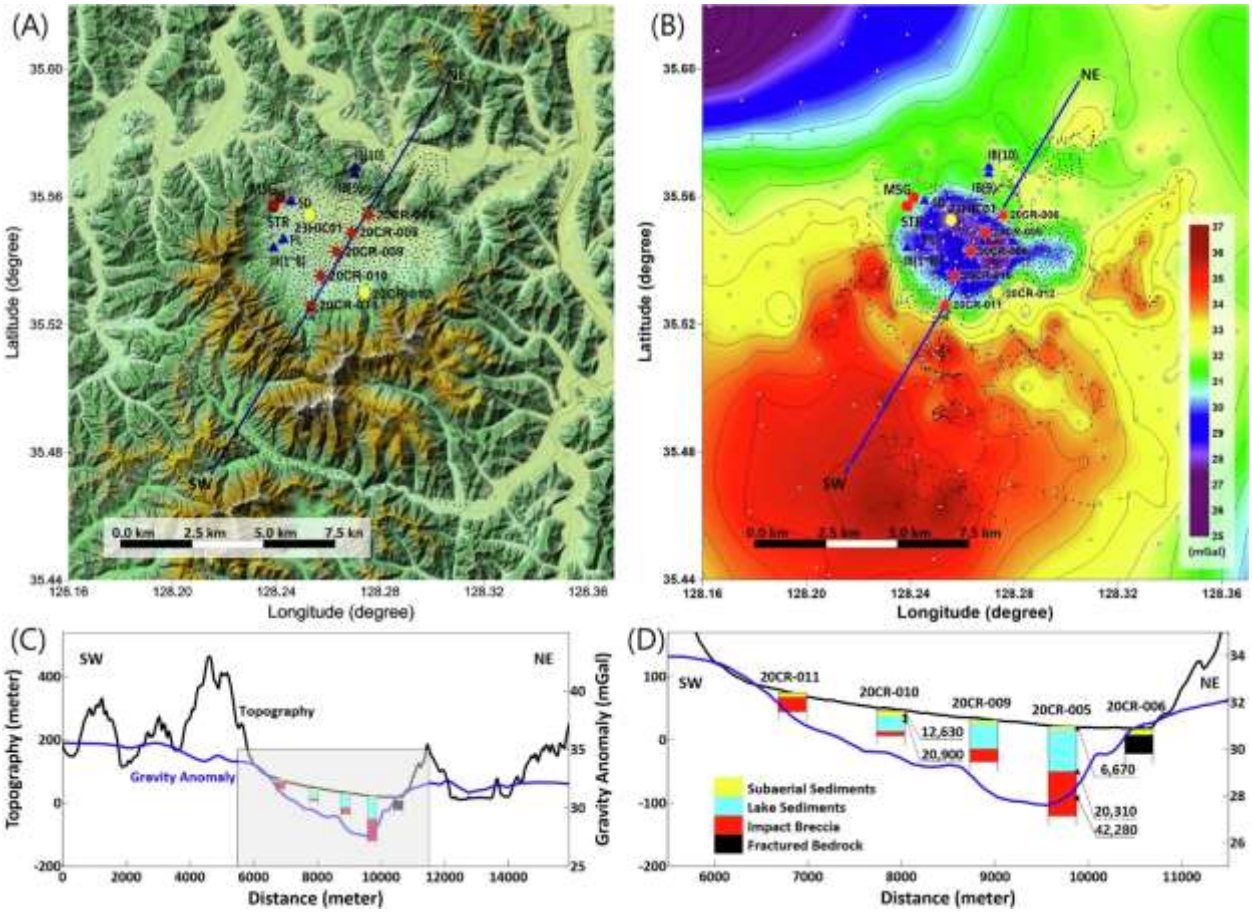
https://coptic-treasures.com/

المائية، ومرحلة التتابع اللاحق للاصطدام". تولد المرحلة الحرارية المائية الحرارة بعدة طرق، منها ترسب الحرارة في الصخور الكامنة بفعل الموجة الصدمية. يوضح الباحثون أن "المرحلة الحرارية المائية يُعتقد أنها تستمر لفترات طويلة في العديد من فوهات الاصطدام"، ويذكرون فوهة ريس في ألمانيا كمثال.

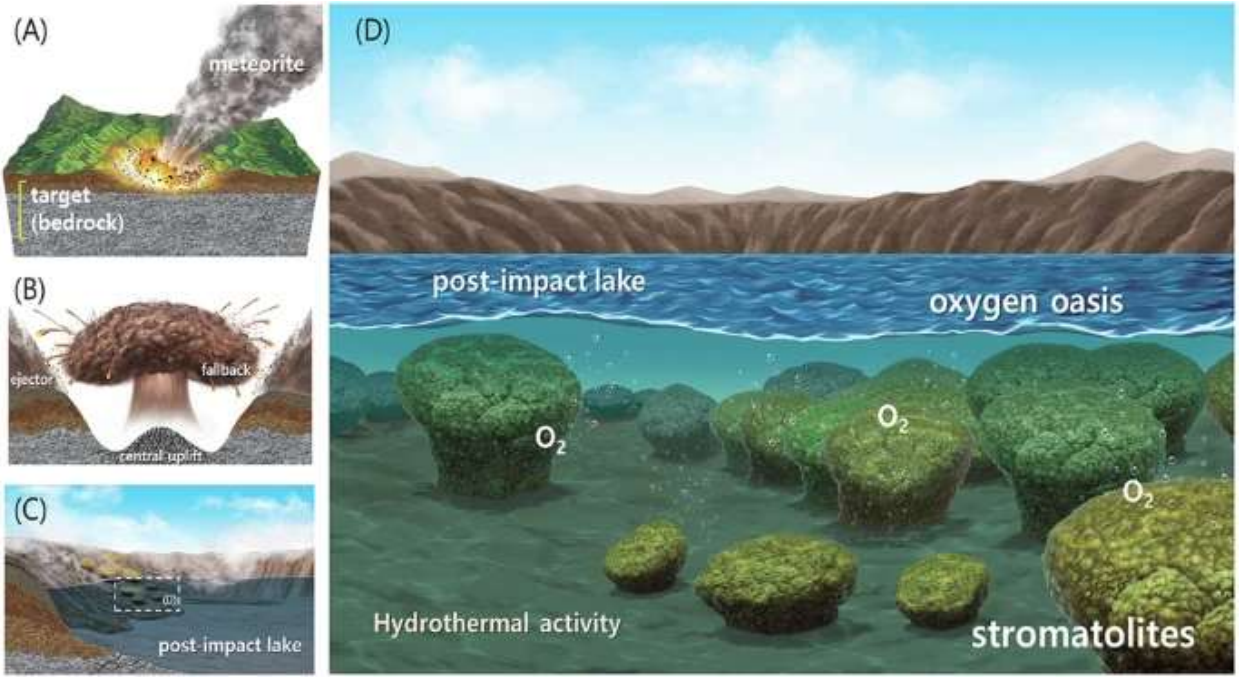
وتُشير بعض الأدلة على وجود هذه الواحات الأكسجينية الناتجة عن الاصطدام إلى الرواسب الموجودة في البحيرة. فقد احتوت الرواسب التي تدفقت إلى البحيرة عقب الاصطدام على كمية كبيرة من المواد النيزكية. فحص الباحثون الرواسب في الستروماتوليت باستخدام تقنية التألق بالأشعة السينية (XRF)، ووجدوا تركيزات أعلى من "المواد الدخيلة"، وهي مواد نشأت في موقع مختلف عن موقع تكوّنها. كما يُشير الباحثون إلى أن فوهة هابتشون وفوهات اصطدامية أخرى تُظهر أدلة على وجود مواد نيزكية في بريشة الاصطدام (IB). وإذا أمكن العثور على مواد نيزكية في الستروماتوليت، فسيعزز ذلك الصلة بين مواقع الاصطدام الحرارية المائية وواحات الأكسجين. كتب الباحثون: "تستدعي هذه النتائج إجراء المزيد من الدراسات حول إمكانية اندماج مواد نيزكية في الستروماتوليتات الموجودة في فوهة هابتشون".

إذا صحّ هذا البحث، فإنّ هذه الفوهات الناتجة عن الاصطدامات كانت بمثابة واحات أكسجين مبكرة ازدهرت فيها الستروماتوليتات، مدعومةً بنشاط حراري مائي هائل تحت الفوهات. وإذا صحّ ذلك، فإنّ تطور الحياة على الأرض مرتبط بالاصطدامات والفوهات الحرارية المائية التي تُخلّفها. وقال المؤلف الرئيسي للدراسة، ليم، في بيان صحفي: "هذا أول دليل شامل يُشير إلى إمكانية تكوّن الستروماتوليتات في البحيرات الحرارية المائية الناتجة عن اصطدامات الكويكبات. وقد تكون هذه البيئات قد وفّرت ظروفًا مواتية للنظم البيئية الميكروبية المبكرة".

https://coptic-treasures.com/



تُظهر هذه الصورة المواقع التي حفر فيها الباحثون أسفل الفوهة لتحديد أنها موقع اصطدام (مُشار إليها بـ CR). كما تُظهر مواقع أخذ عينات الستروماتوليت (STR وMGS)، وموقع رواسب المنحدر (SD)، وموقع حدود البحيرة القديمة (PL)، ومواقع بريشة الاصطدام (IB).



https://coptic-treasures.com/

يُظهر هذا الرسم التوضيحي نيزكًا يصطدم بالأرض، وتكوّن بحيرة في فوهته. وقد أدى هذا الاصطدام إلى نشوء نظام حراري مائي حفّز نموّ الستروماتوليتات المنتجة للأكسجين. وإذا كانت هذه الظاهرة منتشرة على نطاق واسع في بدايات الأرض، فإنّ "واحات الأكسجين" الناتجة عن هذا الاصطدام لعبت دورًا هامًا في حدث الأكسجة العظيم.

كانت الأرض القديمة عالماً مائياً

على مر العصور، ارتفعت وانخفضت مستويات سطح البحر تبعًا لتغير درجات الحرارة، ولكن كان يُفترض دائمًا أن إجمالي كمية المياه السطحية على الأرض ثابت. والآن، تتزايد الأدلة على أن محيطات الكوكب كانت تحتوي، قبل نحو 3 إلى 4 مليارات سنة، على ما يقارب ضعف كمية المياه الحالية، وهي كمية كافية لغمر قارات ما فوق قمة جبل إيفرست. ربما يكون هذا الفيضان قد حفّز حركة الصفائح التكتونية وجعل بدء الحياة على اليابسة أكثر صعوبة. يُعتقد أن الصخور الموجودة في وشاح الأرض الحالي، وهي الطبقة السميكة أسفل القشرة الأرضية، تخزن كمية من المياه تعادل محيطًا أو أكثر في بنيتها المعدنية. ولكن في بدايات تاريخ الأرض، كان الوشاح، بفعل الإشعاع، أكثر سخونة بأربع مرات. وقد أظهرت التجارب التي أُجريت باستخدام مكابس هيدروليكية أن العديد من المعادن لا تستطيع الاحتفاظ بنفس كمية الهيدروجين والأكسجين عند درجات حرارة الوشاح تلك. يقول جونجي دونغ، طالب الدراسات العليا في فيزياء المعادن بجامعة هارفارد، والذي قاد نموذجًا، استنادًا إلى تلك التجارب المخبرية، "هذا يشير إلى أن الماء كان موجودًا في مكان آخر". "والخزان الأكثر ترجيحًا هو السطح."[1].

يقول مايكل والتر، عالم الصخور التجريبي في مؤسسة كارنيجي للعلوم، إن الورقة البحثية منطقية بديهيًا. "إنها فكرة بسيطة قد يكون لها آثار مهمة. يخزن معدنان من معادن الوشاح معظم مياه الكوكب اليوم: الوادسليت والرينغوديت، وهما نوعان من معدن الأوليفين البركاني يتكونان تحت ضغط عالٍ. تشكل الصخور الغنية بهما 7% من كتلة الكوكب، ورغم أن الماء لا يمثل سوى 2% من وزنها اليوم، إلا أن "القليل يتراكم ليصبح كثيرًا"، كما يقول ستيفن جاكوبسن، عالم المعادن التجريبي في جامعة نورث وسترن.

وقد صنع جاكوبسن Jacobsen وزملاؤه هذين المعدنين عن طريق ضغط مساحيق الصخور إلى عشرات الآلاف من الأجواء وتسخينها إلى 1600 درجة مئوية أو أكثر. وقد جمع فريق دونغ النتائج ليُظهر أن الوادسليت والرينغوديت يحتفظان بكمية أقل من الماء عند درجات حرارة أعلى. علاوة على ذلك، وجد الفريق أن هذين المعدنين سيكونان أقل وفرة في الوشاح القديم الأكثر سخونة مما هما عليه اليوم، مما يحدّ من قدرتها على تخزين الماء. ولا تقتصر هذه التجارب وحدها على الإشارة إلى وجود كوكب محاط بالماء. يقول بنجامين جونسون، عالم الكيمياء الجيولوجية في جامعة ولاية أيوا: "هناك أدلة جيولوجية واضحة أيضًا". تشير تركيزات التيتانيوم في بلورات الزركون التي يبلغ عمرها 4 مليارات عام في غرب أستراليا إلى أنها تشكلت تحت الماء. كما

[1]) Paul Voosen ,Ancient Earth was a water world.Science371,1088-1089(2021

https://coptic-treasures.com/

أن بعض أقدم الصخور المعروفة على وجه الأرض، وهي تكوينات عمرها 3 مليارات عام في أستراليا وغرينلاند، هي بازلت وسائدي، وهي صخور منتفخة تتشكل عندما تبرد الصهارة تحت الماء.

وتقدم دراسة أجراها جونسون وبوسويل وينغ، عالم الجيولوجيا الحيوية في جامعة كولورادو بولدر، مزيدًا من الأدلة. فقد كانت عينات من قطعة من القشرة المحيطية عمرها 3.24 مليار عام، متبقية على البر الرئيسي لأستراليا، أغنى بكثير بنظير أكسجين ثقيل من المحيطات الحالية. ويفقد الماء هذا الأكسجين الثقيل عندما يتفاعل المطر مع الصخور القارية لتكوين الطين، لذا فإن وفرته في المحيط القديم تشير إلى أن القارات كانت بالكاد قد ظهرت في ذلك الوقت. ويقول جونسون إن هذه النتيجة لا تثبت أن المحيطات كانت أكبر، ولكن "من الأسهل وجود قارات مغمورة إذا كانت المحيطات أكبر". يقول جونسون إن هذه النتيجة لا تثبت أن المحيطات كانت أكبر، ولكن "من الأسهل وجود قارات مغمورة إذا كانت المحيطات أكبر". على الرغم من أن المحيطات الأكبر كانت ستجعل من الصعب على القارات أن تبرز، إلا أنها قد تفسر سبب تحركها الظاهر في المراحل المبكرة من تاريخ الأرض، كما تقول ريبيكا فيشر، عالمة الصخور التجريبية في جامعة هارفارد. فقد ساهمت المحيطات الأكبر في بدء حركة الصفائح التكتونية، حيث تغلغلت المياه في الشقوق وأضعفت القشرة الأرضية، مما أدى إلى تكوين مناطق اندساس حيث انزلقت صفيحة قشرية أسفل أخرى. وبمجرد أن بدأت الصفيحة المندسة انزلاقها، ساعد الوشاح الأكثر جفافًا وقوةً بطبيعته على ثني الصفيحة، مما يضمن استمرار انزلاقها، كما يقول جون كوريناغا، عالم الجيوفيزياء في جامعة ييل. ويضيف: "إذا لم يكن بالإمكان ثني الصفائح، فلا يمكن أن تحدث حركة الصفائح التكتونية".

ويقول توماس كاريل، عالم الكيمياء الحيوية في جامعة لودفيغ ماكسيميليان في ميونيخ، إن الأدلة على وجود محيطات أكبر تتحدى السيناريوهات المتعلقة بكيفية بدء الحياة على الأرض. يعتقد بعض الباحثين أن الحياة بدأت في فتحات حرارية مائية غنية بالمغذيات في المحيط، بينما يرجح آخرون أنها نشأت في برك ضحلة على اليابسة، والتي كانت تتبخر باستمرار، مما يخلق بيئة غنية بالمواد الكيميائية. يُفاقم وجود محيط أكبر مشكلة سيناريو الحياة تحت الماء: فالمحيط نفسه ربما يكون قد خفف تركيز أي جزيئات حيوية ناشئة إلى حدٍّ ضئيل. ولكن بغمره معظم اليابسة، يُعقّد سيناريو البرك الضحلة أيضًا. يقول كاريل، أحد مؤيدي فرضية البرك، في ضوء الدراسة الجديدة، إنه يفكر الآن في مكان نشأة مختلف للحياة: جيوب مائية محمية داخل الصخور المحيطية التي برزت من سطح الجبال البحرية البركانية. ويضيف: "ربما كانت لدينا كهوف صغيرة حدث فيها كل شيء".

يُذكّرنا عالم الماء القديم أيضًا بمدى هشاشة تطور الأرض. فمن المرجح أن الكوكب كان قاحلًا حتى قصفته الكويكبات الغنية بالماء بعد فترة وجيزة من نشأته. لو أن الكويكبات قد رسبت ضعف كمية الماء، أو لو أن غلاف الأرض الحالي كان أقل استهلاكًا للماء، لما ظهرت القارات، الضرورية جدًا لحياة الكوكب ومناخه. يقول دونغ: "إن الأرض نظام بالغ الحساسية. فزيادة الماء أو نقصه سيؤدي إلى اختلاله".

https://coptic-treasures.com/

نظرية جديدة تشرح كيف أصبحت الأرض القديمة رطبة للغاية

بدأتُ بافتراض أن الكويكبات تخرج مغلفة بالجليد من غلافها الأولي، المعروف أيضًا بالقرص الكوكبي الأولي. هذا الغلاف عبارة عن قرص ضخم غني بالهيدروجين ومملوء بالغبار، حيث تتشكل الكواكب والأحزمة الكوكبية الأولية. وهو يحيط بالنظام الكوكبي الناشئ بأكمله. بمجرد أن يتبدد هذا الغلاف الواقي - بعد بضعة ملايين من السنين - ترتفع درجة حرارة الكويكبات، مما يؤدي إلى ذوبان جليدها، أو بتعبير أدق، تبخره. في الفضاء، حيث يكاد الضغط ينعدم، يبقى الماء في صورة بخار بعد هذه العملية. ثم يتراكب قرص من بخار الماء على حزام الكويكبات الذي يدور حول الشمس. ومع تبخر الجليد، يمتلئ القرص بالبخار، الذي ينتشر باتجاه الشمس بفعل عمليات ديناميكية معقدة. وفي طريقه، يصطدم قرص البخار هذا بالكواكب الداخلية، فيغمرها في نوع من "الحمام". بطريقة ما، يقوم القرص الشمسي "بترطيب" الكواكب الأرضية: المريخ والأرض والزهرة وعطارد. حدث معظم هذا الالتقاط للماء بعد 20 إلى 30 مليون سنة من تكوين الشمس، خلال فترة ازداد فيها سطوع الشمس بشكل كبير خلال فترة وجيزة، مما زاد من معدل إطلاق الغازات من الكويكبات. بمجرد أن تستحوذ جاذبية الكوكب على الماء، تبدأ العديد من العمليات[1].

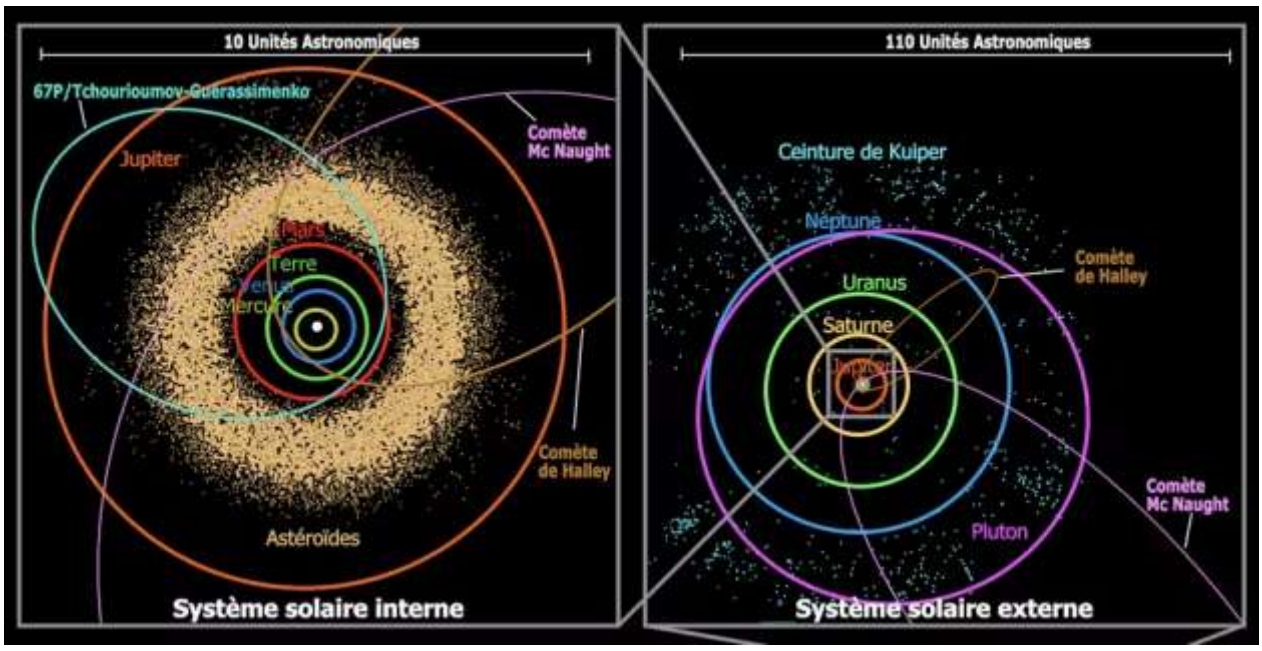
أما على الأرض، فيضمن وجود آلية حماية بقاء الكتلة الإجمالية للماء ثابتة نسبيًا منذ نهاية فترة الاستحواذ وحتى اليوم. فإذا ارتفع الماء عاليًا في الغلاف الجوي، يتكثف مكونًا السحب، التي تعود في النهاية إلى السطح على شكل أمطار - وهي عملية تُعرف بدورة الماء. كميات الماء على الأرض، قديمًا وحديثًا، موثقة جيدًا. نموذجنا، الذي يبدأ بانبعاث الغازات من الجليد من حزام الكويكبات الأصلي، يُفسر بنجاح كمية الماء اللازمة لتكوين المحيطات والأنهار والبحيرات، وحتى الماء المدفون في أعماق وشاح الأرض. تتوافق القياسات الدقيقة لنسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في مياه المحيطات مع نموذجنا. علاوة على ذلك، يُفسر النموذج كميات الماء الموجودة في الماضي على كواكب أخرى - وحتى على سطح القمر. قد نتساءل كيف توصلتُ إلى هذه النظرية الجديدة. ينبع هذا من رصدات حديثة، لا سيما تلك التي أُجريت باستخدام مرصد ألما، وهو عبارة عن مصفوفة من التلسكوبات الراديوية تضم أكثر من 60 هوائيًا، ويقع في تشيلي على هضبة ترتفع خمسة كيلومترات فوق مستوى سطح البحر. وتُظهر رصدات الأنظمة النجمية الخارجية التي تحتوي على أحزمة مشابهة لحزام كايبر أن الكواكب الصغيرة في هذه الأحزمة تُطلق غاز أول أكسيد الكربون (CO). أما في الأحزمة الأقرب إلى نجمها، مثل حزام الكويكبات، فإن أول أكسيد الكربون شديد التطاير لدرجة تجعله غير موجود، وبالتالي يُرجح أن ينطلق الماء.

---

[1]) Quentin Kral, Paul Huet, Camille Bergez-Casalou, Philippe Thébault, Sébastien Charnoz, Sonia Fornasier., An impact-free mechanism to deliver water to terrestrial planets and exoplanets., Astronomy & Astrophysics A&A Vol 692 A70 (2024)

https://coptic-treasures.com/

انطلاقًا من هذه النتائج، بدأت الفكرة الأولية للنظرية بالتبلور. علاوة على ذلك، قدمت البيانات الحديثة من مهمتي هايابوسا 2 وأوزيريس-ريكس، اللتين استكشفتا كويكبات مشابهة لتلك التي ربما ساهمت في تكوين قرص بخار الماء الأولي، تأكيدًا حاسمًا. كشفت هاتان المهمتان، إلى جانب عمليات الرصد طويلة الأمد من التلسكوبات الأرضية، عن كميات كبيرة من المعادن المائية على هذه الكويكبات، وهي معادن لا تتشكل إلا من خلال التلامس مع الماء. يدعم هذا الفرضية القائلة بأن هذه الكويكبات كانت جليدية في الأصل، على الرغم من أن معظمها فقد جليده منذ ذلك الحين (باستثناء الأجرام الأكبر حجمًا مثل سيريس). بعد وضع أساس النموذج، تمثلت الخطوة التالية في تطوير محاكاة عددية لتتبع انبعاث الغازات من الجليد، وانتشار بخار الماء، واستحواذ الكواكب عليه في نهاية المطاف. خلال عمليات المحاكاة هذه، اتضح سريعًا أن النموذج قادر على تفسير إمدادات المياه على الأرض. أكدت أبحاث إضافية حول كميات المياه السابقة على سطح المريخ والكواكب الأرضية الأخرى صحة النموذج بالنسبة لها أيضًا. كانت النتائج متطابقة تمامًا، وجاهزة للنشر! بصفتنا باحثين، لا يكفي تصميم نموذج فعال يبدو أنه يفسر كل شيء. يجب اختبار النظرية على نطاق أوسع. مع أنه من المستحيل الآن رصد قرص بخار الماء الأولي الذي "روى" الكواكب الأرضية، يمكننا البحث في الأنظمة خارج المجموعة الشمسية التي تحتوي على أحزمة كويكبات فتية لمعرفة ما إذا كانت أقراص بخار الماء هذه موجودة. وفقًا لحساباتنا، يُفترض أن تكون هذه الأقراص، رغم خفوتها، قابلة للرصد باستخدام مرصد ألما. وقد حصل فريقنا مؤخرًا على وقت على مرصد ألما لدراسة أنظمة محددة بحثًا عن أدلة على وجودها.



يقع حزام الكويكبات بين المريخ والمشتري، بينما يمتد حزام كويبر إلى ما وراء نبتون

https://coptic-treasures.com/

يمنع عدم تناسق السحب بين الليل والنهار تكوّن المحيطات المبكرة على كوكب الزهرة، لكن ليس على الأرض

أشارت الدراسات الحديثة إلى أن خفوت ضوء الشمس في بداياتها ربما لم يكن مشكلة على الإطلاق، بل كان عاملًا منقذًا. فلو كانت الشمس تمتلك ما بين 92% و95% من سطوعها الحالي قبل 4.5 مليار سنة، لكانت الأرض قد أصبحت شديدة الحرارة، مما كان سيؤدي إلى ما يُعرف بـ"الأرض البخارية"، حيث يعجز بخار الماء عن التكثف من الغلاف الجوي. يقول مارتن توربيت، عالم الفيزياء الفلكية في المركز الوطني الفرنسي للبحث العلمي: "لم تكن الأرض لتتمكن أبدًا من تكوين محيطاتها الأولى". ويضيف: "ربما كان خفوت ضوء الشمس في بداياتها ضروريًا لبقاء الأرض صالحة للسكن". وقد قام توربيت، في دراسته المنشورة في أكتوبر، بنمذجة مناخ كوكب الزهرة في بداياته، ووجد أن الكوكب لم يكن باردًا بما يكفي لدعم وجود الماء السائل، حتى مع خفوت ضوء الشمس. ولو لم يكن ضوء الشمس في بداياته خافتًا، لكان مصير كوكبنا كمصير الزهرة.

احتوت الأرض على محيطات لما يقارب أربعة مليارات سنة، بينما احتوى المريخ على بحيرات وأنهار قبل 3.5 إلى 3.8 مليار سنة. مع ذلك[1]، لا يزال من غير المعروف ما إذا كان الماء قد تكثف على سطح كوكب الزهرة، لأن الكوكب - الجاف تمامًا الآن - قد خضع لعمليات إعادة تشكيل سطحية عالمية حجبت معظم تاريخه. إن الظروف اللازمة لتكثف الماء في البداية على سطح الكواكب الأرضية في المجموعة الشمسية غير مؤكدة إلى حد كبير، إذ لم تُدرس حتى الآن إلا باستخدام نماذج مناخية عددية أحادية البعد لا تأخذ في الحسبان تأثيرات دوران الغلاف الجوي والسحب، وهما عاملان أساسيان في استقرار المناخ. نُبين هنا، باستخدام محاكاة نموذج مناخي عالمي ثلاثي الأبعاد لكوكب الزهرة والأرض في مراحلها المبكرة، أن السحب المائية - التي تتشكل بشكل تفضيلي على الجانب الليلي نظرًا لامتصاص بخار الماء القوي تحت أشعة الشمس - لها تأثير احترازي صافٍ قوي يمنع تكثف الماء على السطح حتى في ظل مستويات إشعاع شمسي معتدلة (تصل إلى 325 واط/م^2، أي 0.95 ضعف ثابت الإشعاع الشمسي للأرض). يُشير هذا إلى أن الماء لم يتكثف قط، وبالتالي لم تتشكل محيطات على سطح كوكب الزهرة. علاوة على ذلك، يُظهر هذا أن تشكل محيطات الأرض تطلب إشعاعًا شمسيًا أقل بكثير مما هو عليه اليوم، وهو ما أتاحته الشمس الفتية الخافتة. كما يُشير هذا إلى وجود حالة استقرار أخرى للأرض في الوقت الحاضر: "الأرض البخارية"، حيث تبخرت جميع مياه المحيطات إلى الغلاف الجوي.

تفترض معظم الدراسات العددية التي تسعى إلى تحديد الظروف التي تسمح بوجود مياه سائلة على سطح الكواكب الأرضية (على شكل بحيرات أو بحار أو محيطات) وجود هذه المياه السائلة مسبقًا. وقد ركزت الدراسات التي أُجريت على المريخ على إيجاد الظروف اللازمة لمنع التجلد الكامل، في محاولة لتفسير الأدلة الواسعة النطاق على الأنشطة الهيدرولوجية المتقطعة في الماضي. أما الدراسات التي أُجريت على الزهرة، فقد ركزت على إيجاد الظروف اللازمة لتأخير التبخر الكامل. وتشير قياسات

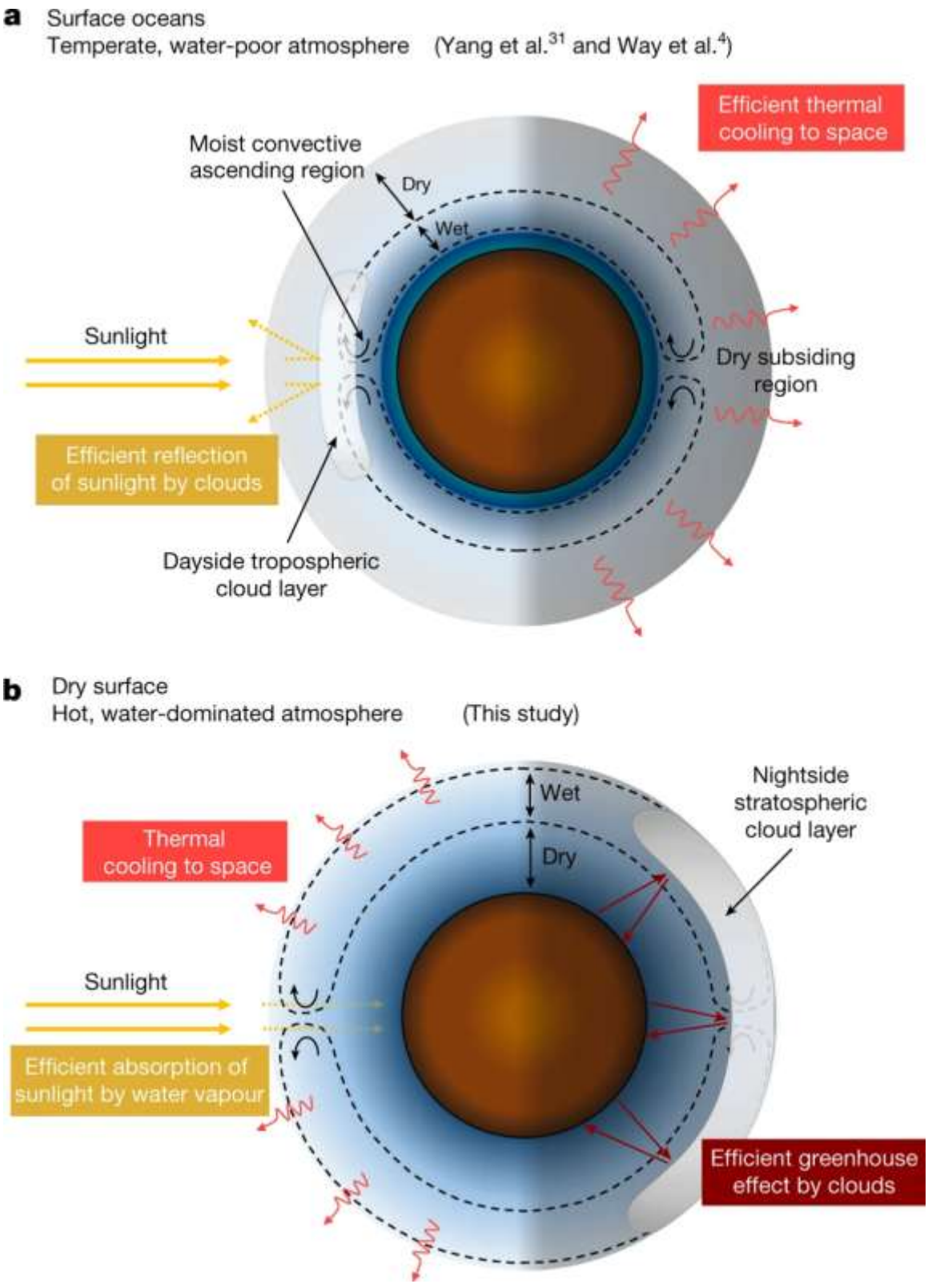
[1] Turbet, M., Bolmont, E., Chaverot, G. et al. Day–night cloud asymmetry prevents early oceans on Venus but not (2021) on Earth. Nature 598, 276–280

https://coptic-treasures.com/

نسبة نظائر الديوتيريوم إلى الهيدروجين (D/H) (الأعلى بنحو 102 مرة من مثيلتها على الأرض) إلى أن خزان المياه السطحية المبكر على الزهرة تراوح سمكه بين 4 أمتار و500 متر تقريبًا من الطبقة المكافئة العالمية (GEL؛ أي سمك طبقة المياه السائلة إذا انتشرت بالتساوي على السطح)، ولكنه ربما كان أعلى من ذلك، حيث يمكن أن يكون عامل تجزئة D/H أثناء هروب الهيدروجين (الهيدروديناميكي) قريبًا من الواحد. كان مستوى المياه السطحية على كوكب الزهرة في بداياته أعلى بكثير مما هو عليه اليوم (حوالي 3 سم من الجليد)، وربما كان على شكل محيط من الماء السائل. ركزت الدراسات على الأرض على إيجاد الظروف اللازمة لمنع كل من التجلد الكامل والتبخر. لا يقتصر هذا على مطابقة السجل الجيولوجي وحل ما يُعرف بمفارقة الشمس الفتية الخافتة فحسب، بل يشمل أيضًا التنبؤ بمستقبل الأرض. وقد أظهرت هذه الدراسات أن العمليات الجوية ثلاثية الأبعاد بطبيعتها تُعد عوامل استقرار رئيسية للحفاظ على محيط من الماء السائل على سطحها. ومن الأمور ذات الأهمية الخاصة لهذه الدراسة، أن الدوران البطيء لكوكب الزهرة قد يؤدي إلى تكوين سحب تحت شمسية، والتي من شأنها أن تعكس بشكل فعال التدفق الشمسي الساقط، وبالتالي تُساهم في استقرار المحيطات. أما على الكواكب سريعة الدوران كالأرض، فتُنتج ديناميكيات الغلاف الجوي مناطق جافة (في الفروع الهابطة للخلايا الجوية، مثل خلايا هادلي) من شأنها أن تزيد من الانبعاث الحراري إلى الفضاء، مما يُبرد المحيطات ويُساهم في استقرارها.

مع ذلك، يجب أن يكون الماء الموجود في الغلاف الجوي الكوكبي الفتيّ والدافئ قادرًا على التكثف على السطح. من المتوقع أن تتشكل الكواكب ساخنةً نتيجةً لطاقة تراكمها الأولية، وبالتالي أن تمر بمرحلة محيط الصهارة - حيث يوجد الماء السطحي على شكل بخار فقط - قبل أن تتطور نحو حالتها النهائية. وقد دُرست حتى الآن الشروط المؤدية إلى تكثف محيط مائي بعد مرحلة محيط الصهارة باستخدام نماذج مناخية عددية أحادية البعد (D1) فقط، والتي تتجاهل تأثيرات ديناميكيات الغلاف الجوي والغيوم. ومن المعروف أن محاكاة الأغلفة الجوية الساخنة التي يهيمن عليها بخار الماء في ثلاثة أبعاد أمرٌ بالغ الصعوبة، لأنها تتطلب تكييف مخططات التكثف والحمل الحراري والإشعاع والتقارب في نظام يسمح بتكثف بخار الماء مع كونه الغاز السائد.

https://coptic-treasures.com/



a, b : رسومات توضيحية لآليات التغذية الراجعة للسحب على كواكب بطيئة الدوران مغطاة في البداية بمحيط من الماء السائل (a)، وكواكب سريعة وبطيئة الدوران ذات محيطات تبخرت بالكامل في الغلاف الجوي (b). وبحسب موقعها (جانب النهار أو جانب الليل)، يكون للسحب تأثير تبريد (a) أو تسخين (b) قوي

https://coptic-treasures.com/

ليكن نور: ماذا حدث في الكون المبكر؟

يذكر المرصد الأوربي الجنوبي ESO: قبل حوالي 13.8 مليار سنة، نشأ الكون وبدأ يتحول تدريجيًا إلى الكون الشاسع الذي نعرفه اليوم. لم يكن الانفجار العظيم انفجارًا بالمعنى الحرفي، بل كان أشبه بتوسع سريع جدًا من شيء متناهي الصغر، شديد الحرارة، وكثيف إلى شيء أقل كثافة، ثم استمر في التوسع إلى ما لا نهاية. مباشرةً بعد بدء التوسع، كان الكون بأكمله عبارة عن "حساء" شديد الحرارة من الجسيمات دون الذرية: البروتونات والنيوترونات والإلكترونات. ومع بدء برودته، بدأت البروتونات والنيوترونات بالتجمع لتكوين ذرات الهيدروجين والهيليوم. تأينت هذه الذرات: فقد جردت الحرارة الشديدة للكون المبكر هذه الذرات من إلكتروناتها. في هذه المرحلة، لم يكن الضوء قادرًا على الانتقال عبر الكون لأنه كان سينحرف بفعل الإلكترونات الحرة[1].

عندما برد الكون قليلًا، تمكنت الإلكترونات من الانضمام إلى الذرات المتأينة، مكونةً الهيدروجين والهيليوم المتعادلين. حدثت هذه العملية، التي يعرفها علماء الفلك باسم إعادة التركيب، بعد حوالي 300 ألف عام من الانفجار العظيم، وجعلت الكون شفافًا، لأن الضوء لم يعد ينحرف بفعل الإلكترونات الحرة. ويعود سبب معرفة علماء الفلك بهذه الحقبة إلى بقايا إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، المنتشر في أرجاء الكون اليوم. هذا الضوء المتبقي من حقبة إعادة التركيب، والذي تمدد طول موجته بفعل توسع الكون، ما أدى إلى انزياحه نحو الأحمر. وهذا يعني أنه كلما قطع هذا الضوء مسافة أطول، زاد طول موجته. يُعد هذا الضوء المتبقي بمثابة بصمة لكيفية ظهور الكون آنذاك: مجرد حساء غازي من الهيدروجين والهيليوم، حيث يكون الغاز أكثر كثافة في بعض المناطق من غيرها. ولكن في ذلك الوقت، لم تكن هناك مصادر ضوء كالنجوم، لذا يُشير علماء الفلك إلى هذه الحقبة باسم العصور المظلمة الكونية.

بعد مرور ما بين 500 مليون إلى مليار سنة من الانفجار العظيم، شهد الكون تحولاً جذرياً، مُزيلاً ضباب الغاز المتعادل. يُعتقد أن كمية هائلة من الأشعة فوق البنفسجية تمكنت من اختراق هذا الضباب، مُنتزعةً الإلكترونات من ذراتها، ومؤينةً إياها. ولهذا السبب، يُطلق علماء الفلك على هذه الفترة من بدايات الكون اسم عصر إعادة التأين، حيث تنمو "فقاعات" من الغاز المتأين وسط الغاز المتعادل المحيط بها. ولا يزال مصدر الأشعة فوق البنفسجية اللازمة لإعادة تأيين الكون غير معروف؛ فقد تكون نجوماً، أو مجرات بدائية، أو كوازارات، أو حتى مزيجاً من هذه المصادر.

افترض علماء الفلك أن الإشعاع فوق البنفسجي المكثف المنبعث من حقبة إعادة التأين كان من النجوم الأولى. وقد تشكلت هذه النجوم على مدى ملايين السنين نتيجة تكثف بعض مناطق الضباب الكوني وانهيارها تحت تأثير جاذبيتها. النجم عبارة

[1] (https://www.eso.org/public/blog/let-there-be-light/
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_eras
https://news.stanford.edu/stories/2023/07/science-illuminated-first-light-universe

https://coptic-treasures.com/

عن شكل كثيف للغاية من البلازما، حيث تندمج ذرات مثل الهيدروجين والهيليوم تحت ضغط وحرارة شديدين، مما يؤدي إلى تكوين عناصر أثقل وإطلاق كميات هائلة من الطاقة. وبمجرد نفاد الوقود، وبحسب حجم النجم، فإنه يموت، مطلقًا وفرة من العناصر الجديدة في الفضاء المحيط به، والتي ستشكل بدورها أجيالًا لاحقة من النجوم الجديدة.

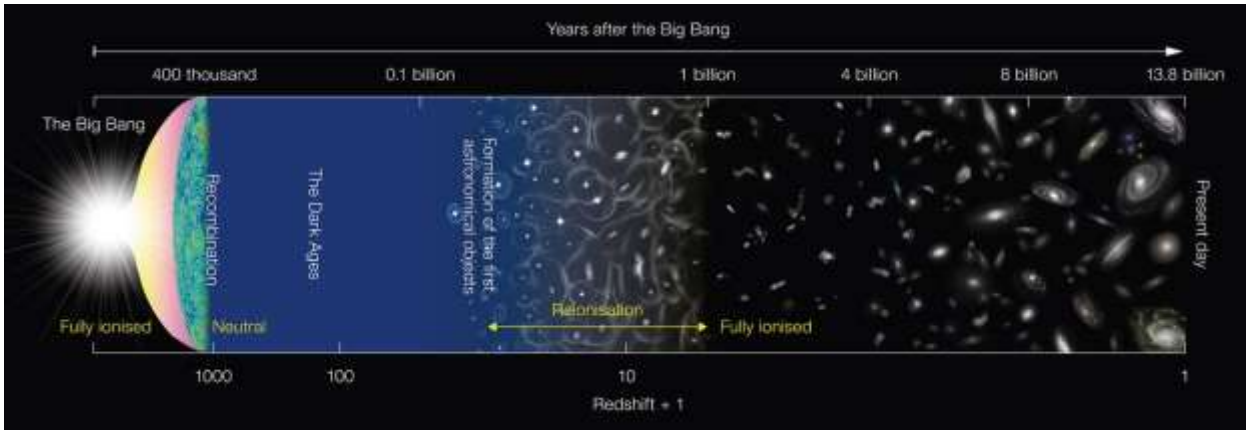
كانت النجوم الأولى أكبر من شمسنا بما يتراوح بين 30 و300 ضعف، وأكثر سطوعًا منها بملايين المرات. وعلى عكس النجوم الحديثة التي تحتوي على آثار من العناصر الثقيلة، كانت تلك النجوم الأولى تتكون من الهيدروجين والهيليوم فقط. كانت هذه النجوم ستحترق بعد بضعة ملايين من السنين فقط، مُشعّةً ضوءًا فوق بنفسجيًا شديدًا، يكفي لتبديد الضباب في عصر إعادة التأين. وكانت ستنهي حياتها بانفجارات مستعرات عظمى هائلة، شديدة الحرارة لدرجة كافية لتكوين أثقل العناصر في الكون. وكانت هذه الانفجارات ستملأ الكون بأولى عناصره الثقيلة، التي كانت ستتطور بدورها لتُشكّل المزيد من الغبار والكواكب والنجوم.

حتى وقت قريب جدًا، كان وجود النجوم الضخمة للغاية في الكون المبكر مجرد نظرية، وذلك ببساطة لأن القدرة على استكشاف الفضاء في تلك الحقبة الزمنية البعيدة كانت محدودة بالتكنولوجيا المتاحة آنذاك. في عام 2011، مكّن البحث باستخدام التلسكوب الكبير جدًا التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي (VLT) علماء الفلك من استكشاف الكون المبكر، حيث عثروا على نجوم ومجرات بدائية عندما كان عمر الكون 780 مليون سنة فقط. ووجدوا أن الأشعة فوق البنفسجية المنبعثة من بعض تلك المجرات كانت تمثل مصدرًا مهمًا للطاقة لإعادة تأيين الضباب الكوني. وفي دراسة أخرى عام 2015، استُخدم التلسكوب الكبير جدًا وتلسكوبات أخرى لدراسة المجرات المبكرة، حيث عُثر على مجرة ساطعة بشكلٍ مدهش لا تحتوي على أي آثار لعناصر أثقل من الهيليوم، تمامًا كما هو متوقع من الجيل الأول من النجوم.

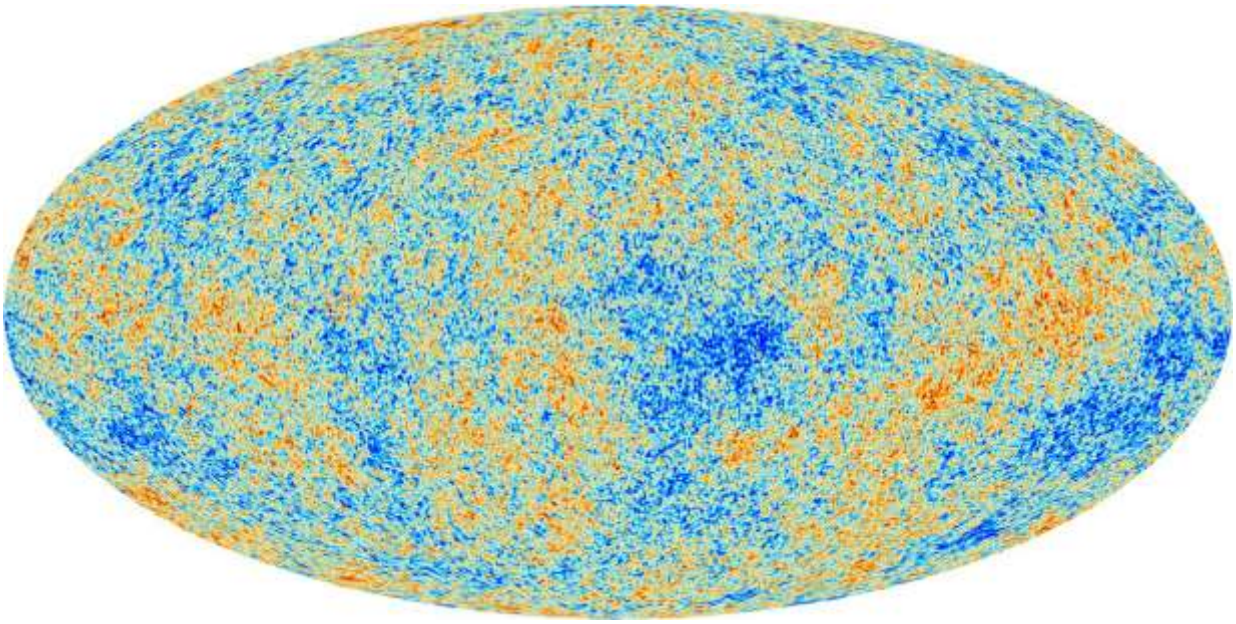
ثم في 30 مارس 2022، تمكن علماء الفلك باستخدام تلسكوب هابل الفضائي التابع لوكالة ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية من التقاط صورة لأبعد نجم تم رصده على الإطلاق، من زمن كان فيه عمر الكون 7% فقط من عمره الحالي، أي بعد 4 مليارات سنة من الانفجار العظيم. وقد تمكنوا من رؤية هذا النجم بفضل ظاهرة تُعرف باسم عدسة الجاذبية، حيث تعمل تجمعات المجرات الكبيرة كعدسة مكبرة، فتُظهر الأجسام على مسافات شاسعة. يُطلق على هذا النجم اسم إيرندال (والذي يعني "نجم الصباح" باللغة الإنجليزية القديمة)، ويُقدر أن كتلته تعادل 50 ضعف كتلة شمسنا على الأقل، وأنه أكثر سطوعًا منها بملايين المرات. كانت المجرات الأولى مختلفة تمامًا عن المجرات الحديثة التي يرصدها علماء الفلك اليوم. فبسبب الطبيعة الفوضوية للكون المبكر، كانت أشكال المجرات أقل وضوحًا، تفتقر إلى سمات مستقرة كالانتفاخات (تجمعات النجوم المترابطة بإحكام نحو مركز المجرة) والأذرع الحلزونية (كتلك الموجودة في مجرة درب التبانة). ومع ذلك، لا تزال هناك بعض الأمور المحيرة. من المتوقع أن تكون المجرات المبكرة غنية بالعناصر الخفيفة كالهيدروجين والهيليوم. لكن في بعض الأحيان، وجد علماء الفلك مجرات من عصر إعادة التأين تبدو أقدم بكثير بناءً على تركيبها الكيميائي. على سبيل المثال، في عام 2015، اكتشف علماء الفلك باستخدام

https://coptic-treasures.com/

مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، التي تُعدّ المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) شريكًا فيها، وتلسكوبها الكبير جدًا (VLT)، مجرةً تعود إلى زمن كان فيه عمر الكون حوالي 700 مليون سنة (مما يضعها بدقة في حقبة إعادة التأين)، ووجدوا أنها تحتوي على غاز وغبار من عناصر أثقل بكثير. وفي عام 2017، دُرست مجرة أبعد باستخدام ALMA، ووُجد أنها غنية بالغبار بشكلٍ مُثير للدهشة. يُشير هذا إلى أن العديد من المستعرات العظمى المبكرة ربما تكون قد ملأت هذه المجرات بالعناصر الثقيلة بسرعة كبيرة، لكن علماء الفلك لا يعرفون ذلك على وجه اليقين.



يُصوّر هذا الرسم البياني أهمّ مراحل تطوّر الكون منذ الانفجار العظيم، قبل حوالي 13.8 مليار سنة. وهو ليس متناسبًا مع المقياس. كان الكون في حالة حيادية بعد 400 ألف سنة من الانفجار العظيم، وظلّ كذلك حتى بدأ ضوء الجيل الأول من النجوم بتأيين الهيدروجين. وبعد مئات الملايين من السنين، تأين غاز الكون بالكامل. مصدر الصورة: NAOJ



خريطة لخلفية الإشعاع الكوني الميكروي التقطها تلسكوب بلانك الفضائي التابع لوكالة الفضاء الأوروبية. تُظهر الألوان المختلفة تقلبات طفيفة في درجة الحرارة تتوافق مع مناطق ذات كثافات مختلفة قليلاً، والتي ستصبح فيما بعد نواة لتكوين النجوم والمجرات الأولى. Credit: ESA and the Planck Collaboration

https://coptic-treasures.com/

في اللحظات الأولى للكون، انحصرت الفوتونات الأولى في بحر من الغاز المتأين. تشتتت عشوائيًا مع النوى الساخنة والإلكترونات في كرة النار الكونية، كقوارب صغيرة في بحر هائج. بعد ذلك، وبعد حوالي 370 ألف عام من الانفجار العظيم، برد الكون بما يكفي لتحرر الفوتونات. وبعد تشتت أخير، تمكنت أخيرًا من الانطلاق في الفضاء بين النجوم. سافر بعضها عبر 14 مليار سنة من الزمان والمكان ليصل إلى الأرض، حيث نراه كجزء من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، وهو بقايا الضوء الأول للخلق. يُعدّ إشعاع الخلفية الكونية الميكروي دليلًا أساسيًا يدعم نظرية الانفجار العظيم والنموذج القياسي لعلم الكونيات. من خلال رصد نطاق التقلبات داخل هذا الإشعاع، يمكننا قياس أمور مثل شكل الفضاء، وتوزيع المادة والطاقة، ومعدل التوسع الكوني. هذا الأخير هو ما يُحيّر علماء الفلك، بسبب مشكلة توتر هابل[1].

يستخدم علماء الفلك عدة طرق لقياس ثابت هابل Hubble، الذي تحدد قيمته معدل تمدد الكون. وتنقسم هذه الطرق عمومًا إلى نوعين: تلك القائمة على رصد إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، وتلك القائمة على الظواهر الفيزيائية الفلكية مثل المستعرات العظمى. تكمن المشكلة في أن هذين النوعين من الطرق لا يتفقان على القيمة، بل يتناقضان فيما بينهما، مما يدفع بعض علماء الفلك إلى القول بوجود خلل ما في النموذج القياسي.

من بين النوعين، تُعدّ طريقة قياس إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMB) الأقل توفرًا للبيانات. وقد أتت أفضل رصدات CMB المتوفرة لدينا من تلسكوبات فضائية مثل بلانك، التي رصدت تقلبات شدة هذا الإشعاع. يتمثل أحد حلول مشكلة التناقض في الادعاء بأن رصدات CMB متحيزة بطريقة ما. لكن الرصدات الجديدة التي جمعها تلسكوب القطب الجنوبي (SPT) تُفنّد هذا الادعاء تمامًا. فبدلًا من قياس تقلبات شدة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، رصد تلسكوب القطب الجنوبي تغيرات في استقطابه. يأتي كل ضوء CMB الذي نرصده من لحظة التشتت الأخيرة، عندما تتشتت الفوتونات عن أيون للمرة الأخيرة قبل أن تقطع رحلة تستغرق مليارات السنين للوصول إلينا. عندما يتشتت الضوء، يكون مستقطبًا بالنسبة لتوزيع الغاز المتأين. لذا، تُعدّ هذه الرصدات مقياسًا مستقلًا تمامًا للتوسع الكوني.

يتمثل أحد التحديات في التعامل مع بيانات إشعاع الخلفية الكونية الميكروي المستقطب في أن الضوء الأول، أثناء انتقاله عبر الفضاء، يتفاعل مع المادة والفضاء والزمن. فبالإضافة إلى انزياح الضوء نحو الأحمر نتيجة للتوسع الكوني، يتعرض أيضًا لتأثير عدسة الجاذبية من المجرات، مما يُغير استقطابه. كما يتشتت جزء من الضوء بفعل الغاز بين النجوم، مما يُعطي استقطابًا زائفًا. حتى تموجات موجات الجاذبية قد تؤثر على اتجاه الضوء. لذلك، لم يقتصر بحث الفريق على الاستقطاب الخام لإشعاع الخلفية الكونية الميكروي، بل شمل أيضًا ما يُعرف باستقطاب النمط E واستقطاب النمط B. كل نمط من هذين النمطين حساس

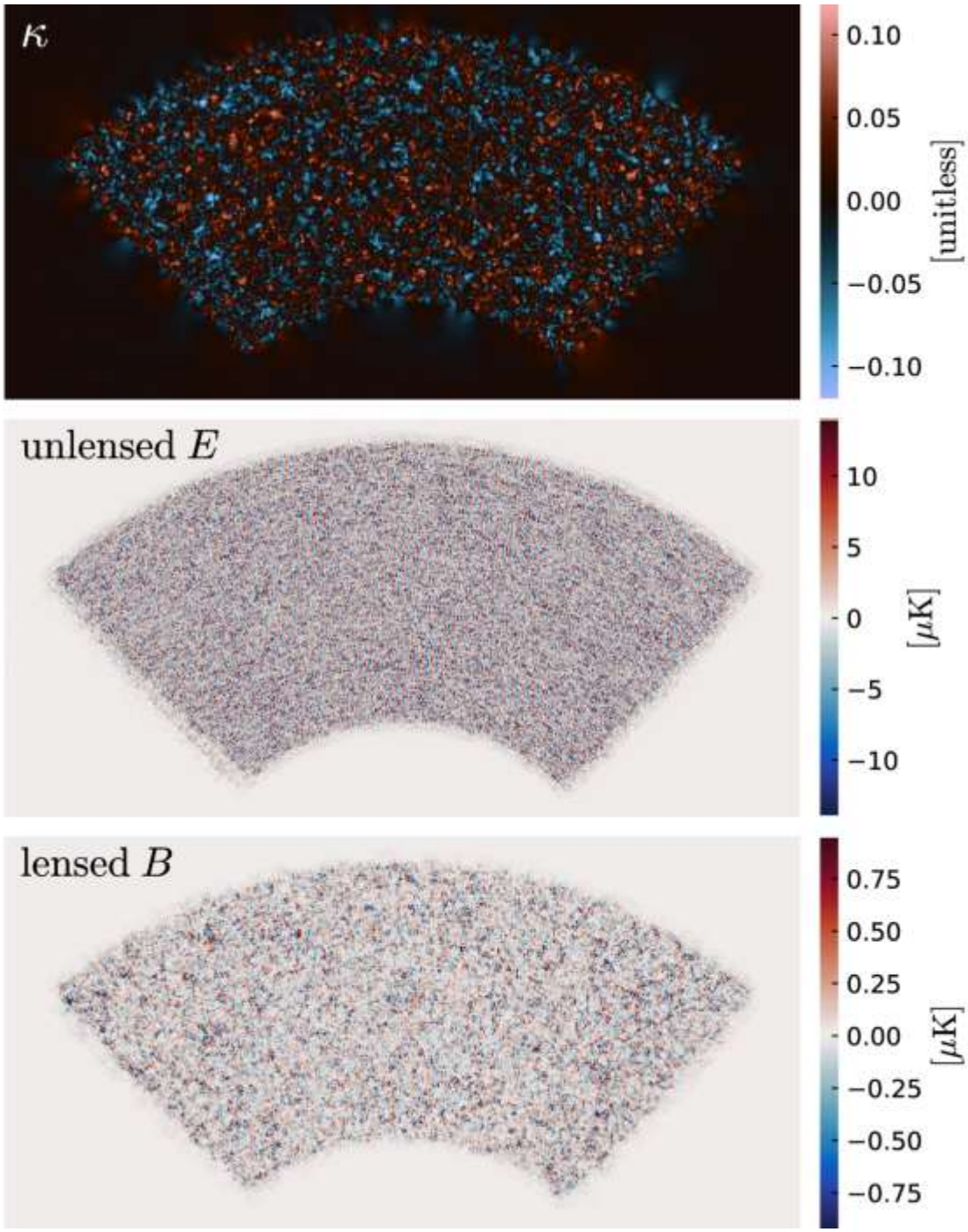
[1] Cosmology From CMB Lensing and Delensed EE Power Spectra Using 2019-2020 SPT-3G Polarization Data. (2024) Astrophysics of Galaxies arXiv:2411.06000.

https://coptic-treasures.com/

لأنواع مختلفة من الانحياز. فعلى سبيل المثال، يُعد النمط E أكثر حساسية للتشتت الثانوي، بينما يُعد النمط B أكثر حساسية للتضخم الكوني وموجات الجاذبية.

ومن خلال الجمع بين أنماط الاستقطاب هذه ومقارنتها، تمكن الفريق من حساب قيمة جديدة لمعامل هابل. بما أن هذه الطريقة لا تعتمد على تقلبات شدة الإشعاع، فهي خالية من أي تحيز في رصد إشعاع الخلفية الكونية الميكروي من الفضاء. استنادًا إلى بياناتهم، حصل الفريق على قيمة H0 تتراوح بين 66.0 و67.6 كم/ث/ميجابارسيك. يتوافق هذا مع رصد شدة الإشعاع الذي أجراه كل من WMAP وPlanck، والذي وجد قيمة تتراوح بين 67 و68 كم/ث/ميجابارسيك. في المقابل، توصلت الطرق الفيزيائية الفلكية إلى قيمة تتراوح بين 73 و75 كم/ث/ميجابارسيك. تؤكد هذه الدراسة أن رصد إشعاع الخلفية الكونية الميكروي السابق لم يكن متحيزًا. إن تباين هابل حقيقي للغاية، ولا نملك حاليًا طريقة واضحة لحله.

https://coptic-treasures.com/



خرائط الاحتمالية القصوى اللاحقة (MAP) من بيانات 95+150+220 جيجاهرتز عند تقدير MUSE النظري وتمثل معلمات النظام، θ. تتوافق خرائط MAP مع ترشيح البيانات الذي يزيد الإشارة إلى أقصى حد بالنسبة للضوضاء (على غرار مرشح وينر الخطي، ولكن في حالة MAP k، مرشح غير خطي). ينشأ التباين الإحصائي المرئي بشكل خاص في خريطة E من هذا الترشيح. لم يتم تطبيق أي تنعيم إضافي آخر، على الرغم من أننا قمنا بطرح متوسط المحاكاة لـ k. باستثناء هذا الطرح، تتطابق هذه المتوسطات المُقدَّرة تمامًا مع k الذي يدخل في تقدير MUSE في المعادلة. لقد اخترنا عرض E غير المُعدَّل وB المُعدَّل فقط (المُستمد من k وE غير المُعدَّل في اللوحتين العلويتين)، حيث يبدو E المُعدَّل وغير المُعدَّل متطابقين تقريبًا على مقياس هذا الشكل، وB غير المُعدَّل يساوي صفرًا فعليًا بافتراضنا.

https://coptic-treasures.com/

بعد الانفجار العظيم ،شكّل الضوء والكهرباء الكون المبكر

عندما تشكلت النجوم والمجرات الأولى، لم تقتصر وظيفتها على إضاءة الكون فحسب، بل أحدثت هذه البنى الساطعة تغييرًا جذريًا في التركيب الكيميائي للكون. خلال تلك الفترة، اكتسب غاز الهيدروجين، الذي يشكل معظم المادة الموجودة في الفضاء بين المجرات اليوم، شحنة كهربائية. يقول برانت روبرتسون Brant Robertson، رئيس مجموعة أبحاث الفيزياء الفلكية الحاسوبية في جامعة كاليفورنيا، سانتا كروز، إن حقبة إعادة التأين هذه كانت "إحدى آخر التغيرات الكبرى في الكون". لقد كانت فجر الكون كما نعرفه اليوم.

لكن العلماء لم يتمكنوا من رصد ما حدث خلال حقبة إعادة التأين بالتفصيل حتى الآن. يوفر تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لناسا، والذي تم تفعيله حديثًا، رؤيةً ثاقبةً لهذه الحقبة التكوينية. ويعكف علماء الفيزياء الفلكية، مثل روبرتسون، على دراسة بيانات تلسكوب جيمس ويب بحثًا عن إجابات لأسئلة جوهرية حول ذلك الفجر الكوني الكهربائي، وما يمكن أن يكشفه لنا عن الديناميكيات التي تشكل الكون اليوم.

لم تكن حقبة إعادة التأين هي المرة الأولى التي امتلأ فيها الكون بالكهرباء. فبعد الانفجار العظيم مباشرةً، كان الكون مظلمًا وحارًا؛ لم تكن هناك نجوم ولا مجرات ولا كواكب. بدلًا من ذلك، كانت الإلكترونات والبروتونات تجوب المكان بحرية، نظرًا لارتفاع نسبة البخار فيها، ما حال دون تزاوجها. ولكن مع انخفاض درجة حرارة الكون، بدأت البروتونات في التقاط الإلكترونات لتكوين الذرات الأولى - الهيدروجين تحديدًا - في فترة تُسمى "إعادة التركيب"، كما توضح آن هوتر Anne Hutter، الباحثة ما بعد الدكتوراه في مركز فجر الكون، وهو مشروع بحثي مشترك بين جامعة كوبنهاغن والمعهد الوطني للفضاء في جامعة الدنمارك التقنية. وقد أدت هذه العملية إلى معادلة شحنة المادة.

كانت أي مادة موجودة في الكون موزعة بشكل متساوٍ نسبيًا في ذلك الوقت، ولم يكن هناك بنية واضحة. ولكن كانت هناك تقلبات طفيفة في الكثافة، وعلى مدى ملايين السنين، جمعت هذه التغيرات الذرات الأولى معًا لتشكل النجوم في نهاية المطاف. جذبت جاذبية النجوم المبكرة المزيد من الغازات والجسيمات والمكونات الأخرى لتتحد في المزيد من النجوم ثم المجرات.

بمجرد أن أضاءت بدايات المجرات، انتهى ما يسميه علماء الفيزياء الفلكية بالعصر المظلم الكوني. يقول روبرتسون Robertson إن هذه الأجرام النجمية كانت شديدة السطوع، إذ كانت أضخم من شمسنا وتتوهج بشدة في طيف الأشعة فوق البنفسجية. ويضيف روبرتسون: "يمكن للأشعة فوق البنفسجية، إذا كانت طاقتها كافية، أن تؤين الهيدروجين". يكفي جسيم ضوئي واحد ذو طاقة عالية، يُسمى فوتونًا، لانتزاع الإلكترون من ذرة الهيدروجين، تاركًا إياها بشحنة كهربائية موجبة.

ومع بدء تجمع المجرات، كانت تؤين أولًا المناطق المحيطة بها، تاركةً فقاعات من غاز الهيدروجين المشحون في أرجاء الكون. ومع نمو التجمعات النجمية المضيئة، تشكلت المزيد من النجوم، ما جعلها أكثر سطوعًا وامتلاءً بالفوتونات. وبدأت مجرات جديدة

https://coptic-treasures.com/

أخرى بالتشكل أيضًا. ومع ازدياد إضاءتها، بدأت الفقاعات المتأينة بالتداخل. يُوضح روبرتسون أن ذلك سمح لفوتون من مجرة ما "بالسفر لمسافة أطول بكثير لأنه لم يصطدم بذرة هيدروجين أثناء عبوره هذه الشبكة" عند تلك النقطة، يتأين باقي الوسط بين المجرات في الكون - حتى في المناطق البعيدة عن المجرات - بسرعة. عندها انتهى عصر إعادة التأين وبدأ الكون كما نعرفه. يقول روبرتسون: "كانت هذه آخر مرة تتغير فيها خصائص الكون بشكل كامل. وكانت أيضًا المرة الأولى التي تُحدث فيها المجرات تأثيرًا فعليًا خارج نطاقها المحلي".

مع شحن الهيدروجين الموجود بين المجرات، دخل الكون مرحلة جديدة من التكوين. كان لهذا التأين تأثيرٌ متسلسل على تكوين المجرات: فمن المرجح أن أي هياكل مرصعة بالنجوم تشكلت بعد فجر الكون قد تأثرت. يوضح هوتر Hutter قائلاً: "إذا قمت بتأيين غاز، فإنك تقوم أيضاً بتسخينه". تذكر أن درجات الحرارة المرتفعة تُصعّب على المادة التماسك وتكوين نجوم وكواكب جديدة، بل ويمكنها حتى تدمير الغازات الموجودة بالفعل. ونتيجة لذلك، قد تواجه المجرات الصغيرة التي تتشكل في منطقة متأينة صعوبة في الحصول على كمية كافية من الغاز لتكوين المزيد من النجوم. يقول هوتر: "هذا يؤثر حقاً على عدد النجوم التي تُكوّنها المجرات، فهو يؤثر على تاريخها بأكمله". على الرغم من أن العلماء لديهم فكرة عامة عن قصة إعادة التأين، إلا أن بعض الأسئلة الكبيرة لا تزال قائمة. على سبيل المثال، بينما يعرفون تقريباً أن الحقبة انتهت بعد حوالي مليار سنة من الانفجار العظيم، إلا أنهم ليسوا متأكدين تماماً متى بدأت إعادة التأين، وبالتالي تكوين المجرات الأولى.

هنا يأتي دور تلسكوب جيمس ويب الفضائي (JWST). صُمم هذا التلسكوب الفضائي الجديد للبحث عن أقدم أجزاء الكون التي لا تُرى بالعين المجردة، وجمع بيانات عن أولى ومضات ضوء النجوم التي أينت الوسط بين المجرات. يعتمد علماء الفلك بشكل أساسي على الإشعاع الذي تُصدره الأجرام السماوية لاكتشافها. تميل الأجرام الأبعد عنا إلى الظهور في نطاق الأشعة تحت الحمراء، حيث يؤدي بُعدها إلى تشويه أطوال موجاتها لتصبح أطول. ومع توسع الكون، قد يستغرق الضوء مليارات السنين للوصول إلى أجهزة الكشف الخاصة بتلسكوب جيمس ويب الفضائي.

كيف أضاء الكون في بداية التكوين

أجرى فريق دولي من علماء الفيزياء الفلكية، بقيادة حكيم أتك Hakim Atek من معهد باريس للفيزياء الفلكية، دراسةً تفصيليةً للكون المبكر. وكان مفتاح حل هذا اللغز هو عنقود مجرات أبيل Abell 2744، الذي استخدمه العلماء كعدسة طبيعية عملاقة. وبفضل تأثير عدسة الجاذبية - حيث يقوم جسم ضخم بتشويه نسيج الزمكان وتكبير الضوء القادم من الأجسام التي تقع خلفه - تمكن الباحثون من رصد مجرات قزمة خافتة كانت موجودة خلال المئات القليلة الأولى من ملايين السنين بعد

https://coptic-treasures.com/

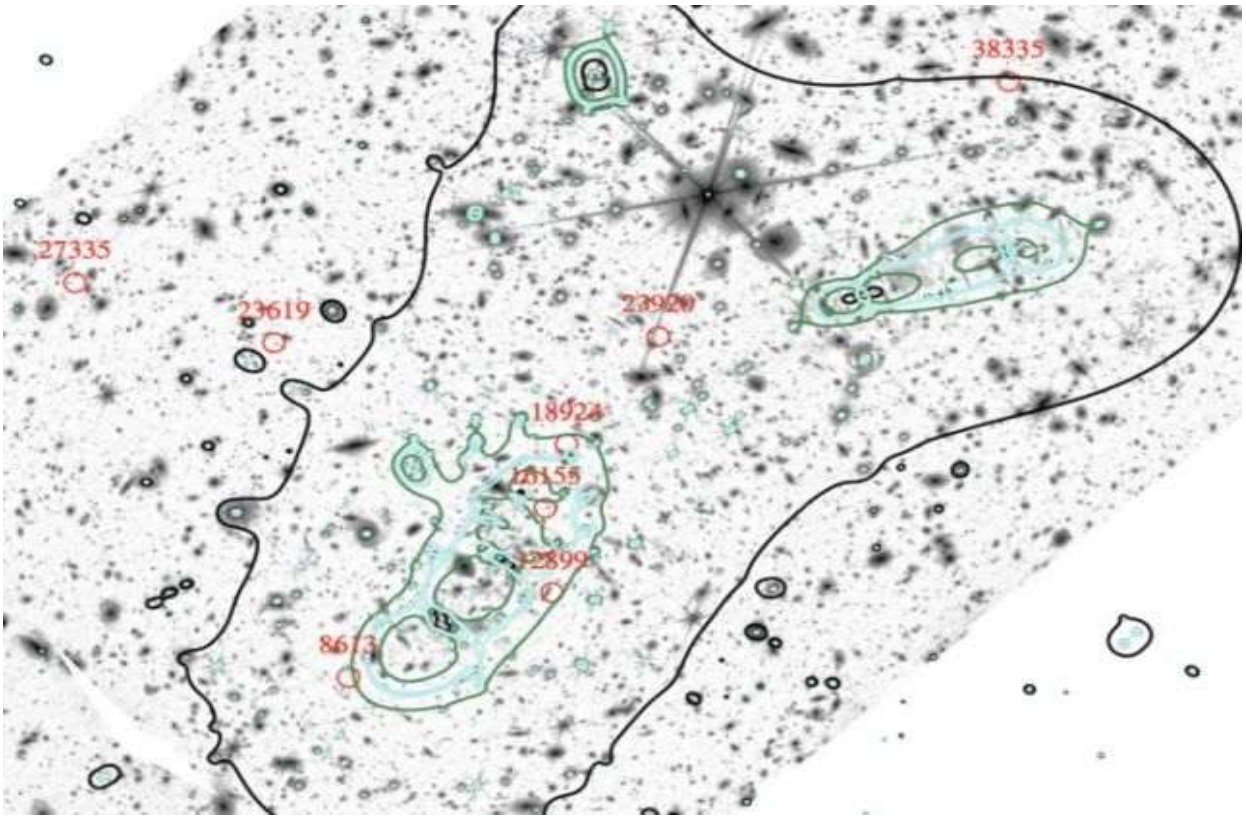
الانفجار العظيم[1]. تتميز مجرة أبيل 2744 بكثافة عالية لدرجة أن نسيج الزمكان ينحني حولها، مشكلاً عدسة كونية؛ فأي ضوء بعيد يصل إلينا عبر هذا النسيج يتضخم. وقد مكّن هذا الباحثين من رؤية مجرات قزمة صغيرة قريبة من فجر الكون.

كشف تحليل الأطياف التي رصدها تلسكوب جيمس ويب الفضائي عن نتائج مذهلة. ففي بدايات الكون، فاق عدد المجرات القزمة عدد المجرات العملاقة بنسبة 100 إلى 1. وقد تبين أن هذه الأنظمة الصغيرة أكثر سطوعًا ونشاطًا بشكل ملحوظ مما كان يُعتقد سابقًا، وأن إشعاعها المؤين كان أقوى بأربع مرات من إشعاع المجرات الكبيرة. وقالت عالمة الفيزياء الفلكية إيرينا تشيميرينسكا Iryna Chemerynska: "يكشف هذا الاكتشاف عن الدور المحوري الذي لعبته المجرات الخافتة للغاية في تطور الكون المبكر". فقد كانت هذه المجرات مصدرًا لتدفق الفوتونات عالية الطاقة التي حولت الهيدروجين المتعادل إلى بلازما شفافة. وقال أتيك: "إن هذه القوى الكونية مجتمعة تُصدر طاقة أكثر من كافية لإنجاز المهمة" ."على الرغم من صغر حجمها، فإن هذه المجرات منخفضة الكتلة تنتج كميات هائلة من الإشعاع عالي الطاقة، ووفرتها خلال هذه الفترة كبيرة لدرجة أن تأثيرها الجماعي يمكن أن يغير حالة الكون بأكملها."

اكتملت عملية إعادة التأين بعد حوالي مليار سنة من الانفجار العظيم. وبسبب نشاط مليارات المجرات الصغيرة، تأين الغاز في الفضاء بين المجرات وتخلخل. وأصبح الضوء قادرًا أخيرًا على الانتقال بحرية عبر مسافات شاسعة. بدت المجرات القزمة وكأنها مليارات الفوانيس الصغيرة المضاءة دفعة واحدة في غابة ضبابية. لم يكن لأي جسم بمفرده القدرة على تغيير الكون، لكن كتلتها مجتمعة كانت هائلة لدرجة أنها "أحرقت" فعليًا سحابة الهيدروجين البدائية. وهذا يُبرز أهمية دراسة الأجسام منخفضة الكتلة: ففي بعض الأحيان، ما يبدو ضئيلاً قد يُحدد مصير الكون بأكمله. ورغم أن الأدلة التي جُمعت حتى الآن هي الأكثر إقناعًا، إلا أن العلماء لا يتعجلون في استخلاص النتائج. لم تتم دراسة سوى جزء صغير من السماء حتى الآن من خلال عدسة الجاذبية Abell 2744. وللتأكيد بشكل قاطع على النظرية، يحتاج علماء الفلك إلى التحقق من أن هذه المنطقة ليست شذوذًا، بل تمثل حالة نموذجية للكون المبكر.

[1] Atek, H., Labbé, I., Furtak, L.J. et al. Most of the photons that reionized the Universe came from dwarf galaxies. (2024) Nature 626, 975–978

https://coptic-treasures.com/



صورة من مجال الرؤية العميق لتلسكوب جيمس ويب الفضائي تُظهر بعض المصادر التي حددها الباحثون كمحركات لإعادة التأين
(Hakim Atek/Sorbonne University/JWST)

الوجه المضيء والمظلم لسديم تكوّن النجوم

كشف المرصد الأوروبي الجنوبي (ESO) عن صورة لسديم غوم[1] Gum 19 ، وهو سديم خافت غير معروف على نطاق واسع، يظهر في الأشعة تحت الحمراء مظلمًا من جانب ومضيء من الجانب الآخر. على أحد جانبيه، يُضاء غاز الهيدروجين الساخن بنجم عملاق أزرق يُدعى V391 Velorum. وتتشكل نجوم جديدة داخل شريط من المادة المضيئة والمظلمة التي تُحيط بالجانب الأيسر من V391 Velorum في هذه الصورة. بعد آلاف السنين، من المرجح أن تُغير هذه النجوم الوليدة، بالإضافة إلى الانفجار الهائل لـ V391 Velorum كمستعر أعظم، مظهر غوم 19 الحالي الشبيه بوجه يانوس Janus.

يقع غوم 19 في اتجاه كوكبة الشراع (Vela) على بُعد حوالي 22,000 سنة ضوئية. يُستمد اسم Gum 19 من منشورٍ صدر عام 1955 لعالم الفيزياء الفلكية الأسترالي كولين إس. غوم، والذي شكّل أول مسحٍ هام لمناطق HII (تُقرأ "H-two") في سماء نصف الكرة الجنوبي. يشير HII إلى غاز الهيدروجين المتأين، أو المُنشط، لدرجة أن ذرات الهيدروجين تفقد إلكتروناتها.

[1] (https://www.astronomy.com/science/the-light-and-dark-face-of-a-star-forming-nebula/

https://coptic-treasures.com/

تُصدر هذه المناطق ضوءًا بأطوال موجية أو ألوان محددة، مما يُضفي على هذه السحب الكونية توهجها المميز. ومثل السحب الأرضية، تتغير أشكال وبنية مناطق HII هذه مع مرور الزمن، وإن كان ذلك على مدى دهورٍ لا نراها بأعيننا. في الوقت الحالي، يبدو Gum 19 في هذه الصورة وكأنه "تمزق في نسيج الزمكان"، حيث يمتدّ شريطٌ ضيقٌ ساطعٌ شبه عمودي عبر السديم. التقطت هذه الصورة الجديدة لسديم غوم 19 المثير للدهشة بواسطة جهاز يعمل بالأشعة تحت الحمراء يُدعى "ابن إسحاق" (SOFI)، مُثبّت على تلسكوب التكنولوجيا الجديدة (NTT) التابع للمرصد الأوروبي الجنوبي، والذي يعمل في مرصد لاسيا في تشيلي. يُمكّن رصد هذا السديم بالأشعة تحت الحمراء علماء الفلك من الرؤية عبر أجزاء من الغبار على الأقل.

يُعدّ النجم العملاق فائق الحرارة، V391 فيلوروم، مصدرًا رئيسيًا لإشعاع غوم 19. يتألق V391 فيلوروم بأبهى صوره في نطاق الضوء المرئي الأزرق الحارق، وتبلغ درجة حرارة سطحه حوالي 30,000 درجة مئوية (17,000 درجة فهرنهايت). ومع ذلك، يتميز هذا النجم الضخم بطبيعته المتقلبة، ويُصنّف ضمن النجوم المتغيرة. قد يتذبذب سطوع V391 Velorum فجأةً نتيجةً لنشاطٍ قويّ قد يشمل قذف أغلفةٍ من المادة، والتي تُساهم في تكوين Gum 19 وانبعاثاته الضوئية. لا تدوم سطوع النجوم الضخمة بحجم V391 Velorum طويلًا، فبعد عمرٍ قصير نسبيًا يبلغ حوالي 10 ملايين سنة، تنفجر هذه العمالقة كمستعراتٍ عظمى. تُضاهي هذه الانفجارات، مؤقتًا، شدة إضاءة مجراتٍ بأكملها، حيث تُقذف مادةً ساخنةً في الفضاء المحيط، وهو حدثٌ يُمكن أن يُغيّر لون وشكل السديم المحيط بها تغييرًا جذريًا. ولذلك، قد تُؤدي لحظات احتضار V391 Velorum إلى جعل Gum 19 غير قابلةٍ للتمييز. في محيط هذا العملاق الفائق المُتقلب، تستمر النجوم الجديدة في النمو. تُشير مناطق HII إلى مواقع تكوّن النجوم النشط حيث بدأت كمياتٌ هائلةٌ من الغاز والغبار بالانهيار تحت تأثير جاذبيتها. في غضون ملايين السنين، ستصل هذه الكتل المتقلصة من المادة في نهاية المطاف إلى الكثافة العالية في مراكزها اللازمة لبدء الاندماج النووي. كما سيؤدي التدفق الجديد للطاقة والرياح النجمية من هذه النجوم الوليدة إلى تغيير المشهد الغازي لـ Gum 19.



تستند صورة منطقة تكوّن النجوم Gum 19 إلى بيانات تم الحصول عليها في ثلاثة نطاقات من الأشعة تحت الحمراء القريبة (J وH وK؛ المرتبطة على التوالي بالأزرق والأخضر والأحمر). يبلغ عرض الصورة 4.7 دقيقة قوسية. ESO

https://coptic-treasures.com/

يكشف ويب عن النجوم الشباب في جميع مراحل التكوين

على شكل تدفقاتٍ متوهجةٍ مزدوجةٍ تُشير إلى موقع النجم الأولي. أدى وفرة النجوم الأولية لكن هدف هذه الملاحظات يتطلب منا النظر خلف سديم الجبار[1]. فخلف النجوم والغاز والغبار في مجرة M42، يمتد خيط طويل وضخم من الغاز والغبار البارد يُسمى (بشكل قد يُثير بعض الالتباس) سحب الجبار الجزيئية، وهي مُقسّمة إلى أربعة أجزاء، من OMC-1 إلى OMC-4. تقع OMC-1 مباشرةً خلف M42، وإلى الشمال منها تقع OMC-2 وOMC-3، بينما تقع OMC-4 إلى الجنوب. تُظهر هذه الصورة جزءًا صغيرًا شماليًا من OMC-2، يقع على بُعد 1280 سنة ضوئية من الأرض، شمال سديم الجبار بقليل. يضم هذا المشهد، الذي يمتد على مسافة 150 سنة ضوئية، جميع مراحل تكوّن النجوم، بدءًا من الأجنة النجمية الفتية، مرورًا بالأقراص الكوكبية الأولية، وصولًا إلى نجوم ما قبل التسلسل الرئيسي حديثة التكوين. أدى النشاط المكثف لتكوّن النجوم إلى ظهور مشهدٍ خلابٍ من التدفقات الغازية المتصاعدة والنجوم المتلألئة فوق طبقاتٍ دوّارةٍ من الغاز وسحبٍ داكنةٍ تحجب الرؤية.

تُعدّ السحب الجزيئية، مثل OMC-2، تجمعاتٍ هائلةً من الغاز أكثر كثافةً بكثيرٍ من بقية الفضاء بين النجوم. تسمح هذه الكثافة بتكوّن جزيئاتٍ معقدةٍ محميةٍ من الإشعاع المنبعث من النجوم الأخرى، كما أنها تعني أن الجاذبية قادرةٌ على التسبب في انهيار السحابة وتكوّن النجوم. المرحلة الأولى من هذه العملية هي النجم الأولي - وهو نجمٌ نامٍ يتغذى بالغاز من السحابة المحيطة به عبر قرصٍ غازيٍّ دوّار. عندما يسقط الغاز على النجم الأولي، يسخن، مما يُغذي توهجه. تُطلق كمية الطاقة الهائلة المكتسبة خلال هذه العملية في شكل نفاثاتٍ غازيةٍ عنيفةٍ من قطبي النجم، والتي غالبًا ما تُرى المتكوّنة هنا في OMC-2 إلى ظهور العديد من التدفقات الغازية المذهلة، الكبيرة والصغيرة. تُشكّل النفاثات المنبعثة من النجوم الفتية موجات صدمية عالية السرعة تجتاح المادة الكثيفة المحيطة بها؛ وعند اصطدام هذه الموجات بالغاز، يسخن ويتوهج بشدة، مُشكّلاً حوافًا حادة. قرّب الصورة لملاحظة أدق تفاصيل هذه الموجات الصدمية، بالإضافة إلى رصد التدفقات الأصغر من النجوم الأولية الفتية. حاول تحديد مواقع النجوم الأولية الخفية، التي لا تزال محجوبة بعمق داخل أحضانها الغبارية بحيث لا يمكن رؤيتها مباشرة، وذلك بتتبع التدفقات! قارن هذه النجوم الأولية الفتية جدًا بأكثر الأمثلة تطورًا: النجوم الكبيرة الساطعة التي أزالت السحب التي كانت تحيط بها وتُضيء الآن OMC-2.

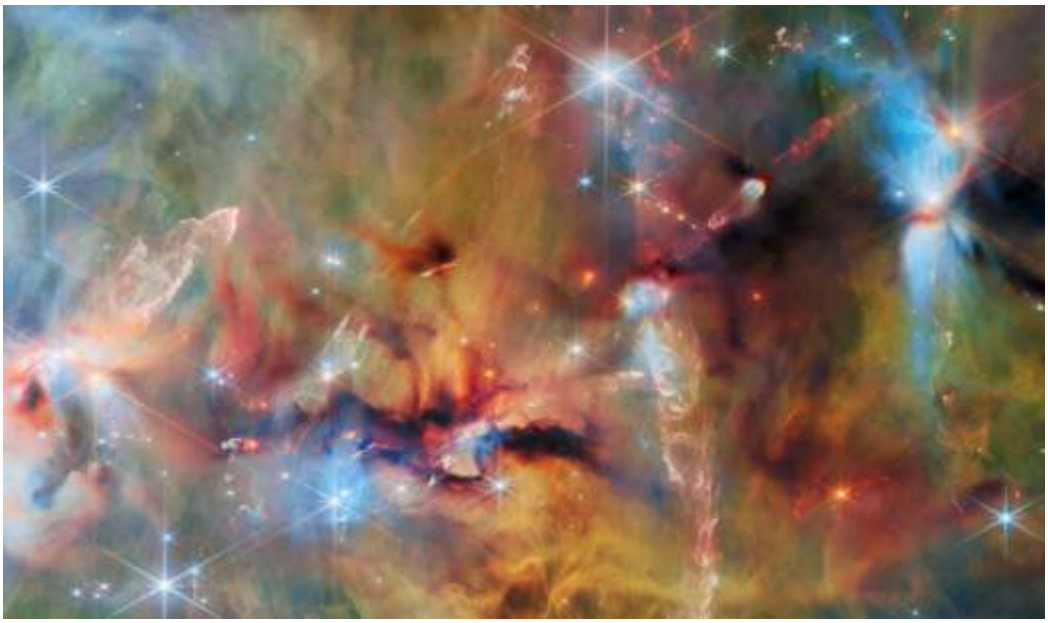
استُخدمت كاميرا الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIRCam) التابعة لتلسكوب جيمس ويب لالتقاط هذه الصورة لـ OMC-2. يحجب الغاز والغبار الكثيفان داخل وحول سديم الجبار أي ضوء قادم من سحابة OMC-2 بأطوال موجية مرئية، كما تحجب السحب الموجودة في سحابة OMC-2 نفسها النجوم الأولية التي يسعى الفلكيون لاكتشافها. فقط في نطاق الأشعة

[1] (https://esawebb.org/images/potm2605a/

https://coptic-treasures.com/

تحت الحمراء نرى هذه النجوم الأولية تبدأ بالتألق من شرانقها الغبارية. في كثير من الأماكن، يكون الغبار البارد كثيفًا لدرجة أنه يمتص كل الضوء أو معظمه، مكونًا كريات داكنة. تشير الألوان البرتقالية والبنية وبعض الألوان الحمراء إلى غبار أكثر دفئًا يمتص بعض الضوء ويصدر بعضًا منه. يُعزى التدرج اللوني من الأصفر إلى الأخضر في معظمه إلى انبعاثات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs)، بينما يُرى الضوء المنبعث من النجوم والنجوم الأولية المتناثرة بفعل حبيبات الغبار هنا بشكل أساسي على هيئة ضباب أزرق وأزرق سماوي. يُشكل الغاز المُسخن بفعل التدفقات الخارجية التلال الحمراء المتوهجة ذات التفاصيل الدقيقة.

جُمعت البيانات ضمن برنامج الرصد رقم 5804، الذي يهدف إلى دراسة تكوّن النجوم في سحابة OMC-2 وجارتها المباشرة OMC-3. ونظرًا لقرب هاتين السحابتين الجزيئيتين من الأرض، فهما بمثابة مختبرات مثالية لدراسة المراحل الأولى لتطور النجوم. سيستخدم علماء الفلك بيانات تلسكوب جيمس ويب الفضائي لدراسة كيفية تأثير التدفقات الخارجية المتعددة على تكوّن النجوم في المنطقتين، وكيف يؤثر انبعاث الأشعة فوق البنفسجية من النجوم الفتية على التركيب الكيميائي للأقراص المحيطة بالنجوم التي ستُشكّل الكواكب يومًا ما، وكيف يتراكم الغاز والغبار على عشرات النجوم الأولية في المنطقة.



في هذه الصورة الملتقطة بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي التابع لوكالة ناسا ووكالة الفضاء الأوروبية ووكالة الفضاء الكندية، نعود إلى كوكبة الجبار (الصياد)، وهي منطقة مألوفة لتلسكوب ويب. تمتلئ هذه المنطقة من السماء بسحب تشكل النجوم، مكونةً شبكة معقدة تمتد لمئات السنين الضوئية. نجد أنفسنا في سحابة الجبار الجزيئية العملاقة (أوريون أ)، التي تُعد سديم الجبار (المعروف أيضًا باسم M42) جزءًا منها؛ وقد سبق لتلسكوب ويب أن التقط صورًا مقربة وواسعة الزاوية لسديم M42.
[وصف الصورة: منطقة داخل سحابة جزيئية تشكل النجوم. الخلفية مغطاة بطبقات من الغاز والغبار بألوان الأزرق والأخضر والأصفر. تحجب كتل أكثر كثافة من الغبار البارد، ذات اللون البني الداكن إلى الأسود، الضوء تمامًا. تقع النجوم بين السحب وفوقها، من النجوم البرتقالية الصغيرة إلى النجوم البيضاء أو الزرقاء الكبيرة. تتشكل أمواج وتيارات من الغاز الأبيض المتوهج نتيجة اصطدام نفاثات النجوم الأولية بالمادة المحيطة.]

https://coptic-treasures.com/

سديم الفراشة يعطي تصور على الضوء الأولى

عُثر على أدلةٍ تُشير إلى كيفية تكوّن عوالم شبيهة بالأرض مدفونةً في قلب سديمٍ كونيّ مذهل يُشبه الفراشة. وبفضل تلسكوب جيمس ويب الفضائي، يقول الباحثون إنهم حققوا قفزةً نوعيةً في فهمنا لكيفية تكوّن المواد الخام للكواكب الصخرية. دُرِسَ هذا الغبار الكوني - جزيئات دقيقة من المعادن والمواد العضوية، بما في ذلك مكونات مرتبطة بأصول الحياة - في قلب سديم الفراشة، NGC 6302، الذي يقع على بُعد حوالي 3400 سنة ضوئية في كوكبة العقرب. من الحلقة الكثيفة المغبرة التي تُحيط بالنجم المختبئ في مركز السديم إلى نفاثاته المتدفقة، تكشف أرصاد ويب عن العديد من الاكتشافات الجديدة التي ترسم صورةً لم يسبق لها مثيل لسديم كوكبي ديناميكي ومنظم[1].

معظم الغبار الكوني ذو بنية ذرية غير منتظمة، أو عشوائية التوجيه، كالسخام. لكن بعضه يتخذ أشكالًا بلورية بديعة، أشبه بالأحجار الكريمة الصغيرة.

"لسنوات، ناقش العلماء كيفية تكوّن الغبار الكوني في الفضاء. لكن الآن، وبفضل تلسكوب جيمس ويب الفضائي القوي، قد نحصل أخيرًا على صورة أوضح"، هذا ما قالته الدكتورة ميكاكو ماتسورا Mikako Matsuura، الباحثة الرئيسية من جامعة كارديف Cardiff. "تمكّنا من رؤية كلٍّ من الأحجار الكريمة الباردة المتكوّنة في مناطق هادئة طويلة الأمد، والغبار الناري المتكوّن في أجزاء عنيفة سريعة الحركة من الفضاء، وكل ذلك ضمن جسم واحد. "هذا الاكتشاف خطوة كبيرة إلى الأمام في فهم كيفية تكوّن المواد الأساسية للكواكب." يُعدّ النجم المركزي لسديم الفراشة أحد أكثر النجوم المركزية حرارةً المعروفة في سديم كوكبي في مجرتنا، حيث تبلغ درجة حرارته 220,000 كلفن.

هذا المحرك النجمي المتوهج هو المسؤول عن التوهج الرائع للسديم، ولكن قد يتم توجيه كامل طاقته عبر حزام كثيف من الغاز الغباري يحيط به: الحلقة. تُظهر بيانات تلسكوب جيمس ويب الفضائي الجديدة أن الحلقة تتكون من سيليكات بلورية مثل الكوارتز، بالإضافة إلى حبيبات غبار غير منتظمة الشكل. يبلغ حجم حبيبات الغبار جزءًا من مليون من المتر - وهو حجم كبير نسبيًا مقارنةً بالغبار الكوني - مما يشير إلى أنها تنمو منذ زمن طويل. خارج الحلقة، يتخذ الإشعاع المنبعث من الذرات والجزيئات المختلفة بنية متعددة الطبقات. تتركز الأيونات التي تتطلب أكبر قدر من الطاقة للتكوين بالقرب من المركز، بينما توجد تلك التي تتطلب طاقة أقل على مسافة أبعد من النجم المركزي. يُعدّ الحديد والنيكل مثيرين للاهتمام بشكل خاص، حيث يرسمان زوجًا من النفاثات التي تنطلق من النجم في اتجاهين متعاكسين. ومن المثير للاهتمام أن الفريق رصد أيضاً ضوءاً ينبعث من

[1] Mikako Matsuura, Kevin Volk, Patrick Kavanagh, et al., The JWST/MIRI view of the planetary nebula NGC 6302 – I. A UV-irradiated torus and a hot bubble triggering PAH formation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 542, Issue 2, September 2025, Pages 1287–1307

https://coptic-treasures.com/

جزيئات كربونية تُعرف باسم الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs). تُشكّل هذه الجزيئات هياكل مسطحة حلقية الشكل، تُشبه إلى حد كبير أشكال خلايا النحل.

بالنظر إلى موقع جزيئات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات (PAHs)، يرجح فريق البحث أن هذه الجزيئات تتشكل عندما تنفجر "فقاعة" من الرياح النجمية في الغاز المحيط بها. قد يكون هذا أول دليل على الإطلاق لتكوّن جزيئات الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات في سديم كوكبي غني بالأكسجين، مما يوفر لمحة مهمة عن تفاصيل كيفية تكوّن هذه الجزيئات. يُعدّ NGC 6302 أحد أكثر السدم الكوكبية دراسةً في مجرتنا، وقد سبق تصويره بواسطة تلسكوب هابل الفضائي.

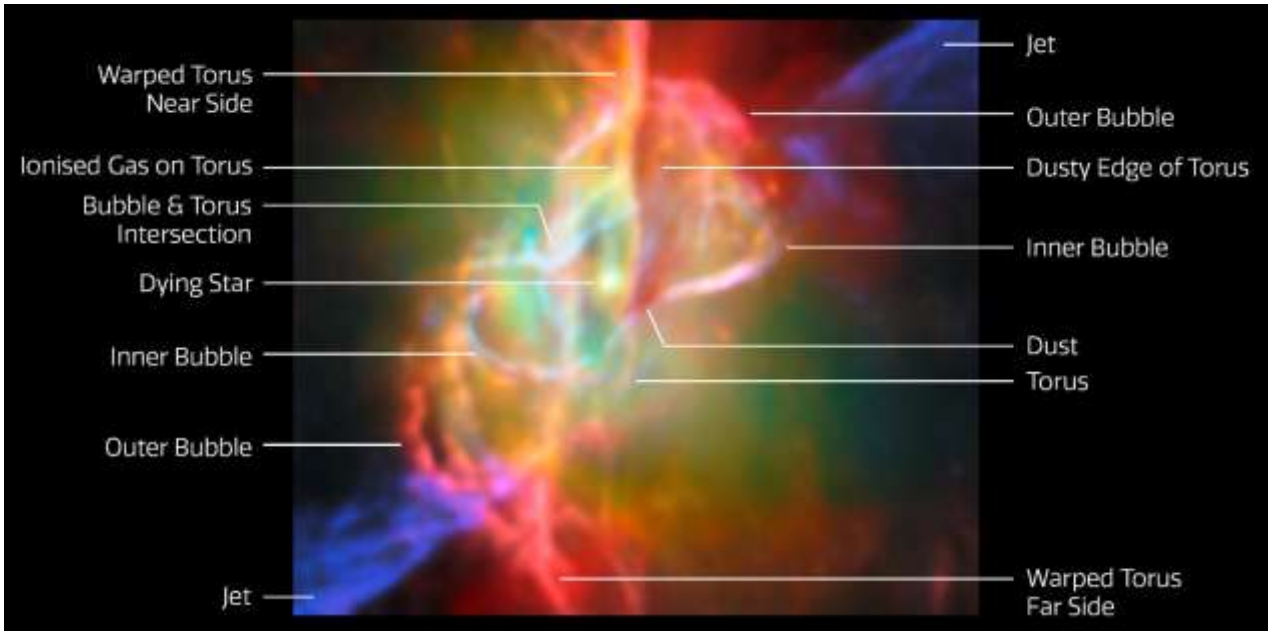
سديم الفراشة هو سديم ثنائي القطب، أي أنه يتكون من فصين يمتدان في اتجاهين متعاكسين، مشكلين "جناحي" الفراشة. ويظهر شريط داكن من الغاز الغباري كـ"جسم" الفراشة. هذا الشريط هو في الواقع حلقة دائرية على شكل كعكة تُرى من الجانب، تخفي النجم المركزي للسديم - النواة القديمة لنجم شبيه بالشمس، وهو الذي يمد السديم بالطاقة ويجعله متوهجًا. قد يكون شكل السديم الشبيه بالحشرات هو السبب في شكله الحلقي المغطى بالغبار، وذلك بمنع الغاز من التدفق للخارج من النجم بالتساوي في جميع الاتجاهات.

تُظهر الصورة الجديدة الملتقطة بواسطة تلسكوب جيمس ويب الفضائي مركز سديم الفراشة وحلقته الغبارية، مُقدّمةً رؤيةً غير مسبوقة لبنيته المعقدة. وتعتمد الصورة على بيانات من جهاز الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (MIRI) التابع لتلسكوب ويب، والذي يعمل بنظام وحدة المجال المتكامل. يجمع هذا النظام بين كاميرا ومطياف لالتقاط صور بأطوال موجية متعددة في آنٍ واحد، كاشفًا كيف يتغير مظهر الجسم بتغير الطول الموجي. وقد عزّز فريق البحث بيانات تلسكوب ويب ببيانات من مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر، وهي شبكة قوية من أطباق الراديو. حدّد الباحثون، من خلال تحليل بيانات تلسكوب ويب، ما يقارب 200 خط طيفي، يحمل كل منها معلومات عن الذرات والجزيئات في السديم. وتكشف هذه الخطوط عن بنى متداخلة ومترابطة تُحدّدها أنواع كيميائية مختلفة. تمكن فريق البحث من تحديد موقع النجم المركزي لسديم الفراشة، الذي يُسخّن سحابة غبارية محيطة به لم تكن مكتشفة سابقًا، مما يجعل النجم يتألق بوضوح في نطاق الأشعة تحت الحمراء المتوسطة التي يرصدها جهاز MIRI. ظل موقع النجم المركزي للسديم غامضًا حتى الآن، لأن هذا الغبار الكثيف يحجبه عن الأنظار في نطاق الضوء المرئي. وقد افتقرت عمليات البحث السابقة عن النجم إلى الجمع بين حساسية الأشعة تحت الحمراء ودقة التصوير اللازمتين لرصد سحابة الغبار الدافئة التي تحجبه.

https://coptic-treasures.com/



تُعرض هذه المجموعة من الصور ثلاث مناظر لسديم الفراشة، تتضمن صورة بصرية وأخرى بالأشعة تحت الحمراء القريبة من تلسكوب Hubble (يسارًا ووسطًا)، بالإضافة إلى أحدث صورة من تلسكوب جيمس ويب/مرصد ألما. حقوق الصورة: ESA/Webb, NASA & CSA, M. Matsuura, J. Kastner, K. Noll, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)، N. Hirano, J. Kastner, M. Zamani (ESA/Webb).



تأخذ هذه الصورة الموضحة المشاهد في رحلة استكشافية عميقة إلى قلب سديم الفراشة، NGC 6302، كما رصده تلسكوب جيمس ويب الفضائي.
حقوق الصورة: ESA/Webb, NASA & CSA, M. Matsuura, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)، N. Hirano, M. Zamani (ESA/Webb).

https://coptic-treasures.com/

نشأة القمر وتكونه

https://coptic-treasures.com/

تعددت النظريات قديماً حول نشأة القمر، ولكن جميع هذه النظريات هى نظريات افتراضية وليس المجال هنا لتفنيد هذه النظريات واثبات عدم صحتها، لكن كما يذكر سفر التكوين "وَقَالَ اللهُ: «لِتَكُنْ أَنْوَارٌ فِي جَلَدِ السَّمَاءِ لِتَفْصِلَ بَيْنَ النَّهَارِ وَاللَّيْلِ، وَتَكُونَ لآيَاتٍ وَأَوْقَاتٍ وَأَيَّامٍ وَسِنِينٍ" تكوين 14:1 فإن القمر قد بدأ تكوينة فى نفس الوقت الذى بدأت فيه الشمس والأرض فى التكون. وبالرغم من أن علماء الفلك قد رصدوا تكون القمر من قرص يدور حول كوكبه وهذه الكشف ربما يكون أقرب إلى الواقع، لأنه غير ممكن أن يكون القمر قد تشكل من التصادم أو من الإنشطار الكوكبى أو من الأستحواذ، لأننا كما نرى يذكر سفر التكوين أن النباتات قد خلق فى اليوم الثالث، أى قبل اكتمال نمو الشمس والقمر، ولذلك كيف ينمو النبات فى نفس الوقت الذى تحدث فيه تطورات عنيفة على كوكب الأرض.

لكن ما تم رصده حول تكوين قمر من القرص الذى يدور حول كوكبه هى أقرب إلى الواقع، حيث أنه تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار. وكما ذكر فى ههذا البحث خير دليل هو أشباه الأقمار التى لازالت تحيط بالكرة الأرضية حتى الآن

نظريات تكوين القمر

طُرحت خمس نظريات رئيسية لتفسير تشكّل القمر:

a. نظرية الانشطار: كان القمر جزءًا من الأرض في الماضي، وانفصل عنها بطريقة ما في بدايات تاريخ النظام الشمسي. ويُعد حوض المحيط الهادئ الحالي الموقع الأكثر ترجيحًا لجزء الأرض الذي نشأ منه القمر.
b. نظرية الاستحواذ: تشكّل القمر في مكان آخر، ثم استحوذت عليه جاذبية الأرض.
c. نظرية التكثف: تكثف القمر والأرض معًا من السديم الأصلي الذي شكّل النظام الشمسي.
d. نظرية تصادم الكويكبات: أدى تفاعل الكويكبات التي تدور حول الأرض والشمس (كتل صخرية ضخمة كالكويكبات) في بدايات تاريخ النظام الشمسي إلى تفككها. وتكثف القمر من هذه الحطام.
e. نظرية الحلقة المقذوفة: اصطدم كويكب بحجم المريخ بالأرض، قاذفًا كميات هائلة من المادة. تشكل قرص من المادة التي تدور حول الأرض، وتكثفت هذه المادة في النهاية لتشكل القمر في مدار حول الأرض.

https://coptic-treasures.com/

علماء الفلك يرصدون قرصاً يتشكل حول كوكب خارج المجموعة الشمسية أثناء تشكل القمر

تقول ميريام بينيستي Myriam Benisty ، الباحثة في جامعة غرونوبل Grenoble بفرنسا وجامعة تشيلي: "يقدم بحثنا رصدًا واضحًا لقرص قد تتشكل فيه أقمار صناعية". وتضيف: "لقد حصلنا على أرصادنا باستخدام مرصد ألما بدقة فائقة، ما مكننا من تحديد ارتباط القرص بالكوكب بدقة، كما تمكّنا من تحديد حجمه لأول مرة". يحيط هذا القرص، المسمى بالقرص المحيط بالكوكب، بالكوكب الخارجي PDS 70c، وهو أحد كوكبين عملاقين شبيهين بالمشتري يدوران حول نجم يبعد عنا حوالي 400 سنة ضوئية. وقد رصد علماء الفلك سابقًا دلائل على وجود قرص "تتشكل فيه الأقمار" حول هذا الكوكب الخارجي، ولكن نظرًا لعدم قدرتهم على تمييز القرص بوضوح عن بيئته المحيطة، لم يتمكنوا من تأكيد رصده[1].

بالإضافة إلى ذلك، وبمساعدة مرصد ألما، اكتشفت بينيستي وفريقها أن قطر القرص يقارب المسافة بين الشمس والأرض، وأن كتلته كافية لتكوين ما يصل إلى ثلاثة أقمار بحجم القمر. لكن هذه النتائج ليست مفتاحًا لفهم كيفية نشأة الأقمار فحسب، بل يقول جيهان باي، الباحث في مختبر الأرض والكواكب التابع لمؤسسة كارنيجي للعلوم في الولايات المتحدة الأمريكية، والمؤلف المشارك في الدراسة: "هذه الملاحظات الجديدة بالغة الأهمية أيضًا لإثبات نظريات تكوين الكواكب التي لم يكن بالإمكان اختبارها حتى الآن". تتشكل الكواكب في أقراص غبارية حول النجوم الفتية، حيث تحفر تجاويف أثناء التهامها للمواد من هذا القرص المحيط بالنجم لتنمو. وفي هذه العملية، يمكن للكوكب أن يكتسب قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نموه من خلال تنظيم كمية المواد المتساقطة عليه. وفي الوقت نفسه، يمكن للغاز والغبار في القرص المحيط بالكوكب أن يتحدا لتكوين أجسام أكبر حجمًا تدريجيًا من خلال تصادمات متعددة، مما يؤدي في النهاية إلى ولادة الأقمار.

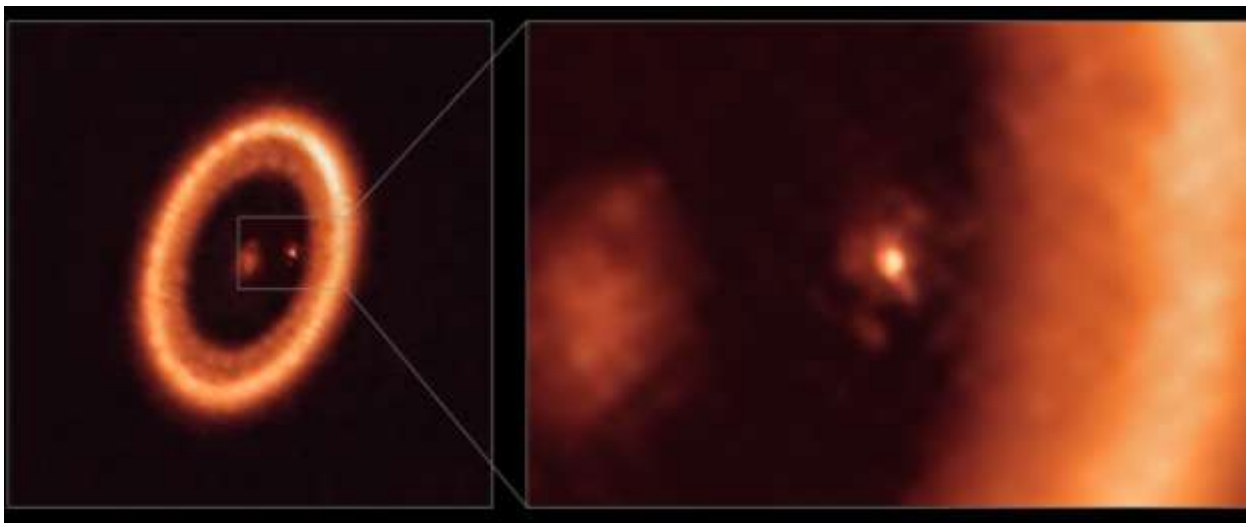
لكن علماء الفلك لم يفهموا بعد تفاصيل هذه العمليات فهمًا كاملًا. يوضح ستيفانو فاكيني Stefano Facchini، الباحث في المرصد الأوروبي الجنوبي، والمشارك أيضًا في البحث: "باختصار، لا يزال من غير الواضح متى وأين وكيف تتشكل الكواكب والأقمار". وتوضح ميريام كيبلر، الباحثة في معهد ماكس بلانك لعلم الفلك في ألمانيا، وإحدى المؤلفات المشاركات في الدراسة: "تم اكتشاف أكثر من 4000 كوكب خارج المجموعة الشمسية حتى الآن، ولكن تم رصدها جميعًا في أنظمة ناضجة. يُعدّ الكوكبان PDS 70b وPDS 70c، اللذان يشكلان نظامًا يُشبه نظام المشتري وزحل، الكوكبين الوحيدين اللذين تم اكتشافهما حتى الآن واللذين لا يزالان في طور التكوين". ويضيف فاكيني: "لذلك، يُتيح لنا هذا النظام فرصة فريدة لمراقبة ودراسة عمليات تكوين الكواكب والأقمار".

---

[1] European Southern Observatory ESO /https://www.eso.org/public/news/eso2111 (
https://www.mpg.de/17248532/astronomers-make-first-clear-detection-of-a-moon-forming-disk-around-an-exoplanet
Myriam Benisty, et. Al., A Circumplanetary Disk around PDS70c, The Astrophysical Journal Letters, Volume 916, (2021) Number 1

https://coptic-treasures.com/

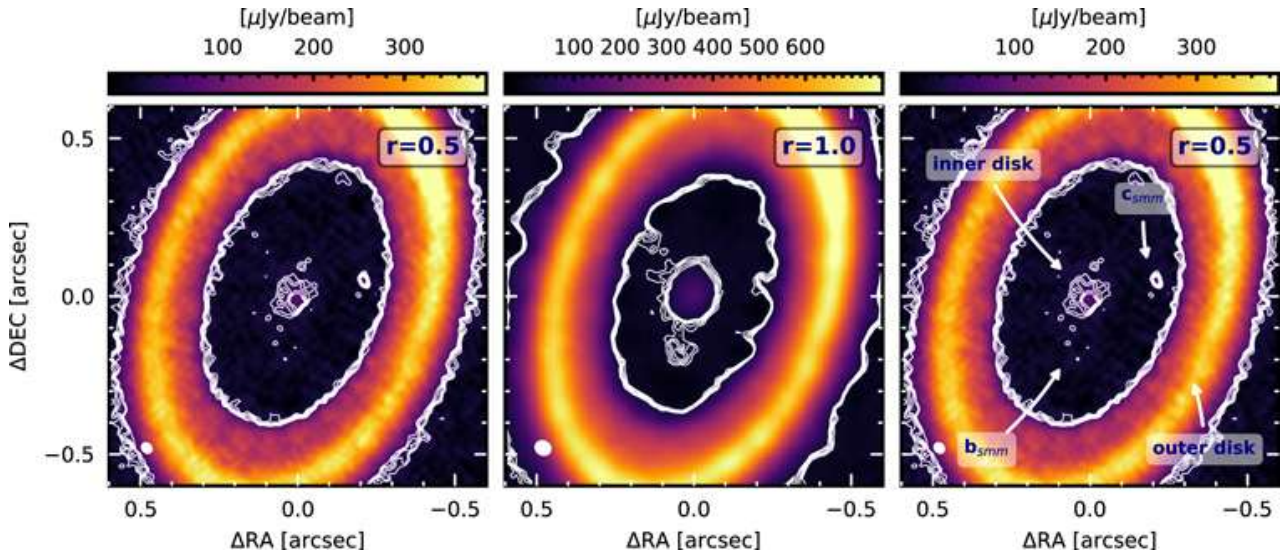
تم اكتشاف الكوكبين PDS 70b وPDS 70c، اللذين يشكلان النظام الكوكبي، لأول مرة باستخدام تلسكوب ESO European Southern Observatory المرصد الأوربى الجنوبى الكبير جدًا (VLT) في عامي 2018 و2019 على التوالي، وبفضل طبيعتها الفريدة، تمت مراقبتها مرات عديدة باستخدام تلسكوبات وأجهزة أخرى منذ ذلك الحين. وقد أتاحت أحدث عمليات الرصد عالية الدقة التي أجراها مرصد ألما (ALMA) لعلماء الفلك الحصول على مزيد من المعلومات حول هذا النظام. فبالإضافة إلى تأكيد اكتشاف القرص المحيط بالكوكب PDS 70c ودراسة حجمه وكتلته، وجدوا أن الكوكب PDS 70b لا يُظهر دليلًا واضحًا على وجود مثل هذا القرص، مما يشير إلى أنه حُرم من الغبار الذي نشأ عليه بفعل الكوكب PDS 70c. وسيتم التوصل إلى فهم أعمق للنظام الكوكبي باستخدام تلسكوب ESO الكبير للغاية (ELT)، الذي يجري بناؤه حاليًا على جبل سيرو أرمازونيس في صحراء أتاكاما التشيلية. يقول ريتشارد تيغ Richard Teague، الباحث في مركز الفيزياء الفلكية بجامعة هارفارد ومؤسسة سميثسونيان Smithsonian بالولايات المتحدة الأمريكية، والمؤلف المشارك في الدراسة: "سيكون التلسكوب الأوروبي الكبير للغاية (ELT) أساسيًا لهذا البحث، إذ سيمكننا، بفضل دقته العالية جدًا، من رسم خريطة تفصيلية للنظام". وبالتحديد، سيتمكن الفريق، باستخدام جهاز التصوير والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء المتوسطة (METIS) التابع للتلسكوب الأوروبي الكبير للغاية، من دراسة حركة الغاز المحيطة بنظام PDS 70c للحصول على صورة ثلاثية الأبعاد كاملة للنظام.



تُظهر هذه الصورة، الملتقطة بواسطة مصفوفة أتاكاما الكبيرة للمليمتر/دون المليمتر (ALMA)، التي تُعدّ ESO شريكًا فيها، مشهدًا واسعًا (يسارًا) ومشهدًا مُقرّبًا (يمينًا) للقرص المُتشكّل حول الكوكب PDS 70c، وهو كوكب شابّ يُشبه المشتري، يقع على بُعد 400 سنة ضوئية تقريبًا. يُظهر المشهد المُقرّب الكوكب PDS 70c وقرصه المحيط به في مركز الصورة، بينما يشغل القرص الحلقي الأكبر المحيط بالنجم معظم الجانب الأيمن من الصورة. يقع النجم PDS 70 في مركز الصورة الواسعة على اليسار.

تمّ اكتشاف كوكبين في هذا النظام، هما PDS 70c وPDS 70b، والأخير غير ظاهر في هذه الصورة. وقد نحت هذان الكوكبان تجويفًا في القرص المحيط بالنجم أثناء التهامهما للمادة من القرص نفسه، ما أدّى إلى ازدياد حجمهما. خلال هذه العملية، اكتسب الكوكب PDS 70c قرصًا محيطًا به، مما يساهم في نمو الكوكب وفي تكوين الأقمار. يبلغ حجم هذا القرص المحيط بالكوكب حجم المسافة بين الشمس والأرض، ويحتوي على كتلة كافية لتكوين ما يصل إلى ثلاثة أقمار بحجم القمر. Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al

https://coptic-treasures.com/



خرائط SCC الجزيئية لنظام CT Cha. بالنسبة لجميع الجزيئات باستثناء H_2O (أسفل اليمين)، تُظهر SCC إشارة عند موقع CT Cha b، بينما لا توجد إشارة من CT Cha A، الموجود في الزاوية السفلية اليسرى والمُشار إليه بالنجمة الرمادية. في المقابل، تهيمن السمات النجمية المتبقية على SCC الخاص بـ H_2O، ولا يزال من الممكن تمييز شكل دالة انتشار النقطة النجمية من المكعب الأصلي (الخط الأبيض المتقطع في لوحة H_2O).

يدرس تلسكوب جيمس ويب القرص المتشكل حول كوكب ضخم والذي يشكل القمر

خلال المرحلة النهائية لتكوين الكواكب الغازية العملاقة، تتشكل أقراص محيطة بالكوكب (CPDs) من الغاز والغبار نتيجةً لقانون حفظ الزخم الزاوي، مما يوفر المواد اللازمة لتراكمها على الكوكب ومكونات الأقمار. وقد ظل تركيب هذه الأقراص غامضًا، نظرًا لضعف إضاءتها وقربها من نجومها المضيفة، مما حدّ من قدرتنا على الوصول إليها. الآن، وبفضل الدقة المكانية والطيفية لمطياف جيمس ويب الفضائي/ميري متوسط الدقة، أصبح بإمكاننا رصد هذا الخزان من المواد اللازمة للكواكب المرافقة ذات الكتلة الكوكبية في مدارات واسعة وتوصيفه لأول مرة. نعرض هنا طيف الأشعة تحت الحمراء المتوسطة للقرص المحيط بالكوكب المرافق الشاب CT Cha b. تُظهر البيانات تركيبة كيميائية غنية بالكربون، حيث تم رصد سبعة جزيئات تحتوي على الكربون (تصل إلى C6H6) ونظير واحد، وتشير إلى نسبة عالية من الكربون إلى الأكسجين في الغاز (C/O > 1)، وهو ما يتناقض مع نسب وفرة العناصر التي تُقاس عادةً في أغلفة الكواكب الغازية العملاقة المصورة مباشرةً. يتناقض هذا التركيب الكيميائي الغني بالكربون تناقضًا صارخًا مع طيف القرص المحيط بالنجم المضيف، CT Cha A، الذي لا يُظهر أي جزيئات تحتوي على الكربون. يشير هذا الاختلاف في التركيب الكيميائي للقرص بين القرص المضيف ورفيقه إلى تطور كيميائي سريع ومتباين على مدى ملايين السنين. ومع ذلك، تتبع الخصائص الكيميائية للقرص المحيطي المركزي اتجاهات مُلاحظة في الأجسام المعزولة،

https://coptic-treasures.com/

حيث تتحول الأقراص من تركيب غني بالأكسجين إلى تركيب غني بالكربون مع انخفاض كتلة النجم المضيف. تُقدم نتائجنا أول نظرة مباشرة على الخصائص الكيميائية والفيزيائية للمادة المتراكمة على نظير عملاق غازي، وعلى نظامه القمري المحتمل[1].

أقمار الأرض شبه الحقيقية والشبحية تؤيد تكون القمر من قرص يدور حول الكوكب

تُعرف أشباه أقمار الأرض بهذا الاسم لأنها، من زاوية معينة، تبدو كأنها أقمار. لكن من منظور أوسع، يتضح أنها ليست أقمارًا على الإطلاق، بل هي كويكبات. إنها أشبه بخدعة جاذبية. فمن منظور يدور مع الأرض حول الشمس، يبدو كل كويكب من هذه الكويكبات وكأنه يدور حول كوكبنا، بينما هو في الواقع يدور حول الشمس. في الحقيقة، تتشارك أشباه أقمار الأرض مدار كوكبنا، فهي تتبع المسار نفسه تقريبًا الذي نسلكه حول الشمس[2].

لكن بينما ترسم هذه الكويكبات مداراتها، تتأثر أيضًا بشكل طفيف بجاذبية الأرض. فهي لا تدور حول الأرض كالأقمار الصناعية، بل تتزامن مداراتها مع مدار كوكبنا، مما يبقيها قريبة منه. أحيانًا يتقدم شبه القمر على الأرض، وأحيانًا يتخلف عنها، بينما يدور كلاهما حول الشمس. من زاوية معينة، يبدو الأمر كما لو أن شبه القمر يدور حولنا بدلًا من نجمنا. يُطلق على هذا التكوين اسم حركة شبه القمر، وهي إحدى الطرق العديدة التي يمكن للأجرام السماوية من خلالها أن تتشارك مدارًا مع الأرض. هناك أيضًا مدارات "طروادة"، حيث يرسم جسم ما حلقات حول نقطة تبقى دائمًا متقدمة أو متأخرة عن الأرض أثناء دورانه حول الشمس. وهناك مدارات "حدوة الحصان"، حيث يتبادل جسم ما بين التقدم والتخلف عن الأرض في مداره، لكن دون البقاء قريبًا من الأرض كما في حركة شبه القمر.

أما القمر المصغر، فهو جرم يدور حول كوكب ما، وإن كان ذلك لفترة وجيزة. تدوم أقمار الأرض المصغرة أقل من عام في المتوسط. وهي صغيرة جدًا ويصعب رصدها: لم يُكتشف سوى أربعة أقمار مصغرة للأرض، ولا يوجد أي منها يدور حول كوكبنا اليوم. بل قد يكون بعضها حطامًا فضائيًا. فقد ظُنّ خطأً أن مركبة غايا الفضائية قمر مصغر، وكذلك مراحل الصواريخ من مهمتي تشانغ إي 2 ولونار بروسبكتور.

الأقمار الشبحية - إن وُجدت فعلاً - هي سحب غبارية دوّامية تشارك الأرض مدارها، فتتقدمها أو تتأخر عنها أثناء دورانها حول الشمس. تُعرف رسمياً باسم "سحب كورديلفسكي"، وقد رُصدت الأقمار الشبحية لأول مرة في ستينيات القرن الماضي،

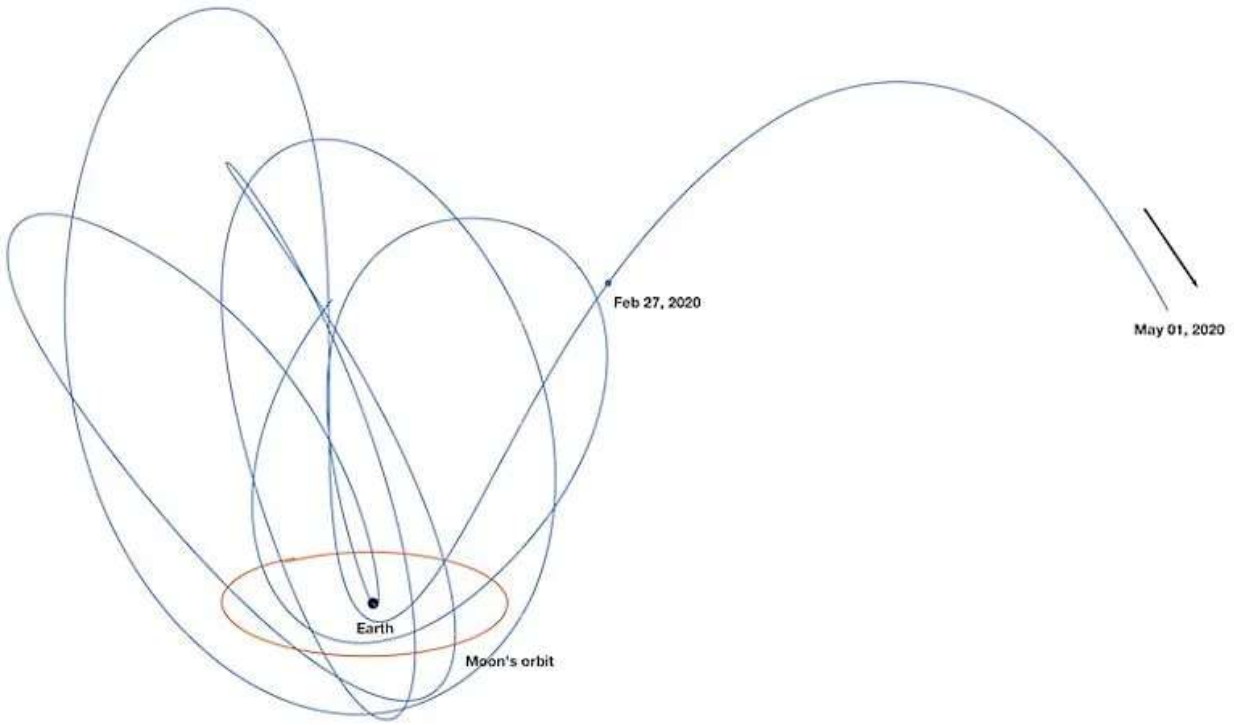
[1] Gabriele Cugno and Sierra L. Grant, A Carbon-rich Disk Surrounding a Planetary-mass Companion, The Astrophysical Journal Letters, Volume 991, Number 2 (2025)

[2] https://www.planetary.org/articles/the-quasi-moons-of-earth

https://coptic-treasures.com/

ولم يتم تأكيد وجودها إلا بشكل مبدئي في عام ٢٠١٨. ولا يزال الجدل قائماً حول وجود هذه السحب من عدمه. ومن المحتمل أن تظهر وتختفي تبعاً لتأثير الشمس والكواكب.

كان العلماء يعتقدون سابقًا أن بعض الأقمار شبه القمرية لديها فرصة كبيرة للاصطدام بالأرض، ولكن لحسن الحظ، لم يعد هذا هو الحال. نظرًا لأن حجم الأقمار شبه القمرية الحالية للأرض يتراوح بين 10 و300 متر (30-1000 قدم)، فإن بعضها كبير بما يكفي لإحداث دمار هائل في منطقة ما إذا اصطدمت بنا. ولكن لا يوجد خطر من اصطدام أي قمر شبه قمري معروف بالأرض في المستقبل القريب. مدارات الأقمار شبه القمرية قابلة للتنبؤ بدرجة كافية تمكن علماء الفلك من رصد أي اصطدام محتمل قبل حدوثه بوقت كافٍ. أما بالنسبة للأقمار الصغيرة جدًا، فليس من النادر أن تصطدم بالأرض. حوالي 1% من جميع الأقمار الصغيرة تصطدم في نهاية المطاف، ولكن معظمها صغير، لذا تحترق في غلافنا الجوي. من المتوقع أن يصطدم قمر صغير جدًا وخطير، قطره كيلومتر واحد (0.6 ميل)، بالأرض مرة واحدة كل مليار سنة على الأكثر.



مسار القمر المصغر 2020 CD3: المسار الذي سلكه القمر المصغر 2020 CD3، الذي تم أسره مؤقتًا حول الأرض، من يناير 2019 إلى مايو 2020.
Image: Javier Roa Vicens

https://coptic-treasures.com/

قابلية الأرض المبكرة للحياة: وجود الماء السائل تحت شمس فتية خافتة، بفضل التسخين المدّي القوي الناتج عن قرب القمر

تشير الأدلة الجيولوجية إلى وجود ماء سائل بالقرب من سطح الأرض منذ 4.4 مليار سنة، عندما كانت الشمس الفتية الخافتة تشع حوالي 70% فقط من طاقتها الحالية[1]. في ذلك الوقت، كان من المفترض أن تكون الأرض كرة ثلجية ضخمة لو كانت خصائص غلافها الجوي مشابهة لخصائص الأرض الحالية. وقد طُرحت عدة فرضيات، منها تأثير الاحتباس الحراري الشديد في الغلاف الجوي، وكبر كتلة الشمس في البداية، وانبعاث الحرارة المكتسبة خلال عملية تراكم المواد الكوكبية الأولية، والنشاط الإشعاعي لمواد الأرض المبكرة، كمستودعات أو مصائد للحرارة. وحتى الآن، لا تزال مفارقة الشمس الفتية الخافتة تشكل مشكلة مهمة في فهمنا لأصل الحياة على الأرض. تستخدم نظرية المد والجزر ذات التأخر الطوري الثابت لاستكشاف إمكانية أن يكون القمر الوليد، الذي تشكل بعد حوالي 69 مليون سنة من اشتعال الشمس، قد ولّد احتكاكًا مدّيًا شديدًا، وبالتالي حرارة، في حقبة الهاديان، وربما في حقبة الأركي. نُبين أن نظام الأرض والقمر قد فقد ما يقارب 3×10^{31} جول (99% من ميزانيته الأولية للطاقة الميكانيكية) على شكل حرارة مدية. وقد يكون التسخين المدّي الذي يبلغ حوالي $10\ W\ m^{-2}$ عبر السطح على مدى 100 مليون سنة قد ساهم في ارتفاع درجة الحرارة بما يصل إلى 5 درجات مئوية على الأرض في بداياتها. لا يُفسر هذا التأثير الحراري وحده مفارقة الشمس الفتية الخافتة، ولكنه قد يكون لعب دورًا محوريًا بالاشتراك مع تأثيرات أخرى. قد تُسهم الدراسات المستقبلية للتفاعل بين التسخين المدّي، وتطور إنتاج الطاقة الشمسية، وتأثيرات الغلاف الجوي (الاحتباس الحراري) على الأرض في بداياتها في حل مفارقة الشمس الفتية الخافتة.

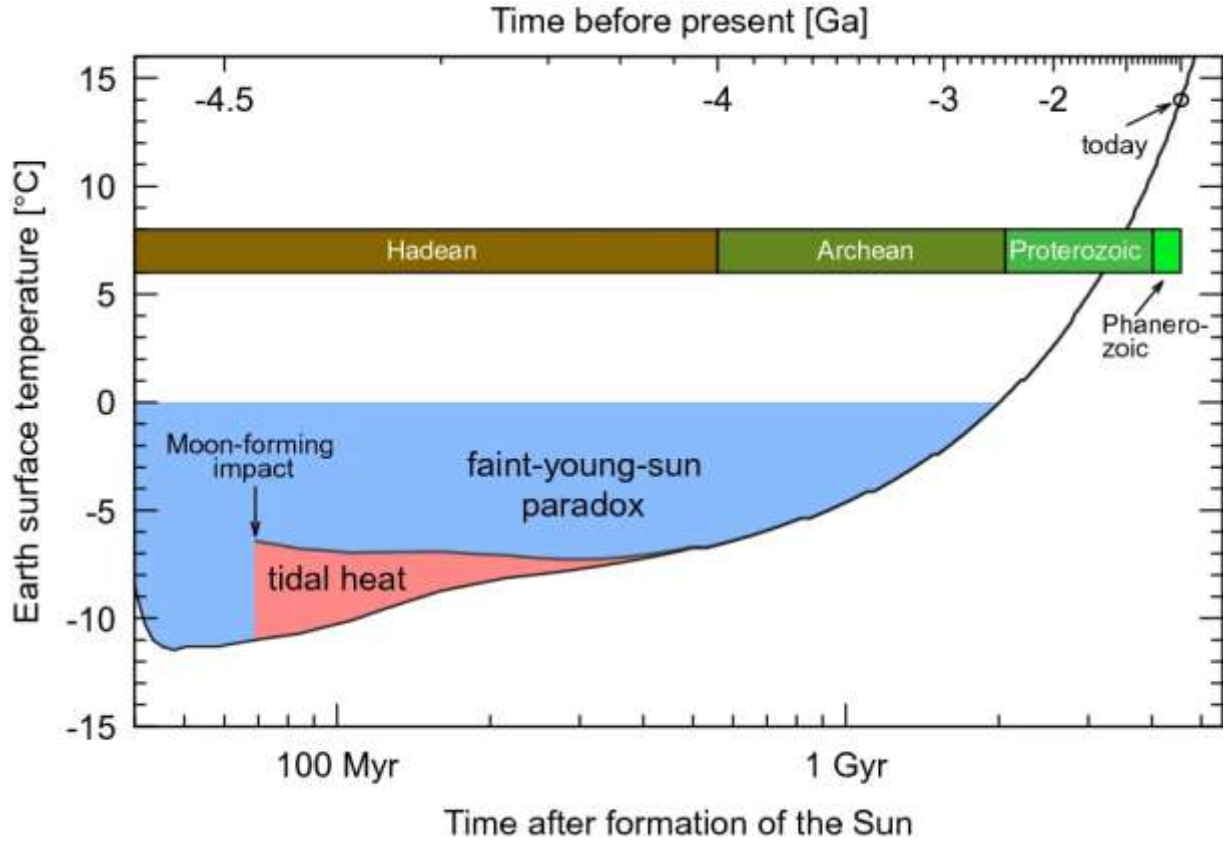
لقد تبين أن نظام الأرض والقمر الحديث لا يحتوي إلا على حوالي 1% من طاقة دورانه المداري الأولية، عندما كانت الأرض تدور بسرعة وكان القمر في مدار ضيق للغاية. وقد تبدد معظم هذه الطاقة عبر المد والجزر، ونوضح أن التسخين الناتج عن المد والجزر ربما كان له تأثير أكبر بكثير على متوسط درجة حرارة سطح الأرض مما كان يُعتقد سابقًا. ويتوقع نموذجنا للغلاف الجوي الرمادي، المُدمج مع نموذج مُخصص لتطور معدل تسخين الأرض بفعل المد والجزر، والمتوافق مع إجمالي الطاقة المنبعثة في نظام الأرض والقمر، أن تسخين المد والجزر ربما ساهم في ارتفاع درجة حرارة الأرض بعدة درجات مئوية خلال المليون سنة الأولى من عمرها.

وعلى الرغم من أن تسخين الأرض بفعل المد والجزر الناتج عن اقتراب القمر لا يمكنه وحده حل مفارقة خفوت الشمس الفتية، إلا أن نتائجنا تشير إلى أنه ربما لعب دورًا هامًا في الحفاظ على الماء السائل على السطح. إضافةً إلى ذلك، قد يكون التسخين المدّي، كمصدر حراري أرضي، قد ساهم في الحفاظ على درجات حرارة مرتفعة في الوشاح، على سبيل المثال عن طريق تحفيز دوران السوائل الحرارية المائية في قشرة الأرض المبكرة. يتوافق هذا التفسير مع مفهوم "المضخة الحرارية المائية" المذكور سابقًا، والذي يتطلب وجود مصدر حرارة داخلي وقوى هائلة في قشرة الأرض في حقبة الأركي لتفسير وجود عروق الصوان الأسود

[1] Heller, R., Duda, JP., Winkler, M. et al. Habitability of the early Earth: liquid water under a faint young Sun facilitated (2021) by strong tidal heating due to a closer Moon. Paläontologische Zeitschrift PalZ 95, 563–575

https://coptic-treasures.com/

التي يبلغ عمرها 3.49 مليار سنة في تكوين دريسر (غرب أستراليا). قد يتمكن نموذج موحد يشمل التأثيرات الجيوفيزيائية والجوية والمدّية والفيزيائية الفلكية من حل مفارقة الشمس الفتية الخافتة التي طال أمدها.



تطور متوسط درجة حرارة سطح الأرض في بداياتها باستخدام مدخلات الطاقة من الإشعاع الشمسي وتدفق الحرارة المدّي. تم ضبط عتامة الغلاف الجوي للأرض على اللون الرمادي T = 0.925 لإجبار نموذج الغلاف الجوي على محاكاة درجات حرارة الأرض الحالية. تُبرز المنطقة المظللة باللون الأزرق مرحلة درجات الحرارة دون الصفر. أما المنطقة المظللة باللون الأحمر، والتي يحتوي تكاملها على 2.98 × 10^{31} Jas، فتوضح زيادة في درجة الحرارة نتيجة التسخين المدّي بافتراض $F_{t,0}$ = 20 W m^{-2} و t_{tid} = 100 Myr. تم تمييز الأعمار الجيولوجية بأشرطة أفقية. باختصار، لا يمكن للتسخين المدّي وحده حل مفارقة الشمس الخافتة الفتية. ومع ذلك، ربما كان تعويضًا مهمًا (< 1 درجة مئوية) لانخفاض اللمعان الشمسي في أول 220 مليون سنة تقريبًا (قبل حوالي 4.35 مليار سنة) لمنع تحول الأرض إلى كرة ثلجية عالمية.

القمر ربما ساهم في حماية الأرض الفتية من الشمس

شمسنا، كغيرها من النجوم، تقذف جسيمات وإشعاعات ضارة في الفضاء المحيط بها. إلا أن الشمس كانت في الماضي أكثر نشاطًا مما هي عليه اليوم. يقول عالم الفيزياء الفلكية تشوانفي دونغ من جامعة برينستون: "تمامًا كطفل رضيع، تكون الشمس في شبابها مليئة بالطاقة، ثم تتراجع طاقتها مع تقدمها في العمر. لنعد بالزمن إلى الوراء أربعة مليارات سنة، حين كانت الشمس في أوج نشاطها، وكانت تُصدر إشعاعات نجمية عالية وتدفقات جسيمية كثيفة". تمتلك هذه الجسيمات والإشعاعات القدرة على تجريد الكواكب من غلافها الجوي، لذا يجب حماية الكواكب الفتية للحفاظ على غلافها الجوي. تستخدم الكواكب مجالاتها

https://coptic-treasures.com/

المغناطيسية لصد معظم الجسيمات والإشعاعات الشمسية وإبعادها عنها، تمامًا كالمظلة الكوكبية. تمتلك الأرض مجالًا مغناطيسيًا واقيًا، بينما لا يمتلك القمر مجالًا مغناطيسيًا في الوقت الحالي. مع ذلك، تشير إعادة فحص حديثة لعينات قمرية من مهمات أبولو إلى أن هذا لم يكن الحال دائمًا. يقول جيمس غرين، كبير علماء ناسا: "أظهرت الأبحاث التي أجريت على صخور أبولو أن القمر كان يمتلك مجالًا مغناطيسيًا في الماضي.

اكتشف فريق غرين أن القمر كان يمتلك مجالًا مغناطيسيًا قويًا قبل حوالي أربعة مليارات سنة، حمى الأرض الفتية. عمل هذا المجال كدرع ثانٍ لحماية الغلاف الجوي للأرض من أشعة الشمس الفتية المتقلبة. لهذه النتيجة آثار بالغة الأهمية في البحث عن حياة خارج كوكب الأرض. فالكواكب الخارجية التي تدور حولها أقمار ستحظى بحماية إضافية من نجومها النشطة، ما يعني أنها قد تكون أقرب إلى نجوم أكثر تقلبًا، ومع ذلك ستحافظ على ظروف مواتية للحياة. بالإضافة إلى ذلك، فإن التفاعل بين المجالين المغناطيسيين للقمر والأرض في بداياتهما كان سيؤدي إلى انتقال جزء من الغلاف الجوي للأرض إلى القمر. وكان جزء من الغلاف الجوي للأرض سينتقل على طول خطوط المجال المغناطيسي المتصلة، ليُضاف إلى الغلاف الجوي القمري في بداياته. ورغم أن القمر لا يملك غلافًا جويًا اليوم، إلا أنه من المحتمل أن تكون بقايا هذا الغلاف الجوي المشترك محفوظة في فوهات مظللة بشكل دائم على سطحه تُعرف باسم "المصائد الباردة". لم تُشرق الشمس على هذه الفوهات منذ تكوّنها قبل مليارات السنين، مما يجعلها من أبرد الأماكن في النظام الشمسي. وكان الغاز الذي انتقل من الأرض إلى القمر سينجذب إلى هذه المصائد الباردة، ومن المفترض أنه لا يزال محتجزًا هناك حتى اليوم. وهذا يعني أنه من خلال دراسة القمر اليوم، يمكننا معرفة مكونات الغلاف الجوي للأرض في بداياته. يقول غرين: "من المثير للاهتمام التفكير في أن الغلاف الجوي للأرض في بداياته - والذي كان من شبه المستحيل علينا فهمه - قد يكون موجودًا بالفعل على سطح القمر، بانتظار أن نكتشفه"[1].

[1] Green, J., Draper, D., Boardsen, S., & Dong, C. (2020). When the Moon had a magnetosphere. Sci. Adv (Vol. 6, pp. 865–879)

https://coptic-treasures.com/

عدد ساعات اليوم فى الأرض البدائية

https://coptic-treasures.com/

طول النهار كان أقل من 12 ساعة

نشرة علمية نشرتها الأكاديمية العلمية العابرة للقارات جاء فيها: لقياس المسافة بين الأرض والقمر، يستخدم العلماء الزمن: المدة التي يستغرقها شعاع الليزر للوصول إلى القمر، ثم انعكاسه، ثم وصوله إلى الأرض. تعتمد تجربة قياس المسافة بالليزر إلى القمر على هذه الطريقة، وقد أُجري أول قياس عام 1969. وباستخدام هذه الطريقة، حُدِّد أن القمر يبعد عن الأرض مسافة 384,400 كيلومتر. ثم كشفت التجربة عن حقيقة مُذهلة: فمن خلال تحليل البيانات من يناير 1992 إلى أبريل 2001، وجد الباحثون أن القمر يبتعد عن الأرض بمقدار 3.8 سنتيمتر سنويًا. وقال ساساكي Sasaki : "إذا كان هذا صحيحًا، فإن القمر كان أقرب بكثير في الماضي"[1].

قال ساساكي إن تكوين الأرض والقمر قبل 4.5 مليار سنة، وتأثير القمر على الكوكب، هما العاملان الرئيسيان في تحديد تباين طول اليوم والشهر عبر تاريخ الأرض. ووفقًا له، فإن الفرضية الأكثر قبولًا لتفسير أصل القمر هي حدوث اصطدام هائل بين جرم بحجم المريخ وما يمكن تسميته بالأرض البدائية. لكن متى حدث هذا الاصطدام تحديدًا؟ أوضح ساساكي أن الباحثين، للإجابة على هذا السؤال، يحللون تحول نظير الهافنيوم-182 إلى نظير التنجستن-182. الهافنيوم عنصر محب للصخور، والتنغستن عنصر محب للحديد، ويرتبطان على التوالي بغلاف النجم ونواته.

ووفقًا لساساكي، فقد أدى الاصطدام الهائل إلى تكوين محيط من الصهارة على الأرض البدائية، مما أدى على ما يبدو إلى انفصال كبير بين المعادن والسيليكات. وبالتالي، فإن عمر انفصال الهافنيوم عن التنغستن (Hf-W) هو عمر آخر اصطدام هائل، أي عمر الأرض والقمر. "من الممكن حساب كمية التنغستن في الغلاف، ومن ثم تحديد عمر الكوكب." وباستخدام هذه الطريقة، تم التوصل إلى أن الأرض والقمر ظهرا في بداية النظام الشمسي، بعد 62 مليون سنة من نشأة النظام، أي قبل 4.5 مليار سنة. وقد ولّد الاصطدام عددًا كبيرًا من الشظايا حول الأرض، والتي تجمعت لاحقًا لتشكل القمر في مدار فوقها بقليل. قال ساساكي: "يُعرف حد روش بأنه أدنى مسافة يمكن أن يدورها قمر صناعي حول الأرض دون أن يتضرر بفعل قوى المد والجزر". يقع هذا الحد عند مسافة تعادل ثلاثة أضعاف نصف قطر الأرض، لكن القمر الآن على مسافة تعادل 60 ضعف نصف القطر، ومن المتوقع أن يتوقف عن الابتعاد عندما تصل المسافة إلى 80 ضعف نصف القطر، أي بعد مليارات السنين.

---

[1]) http://intercontinental-academia.ubias.net/nagoya/news/when-a-day-lasted-only-4-hours
Intercontinental academia SAO PAULO : طُرح اقتراح إنشاء الأكاديمية العابرة للقارات خلال اجتماع اللجنة التوجيهية لشبكة معاهد الدراسات المتقدمة الجامعية (UBIAS)، وهي شبكة تضم معاهد وطنية للدراسات المتقدمة تابعة لـ 36 جامعة حول العالم، والذي عُقد في مارس 2012 في معهد جواهر لال نهرو للدراسات المتقدمة في نيودلهي، الهند. وكانت الفكرة الأولية من نصيب مدير معهد الدراسات المتقدمة آنذاك في الجامعة العبرية بالقدس، إسرائيل، إليعازر رابينوفيتشي. وقد استلهمت الأكاديمية العابرة للقارات - جامعة جنوب المحيط الهادئ (IEA-USP) ومعهد البحوث المتقدمة (IAR) بجامعة ناغويا من رؤية العالم الإسرائيلي، وقررتا دعم المشروع التجريبي لهذه المبادرة، الذي يعمل كمشروع مشترك.

https://coptic-treasures.com/

يستخدم العلماء الزمن لقياس المسافة بين الأرض والقمر: أي المدة التي يستغرقها شعاع الليزر للوصول إلى القمر، ثم انعكاسه، ثم وصوله إلى الأرض. تعتمد تجربة قياس المسافة بالليزر إلى القمر على هذه الطريقة، وقد أُجري أول قياس عام 1969. وباستخدام هذه الطريقة، حُدد أن القمر يبعد عن الأرض مسافة 384,400 كيلومتر. ثم اكتشفت التجربة حقيقةً مُذهلة: بتحليل البيانات من يناير 1992 إلى أبريل 2001، وجد الباحثون أن القمر يبتعد عن الأرض بمقدار 3.8 سنتيمترات سنويًا. وأضاف ساساكي: "إذا كان هذا صحيحًا، فإن القمر كان أقرب بكثير من الأرض". قال ساساكي: "في الماضي".

يحدث تبادل للزخم الزاوي بين القمر والأرض. واستشهد ساساكي بفرضية وردت في كتاب "ديناميكيات النظام الشمسي" لكارل موراي وستانلي ديرموت، وهو مرجع في هذا المجال: "من المرجح جدًا أن مدار القمر ودوران الأرض قد تغيرا بشكل ملحوظ خلال فترة وجود النظام الشمسي، وخاصةً بسبب تأثير المد والجزر نصف اليومي [عندما يكون القمر فوق موقع معين على الأرض ثم فوق الجانب المقابل له] الناتج عن تأثير القمر على الأرض". هذا يعني أن القمر يجذب كتلة الماء، مما يقلل من سرعة دوران الأرض. وفي الوقت نفسه، يؤدي تغير المد والجزر الناتج عن دوران الأرض إلى جذب القمر، مما يكسبه زخمًا زاويًا ويبعده تدريجيًا. كما يتباطأ القمر أيضًا، مما يقلل من مدة الشهر. وأوضح ساساكي أنه وفقًا لقانون كبلر الثالث (مربع الفترة المدارية لكوكب يتناسب طرديًا مع مكعب نصف الفترة الرئيسية) كلما اقترب الكوكب من الشمس، زادت سرعته، وكلما ابتعد عنها، تباطأت. وينطبق هذا أيضًا على نظام الأرض والقمر. حاول باحثان إثبات اختلاف طول الشهر بدراسة بنية نوع معين من الأصداف البحرية. يقول ساساكي: "هذه دراسة مثيرة للجدل، لكنها تقدم بعض التوجيهات المهمة". تنمو في الأصداف خطوط نمو يومية في أجزاء تنمو شهريًا. عند تحليل الأصداف اليوم، يبدو أن لكل جزء 30 صفًا، ما يعني شهرًا من 30 يومًا. "في الأصداف الأحفورية التي يعود تاريخها إلى 400 مليون سنة، يوجد 9 خطوط فقط لكل جزء، بافتراض أن الشهر كان 9 أيام. يشير هذا إلى أن القمر كان يدور حول الأرض بسرعة أكبر وعلى مسافة أصغر بنسبة 40% من المسافة الحالية".

في النهاية، كم كان طول اليوم عندما وُجدت الأرض والقمر؟ "في البداية، كان القمر على مسافة تعادل ثلاثة أضعاف نصف قطر الأرض، مباشرة بعد حد روش". بناءً على هذه المسافة والزخم الزاوي المُقدَّر، يُمكن القول إن النهار كان يدوم أربع ساعات فقط. مع مرور الوقت، ابتعد القمر وزاد طول النهار: عندما كان عمر الكوكب وقمره 30 ألف عام، كان النهار يدوم ست ساعات؛ وعندما بلغ عمرهما 60 مليون عام، أصبح النهار يدوم عشر ساعات. في ختام عرضه، قدم ساساكي رسمًا بيانيًا يربط بين تطور الحياة (مع أنه ليس خبيرًا في هذا المجال) وطول النهار عبر الزمن. ووفقًا لهذا الرسم، ظهرت أولى دلائل الحياة قبل 3.5 مليار سنة، عندما كان طول النهار 12 ساعة. وظهرت عملية التمثيل الضوئي قبل 2.5 مليار سنة، عندما كان طول النهار 18 ساعة. وقبل 1.7 مليار سنة، أصبح طول النهار 21 ساعة، وظهرت الخلايا حقيقية النواة. وبدأت الحياة متعددة الخلايا قبل 1.2 مليار سنة، عندما أصبح طول النهار 23 ساعة. وظهر أسلاف الإنسان الأوائل قبل 4 ملايين سنة، عندما كان طول النهار قريبًا جدًا من 24 ساعة.

https://coptic-treasures.com/

لماذا يبلغ طول اليوم 24 ساعة

كشف فريق من علماء الفيزياء الفلكية كيف توقف التزايد البطيء والثابت في طول اليوم الأرضي، الناتج عن تأثير المد والجزر للقمر، لأكثر من مليار عام. يوضحون أنه منذ حوالي مليار عام وحتى 600 مليون عام مضت، كان هناك مد وجزر في الغلاف الجوي، مدفوع بأشعة الشمس، يعاكس تأثير القمر، مما حافظ على ثبات معدل دوران الأرض وطول اليوم عند 19.5 ساعة ثابتة. لولا هذا التوقف الذي دام مليار عام في تباطؤ دوران كوكبنا، لكان يومنا الحالي، الذي يبلغ 24 ساعة، قد امتد إلى أكثر من 60 ساعة. بالاستناد إلى الأدلة الجيولوجية وباستخدام أدوات البحث الجوي، يُبين العلماء أن حالة الجمود في تأثير المد والجزر بين الشمس والقمر نتجت عن ارتباط عرضي، ولكنه بالغ الأهمية، بين درجة حرارة الغلاف الجوي ومعدل دوران الأرض[1].

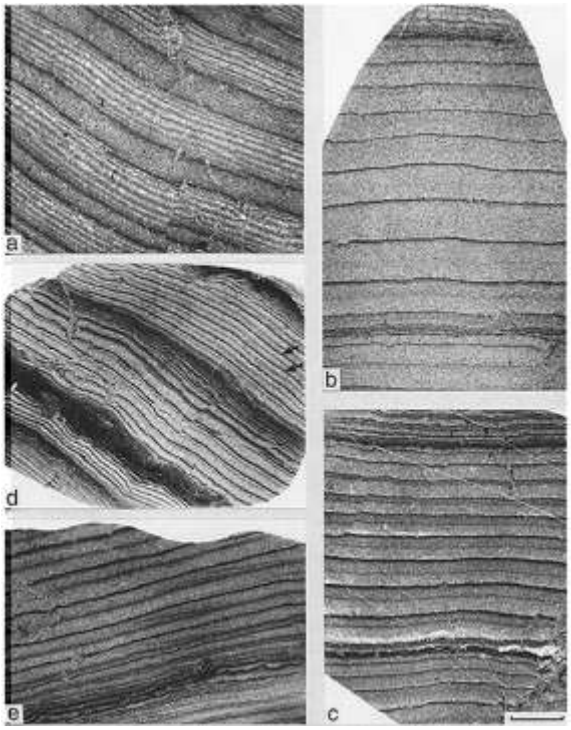
شمل مؤلفو الدراسة: نورمان موراي Norman Murray، عالم الفيزياء الفلكية النظرية في المعهد الكندي للفيزياء الفلكية النظرية (CITA) التابع لكلية الآداب والعلوم؛ والطالب هانبو وو Hanbo Wu، من المعهد الكندي للفيزياء الفلكية النظرية وقسم الفيزياء؛ وكريستين مينو Kristen Menou، من قسم ديفيد أ. دنلاب David A. Dunlap لعلم الفلك والفيزياء الفلكية وقسم العلوم الفيزيائية والبيئية في جامعة تورنتو سكاربورو Toronto Scarborough؛ وجيريمي لاكونت Jeremy Laconte، من مختبر الفيزياء الفلكية في بوردو Bordeauxand، وزميل سابق لما بعد الدكتوراه في المعهد الكندي للفيزياء الفلكية النظرية؛ وكريستوفر لي Christopher Lee، من قسم الفيزياء.

عندما تشكّل القمر لأول مرة قبل حوالي 4.5 مليار سنة، كان طول اليوم أقل من 10 ساعات. لكن منذ ذلك الحين، أدى تأثير جاذبية القمر على الأرض إلى إبطاء دوران كوكبنا، مما نتج عنه يوم أطول فأطول. واليوم، يستمر طول اليوم في الازدياد بمعدل 1.7 مللي ثانية تقريبًا كل قرن. يُبطئ القمر دوران الأرض عن طريق جذبه لمحيطاتها، مُحدثًا انتفاخات مدّية على جانبي الكوكب، والتي نشهدها على شكل مدّ وجزر. تعمل جاذبية القمر على هذه الانتفاخات، بالإضافة إلى الاحتكاك بين المدّ وقاع المحيط، كمكابح لكوكبنا الدوّار. يقول موراي Murray: "يُنتج ضوء الشمس أيضًا مدًّا جويًا بنفس نوع الانتفاخات. تجذب جاذبية الشمس هذه الانتفاخات الجوية، مُحدثةً عزم دوران على الأرض. ولكن بدلًا من إبطاء دوران الأرض كما يفعل القمر، فإنه يُسرّعه." على مدار معظم تاريخ الأرض الجيولوجي، تفوقت ظاهرة المد والجزر القمري على ظاهرة المد والجزر الشمسي بنحو عشرة أضعاف؛ ومن هنا، تباطأت سرعة دوران الأرض وازداد طول النهار. لكن قبل نحو مليار عام، كانت انتفاخات الغلاف الجوي أكبر حجمًا لأن الغلاف الجوي كان أكثر دفئًا، ولأن رنينه الطبيعي - أي التردد الذي تتحرك به الموجات خلاله - كان متوافقًا مع طول النهار.

[1] Hanbo Wu, Norman Murray, et al., Why the day is 24 hours long: The history of Earth's atmospheric thermal tide, composition, and mean temperature, Science Advances, Volume 9, Issue 27Jul 2023

https://coptic-treasures.com/

يرن الغلاف الجوي، كالجرس، بتردد تحدده عوامل مختلفة، من بينها درجة الحرارة. بعبارة أخرى، تنتقل الموجات - كتلك التي نتجت عن ثوران بركان كراكاتوا الهائل في إندونيسيا عام ١٨٨٣ - خلاله بسرعة تحددها درجة حرارته. ويفسر المبدأ نفسه سبب إصدار الجرس دائمًا النغمة نفسها إذا كانت درجة حرارته ثابتة. على مدار معظم تاريخ الأرض، كان رنين الغلاف الجوي هذا غير متزامن مع سرعة دوران الكوكب. اليوم، تستغرق كل من موجتي المد والجزر الجويتين 22.8 ساعة للدوران حول الأرض؛ ولأن هذا الرنين غير متزامن مع فترة دوران الأرض البالغة 24 ساعة، فإن المد الجوي صغير نسبيًا. لكن خلال فترة المليار عام قيد الدراسة، كان الغلاف الجوي أكثر دفئًا، وكان رنينه يدور بفترة تقارب 10 ساعات. كذلك، عند بداية تلك الحقبة، وصل دوران الأرض، الذي أبطأه القمر، إلى 20 ساعة. عندما أصبح رنين الغلاف الجوي وطول النهار عاملين زوجيين - 10 و20 على التوالي - تعزز المد الجوي، وكبر حجم الانتفاخات، وأصبح جذب الشمس قويًا بما يكفي لموازنة المد القمري.



في الشكل المرفق اعتمد موراي وزملاؤه في دراستهم على أدلة جيولوجية، مثل هذه العينات المأخوذة من مصب نهري مدّي، والتي تكشف عن دورة المد والجزر الربيعي والجزر الأدنى. تشير الأشرطة السميكة إلى المد والجزر الربيعي، بينما تشير الأشرطة الرقيقة إلى المد والجزر الأدنى. حقوق الصورة: G.E. Williams

إلى جانب الأدلة الجيولوجية، توصل موراي وزملاؤه إلى نتائجهم باستخدام نماذج الدوران الجوي العالمي (GCMs) للتنبؤ بدرجة حرارة الغلاف الجوي خلال هذه الفترة. هذه النماذج هي نفسها التي يستخدمها علماء المناخ لدراسة ظاهرة الاحتباس الحراري. ووفقًا لموراي، فإن نجاح هذه النماذج في بحث الفريق يُعد درسًا في وقته المناسب. يقول موراي: "لقد تحدثتُ إلى أشخاصٍ يشككون في تغير المناخ ولا يؤمنون بنماذج الدوران الجوي العالمي التي تُشير إلى أننا نعيش أزمة مناخية. وأقول لهم: لقد استخدمنا هذه النماذج في بحثنا، وقد أصابت في توقعاتها. إنها فعّالة." على الرغم من بُعد هذه النتيجة في التاريخ الجيولوجي، إلا أنها تُضيف بُعدًا جديدًا لأزمة المناخ. ونظرًا لتغير الرنين الجوي مع تغير درجة الحرارة، يُشير موراي إلى أن ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي الحالي قد يُؤدي إلى اختلال التوازن المدّي. مع ارتفاع درجة حرارة الأرض نتيجة للاحتباس الحراري، يرتفع تردد الرنين أيضاً، مما يُبعد الغلاف الجوي عن الرنين. ونتيجة لذلك، يقل عزم الدوران الناتج عن الشمس، وبالتالي سيطول النهار أسرع مما كان عليه في الأحوال العادية.

https://coptic-treasures.com/

عندما كان للقمر غلاف مغناطيسي

تكشف عينات أبولو القمرية أن القمر شكّل غلافًا مغناطيسيًا عاليًا خاصًا به، استمر من حوالي 4.25 إلى حوالي 2.5 مليار سنة مضت. في ذروة شدة المجال المغناطيسي القمري (منذ 4 مليارات سنة)، كان القمر نشطًا بركانيًا، مما أدى على الأرجح إلى تكوين غلاف جوي رقيق للغاية، ويُعتقد أنه كان على مسافة مركزية أرضية تعادل حوالي 18 ضعف نصف قطر الأرض. تعمل العواصف الشمسية على تجريد الغلاف الجوي للكواكب بمرور الوقت، ولا يمكن توفير أقصى حماية إلا من خلال غلاف مغناطيسي قوي. نقدم نموذجًا مبسطًا لحقل ثنائي القطب المغناطيسي محصورًا داخل غلاف مغناطيسي على شكل قطع مكافئ، لنوضح كيف يوفر الغلافان المغناطيسيان المتوقعان للأرض والقمر حاجزًا كبيرًا ضد الرياح الشمسية الشديدة المتوقعة، مما يقلل من فقدان الغلاف الجوي للأرض إلى الفضاء[1].

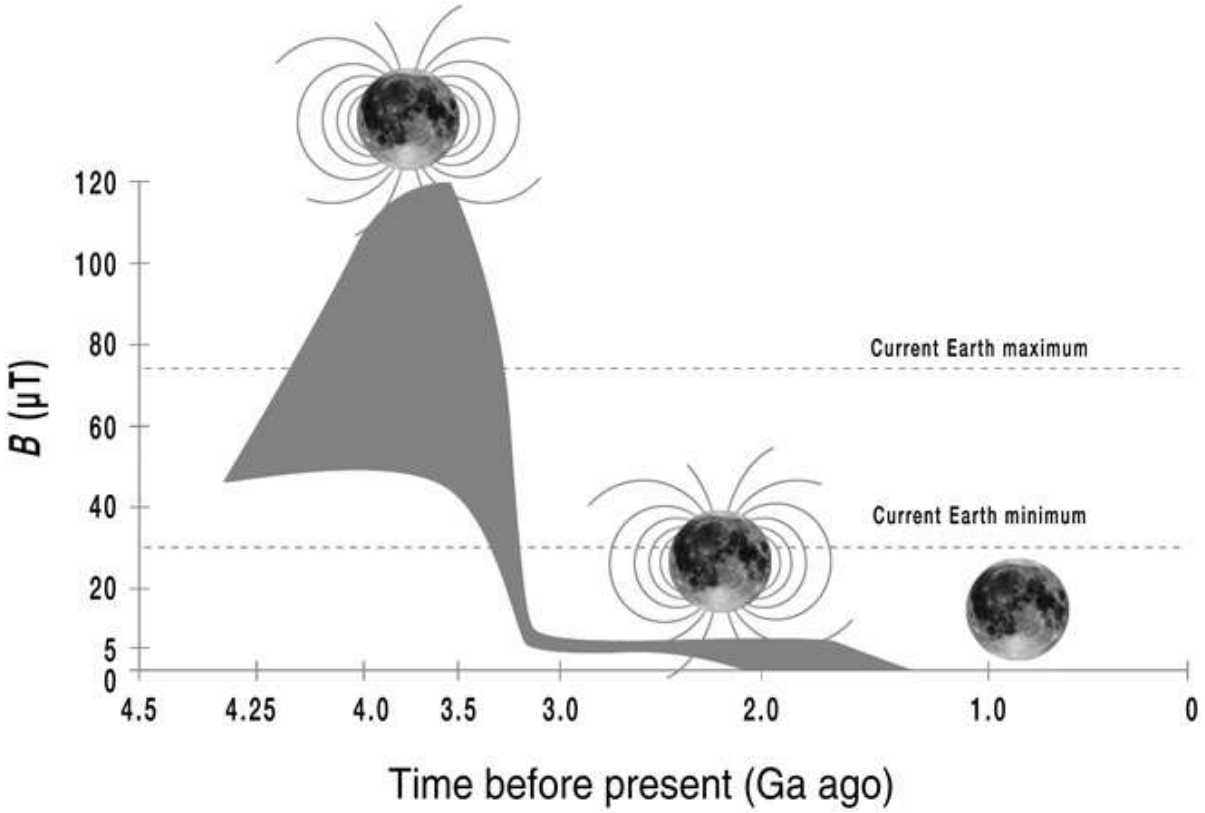
النموذج السائد لتكوين القمر هو فرضية الاصطدام العملاق، حيث اصطدم جسم بحجم المريخ تقريبًا، يُدعى ثيا، بالأرض البدائية خلال المراحل الأولى لتكوين النظام الشمسي. وشكّلت الحطام الناتج الأرض والقمر، وانتهى المطاف بالقمر خارج حدود روش البالغة حوالي 2.9 ضعف نصف قطر الأرض. وبناءً على هذه الفرضية، سيكون لب القمر الحديدي الناتج أصغر بكثير من لب ثيا. ولعقود، ساد الاعتقاد بأن القمر لا يملك القدرة على توليد مجال مغناطيسي قوي والحفاظ عليه من هذا اللب الصغير.

أجرى مقياس المغناطيسية على متن المركبة الفضائية السوفيتية لونا 1، التي حلّقت بالقرب من القمر في 4 يناير 1959، أولى قياسات المجال المغناطيسي القمري. وأظهرت قياسات لونا 1 أن القمر لا يملك مجالًا مغناطيسيًا ذاتيًا يزيد عن 10000/1 من المجال المغناطيسي للأرض. لم يُقاس المجال المغناطيسي الضعيف للقمر، الذي كان أضعف بألف مرة من المجال المغناطيسي للأرض في الوقت الحاضر، إلا بواسطة مقياس المغناطيسية الذي أحضره رواد فضاء أبولو 12 إلى سطح القمر. يُعد هذا المجال ذاكرة مغناطيسية للعصور السابقة للقمر، محفوظة في صخور سطحه، والتي أحضر رواد فضاء أبولو العديد منها لتحليلها في المختبر. مع ذلك، وخلال السنوات القليلة الماضية، ومع بدء علماء المغناطيسية القديمة إعادة فحص جميع عينات أبولو القمرية المُعادة بدقة باستخدام تقنيات التحليل الحديثة، برز مفهومٌ ثوري. تُوضح هذه القياسات المغناطيسية القديمة الآن أنه لا بد من وجود غلاف مغناطيسي قمري كبير خلال المئات الأولى من ملايين السنين من تاريخ القمر. ولا تزال أسباب نشأة المجال المغناطيسي القمري وتوقيت تلاشيه محل نقاش.

[1] James Green et al. ,When the Moon had a magnetosphere. Science Advances Oct 2020m Vol 6, Issue 42 (https://www.nasa.gov/solar-system/earth-and-moon-once-shared-a-magnetic-shield-protecting-their-/atmospheres

https://coptic-treasures.com/

يُظهر الشكل التخطيطي نظرة عامة على تطور المجال المغناطيسي للقمر. يُمثل المنحنى المتصل نطاق القياسات المغناطيسية مُقارنةً بأعمار عينات أبولو التي تم تحليلها. يتراوح الحد الأقصى المُستنتج للمجال المغناطيسي للدينامو القمري بين 20 و100 ميكروتسلا خلال الفترة من 4.25 إلى 3.5 مليار سنة مضت، ثم ينخفض إلى حوالي 5 ميكروتسلا بحلول 3.2 مليار سنة مضت. وقد استنتجت دراسات حديثة قوة مجال تبلغ حوالي 5 ميكروتسلا في الصخور المتفتتة الناتجة عن الاصطدام والتي يتراوح عمرها بين 1 و2.5 مليار سنة. كما يُظهر هذا الشكل الحد الأدنى والحد الأقصى للمجال المغناطيسي الحالي للأرض على سطح القمر، مما يدل على أنه في الفترة الزمنية من 4.2 إلى 3.4 مليار سنة مضت، كان المجال المغناطيسي للقمر على الأقل بنفس قوة المجال المغناطيسي للأرض اليوم، أو ربما أقوى منه، على سطحيهما.



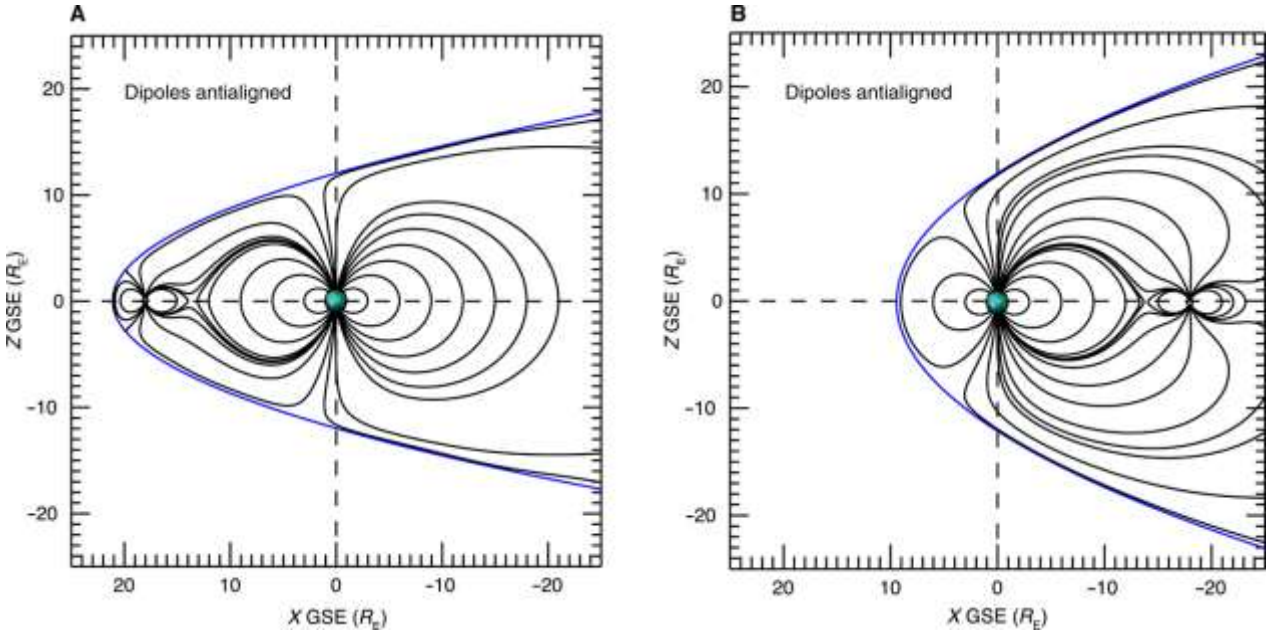
شدة المجال المغناطيسي للقمر مع مرور الوقت. يوضح هذا الرسم التخطيطي تاريخ المجال المغناطيسي المتبقي من عينات أبولو القمرية. يُظهر الغلاف التغير في المجال، وقد يشير إلى أن المجال المغناطيسي القمري مرّ بعدة انعكاسات خلال تاريخه المبكر. كما تُظهر الخطوط المتقطعة الحد الأدنى والحد الأقصى لسطح المجال المغناطيسي الحالي للأرض مقارنةً بالمجال المغناطيسي للقمر.

كان تحديد قوة الدينامو المغناطيسي للأرض في مراحلها المبكرة جدًا (أي قبل القصف النيزكي الكثيف الذي حدث قبل حوالي 3.9 مليار سنة) أمرًا صعبًا بسبب العمليات الجيولوجية النشطة التي طمست السجل الصخري. وقد طُرحت فرضية أن قوة المجال المغناطيسي للأرض في تلك المراحل المبكرة قد تكون مرتبطة بدورانها. ففي فرضية الاصطدام العملاق، تبقى للأرض فترة دوران مدتها 5 ساعات بعد تشكل القمر قبل 4.5 مليار سنة، لذا ربما كان المجال المغناطيسي الناتج قويًا جدًا، لكن آخرين

https://coptic-treasures.com/

يشيرون إلى وجود العديد من المسائل العالقة في نظرية الدينامو، مما يجعل فهم شدة المجال المغناطيسي في تلك المراحل المبكرة غير واضح إلى حد كبير. وتشير أحدث 2 مليار سنة من السجل المغناطيسي القديم للأرض إلى أن الدينامو الأرضي كان ثابتًا تقريبًا، وإذا ما تم حساب متوسطه على مدى ملايين السنين، فإنه يبدو كمغناطيس ثنائي القطب بسيط أو مغناطيس قضيب بأقطاب مغناطيسية موازية لمحور دوران الأرض.

... قدّر زاركوف أن المسافة بين الأرض والقمر كانت 21 وحدة أرضية فقط قبل حوالي 3.9 مليار سنة، استنادًا إلى قياسات الجاذبية التي أجرتها بيانات المركبة الفضائية كليمنتين. وبالتالي، كانت الأرض والقمر على مقربة نسبية في وقت كان فيه للقمر دينامو مغناطيسي فعال. كيف كان سيتفاعل هذان الغلافان المغناطيسيان، وما الحماية التي كان سيوفرها غلاف مغناطيسي مشترك لغلافَي الأرض والقمر في بداياتهما؟



الغلاف المغناطيسي للأرض والقمر متضاد المحاذاة. نتائج محاكاة الغلاف المغناطيسي للأرض والقمر مع ثنائيات الأقطاب المتضادة المحاذاة والقمر يقع على بُعد 18 درجة من الأرض في إحداثيات GSE. (A) يقع القمر عند الساعة 12 بالتوقيت المحلي، و(B) عند الساعة 0 بالتوقيت المحلي مع تدفق الرياح الشمسية من اليسار إلى اليمين.

https://coptic-treasures.com/

الأرض كانت تدور حول محورها في 19 ساعة في الماضي

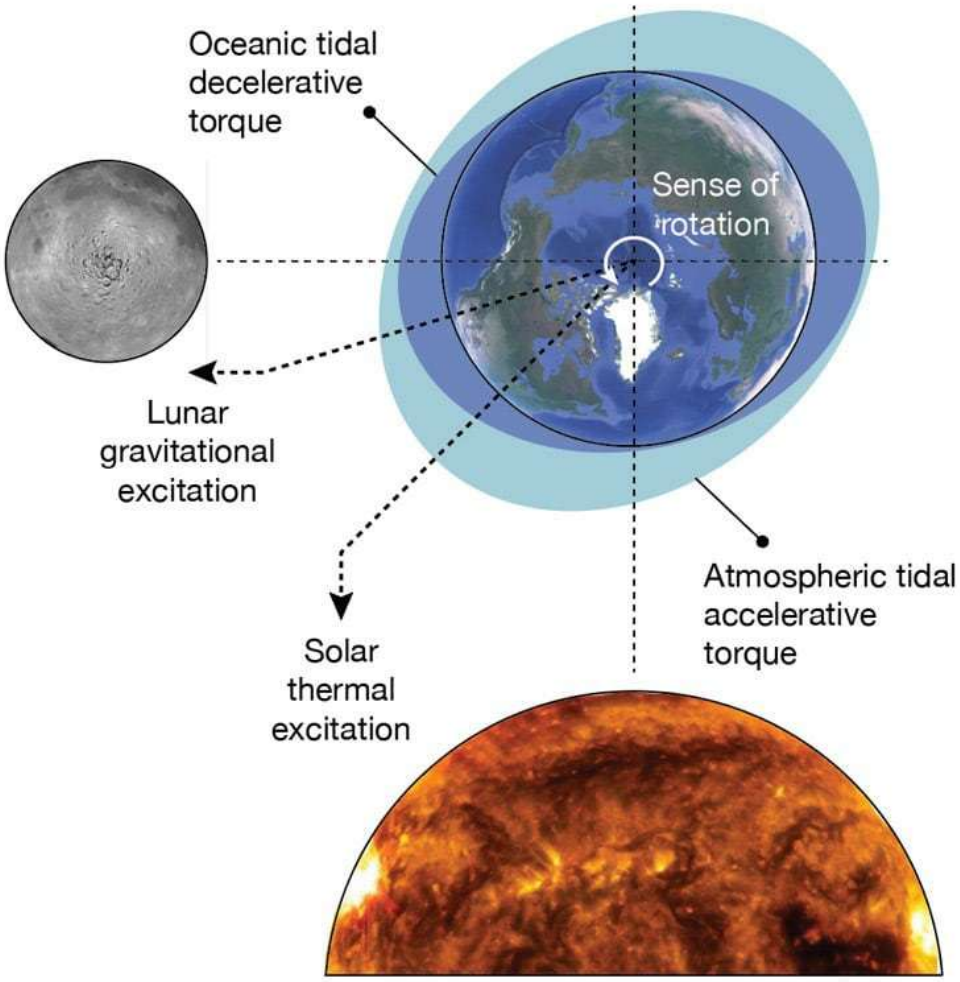
تدور الأرض حول محورها مرة كل 24 ساعة تقريبًا بالنسبة للشمس. وقد أشارت بعض الدراسات إلى أن دوران الأرض يتباطأ تدريجيًا مع مرور الوقت. وتقدم دراسة جديدة تحليلًا إحصائيًا لمجموعة من القيود الرصدية المتعلقة بطول اليوم في العصر ما قبل الكمبري. وقد وجدت الدراسة أن طول اليوم على الأرض كان 19 ساعة فقط في الماضي) [1]. يقول روس ميتشل Ross Mitchell، عالم الجيوفيزياء في معهد الجيولوجيا والجيوفيزياء التابع للأكاديمية الصينية للعلوم: "كان طول اليوم أقصر لأن القمر كان أقرب. ومع مرور الوقت، امتص القمر طاقة دوران الأرض ليدفعها إلى مدار أعلى وأبعد عنها". كيف يقيس الباحثون طول الأيام القديمة؟ اعتمد الجيولوجيون سابقًا على بيانات من صخور رسوبية فريدة احتفظت بطبقات دقيقة للغاية في المسطحات الطينية المدية. ويمكن حساب عدد ساعات اليوم القديم عن طريق عدّ الطبقات الرسوبية الناتجة عن تغيرات المد والجزر شهريًا.

تتحكم قوى المد والجزر للقمر في تطور دوران الكوكب. ولأن الأرض تدور أسرع من السرعة الزاوية المدارية للقمر، فإن انتفاخ المد والجزر المحيطي للأرض يتقدم أمام القمر. يُحدث هذا الانحراف عزم دوران على القمر، والذي بدوره - ناقلاً الزخم الزاوي من الأرض إلى القمر - يدفع القمر إلى مدار أبعد ويبطئ دوران الأرض، مما يزيد من طول يومه بمرور الوقت. وقد اتسمت النماذج النظرية لانحسار القمر عمومًا باتجاه ثابت على مدى 3 أو 4 مليارات سنة الماضية. وعلى النقيض من النماذج التقليدية التي تفترض ظروفًا متغيرة باستمرار، يُطرح افتراض وجود فترة زمنية طويلة مؤقتة ذات طول يوم ثابت خلال حقبة ما قبل الكمبري، والتي يُحتمل أن تكون ناجمة عن استقرار بسبب الرنين مع المد والجزر الحراري الجوي. لذلك، ثمة حاجة إلى عدد كافٍ من قيود طول اليوم في حقبة ما قبل الكمبري التي يمكن استخدامها لفهم تطور نظام الأرض والقمر بدقة زمنية عالية.

على عكس المد والجزر المحيطي الذي ينشأ بفعل جاذبية القمر، ينشأ المد والجزر الجوي حراريًا نتيجة امتصاص بخار الماء والأوزون لأشعة الشمس، وأكبرها نصف يومي. وبسبب ترتيب النظام الثلاثي ودوران الأرض، يُطبّق المد والجزر المحيطي القمري نصف اليومي عزمًا مُبطئًا، بينما يُطبّق المد والجزر الجوي الشمسي نصف اليومي عزمًا مُسرّعًا على سرعة دوران الأرض (الشكل 1). ويُعدّ طول اليوم المُستقر بالرنين حالةً فريدةً يُمكن فيها، عند نقطة الرنين، إلغاء عزم الدوران المحيطي القمري بواسطة عزم الدوران الجوي الشمسي. وقد يكون هذا ممكنًا في حقبة ما قبل الكمبري، عندما يُعتقد أن عزم الدوران القمري كان يُساوي ربع قيمته الحالية بسبب ضعف الاحتكاك بين الأرض والقمر عند دوران الأرض القديم بسرعة أكبر. إذا أصبح عزم الدوران الجوي المعاكس مساوياً لعزم الدوران القمري المتناقص، فمن الممكن أن يكون تباطؤ دوران الأرض على المدى الطويل قد توقف مؤقتاً عند طول يوم ثابت لفترة ما من زمن ما قبل الكمبري.

[1] Mitchell, R.N., Kirscher, U. Mid-Proterozoic day length stalled by tidal resonance. Nature Geoscience. volume 16, (2023) pages567–569

https://coptic-treasures.com/



رسم توضيحي لظاهرة المد والجزر المتعاكسة على الأرض الناتجة عن جاذبية القمر ودفع الشمس (Image by Mitchell, et al.)

يُتيح السجل الجيولوجي وسائل متعددة لحفظ أرشيف طول اليوم عبر الزمن، وبالتالي، تاريخ المسافة بين الأرض والقمر. تُحافظ الوسائل البيولوجية لتسجيل طول اليوم، كحلقات الأشجار وحلقات نمو المرجان، على نطاق سنوي موثوق، لكنها تقتصر على حقبة البشائر، منذ 539 مليون سنة مضت، حين تطورت الحياة الحيوانية. أما بالنسبة لعصر ما قبل الكمبري، أي قبل حقبة البشائر، فيجب استخدام سجلات أخرى لطول اليوم. عندما طُرحت فرضية استقرار طول اليوم بالرنين لأول مرة، لم يكن متاحًا سوى عدد قليل من قيود طول اليوم في عصر ما قبل الكمبري. وقد استُمدت هذه القيود من النمو الحيبي الموسمي للستروماتوليت (تبعًا لزاوية الشمس السنوية)، لكن هذه القيود تتطلب معدلات تراكم عالية للرواسب، وهي نادرة في مثل هذه البيئات الترسيبية. كانت القيود الأخرى الوحيدة المتاحة آنذاك مستمدة من الرواسب الإيقاعية المدية، إلا أن هذه البيئات الترسيبية نادراً ما تُحفظ، أو يصعب إثباتها في غياب التسلسل الزمني الجيولوجي المستقل، وهو ما يفتقر إليه غالباً

https://coptic-treasures.com/

التتابعات ما قبل الكمبري. فعلى سبيل المثال، تم التوصل إلى تفسيرات متضاربة لطول اليوم (LOD) للرواسب الإيقاعية المدية لتكوين بيغ كوتونوود الذي يعود تاريخه إلى حوالي 900 مليون سنة.

ومن الأهمية بمكان، أنه يمكن أيضاً حساب طول اليوم من خلال الدراسات الدورية الطبقية cyclostratigraphic لدورات ميلانكوفيتش المدارية Milankovitch orbital، لأن تردد التبادر الفلكي (k) هو دالة لمعدل دوران الأرض. وقد حفزت هذه الدراسة وفرة حديثة من قيود طول اليوم الجديدة القائمة على الدراسات الدورية الطبقية لما قبل الكمبري، حيث تم توليد 12 من أصل 22 قيداً لطول اليوم لما قبل الكمبري خلال السنوات السبع الماضية (جدول البيانات الموسع 1). أظهر تحليلنا الإحصائي لنقاط التغير في أحدث تجميعة لبيانات طول اليوم في حقبة ما قبل الكمبري، وهي الأكثر وفرة، كما هو مُفترض نظريًا، استقرارًا في طول اليوم بين ملياري وملیار سنة مضت خلال منتصف حقبة البروتيروزويك (الشكل 2). وبذلك، تُؤكد هذه الملاحظة تجريبيًا الفرضية القائمة على النمذجة حول ظهور رنين بين المد والجزر المحيطي (القمري) والجوي (الشمسي) المؤثر على دوران الأرض خلال حقبة ما قبل الكمبري.

لكن سجلات المد والجزر هذه نادرة، وكثيرًا ما تكون تلك المحفوظة موضع جدل. لحسن الحظ، توجد طريقة أخرى لتحديد طول اليوم. لتحديد دورات ميلانكوفيتش Milankovitch الفلكية، التي تُظهر كيف تؤثر تغيرات مدار الأرض ودورانها على المناخ، تُستخدم تقنية علم الطبقات الدورية الجيولوجية. يقول أوي كيرشر Uwe Kirscher، المؤلف المشارك في الدراسة والباحث حاليًا في جامعة كورتين بأستراليا: "ترتبط دورتان من دورات ميلانكوفيتش، وهما التبادر والميل المحوري، بتذبذب وميل محور دوران الأرض في الفضاء. وبالتالي، يمكن رصد دوران الأرض الأسرع في بداياتها من خلال دورات التبادر والميل المحوري الأقصر في الماضي." استخدم العلماء مجموعة كبيرة من سجلات ميلانكوفيتش الحديثة، حيث جُمع أكثر من نصف بيانات العصور القديمة خلال السنوات السبع الماضية. يقول ميتشل Mitchell: "أدركنا أخيرًا أن الوقت قد حان لاختبار فكرة بديلة، وإن كانت هامشية، إلا أنها معقولة تمامًا، حول دوران الأرض في العصور القديمة."

بطبيعة الحال، عند مقارنة البيانات والنظرية، حتى في حال وجود اتفاق عام، يمكن استخلاص بعض الدروس من التباين الطفيف. ونظرًا لطول موجاتها الرأسية، تُعدّ المد والجزر الجوية (المعروفة أيضًا بموجات لامب) ظواهر قابلة للقياس في الغلاف الجوي للأرض، حيث تبلغ دورتها 10.4 ساعات في الغلاف الجوي الحالي. وقد افترضت الفرضيات السابقة حول إمكانية استقرار طول اليوم في حقبة ما قبل الكمبري، والمتعلقة بالرنين، أن للمد والجزر الجوية دورة ثابتة تبلغ 21 ساعة (حوالي 10.5 ساعات عند الرنين). مع ذلك، تشير بيانات طول اليوم في حقبة ما قبل الكمبري إلى دورة أقصر تبلغ حوالي 19 ساعة (حوالي 9.5 ساعات عند الرنين). ويُحيط الغموض بتقدير الـ 19 ساعة من مصادر متعددة، بما في ذلك الغموض في كل تقدير من تقديرات طول اليوم، والاختلافات في الطرق المستخدمة لتقديره، بالإضافة إلى العدد المحدود لبيانات طول اليوم في حقبة ما قبل الكمبري، لا سيما تلك التي تغطي الفترة الحرجة من حقبة البروتيروزويك. يدعم خمسة قيود حديثة من علم الطبقات

https://coptic-treasures.com/

الدورية، ذات هوامش خطأ منخفضة نسبيًا، فرضية استقرار طول النهار في منتصف حقبة البروتيروزويك، إلا أنه لا بد من إجراء المزيد من الدراسات لاختبار فترة الرنين وتحديدها بدقة أكبر. وبما أن بيانات طول النهار تشير إلى أن الرنين المفترض قد تحقق في الفترة ما بين 2.46 و2.00 مليار سنة، فإن السؤال المطروح هو ما إذا كانت الظروف الجوية خلال تلك الفترة مواتية لموجات لامب التي كانت أسرع بنحو 10% مما هي عليه اليوم.

يبدو أن استقرار طول النهار قد حدث بعد فترة وجيزة من اثنين من أبرز التقلبات في الظروف الجوية، والتي ربما تسببت في تغيير جوهري في المد والجزر الجوي، مما أدى إلى حدوث رنين مع المد والجزر المحيطي. وتتباين هاتان الفترتان الزمنيتان - حدث الأكسدة العظيم (GOE) وخروج الأكسجين (Oxit) - تبايناً صارخاً، حيث يمثل حدث الأكسدة العظيم إضافة الأكسجين، بينما يمثل خروج الأكسجين طرحه. ولا يمكن أن تؤدي مستويات الأكسجين المنخفضة، بالإضافة إلى ارتفاع درجات الحرارة مقارنةً باليوم، إلى جعل موجات لامب أسرع بنسبة 10% مما هي عليه اليوم، مقتربةً من طول النهار الذي لوحظ في منتصف حقبة البروتيروزويك Proterozoic، والذي يبلغ حوالي 19 ساعة. علاوة على ذلك، ونظراً لأن امتصاص الأوزون لأشعة الشمس يحدث على أعماق كبيرة وعلى ارتفاعات أعلى من امتصاص بخار الماء، فإن الأوزون أكثر أهمية في إثارة المد والجزر الجوي. وبالتالي، فإن تراكم الأوزون بعد حدث الأكسدة العظيم (نتيجة تحلل جزيئات الأكسجين بواسطة الأشعة فوق البنفسجية وإعادة اتحادها مع ذرات الأكسجين لتكوين الأوزون) ربما يكون قد زاد من قوة المد الشمسي المعاكس لينافس قوة المد القمري الأصغر في حقبة ما قبل الكمبري، مما أدى إلى استقرار طول النهار. لذلك، ربما لعب تتابع حدث الأكسدة العظيم، الذي أدى إلى تكوين طبقة الأوزون، ثم حدث الأكسدة الذي أدى إلى انخفاض مستويات الأكسجين، أدوارًا متكررة في دخول الأرض في حالة الرنين، حيث تحققت درجات حرارة السطح الأكثر ترجيحًا عند رنين يبلغ طول النهار فيه حوالي 19 ساعة مع انخفاض مستوى الأوزون ووجود الأوزون الحديث. وقد تكون درجات حرارة السطح الدافئة التي يشير إليها هذا النموذج قد تحققت نتيجة لانخفاض مستوى الأوزون بعد حدث الأكسدة الذي تسبب في ارتفاع درجة حرارة السطح. وهناك تفسيرات متعددة محتملة لكيفية حدوث الخروج من حالة الرنين. استنادًا إلى التوقيت، يُرجّح أن يكون هذا مرتبطًا بشكلٍ ما بتغيرات درجة حرارة الغلاف الجوي أو تركيبه خلال بداية التقلبات المناخية الحادة في العصر النيوبروتيروزوي Neoproterozoic.

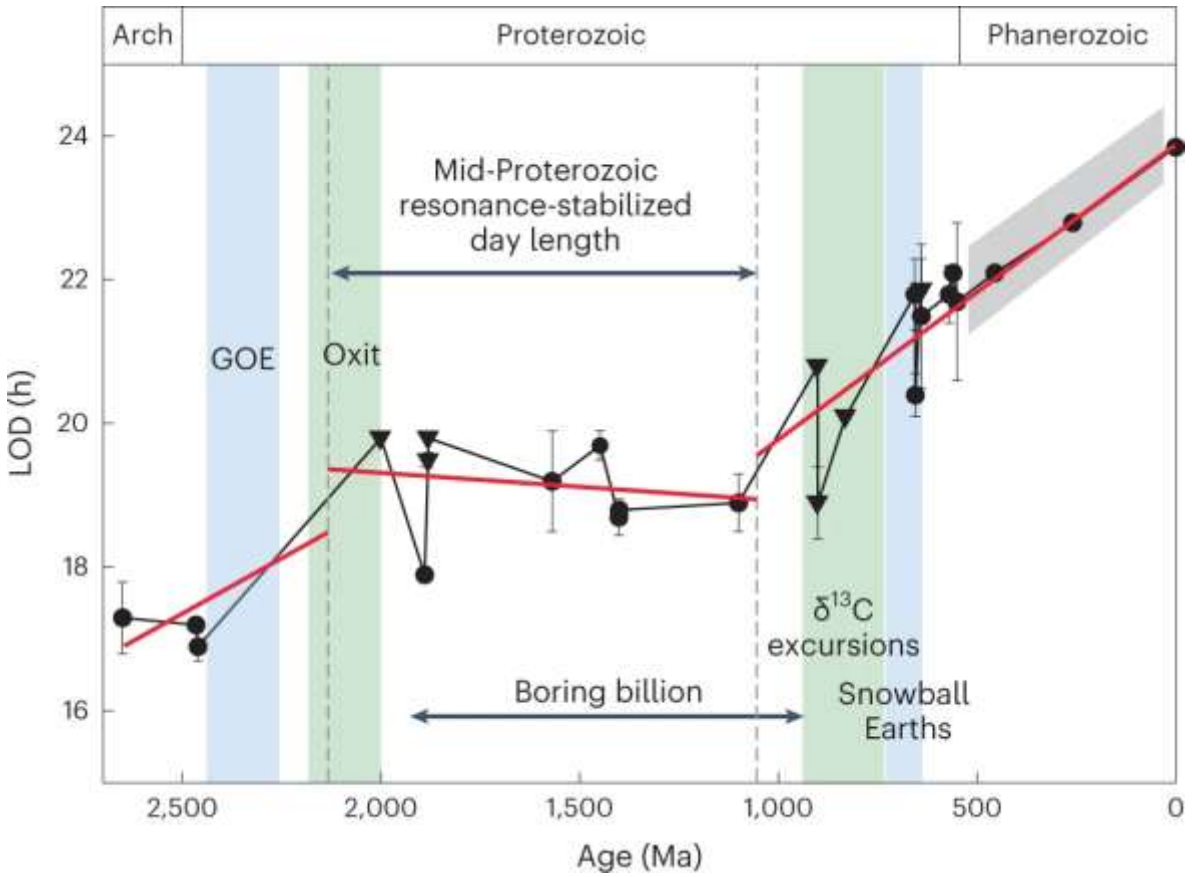
إن ثبات طول النهار عند حوالي 19 ساعة لمدة مليار سنة له آثار على نظام الأرض والقمر، وكذلك على تاريخ الأرض. ومن بين هذه الآثار زيادة في الزخم الزاوي لنظام الأرض والقمر ككل نتيجة استخلاص زخم زاوي إضافي من مدار الأرض أثناء الرنين. ومن القيود الحالية أن الدراسات الدورية الطبقية تفترض حفظ الزخم الزاوي عند التحويل من k إلى طول النهار؛ لذا، ينبغي النظر في مقترحات لتقدير طول النهار دون هذا الافتراض. على الأرض، تتوافق فترة ثبات طول النهار الطويلة بشكل وثيق مع فترة مماثلة من توقف التطور البيولوجي، والهدوء الجيوكيميائي والتكتوني المعروف باسم "المليار الممل". ومن الناحية

https://coptic-treasures.com/

التكتونية، يمكن اعتبار التغيرات الزمنية في الطاقة الحركية للدوران الناتجة عن طول النهار قوة مساهمة في الطاقات اللازمة لتحريك الصفائح التكتونية. بيولوجيًا، يتوافق عملنا مع فكرة أن كلًا من الارتفاع المتأخر للأكسجين الجوي الناتج عن عملية التمثيل الضوئي وظهور الحياة المعقدة، وكلاهما حدث في وقت متأخر من العصر النيوبروتيروزوي، قد تأخرا حتى تم كسر الرنين وأصبحت الأيام الأطول قادرة على تزويد البكتيريا الضوئية بأشعة الشمس الكافية لرفع مستويات الأكسجين إلى مستوى عالٍ بما يكفي لدعم حياة الحيوانات الكبيرة.

إن احتمال ثبات طول النهار على الأرض عند قيمة ثابتة في الماضي هو أحد المفاهيم التي لم تُختبر بعد. كما تشهد الأرض ظاهرة المد والجزر الشمسي الناتج عن ارتفاع درجة حرارة الغلاف الجوي خلال النهار، وظاهرة المد والجزر المحيطي الناتجة عن جاذبية القمر. لا تُضاهي قوة المد والجزر الشمسي قوة المد والجزر القمري المحيطي، ولكن لم يكن هذا هو الحال دائمًا. فقد كان تأثير جاذبية القمر أضعف بكثير في الماضي عندما كانت الأرض تدور بسرعة أكبر. يجذب مد الشمس الأرض، على عكس جاذبية القمر. ونتيجة لذلك، تُسرّع الشمس دوران الأرض بينما يُبطئه القمر. قال كيرشر: "لو تساوى هذان العاملان المتعاكسان في الماضي، لكان هذا الرنين المدّي قد تسبب في توقف تغير طول النهار على الأرض وثباته لفترة من الزمن". وقال ميتشل: "يبدو أن طول النهار على الأرض قد توقف عن الزيادة طويلة الأمد واستقر عند حوالي 19 ساعة تقريبًا بين ملياري ومليار سنة مضت - وهي "المليار سنة" التي تُعرف عادةً باسم "المليار الممل". وبذلك، يدعم البحث الجديد فرضية أن بكتيريا التمثيل الضوئي كانت تحتاج إلى أيام أطول لإنتاج المزيد من الأكسجين يوميًا قبل أن يصل مستوى الأكسجين على الأرض إلى مستوياته الحالية.

https://coptic-treasures.com/



يُفصّل تجميع بيانات طول اليوم (LOD) في قسم الطرق، ويُقدّم في البيانات الإضافية. تُعرّف أشرطة خطأ طول اليوم بالفرق بين متوسط جميع تقديرات طول اليوم المستندة إلى التبادر/الميل المحوري لوحدة صخرية، والتقدير ذي أكبر فرق عن المتوسط. تمّ تعيين الانحدارات الخطية الحمراء تلقائيًا بواسطة خوارزمية نقطة التغيير دون أي تجميع مسبق للبيانات. يضمّ النطاق الرمادي العديد من قيود طول اليوم لحقبة الحياة الظاهرة، مع عرض قيدين حديثين من علم الطبقات الدورية من حقبة الحياة القديمة وطول اليوم الحالي. قد تمثل القيود غير الدورية من الإيقاعات المدية والستروماتوليت (المثلثات) ذات الطبقات الدقيقة التي قد تحتوي على انقطاعات خفية، أقصى تقديرات طول اليوم. تفتقر بعض البيانات إلى هامش الخطأ نظرًا لعدم كفاية المعلومات المُقدّمة في الدراسات الأصلية. Arch: العصر الأركي؛ δ13C: نظير الكربون.

الأرض كانت تدور حول محورها كل 18 ساعة

أصبحت قطعة صخرية ظلت مدفونة في الأرض لملايين السنين بمثابة ساعة جديدة لفهم دوران الأرض. فقد كشف تحليل صدفة متحجرة من العصر الطباشيري أن طول اليوم على كوكبنا كان أقصر بنصف ساعة قبل 70 مليون سنة. وبالتالي، فإن معرفة ذلك تُساعد العلماء الآن على تحديد معدل ابتعاد القمر البطيء عن كوكبنا بدقة أكبر. يُعدّ فهم كيفية تغير دوران الأرض

https://coptic-treasures.com/

عبر الزمن تحديًا مثيرًا للاهتمام. لا يُمكننا العودة بالزمن وتجربة ذلك أو تسجيله؛ بل علينا الاعتماد على كيفية تسجيل كوكبنا لتلك التغيرات عبر الزمن[1].

فعلى سبيل المثال، من خلال دراسة كيفية توافق التغيرات في الإشعاع الشمسي المسجلة في الصخور القديمة مع دورات الشمس على مدى عشرات آلاف السنين، تمكن العلماء مؤخرًا من تحديد أن طول اليوم على الأرض كان 18 ساعة فقط قبل حوالي 1.4 مليار سنة.

لكن الحصول على معلومات أكثر تفصيلًا أثبت أنه أمرٌ صعبٌ نوعًا ما. وهنا يأتي دور نوعٍ منقرضٍ من ذوات الصدفتين يُدعى Torreites sanchezi. ينتمي هذا النوع إلى مجموعةٍ من ذوات الصدفتين تُسمى الروديست rudists، والتي انقرضت في حدث انقراض العصر الطباشيري-الباليوجيني Palaeogene قبل 66 مليون سنة، ولا يوجد مثيلٌ لها اليوم. كانت هذه الرخويات تُشبه في شكلها المزهرية، بغطاءٍ عند طرفها الأوسع؛ وقد هيمنت على النظم البيئية للشعاب المرجانية. لكنها كانت تشترك في بعض الخصائص مع المحار الحديث، منها أن أصدافها كانت تنمو بمعدل طبقةٍ واحدةٍ يوميًا.

فكما تحتوي حلقات الأشجار على معلوماتٍ عن السنة التي نمت فيها، يُمكن تحليل حلقات الأصداف أيضًا. وبشكلٍ أدق، يُمكنها الكشف عن ظروف المياه، مثل درجة الحرارة والتركيب الكيميائي، على فتراتٍ زمنيةٍ أقل من يوم، مما يُظهر لنا كيف عاشت هذه الحيوانات. "لدينا ما بين أربع إلى خمس نقاط بيانات يوميًا، وهذا أمر نادر الحدوث في التاريخ الجيولوجي"، أوضح عالم الكيمياء الجيولوجية نيلز دي وينتر من جامعة فريجي في بروكسل ببلجيكا. "بإمكاننا ببساطة دراسة يومٍ مضى عليه 70 مليون سنة. إنه لأمرٌ مذهل حقًا." حصل الفريق على أحفورة واحدة من نوع T. sanchezi وأخضعها لتقنيات تحليلية متنوعة، بما في ذلك مطياف الكتلة، والمجهر، وتحليل النظائر المستقرة، والتألق المجهري بالأشعة السينية.

كشف التحليل الكيميائي للصدفة أن المحيطات كانت أكثر دفئًا بكثير قبل 70 مليون سنة. ازدهر هذا النوع من ذوات الصدفتين في مياه وصلت درجة حرارتها إلى 40 درجة مئوية (104 درجة فهرنهايت) في الصيف، وأكثر من 30 درجة مئوية (86 درجة فهرنهايت) في الشتاء. تُظهر حلقات الصدفة أيضًا تباينًا موسميًا؛ فعلى سبيل المثال، في المحار الحديث، تكون الطبقات التي تنمو في الشتاء أغمق لونًا. يُتيح هذا التباين الموسمي للعلماء تحديد الأطر الزمنية السنوية ضمن أنماط الخطوط الظاهرة في الصدفة، حيث تتطابق الحلقات الموسمية فيما بينها. استخدم الفريق هذه الخاصية لحساب طول النهار خلال فترة حياة هذا المحار. وقد توصلوا إلى أن أحفورة T. sanchezi عاشت لمدة تسع سنوات. ثم قاموا بحساب عدد الحلقات في كل عام، بصريًا وكيميائيًا. لو تم ذلك اليوم، لحصلنا على 365 حلقة في السنة، ولكنهم حصلوا على 372 حلقة.

[1] Niels J. de Winter, Steven Goderis, et al.. Subdaily-Scale Chemical Variability in a Torreites Sanchezi Rudist Shell: Implications for Rudist Paleobiology and the Cretaceous Day-Night Cycle., Paleoceanography and Paleoclimatology, (2020) Volume35, Issue2

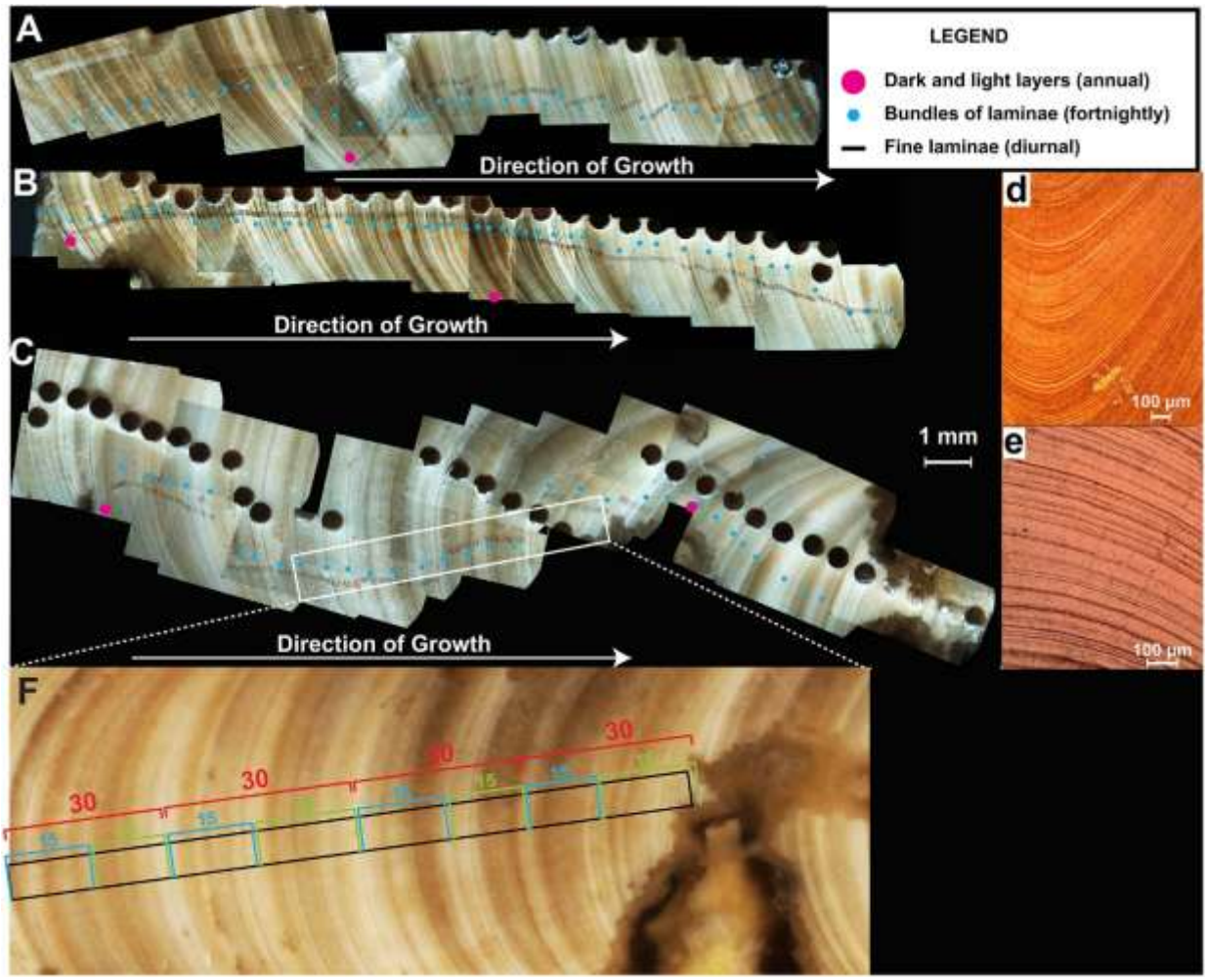
https://coptic-treasures.com/

نعلم أن طول السنة ظل ثابتًا تقريبًا، نظرًا لعدم تغير مدار الأرض. وهذا يعني أن طول اليوم - المحدد بسرعة دوران الأرض - قد تغير، إذ ازداد منذ ذلك الحين من 23.5 إلى 24 ساعة. إن تباطؤ دوران الأرض أمرٌ راسخٌ، وقد رُبط بشكلٍ قاطعٍ بالقمر، لأن تباطؤ دوران الأرض ناتجٌ عن احتكاك المد والجزر. ويُطلق على هذا التأثير، بشكلٍ طريف، اسم احتكاك المد والجزر. ينتج هذا المد والجزر عن جاذبية القمر، مما يُسبب انتفاخه. ومع ذلك، فإن دوران الأرض يُؤدي إلى انحراف هذا الانتفاخ قليلًا أمام موقع القمر في مداره حول الأرض. وهذا يُولّد قوة دوران بين الجسمين تُسرّع القمر، مما يجعله يبتعد تدريجيًا عن الأرض.

يدور القمر حاليًا مبتعدًا عن الأرض بمعدل 3.82 سنتيمتر (1.5 بوصة) سنويًا، وفقًا لقياسات دقيقة باستخدام أشعة ليزر مُنعكسة عن علامات وضعها رواد الفضاء خلال مهمات أبولو. إذا استخدمنا هذا المعدل لاستقراء موقع القمر الأولي قبل 4.5 مليار سنة (عندما نعتقد أنه تشكل)، فسنجد خللًا ما: كان القمر سيكون قريبًا جدًا من كوكبنا لدرجة أنه كان سيتعرض للتمزق بفعل قوى المد والجزر. وهذا ما يدفع العلماء إلى استنتاج أن معدل ابتعاد القمر قد تغير - أو تسارع - بمرور الزمن. لكن من الصعب تحديد سرعة ابتعاده بدقة في أي لحظة زمنية محددة.

لكن هذا ليس كل شيء. فقد كشفت الدراسة أيضًا أن حلقات الصدفة تنمو بسرعة أكبر خلال النهار. ويشير هذا، بحسب الباحثين، إلى أن نوع T. sanchezi كان يُقيم علاقة تكافلية مع الكائنات الحية التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي، على غرار المحار العملاق الحالي الذي يُقيم علاقة تكافلية مع الطحالب.

https://coptic-treasures.com/



ملاحظات مجهرية لصفائح الصدفة وتجمعاتها. (a-c) صورة مركبة من صور مجهرية لجزء من السطح الخارجي لصدفة T. sanchezi، تُظهر دورة موسمية واضحة في طبقات الكالسيت (الشكل1d). تُعرض المقاطع الموضحة في A, B، و C بترتيب عمر الصدفة، حيث تتطابق الأجزاء اليمنى من A, B مع الأجزاء اليسرى من B و C، على التوالي (النمو من اليسار إلى اليمين). تمثل المسافات بين النقاط الحمراء سنة واحدة من النمو (استنادًا إلى سجلات نظائر الأكسجين المستقرة). تمثل المسافات بين النقاط الخضراء حزمًا من الصفائح بطول 0.6 مم مرتبطة بدورة المد والجزر التي تستغرق أسبوعين. تُشير الخطوط السوداء إلى الصفائح اليومية الدقيقة الفردية. يتم عدّ هذه الصفائح للحصول على دليل مستقل على عدد الأيام في السنة وطول الدورة اليومية المسجلة في صدفة T. sanchezi. (d) صورة مجهرية لشريحة رقيقة من الطبقة الخارجية لغلاف LMC، تُظهر صفائح بسمك 40 ميكرومتر تقريبًا مع نطاقات بارزة من الكالسيت الداكن. (e) صورة مجهرية لشريحة رقيقة من الطبقة الخارجية لغلاف LMC، تُظهر صفائح بسمك 40 ميكرومتر تقريبًا مع نطاقات بارزة من الكالسيت الفاتح. لاحظ اختلاف المقياس مع (e). (f) صورة مكبرة لمقطع من الغلاف المشار إليه بالمربع الأبيض في الشكل 2c. تُبرز الأقواس الخضراء والزرقاء التجمع المدّي نصف الشهري الواضح في هذا المقطع، بينما تُظهر الحزم الحمراء الأكبر التجمع الشهري (28 يومًا).

Period	Age (years)	Days/year	Hours/day	ratio
Current	0	365	24.0	1.000
Upper Cretaceous	70 million	370	23.7	0.988
Upper Triassic	220 million	372	23.5	0.979
Pennsylvanian	290 million	383	22.9	0.954

https://coptic-treasures.com/

Mississippian	340 million	398	22.0	0.917
Upper Devonian	380 million	399	22.0	0.917
Middle Devonian	395 million	405	21.6	0.900
Lower Devonian	410 million	410	21.4	0.892
Upper Silurian	420 million	400	21.9	0.913
Middle Silurian	430 million	413	21.2	0.883
Lower Silurian	440 million	421	20.8	0.867
Upper Ordovician	450 million	414	21.2	0.883
Middle Cambrian	510 million	424	20.7	0.863
Ediacarin	600 million	417	21.0	0.875
Cryogenian	900 million	486	18.0	0.750

كان متوسط طول اليوم على الأرض أقل من 19 ساعة

يُوفّر السجل الجيولوجي conceptual لدورات ميلانكوفيتش Milankovitch المناخية إطارًا مفاهيميًا وزمنيًا ثريًا لتقييم تطور نظام الأرض، مما يُتيح لنا رؤيةً دقيقةً لتاريخ كوكبنا. مع ذلك، فإنّ فائدة هذه الدورات في تحديد نظام الأرض المبكر تُعيقها شكوكٌ تبدو مستعصيةً على الحل في معرفتنا بسلوك النظام الشمسي (بما في ذلك تاريخ الأرض والقمر)، وضعف التحكم الزمني للتحقق من صحة فترات الدورات (مثلًا، من خلال التواريخ النظائرية المشعة). نتناول هنا هذه المشكلات باستخدام منهجية الانعكاس البايزي لربط النظرية الفلكية كميًا بالرصد الجيولوجي، مما يسمح بإعادة بناء الدورات الفلكية في حقبة ما قبل الكامبري[1]، والترددات الأساسية للنظام الشمسي، وثابت التبادر، والمقياس الزمني الجيولوجي الأساسي، مباشرةً من البيانات الطبقية. يشير تطبيق هذا المنهج على طبقات إيقاعية عمرها 1.4 مليار سنة إلى ثابت ترنح يبلغ 85.79 ± 2.72 ثانية قوسية/سنة ($\sigma 2$)، ومسافة بين الأرض والقمر تبلغ 340,900 ± 2,600 كيلومتر ($\sigma 2$)، وطول يوم يبلغ 18.68 ± 0.25 ساعة ($\sigma 2$)، مع دورات ترنح مناخية سائدة تبلغ حوالي 14 ألف سنة ودورات انحراف مداري تبلغ حوالي 131 ألف سنة. تؤكد هذه النتائج انخفاض التبدد المدّي في حقبة ما قبل الكامبري. يوضح تحليل تكميلي لطبقات إيقاعية من العصر الإيوسيني (حوالي 55 مليون سنة) كيف يوفر هذا المنهج وسيلة لرسم خريطة لسلوك النظام الشمسي القديم وتاريخ الأرض والقمر باستخدام السجل الجيولوجي. كما توفر هذه الطريقة أيضًا دقة عالية في تقدير عدم اليقين الكمي بشأن فترات الانحراف المداري

[1] S.R. Meyers, & A. Malinverno, Proterozoic Milankovitch cycles and the history of the solar system, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115 (25) 6363-6368 (2018)

https://coptic-treasures.com/

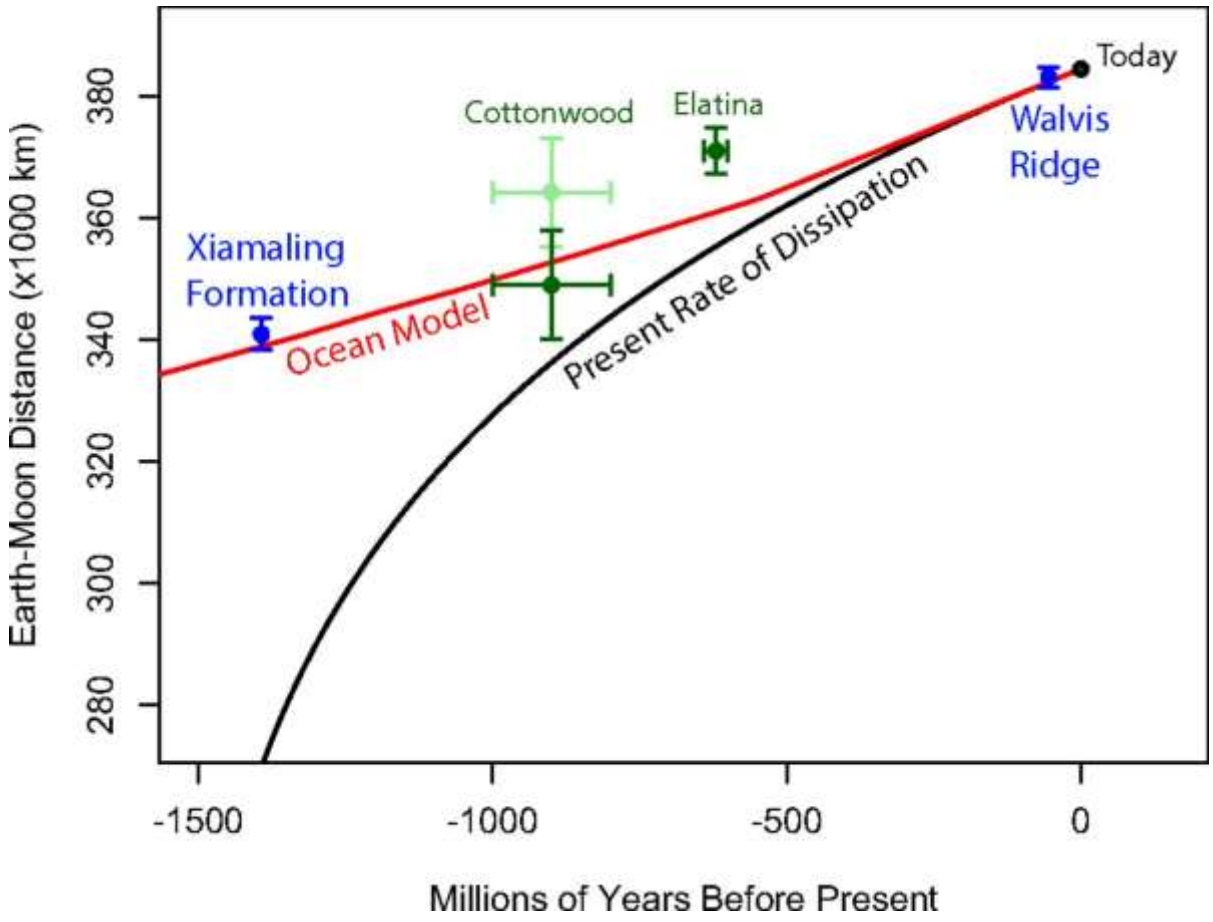
والترنح المناخي، والجداول الزمنية الفلكية المستنتجة. ونتيجة لذلك، يتم تحسين الدقة الزمنية لعمليات نظام الأرض القديم، وتتحسن معرفتنا بديناميكيات النظام الشمسي المبكر بشكل كبير.

تُعدّ التغيرات شبه الدورية في الإشعاع الشمسي، والمعروفة بدورات ميلانكوفيتش، عاملاً رئيسياً في التحكم بتغير المناخ على مدى فترات زمنية تتراوح بين 104 و106 سنوات. ويُشكّل ظهورها في السجل الطبقي أداةً فعّالة لإعادة بناء الأطر الزمنية الجيولوجية، أو ما يُعرف بالتسلسل الزمني الفلكي، وتقييم تاريخ الأرض. إلا أن تطبيق هذا الإيقاع الفلكي على حقبة ما قبل الكمبري أثبت صعوبته نظراً لقصور كلٍّ من النظرية والبيانات الجيولوجية. فمن منظور السجل الجيولوجي، يتمثل أحد أبرز القيود في عدم وجود تحكم زمني مستقل كافٍ (مثل التواريخ النظيرية المشعة) لمعايرة الإيقاعات المكانية المرصودة بدقة مع الفترات الفلكية (الزمنية). أما من الناحية النظرية، فقد أصبحت فترات الدورات الفلكية للأرض أقل تحديداً خلال حقبة ما قبل الكمبري بسبب الشكوك المحيطة بتطور النظام الشمسي. على الرغم من ثبوت أن دورات الانحراف المداري السائدة ودورات التبادر المناخي تنبع من الترددات الأساسية المرتبطة بمدارات الكواكب الخمسة الأقرب إلى الشمس وثابت التبادر k، إلا أن هذه القيم غير محددة بدقة بسبب الطبيعة الفوضوية للنظام الشمسي، ولأن تاريخ تبديد الطاقة المدّي لنظام الأرض والقمر غير معروف جيدًا. في الواقع، تقتصر صلاحية الحلول الفلكية النظرية التي يقوم عليها علم التأريخ الفلكي على الخمسين مليون سنة الماضية، على الرغم من اقتراح تأريخات فلكية "عائمة" لفترات أقدم، ومن المتوقع أن تكون دورة الانحراف المداري التي يبلغ طولها 405 ألف سنة مستقرة نسبيًا بنسبة خطأ لا تتجاوز 0.2% بحلول 250 مليون سنة.

تُقدّم التطورات الحديثة في التقييم الفلكي الزمني حلاً جزئياً للتحديات المذكورة أعلاه، وذلك بتوفير مناهج إحصائية تُراعي وتُقيّم بشكل صريح عدم اليقين في النطاق الزمني من حيث معدل تراكم سجل رسوبي مُحدد. مع ذلك، تتطلب هذه الأساليب افتراضات حول الترددات الفلكية المرتبطة بانحراف مدار الأرض، وميل محورها، وترنحها المناخي (دورات ميلانكوفيتش). في هذه الدراسة، نبني على أعمال سابقة لصياغة منهج عكسي بايزي يربط كمياً النظرية الفلكية بالملاحظة الجيولوجية، متجاوزين بذلك القيود المرتبطة بكل منهما. يتألف هذا المنهج من ثلاثة مكونات أساسية: (1) طريقة TimeOpt، التي تُراعي بشكل صريح عدم اليقين في النطاق الزمني، وتستخدم سمات متعددة للإشارة الفلكية لزيادة الموثوقية الإحصائية؛ (2) النظرية الفلكية الأساسية، التي تربط إيقاعات الترنح المناخي وانحراف المدار المرصودة بالترددات الأساسية للنظام الشمسي وتطور الأرض والقمر؛ و(3) منهجية بايزية تعتمد على سلسلة ماركوف مونت كارلو، تتيح استكشافًا دقيقًا لبيانات ونماذج الفضاء، فضلًا عن أوجه عدم اليقين. والنتيجة هي منهجية متينة لعلم التأريخ الفلكي، مناسبة لحقبة ما قبل الكامبري، وتُعزز بشكل كبير المعرفة الفلكية التي يُمكننا الحصول عليها من الطبقات الأحدث (مثل الطبقات المبكرة من حقبة الحياة الحديثة). نُشير إلى هذه المنهجية باسم TimeOptMCMC. ونؤكد أنه على الرغم من أن TimeOptMCMC تُوفر قياسًا كميًا دقيقًا لأوجه عدم اليقين في نتائج علم التأريخ الفلكي، إلا أن هذه المنهجية لا تُقلل من هذه الأوجه في حد ذاتها. في نهاية المطاف، لا يُمكن تقليل أوجه عدم اليقين في علم التأريخ الفلكي إلا من خلال معلومات إضافية تُوفرها البيانات المقاسة.

https://coptic-treasures.com/

نُطبق منهجية TimeOptMCMC لتقييم سجلين دوريين طبقيين ذوي أهمية خاصة. الأول هو تكوين شيامالينغ، الذي يبلغ عمره 1.4 مليار سنة، من درع شمال الصين، وهو أحد أقدم السجلات المقترحة للتأثيرات الفلكية. أما الثاني فهو السجل المدروس جيدًا والذي يعود تاريخه إلى حوالي 55 مليون سنة من سلسلة جبال والفيش، وهو جدير بالذكر لأنه يشمل ذروة الاحترار في العصر الباليوسيني-الإيوسيني، ويتجاوز الحدود الزمنية للحلول الفلكية النظرية المتاحة. تسمح لنا هذه المنهجية بمعالجة هدفين بحثيين رئيسيين: (أ) توفير تقديرات جيولوجية دقيقة لفترات التبادر واللامركزية المناخية لكل من العصر الإيوسيني المبكر والبروتيروزوي (بما في ذلك هامش الخطأ)؛ و(ب) تحديد طول اليوم والمسافة بين الأرض والقمر خلال حقبة البروتيروزوي (عن طريق ثابت التبادر k)، في وقت كان فيه استقراء معدل تبديد المد والجزر الحالي يشير إلى حالة قريبة من اصطدام الأرض بالقمر.



أعاد برنامج TimeOptMCMC بناء المسافة بين الأرض والقمر، مقارنةً بتقديرين قائمين على بيانات المد والجزر ونموذجين. تتراوح نسبة عدم اليقين في المسافة بين الأرض والقمر بين ±2σ، بينما تتراوح نسبة عدم اليقين في العمر بين الحد الأدنى والحد الأقصى. تُشير الرموز الزرقاء إلى تقديرات TimeOptMCMC الخلفية البايزية لتكوين شيامالينغ البروتيروزوي وجرف والفيش الإيوسيني. يُلاحظ التحسن الكبير في الدقة بين التقديرات الخلفية (الزرقاء) والتقديرات السابقة لبيانات شيامالينغ (السابقة = 319,743 إلى 380,309 كم؛ 2σ). تقع نسبة عدم اليقين في العمر لنتائج شيامالينغ وجرف والفيش ضمن نطاق الرموز الزرقاء. تُعرض تقديرات المد والجزر من تكوين بيغ كوتونوود وتكوين إيلاتينا وحجر رينيل الطيني برموز خضراء داكنة. يمثل تقدير تكوين بيغ كوتونوود ذو اللون الأخضر الفاتح (364,192 كم) قيمة بديلة مع هامش خطأ مقارنةً بالتقدير البالغ 348,884 كم (الرمز الأخضر الداكن). ويُظهر الشكل نموذج المحيط (الخط الأحمر)، ونموذجًا آخر يستخدم معدل التبدد المدّي الحالي (الخط الأسود).

https://coptic-treasures.com/

المراجع

https://coptic-treasures.com/

1. Raluca Rufu, Robin M. Canup, Origin of compact exoplanetary systems during disk infall, Nature Communications volume 16, Article number: 4853 (2025)
2. https://www.astronomy.com/science/the-light-and-dark-face-of-a-star-forming-nebula/
3. Karin Cescon , Jacqueline A Hodge , Leindert A Boogaard , Hiddo S B Algera , Lucie E Rowland , Dominik A Riechers , Renske Smit , Ilse De Looze , Rychard Bouwens , Paul van der Werf , Manuel Aravena , Elisabete da Cunha , Pratika Dayal , Andrea Ferrara , Rebecca Fisher , Hanae Inami , Pavel E Mancera Piña , Pascal A Oesch , Andrea Pallottini , Matus Rybak , Sander Schouws , Laura Sommovigo , Mauro Stefanon , Livia Vallini, Direct detection of cool molecular ga s in a star-forming galaxy at z=7.31, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 549, Issue 3, July 2026, stag924
4. https://esawebb.org/images/potm2605a/
5. https://www.swri.org/newsroom/press-releases/new-swri-model-explains-exoplanetary-systems-compact-orbits
6. https://www.universiteitleiden.nl/en/news/2018/06/planet-formation-starts-before-a-star-is-fully-grown
7. Ayumu Shoshi, Masayuki Yamaguchi, Takayuki Muto, Naomi Hirano, Ryohei Kawabe, Takashi Tsukagoshi, Masahiro N Machida, ALMA 2D super-resolution imaging survey of Ophiuchus Class I/flat spectrum/II disks. I. Discovery of new disk substructures, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 77, Issue 3, June 2025, Pages 572–606
8. https://alma-telescope.jp/en/news/press/cradle-202506.html
9. https://www.nao.ac.jp/en/news/science/2025/20250624-alma.html
10. https://science.nasa.gov/exoplanets/how-do-planets-form/
11. https://www.apu.apus.edu/area-of-study/math-and-science/resources/origin-of-the-universe/
12. https://www.nationalgeographic.com/science/article/origins-of-the-universe
13. https://www.ebsco.com/research-starters/astronomy-and-astrophysics/origins-solar-system#full-article
14. https://www.ebsco.com/research-starters/science/earths-origin

https://coptic-treasures.com/

15. S Pfalzner, M B Davies, M Gounelle, A Johansen, C Münker, P Lacerda, S Portegies Zwart, L Testi, M Trieloff and D Veras, The formation of the solar system, Physica Scripta, Volume 90, Number 6, April 2015
16. Alex N. Halliday & Robin M. Canup, The accretion of planet Earth, Nature Reviews Earth & Environment volume 4, pages19–35 (2023)
17. Tim Lichtenberg, Joanna Drążkowska, Maria Schönbächler, Gregor J. Golabek, and Thomas O. Hands, Bifurcation of planetary building blocks during Solar System formation, Science Vol. 371, No. 6527, Issue 6527 pp. 365-370, Jan 2021
18. https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/for-the-first-time-astronomers-witness-the-dawn-of-a-new-solar-system/
19. McClure, M.K., van't Hoff, M., Francis, L. et al. Refractory solid condensation detected in an embedded protoplanetary disk. Nature 643, 649–653 (2025)
20. https://science.nasa.gov/missions/webb/nasas-webb-redefines-dividing-line-between-planets-stars/
21. https://aasnova.org/2026/06/16/aas-248-day-1/#prettyPhoto
22. https://www.cfa.harvard.edu/news/growing-stardust-scientists-discover-stars-and-planets-may-be-siblings
23. Segura-Cox, D.M., Schmiedeke, A., Pineda, J.E. et al. Four annular structures in a protostellar disk less than 500,000 years old. Nature 586, 228–231 (2020)
24. https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/alma-campaign-provides-unprecedented-views-of-the-birth-of-planets/
25. Ke Zhang, Laura M. Pérez, Ilaria Pascucci, Paola Pinilla, Lucas A. Cieza, John Carpenter, Leon Trapman, Dingshan Deng, Carolina Agurto-Gangas, Anibal Sierra, Nicolás T. Kurtovic, Dary A. Ruiz-Rodriguez, Miguel Vioque, James Miley, Benoît Tabone, Camilo González-Ruilova, Rossella Anania, Giovanni P. Rosotti, Estephani TorresVillanueva, Michiel R. Hogerheijde, Kamber Schwarz, and Aleksandra Kuznetsova, The ALMA Survey of Gas Evolution of PROtoplanetary Disks (AGE-PRO). I. Program Overview and Summary of First Results, The Astrophysical Journal, Volume 989, Number 1, (2025)

https://coptic-treasures.com/

26. Satoshi Ohashi, Hiroshi Kobayashi, Riouhei Nakatani, Satoshi Okuzumi, Hidekazu Tanaka, Koji Murakawa, Yichen Zhang, Hauyu Baobab Liu, and Nami Sakai, Ring Formation by Coagulation of Dust Aggregates in the Early Phase of Disk Evolution around a Protostar, The Astrophysical Journal, Volume 907, Number 2 (2021)
27. Xing, QF., Zhao, G., Liu, ZW. et al. A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova. Nature 618, 712–715 (2023)
28. Eduard I. Vorobyov, Daniel J. Whalen, Muhammad A. Latif, Alexander M. Skliarevskii, Christopher Jessop, Ryoki Matsukoba, Takashi Hosokawa, Devesh Nandal, Planetesimals Formed in HO-Rich Disks at Cosmic Dawn, Astrophysics of Galaxies (astro-ph.GA), arXiv:2501.08375v3 [astro-ph.GA] 29 Jul 2025
29. https://www.eso.org/public/blog/let-there-be-light/
30. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cosmic_eras
31. https://news.stanford.edu/stories/2023/07/science-illuminated-first-light-universe
32. Atek, H., Labbé, I., Furtak, L.J. et al. Most of the photons that reionized the Universe came from dwarf galaxies. Nature 626, 975–978 (2024)
33. Cosmology From CMB Lensing and Delensed EE Power Spectra Using 2019-2020 SPT-3G Polarization Data. Astrophysics of Galaxies arXiv:2411.06000 (2024).
34. Mitchell, R.N., Kirscher, U. Mid-Proterozoic day length stalled by tidal resonance. Nature Geoscience. volume 16, pages567–569 (2023)
35. Niels J. de Winter, Steven Goderis, Stijn J.M. Van Malderen, Matthias Sinnesael, Stef Vansteenberge, Christophe Snoeck, Joke Belza, Frank Vanhaecke, Philippe Claeys. Subdaily-Scale Chemical Variability in a Torreites Sanchezi Rudist Shell: Implications for Rudist Paleobiology and the Cretaceous Day-Night Cycle., Paleoceanography and Paleoclimatology, Volume35, Issue2 (2020)
36. Hanbo Wu, Norman Murray, Kristen Menou, Christopher Lee, and Jeremy Leconte., Why the day is 24 hours long: The history of Earth's atmospheric

https://coptic-treasures.com/

thermal tide, composition, and mean temperature, Science Advances, Volume 9, Issue 27Jul 2023

37. http://intercontinental-academia.ubias.net/nagoya/news/when-a-day-lasted-only-4-hours

38. Mikako Matsuura, Kevin Volk, Patrick Kavanagh, Bruce Balick, Roger Wesson, Albert A Zijlstra, Harriet L Dinerstein, Els Peeters, N C Sterling, Jan Cami, M J Barlow, Joel Kastner, Jeremy R Walsh, L B F M Waters, Naomi Hirano, Isabel Aleman, Jeronimo Bernard-Salas, Charmi Bhatt, Joris Blommaert, Nicholas Clark, Olivia Jones, Kay Justtanont, F Kemper, Kathleen E Kraemer, Eric Lagadec, J Martin Laming, F J Molster, Paula Moraga Baez, H Monteiro, Anita M S Richards, Raghvendra Sahai, G C Sloan, Maryam Torki, Peter A M van Hoof, Nicholas J Wright, Finnbar Wilson, Alexander Csukai, The JWST/MIRI view of the planetary nebula NGC 6302 – I. A UV-irradiated torus and a hot bubble triggering PAH formation, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 542, Issue 2, September 2025, Pages 1287–1307

39. Kooten, G. H. van. (2005). The creation of heaven and earth : re-interpretation of Genesis I in the context of Judaism, ancient philosophy, Christianity, and modern physics. Brill.

40. Haffert, S.Y., Bohn, A.J., de Boer, J. et al. Two accreting protoplanets around the young star PDS 70. Nat Astron 3, 749–754 (2019)

41. M. Keppler, M. Benisty, A. Müller, Th. Henning, R. van Boekel, F. Cantalloube, C. Ginski, R. G. van Holstein, A.-L. Maire, A. Pohl, M. Samland, H. Avenhaus, J.-L. Baudino, A. Boccaletti, J. de Boer, M. Bonnefoy, G. Chauvin, S. Desidera, M. Langlois, C. Lazzoni, G.-D. Marleau, C. Mordasini, N. Pawellek, T. Stolker, A. Vigan, A. Zurlo, T. Birnstiel, W. Brandner, M. Feldt, M. Flock, J. Girard, R. Gratton, J. Hagelberg, A. Isella, M. Janson, A. Juhasz, J. Kemmer, Q. Kral, A.-M. Lagrange, R. Launhardt, A. Matter, F. Ménard, J. Milli, P. Mollière, J. Olofsson, L. Pérez, P. Pinilla, C. Pinte, S. P. Quanz, T. Schmidt, S. Udry, Z. Wahhaj, J. P. Williams, E. Buenzli, M. Cudel, C. Dominik, R. Galicher, M. Kasper, J. Lannier, D. Mesa, D. Mouillet, S. Peretti, C. Perrot, G. Salter, E. Sissa, F. Wildi, L. Abe, J. Antichi, J.-C. Augereau, A. Baruffolo, P. Baudoz, A. Bazzon, J.-L. Beuzit, P. Blanchard, S. S. Brems, T. Buey, V. De Caprio, M. Carbillet, M. Carle,

https://coptic-treasures.com/

E. Cascone, A. Cheetham, R. Claudi, A. Costille, A. Delboulbé, K. Dohlen, D. Fantinel, P. Feautrier, T. Fusco, E. Giro, L. Gluck, C. Gry, N. Hubin, E. Hugot, M. Jaquet, D. Le Mignant, M. Llored, F. Madec, Y. Magnard, P. Martinez, D. Maurel, M. Meyer, O. Möller-Nilsson, T. Moulin, L. Mugnier, A. Origné, A. Pavlov, D. Perret, C. Petit, J. Pragt, P. Puget, P. Rabou, J. Ramos, F. Rigal, S. Rochat, R. Roelfsema, G. Rousset, A. Roux, B. Salasnich, J.-F. Sauvage, A. Sevin, C. Soenke, E. Stadler, M. Suarez, M. Turatto and L. Weber., Discovery of a planetary-mass companion within the gap of the transition disk around PDS 70., Astronomy & Astrophysics A&A, Volume 617 (2018), 617 (2018) A44

42. A. Müller, M. Keppler, Th. Henning, M. Samland, G. Chauvin, H. Beust, A.-L. Maire, K. Molaverdikhani, R. van Boekel, M. Benisty, A. Boccaletti, M. Bonnefoy, F. Cantalloube, B. Charnay, J.-L. Baudino, M. Gennaro, Z. C. Long, A. Cheetham, S. Desidera, M. Feldt, T. Fusco, J. Girard, R. Gratton, J. Hagelberg, M. Janson, A.-M. Lagrange, M. Langlois, C. Lazzoni, R. Ligi, F. Ménard, D. Mesa, M. Meyer, P. Mollière, C. Mordasini, T. Moulin, A. Pavlov, N. Pawellek, S. P. Quanz, J. Ramos, D. Rouan, E. Sissa, E. Stadler, A. Vigan, Z. Wahhaj, L. Weber and A. Zurlo., Orbital and atmospheric characterization of the planet within the gap of the PDS 70 transition disk., Astronomy & Astrophysics (A&A) Volume 617 (2018) L2

43. https://www.mpia.de/news/science/2018-06-PDS70

44. S.R. Meyers, & A. Malinverno, Proterozoic Milankovitch cycles and the history of the solar system, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115 (25) 6363-6368, (2018).

45. Hosono, N., Karato, Si., Makino, J. et al. Terrestrial magma ocean origin of the Moon. Nature Geoscience volume 12, pages 418–423 (2019)

46. J. A. Kegerreis, S. Ruiz-Bonilla, V. R. Eke, R. J. Massey, T. D. Sandnes, and L. F. A. Teodoro., Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite., The Astrophysical Journal Letters, Volume 937, Number 2 (2022)

47. Francis Brown, S. R. Driver, and Charles A. Briggs, A Hebrew and English Lexicon of the Old Testament (Oxford: Clarendon Press, 1906), s.v. "בָּרָא

48. Ludwig Koehler and Walter Baumgartner, The Hebrew and Aramaic Lexicon of the Old Testament, 2 vols., study ed. (Leiden: Brill, 2001), s.v. "ברא

https://coptic-treasures.com/

49. Gordon J. Wenham, Genesis 1–15, Word Biblical Commentary (Waco, TX: Word Books, 1987), 14
50. Young, Edward J. 1961. “The Interpretation of Genesis 1:2.” Westminster Theological Journal 23, no. 2 (May): 151–178
51. Wilson, Joshua. 2023. “Genesis 1:1–2 and the Doctrine of Creatio Ex Nihilo (Part 1): A Lexical Analysis of the Phrase אֵת הַשָּׁמַיִם וְאֵת הָאָרֶץ.” Answers Research Journal 16 (June 7): 265–281
52. Ludwig H. Koehler and Walter Baumgartner, Lexicon in Veteris Testamenti Libros (Leiden: Brill, 1985), 388, citing 2 Sam 20:5; Isa 47:7.
53. Jay P. Green, ed., The New Brown-Driver-Briggs-Gesenius Hebrew and English Lexicon with an Appendix Containing the Biblical Aramaic (Peabody, MA: Hendrickson, 1979), 417.
54. James B. Jordan, Christianity and the Calendar: A Syllabus (Niceville, FL: Biblical Horizons, 1988), 81
55. E. A. Speiser, Genesis, AB 1 (Garden City, NY: Doubleday, 1969), 6
56. Eduard König, Historisch-Comparative Syntax der Hebräischen Sprache (Leipzig: J. C. Hinrichs, 1897), 287
57. Die Genesis: Eingeleitet, Übersetzt und Erklärt (Gütersloh: Bertelsmann, 1919), 130
58. Alexander Heidel, The Babylonian Genesis (Chicago: University of Chicago Press, 1951), 90–96, 128–29
59. Young, Studies in Genesis One (Phillipsburg, NJ: P & R, 1964), 87–89, 103–5
60. E.g. Gordon J. Wenham, Genesis 1–15 (WBC 1; Waco, TX: Word, 1987), 11
61. Claus Westermann, Genesis 1–11 (trans. John J. Scullion; Minneapolis: Fortress, 1994), 94
62. Cuthbert A. Simpson, “Genesis,” In George Arthur Buttrick (ed.), The Interpreter’s Bible 1 (New York: Abingdon Press, 1956), 466
63. Twumasi-Ankrah et al., “An Analytical Study of the Translations of Genesis 1: 26-27 in the Akuapem-Twi Bible,” 52-53. 44 Gordon J Wenham, “Genesis 1-15, Word Biblical Commentary,” Waco, TX: Word Books, 1987, 12

https://coptic-treasures.com/

64. Paul Copan and William Lane Craig, Creation out of Nothing: A Biblical, Philosophical, and Scientific Exploration (Baker Academic, 2004), 25 citing Gerhard von Rad
65. Cuthbert A. Simpson, "Genesis," In George Arthur Buttrick (ed.), The Interpreter's Bible 1 (New York: Abingdon Press, 1956), 466
66. Smith, Kevin Gary. "Bible Translation and Relevance Theory: The Translation of Titus," PhD diss., University of Stellenbosch, 2000
67. Smith, Mark S. The Priestly Vision of Genesis 1. Fortress Press, 2010
68. Wenham, Gordon J. "Genesis 1-15, Word Biblical Commentary." Waco, TX: Word Books, 1987
69. Hamilton, Victor P. The New International Commentary on the Old Testament: The Book of Genesis, Chapters 1–17. Grand Rapids, MI: Eerdmans, 1990.
70. Heller, R., Duda, JP., Winkler, M. et al. Habitability of the early Earth: liquid water under a faint young Sun facilitated by strong tidal heating due to a closer Moon. Paläontologische Zeitschrift PalZ 95, 563–575 (2021)
71. Miyazaki, Y., Korenaga, J. A wet heterogeneous mantle creates a habitable world in the Hadean. Nature 603, 86–90 (2022)
72. Rivera-Valentín EG, Filiberto J, Lynch KL, et al. Introduction-First Billion Years: Habitability. Astrobiology. 2021;21(8):893-905
73. Stüeken, E.E., Som, S.M., Claire, M. et al. Mission to Planet Earth: The First Two Billion Years. Space Science Reviews, Volume 216, article number 31 (2020)
74. Chatterjee, S. (2023). Cosmic Connections. In: From Stardust to First Cells. Springer, Cham pp 31-42
75. M.M. Hirschmann,E.A. Bergin,G.A. Blake,F.J. Ciesla, & J. Li, Early volatile depletion on planetesimals inferred from C–S systematics of iron meteorite parent bodies, Producing of National Academy of Sciences PNAS U.S.A. 118 (13) e2026779118
76. https://science.nasa.gov/astrobiology/learning-resources/alp/sun-when-it-formed/
77. https://eos.org/features/the-young-earth-under-the-cool-sun

https://coptic-treasures.com/

78. William F. McDonough, Earth's composition: origin, evolution and energy budget, arXiv:2505.02641v1 [physics.geo-ph] 05 May 2025
79. Borlina, C. S., Weiss, B. P., Bryson, J. F. J., & Armitage, P. J. (2022). Lifetime of the outer solar system nebula from carbonaceous chondrites. Journal of Geophysical Research: Planets, 127, e2021JE007139
80. https://svs.gsfc.nasa.gov/14906/
81. Förster, F., Moriya, T.J., Maureira, J.C. et al. The delay of shock breakout due to circumstellar material evident in most type II supernovae. Nature Astronomy 2, 808–818 (2018)
82. https://www.ebsco.com/research-starters/astronomy-and-astrophysics/solar-evolution
83. https://www.ebsco.com/research-starters/physics/stellar-evolution
84. J.A. Tarduno,R.D. Cottrell,R.K. Bono,H. Oda,W.J. Davis,M. Fayek,O.V.'. Erve,F. Nimmo,W. Huang,E.R. Thern,S. Fearn,G. Mitra,A.V. Smirnov, & E.G. Blackman, Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 117 (5) 2309-2318
85. O. R. Lehmer et al. ,Atmospheric CO2 levels from 2.7 billion years ago inferred from micrometeorite oxidation.Science Advances Sci. Adv.6,eaay4644(2020).
86. Erickson, T.M., Kirkland, C.L., Timms, N.E. et al. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognised meteorite impact structure. Nature Communications Nat Commun 11, 300 (2020)
87. van Dijk, J., Fernandez, A., Bernasconi, S.M. et al. Spatial pattern of super-greenhouse warmth controlled by elevated specific humidity. Nature Geoscience Nat. Geosci. 13, 739–744 (2020)
88. https://www.environment.harvard.edu/news/ancient-earth-it-never-rained-it-poured
89. Seeley, J.T., Wordsworth, R.D. Episodic deluges in simulated hothouse climates. Nature 599, 74–79 (2021)
90. Dong, J., Fischer, R. A., Stixrude, L. P., & Lithgow-Bertelloni, C. R. (2021). Constraining the volume of Earth's early oceans with a temperature-

https://coptic-treasures.com/

dependent mantle water storage capacity model. American Geophysical Union AGU Advances, 2, e2020AV000323

91. Johnson, B.W., Wing, B.A. Limited Archaean continental emergence reflected in an early Archaean 18O-enriched ocean. Nature Geoscience Nat. Geosci. 13, 243–248 (2020)
92. Lim, J., Kim, Y., Park, S. et al. Discovery of stromatolite formation in post-impact hydrothermal lacustrine environments and its implications for early Earth. Communications Earth & Environment 7, 334 (2026).
93. Paul Voosen ,Ancient Earth was a water world.Science371,1088-1089(2021)
94. Quentin Kral, Paul Huet, Camille Bergez-Casalou, Philippe Thébault, Sébastien Charnoz, Sonia Fornasier., An impact-free mechanism to deliver water to terrestrial planets and exoplanets., Astronomy & Astrophysics A&A Vol 692 A70 (2024)
95. Lin, J., & Qian, T. (2022). Earth's Climate History from 4.5 Billion Years to One Minute. Atmosphere-Ocean, 60(3–4), 188–232
96. https://news.arizona.edu/news/study-over-nearly-half-billion-years-earths-temperature-has-changed-drastically-driven-carbon
97. Emily J. Judd, Jessica E. Tierney, Daniel J. Lunt, Isabel P. Montañez, Brian T. Huber, Scott L. Wing, and Paul J. Valdes., A 485-million-year history of Earth's surface temperature., Science (2024) Vol 385, Issue 6715
98. D. Evans,N. Sagoo,W. Renema,L.J. Cotton,W. Müller,J.A. Todd,P.K. Saraswati,P. Stassen,M. Ziegler,P.N. Pearson,P.J. Valdes, & H.P. Affek, Eocene greenhouse climate revealed by coupled clumped isotope-Mg/Ca thermometry, The Proceedings of the National Academy of Sciences Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 115 (6) 1174-1179
99. Emily J. Judd, Jessica E. Tierney and Daniel J. Lunt et al. A 485-million-year history of Earth's surface temperature. Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS). 2024. Vol. 385(6715)
100. O. R. Lehmer et al. ,Atmospheric CO2 levels from 2.7 billion years ago inferred from micrometeorite oxidation. Science Advances Sci. Adv.6,eaay4644(2020)

https://coptic-treasures.com/

101. Ratnayake, D.M., Tanaka, R. & Nakamura, E. Biogeochemical impact of nickel and urea in the great oxidation event. Communications Earth & Environment volume 6, Article number: 654 (2025)
102. Tajika, E., Harada, M. (2019). Great Oxidation Event and Snowball Earth. In: Yamagishi, A., Kakegawa, T., Usui, T. (eds) Astrobiology. Springer, Singapore
103. Richard Blaustein, The Great Oxidation Event: Evolving understandings of how oxygenic life on Earth began, BioScience, Volume 66, Issue 3, 01 March 2016, Pages 189–195
104. Ostrander, C.M., Heard, A.W., Shu, Y. et al. Onset of coupled atmosphere–ocean oxygenation 2.3 billion years ago. Nature 631, 335–339 (2024)
105. West JB. The strange history of atmospheric oxygen. Physiological Reports Physiol Rep. 2022;10(6):e15214
106. Turbet, M., Bolmont, E., Chaverot, G. et al. Day–night cloud asymmetry prevents early oceans on Venus but not on Earth. Nature 598, 276–280 (2021)
107. D.E. Canfield,L. Ngombi-Pemba,E.U. Hammarlund,S. Bengtson,M. Chaussidon,F. Gauthier-Lafaye,A. Meunier,A. Riboulleau,C. Rollion-Bard,O. Rouxel,D. Asael,A. Pierson-Wickmann, & A. El Albani, Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 110 (42) 16736-16741
108. Crockford, P.W., Sugiyama, I., Kipp, M.A. et al. Revisiting the greatness of Earth's great oxidation. Communications Earth & Environment volume 7, Article number: 348 (2026)
109. Zheng, D., Lipp, A.G., Farnsworth, A. et al. Tight regulation of Earth's long-term temperature over Phanerozoic time. nature communications 17, 5995 (2026)
110. Paolo A. Sossi et al. ,Redox state of Earth's magma ocean and its Venus-like early atmosphere.Sci. Science Advances Nov 2020 Vol 6, Issue 48
111. Moldogazieva, N.T., Terentiev, A.A., Mokhosoev, I.M. et al. Redox chemistry of early Earth and the origin of life. Communications Chemistry volume 9, Article number: 143 (2026)

https://coptic-treasures.com/

112. James Green et al. ,When the Moon had a magnetosphere. Science Advances Oct 2020m Vol 6, Issue 42
113. https://www.nasa.gov/solar-system/earth-and-moon-once-shared-a-magnetic-shield-protecting-their-atmospheres/
114. James F. Kasting, Aoshuang Ji; Atmospheric oxygen and methane on the early Earth. Philosophical Transactions of the Royal Society B Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci August 2025; 380 (1931): 20240093.
115. Vulpius, S., Runge, E., Herwartz, D. et al. Formation and redox evolution of Earth's early atmosphere and hydrosphere. Nature Reviews Earth & Environment Nat Rev Earth Environ 7, 412–426 (2026)
116. Ohmoto, H., Ferry, J.G. The hydrogen, methane and ammonia biosphere on early Earth. Sci Rep 16, 14017 (2026)
117. Green, J., Draper, D., Boardsen, S., & Dong, C. (2020). When the Moon had a magnetosphere. Sci. Adv (Vol. 6, pp. 865–879)
118. Agyekum, Kofi. Linguistics: Ethnography of Speaking. University of Ghana, Accra: Institute of Continuing and Distance Education, 2010.
119. Bandstra, Barry. Genesis 1-11: Baylor Handbook on the Hebrew Bible edited by W. Dennis Tucker Jr. Texas: Baylor University Press, 2008.
120. Boaheng, Isaac. Basic Biblical Hebrew. Sunyani: Jonnette Secretarait, 2020.
121. Chryssides, George D. Christianity Today: An Introduction. London: A&C Black, 2010.
122. Copan, Paul and William Lane Craig, Creation Out of Nothing: A Biblical, Philosophical, and Scientific Exploration. Leicester: Inter-Varsity Press, 2004.
123. Custance, Arthur C. Without form and Void: A Study of the Meaning of Genesis 1:2. Brookville, Canada: Doorway Papers, 1970.
124. Dake, Finis Jennings. Dake's Annotated Reference Bible. Georgia: Dake's Publishing Inc., 2011.
125. Fields, W.W. Unformed and Unfilled. Collinsville, IL: Burgeners Enterprises, 1976.

https://coptic-treasures.com/

126. Hamilton, Victor P. Handbook on the Pentateuch: Genesis, Exodus, Leviticus, Numbers, Deuteronomy. Grand Rapids, MI: Baker Book House, 1982.
127. Keathley, Kenneth and Mark F. Rooker. 40 Questions About Creation and Evolution. Grand Rapids, MI: Kregel Academic, 2014.
128. Kretzschmar, William A. Jr. The Emergence and Development of English: An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
129. Leupold, H. C. Exposition on Genesis. Grand Rapids, MI: Baker Book House, 1942.
130. McIver, Tom. "Formless and Void: Gap Theory Creationism" in Creation/Evolution Journal Vol. 8. No. 3 (2008).
131. Miles Gentry, Spontaneous Combustion: Enlightenment and the Cosmic Crucible. np: Lulu.com, 2012.
132. Missler, Chuck. Supplemental Notes: The Book of Ezekiel. Coeur d'Alene: Koinonia House, 2008.
133. Morris, Henry M. Studies in the Bible and Science. Grand Rapids, MI: Baker Book Publishing, 1966.
134. The Genesis Record: A Scientific and Devotional Commentary on the book of Beginnings. Grand Rapids, MI: Baker Book House, 1998.
135. Nee, Watchman. The Mystery of Creation. New York: Christian Fellowship Publishers, Inc., 1981.
136. Ogilvie, Lloyd J. (ed), The Preacher's Commentary. Nashville, TN: Thomas Nelson, Inc., 1987.
137. Heller, R., Duda, JP., Winkler, M. et al. Habitability of the early Earth: liquid water under a faint young Sun facilitated by strong tidal heating due to a closer Moon. Paläontologische Zeitschrift PalZ 95, 563–575 (2021)
138. Pember, G. H. Earth's Earliest Ages and Their Connection with Modern Spiritualism and Theosophy. London and Glasgow: Pickering & Inglis, n.d.
139. Renn, Stephen D. (ed.). Expository Dictionary of Bible Words. Peabody, Massachusetts: Hendricks Publishers Marketing, Inc., 2005.
140. Reyburn, William D. and Euan McG Fry, A Handbook on Genesis. New York: United Bible Society, 1997.

https://coptic-treasures.com/

141. Rimmer, Harry. Modern Science and the Genesis Record. Grand Rapids: Eerdmans, 1941.
142. Ryrie, Charles C. Systematic Theology. Chicago, IL: Moody Publishers, 1999), 210.
143. Simpson, Cuthbert A. “Genesis” in George Arthur Buttrick (ed.), The Interpreter’s Bible Vol. 1. New York: Abingdon Press, 1956.
144. Swaggart, Jimmy. Expositor’s Study Bible. Baton Rouge: Jimmy Swaggart Ministries, 2013.
145. Tsumura, David T. “The Earth and the Waters in Genesis 1 and 2: A Linguistic Investigation,” JSOT Supplement Series 83. Sheffield: JSOT Press, 1989.
146. Unger, Merrill. “Rethinking the Genesis Account of Creation” Bibliotheca Sacra 115:457 (1958).
147. Westermann, Claus. Genesis translated by David E. Green. London: T8.T Clark International, 2004.
148. Paul Beauchamp, Création et séparation. Étude exégétique du chapitre premier de la Genèse, Cerf, Paris 2005, p. 235
149. Mark S. Smith, The Priestly Vision of Genesis 1, Fortress Press, Minneapolis (MN) 2010
150. https://www.eso.org/public/news/eso2111/ European Southern Observatory ESO
151. https://www.mpg.de/17248532/astronomers-make-first-clear-detection-of-a-moon-forming-disk-around-an-exoplanet
152. Gabriele Cugno and Sierra L. Grant, A Carbon-rich Disk Surrounding a Planetary-mass Companion, The Astrophysical Journal Letters, Volume 991, Number 2 (2025)
153. Myriam Benisty, Jaehan Bae, Stefano Facchini, Miriam Keppler, Richard Teague, Andrea Isella, Nicolas T. Kurtovic, Laura M. Pérez, Anibal Sierra, Sean M. Andrews, John Carpenter, Ian Czekala, Carsten Dominik, Thomas Henning, Francois Menard, Paola Pinilla, and Alice Zurlo, A Circumplanetary Disk around PDS70c, The Astrophysical Journal Letters, Volume 916, Number 1 (2021)

https://coptic-treasures.com/

154. https://www.planetary.org/articles/the-quasi-moons-of-earth
155. ulpius, S., Runge, E., Herwartz, D. et al. Formation and redox evolution of Earth's early atmosphere and hydrosphere. Nature Reviews Earth & Environment Nat Rev Earth Environ 7, 412–426 (2026)
156. Marty, B. (2023). Earth's Atmosphere, Origin and Evolution of. In: Gargaud, M., et al. Encyclopedia of Astrobiology. Springer, Berlin, Heidelberg. pp 859–863
157. James F. Kasting, Aoshuang Ji; Atmospheric oxygen and methane on the early Earth. Philosophical Transactions of the Royal Society B Phil. Trans. R. Soc. B 7 August 2025; 380 (1931)

https://coptic-treasures.com/


https://coptic-treasures.com/