

الحتمية والإرادة الحرة بين العلم والدين (5-1)

د. جواد بشارة

منذ فجر الإنسانية ونشأة الحضارات البشرية، هناك في كافة المجتمعات والأديان أموراً وأطروحات ورؤى وعقائد تتعلق بالكون والحياة والأصل والمصير. ففي العصور القديمة كانت المسائل الكونية تقع على عاتق الكهنوت الذي يدعون بأن لديهم اتصالات بالملأ الأعلى ويتلقون الوحي الذي تمليه الآلهة على البشر. فالسمااء يقطنها آلهة وأبطال خارقون أسطوريون وكائنات أخرى عديدة كالجن والعفاريت والوحوش الهائلة والأرض خصصت للبشر الذين كان هدف وجودهم هو خدمة الآلهة كعبيد وإن خلق الكون جاء نتيجة مباشرة لقوى خارقة للطبيعة لم تكن تحمل اسم الله الإله الواحد بعد.

ولد علم الكونيات الحديث في عشرينات القرن المنصرم القرن العشرين وقبله لم يكن البشر يعرفون الشئ الكثير عن الكون سوى ما تسطره لهم خرافات الكتب المقدسة، وكانت البداية العلمية الحقيقية مع الثورة الكوبرنيكية على يد كوبرنيكوس وأطروحات غاليلو غاليله ويوهان كبلر ثم جاء نيوتن بقانون الجاذبية الكونية حيث اعتبر نيوتن الكون مستقر ولانهائي لأنه لو لم يكن كذلك لانهار بفعل قوة الجاذبية المتبادلة بين النجوم والمجرات التي ستقود إلى تقلصه وانكماشه لذلك لا بد أن يكون لانهائي ومستقر وثابت وغير متغير. بيد أن أينشتاين نفس هذا التصور النيوتني بنظريته النسبية الخاصة والعامة بين 1905 و1915 التي تبحث في الجاذبية وتطورها وكيفية عملها وتأثيرها وقال إن هذه الأخيرة ماهي إلا انحناء في نسيج الزمكان بسبب كتلة الأجسام في الكون، لكن أينشتاين لم يكن يعلم في ذلك الوقت أن الكون يتمدد ويتوسع كما أثبت هابل ذلك مما اضطر أينشتاين إلى مراجعة معادلاته التي سبق أن اضاف لها معامل جديد أسماه الثابت الكوني لكي يبقى الكون ثابتاً ومستقراً وغير متحرك ولا متغير. وأعيد النظر في مفاهيم اللامتناهي في الصغر واللامتناهي في الكبر والفراغ الكوني وحدود وحافة الكون ومركزه. وبفضل نظرية أينشتاين ومن عمل عليها من العلماء من الجيل اللاحق أو المعاصر لأينشتاين صيغت نظرية الانفجار الكبير والنظرية المعيارية لفيزياء الجسيمات الأولية وتبلورت مبادئ وقوانين ومعادلات نظرية الكموم أو الكوانتوم الخ..

والآن لنلقي نظرة سريعة على ظروف النشأة الأولى للكون المرئي البعيدة عن الرؤية الميثولوجية الدينية عن الخلق الإلهي كما روته الكتب السماوية التوراة والإنجيل والقرآن وحكاية سفر التكوين وخلق الأرض والسماوات والإنسان آدم وأنتاه من ضلعه حواء وذريتهم وقصة إبليس والشجرة المحرمة والخطيئة الأولى والطرد من جنة عدن الخ..

من المحتمل أن يعود تاريخ ولادة الكون المرئي إلى 13.8 مليار سنة. بقدر ما يمكننا العودة إلى الوراء في حساباتنا، إلى الأجزاء الأولى من مليار المليار من الثانية الأولى، حيث كل شيء يعزى إلى التقلبات الكمومية أو الكوانتية fluctuations quantiques (وهو تغيير مؤقت يحدث في مستوى الطاقة في الفضاء ويخلق تلقائياً أزواج افتراضية من الجسيمات والجسيمات المضادة الأولية) والتي تخلق ما يسمى "الطاقة الفراغية". الصعود زمنياً أكثر من 10^{-43} بعد الانفجار العظيم «». يعتبر مستحيلًا وفق قوانين الفيزياء التي نعرفها وهي الفترة الزمنية القصوى التي يمكننا الوصول إليها. ما الذي لا يمكن تصويره في

الزمن الذي يسبق هذه 10^{-43s} من الثانية الأولى؟، وهي الفترة التي تعرف بـ "زمن بلانك de Planck Temps"، والتي لا يمكننا بلوغها، لأن النسبية العامة ليست قادرة عند هذا الحد الزمني أن تعمل، حيث تتوقف قوانينها وتتعطّل، الأمر الذي يستدعي اللجوء إلى نظرية أخرى في علم الكونيات في مجال الثقالة الكمومية أو الكوانتية gravitation quantique التي من المفترض أن تنجم عن توحيد النسبية الأينشتاينية مع نظرية الكموم أو الكوانتوم. ولاننسى حدوث التضخم الكوني المفاجيء والسريع الذي زاد حجم الكون بنسبة أو بعامل 10^{50} في جزء صغير من الثانية» كما يعتبر Q-43s1 "زمن بلانك"، هو أصغر مقياس زمني ملموس مادياً. في غياب نظرية الجاذبية أو الثقالة الكمومية، تبقى هذه المرحلة غامضة ومفاهيم الزمان والمكان تطرح إشكالية. يفترض أن التفاعلات الأساسية للقوى الكونية الجوهرية الأربعة كانت موحدة في تفاعل أساسي واحد. إن عصر التوحيد العظيم يكاد يصاحب عصر التضخم ويبلغ حوالي الربع الأول من العام 35 بعد الانفجار العظيم. القوى الأساسية كانت لا تزال موحدة أو على الأقل القوة النووية. عند الخروج من عصر التوحيد العظيم تنفصل قوة الجاذبية عن الطاقة النووية (القوة الكهرومغناطيسية وضعف التفاعل النووي الشديد أو التفاعل النووي القوي). يمثل الانتقال لهذه المرحلة نهاية التوحيد العظيم. كانت مرحلة التضخم الكوني ستحدث في 10^{-32s} من الثانية الأولى بعد الانفجار الكبير. أعتبرت هذه مرحلة توسع عنيفة للغاية كما نظر لها العالم الأمريكي آلان غوث واقترحها كحل في عام 1979 لشرح التجانس والتساوي والتشابه في الكون. إن نموذج التضخم الكوني يحل كلا من "مشكلة الأفق" و "مشكلة التسطيح" الكونيين. خلال هذا التضخم، الذي شهد حجم الكون يتزايد بمعامل 10^{50} في جزء صغير من الثانية، فإن الطاقة الكامنة في مجال التضخم المنطلق ملأت الكون ببلازما من الكواركات، ومضادات الكواركات والغلوونات (الفرميونات والبوزونات، أو الجسيمات الأولية). يظهر العصر الكهربائي الضعيف: والذي ينجم عن انفصال التفاعل النووي القوي عن القوة الكهربائية الضعيفة (الكهرومغناطيسية والتفاعل النووي الضعيف). تكون التفاعلات بين الجسيمات نشطة بما يكفي لإنشاء جسيمات غريبة بما في ذلك بوزونات W وبوزونات Z وبوزونات هيغز. وبعده يظهر العصر الهادروني hadronique: حيث انفصلت القوة الكهرومغناطيسية عن التفاعل النووي الضعيف. القوى الكونية الجوهرية الأساسية الأربع باتت مستقلة الآن. يمكن أن يكون سبب هذا التضخم الكوني كياناً متسارعاً من نوع الطاقة المظلمة، وهي المسؤولة عن توسع الكون.

هذا الكيان قد تفكك إلى الجسيمات، مؤشراً نهاية التضخم وولادة المادة. وحتى مرحلة نهاية التضخم، كان الفضاء فارغاً، بالمعنى الكمومي للمصطلح. ومع ذلك كان مغموراً بسلسلة كاملة من الجسيمات الافتراضية التي تنشأ من العدم وسرعان ما تعود للعدم على الفور.

BAROGENESIS التكوين الباريوني: ثم انبثقت المادة.

برد الكون حتى وصل على ما تحت العارضة 10^{13} درجة. ولم يعد لدى الكواركات ما يكفي من الطاقة لتبقى موجودة لوحدها ومن ثم تبدأ بالتجمع بفضل الغليونات gluons، والبوزونات وخاصة بوزونات القياس bosons de jauge للتفاعل النووي القوي لتشكيل أو تكوين الهادرونات، من بين تلك الهادرونات تنبثق جسيمات مجهرية دون ذرية جديدة مركبة أو مكونة من: البروتونات (الباريونات) والنيوترونات (الباريونات). إنها ولادة "المادة" من خلال تشكيل الباريونات عن طريق عملية "التكوين الباريوني baryogénèse". وعندما تلتقي المادة وتجتمع بالمادة المضادة يفنيان بعضهما البعض (مثل

-1 + 0 = 1) وتتحول إلى طاقة (عبر معادلة آينشتاين الطاقة تساوي الكتلة مضروبة بمربع سرعة الضوء $E = mc^2$).

هذا الصراع حتى الموت الذي يتم حصوله بين المكونات المتضاربة إلى أقرب وحدة ممكنة: بالنسبة لمليار من الكواركات المضادة التي تم إنشاؤها، هناك مليار كوارك وواحد كوارك إضافي مضاد مقابل كل مليار كوارك، لذلك يبيد الملياران نفسيهما يترك كوارك واحد فقط يكون فائض. وبالتالي تنتج عملية التكوين الباريوني Baryogenesis و"التناظر الباريوني" في التوزيع المكاني، مما يسمح بانتصار المادة (المسماة باريونية "Baryonic") على المادة المضادة.

كما درس العالم الفيزيائي الروسي أندريه ساخاروف في عام 1967 هذه الحقبة وقال: لم تتواجد المادة بعيداً عن عملية إبادة خاصة بها، وإلى هذا الانقسام في التماثل وكسر التناظر، تدين بوجودها في الكون المرئي. في نهاية العصر الهادروني، تم تشكيل أول نوى ذرية (عبر النيوكليونات، أي البروتونات والنيوترونات) تحت قوة التفاعل النووي القوي لكن الفوتونات، التي لا تزال نشطة للغاية، تفرقها على الفور. دائماً ما تكون درجة الحرارة مرتفعة جداً بحيث لا تتشكل الذرات. ثم يظهر العصر اللبثوني leptonique: أول حدث مهم في العصر اللبثوني هو فصل النيوتريونات (النيوترينوات المنفصلة عن المادة) والتي تحدث عندما تصل درجة الحرارة إلى 10 مليار درجة. الحدث الثاني المهم هو إبادة الإلكترونات ومضادات الإلكترونات التي تحدث عندما تصل درجة الحرارة إلى مليار درجة (لم يعد لدى الفوتونات ما يكفي من الطاقة لإنشاء البروتونات، ولكن بما أن للإلكترونات كتلة أضعف 2000 مرة من البروتون، لا يزال بإمكانها إنشاء إلكترونات). حساء الكواركات والكواركات المضادة سيكون غنياً بجسيمات خفيفة (اللبثونات): الإلكترونات، الميونات، تاونات، النيوترينات (وجسيماتها المضادة)، الجسيمات الأولية تشترك في أنها لا تتفاعل مع التفاعل النووي القوي. التباين الطفيف بين المادة والمادة المضادة الذي سمح للباريونات بالبقاء على قيد الحياة خلال العصر الهادروني، يعمل بطريقة مماثلة ويسبب الاختفاء التام لمضادات الإلكترونات (البوزيترونات) وبقاء جزء من الإلكترونات. وبالتالي فإن نهاية العصر اللبثوني تشهد المحو التام أو الاختفاء الكامل للمادة المضادة. فالكون، الذي يقترب من ثانيته الأولى من وجوده، لم يعد يحتوي سوى على المادة العادية التي نعرفها والمكونة من البروتونات والنيوترونات والإلكترونات.

ما بين ثانية وثلاث ثوانٍ بعد الانفجار الكبير، تظهر حقبة التركيب النووي البدائي التي ستستمر حوالي 3 دقائق. كان الفيزيائي الروسي جورج غاموف هو الذي تصور في سنوات الأربعينات

1940 ظاهرة التفاعلات النووية الأصلية. وحتى تلك اللحظة، كانت الفوتونات نشطة للغاية بحيث لا تديم تكوين النوى الذرية. ولكن عندما انخفضت درجة حرارة الكون إلى ما دون مليار درجة، أصبحت طاقة الفوتونات أقل من طاقة الربط الداخلية للنواة. بات بإمكان النيوكليونات (البروتونات والنيوترونات) أن تتصادم للإشارة إلى بدء الاندماج النووي. منذ هذه اللحظة، تلد عمليات الاندماج المتعاقبة النوى الخفيفة أكثر فأكثر تعقيداً من أي وقت مضى: الديوتريوم، الهليوم 3، الهليوم 4، الليثيوم 7 والبريليوم. بحيث لم يعد الكون أكثر من كونه مفاعل اندماج نووي ضخم، ومعظم النيوترونات الحرة عالقة في نوى الهيليوم. العنصران الرئيسيان في نهاية التركيب النووي البدائي هما الهيدروجين (البروتونات) والهيليوم-4. وبوفرة نسبية (9 إلى 1)

ترتبط بنسبة النيوترونات والبروتونات في العصر اللبثوني: عندما يبدأ التخليق والتركيب النووي، لا يوجد سوى نيوترون لحوالي 14 بروتون. لنواة الهيليوم (2 نيوترون، 2 بروتون)

، هناك 12 بروتون متبقياً، لذلك كان هناك الكثير من الهيدروجين (1 بروتون). تتكون مادة الكون من نويات الذرات التالية: 90٪ من الهيدروجين (H)، 10٪ من الهيليوم (He) ،

آثار من نظائرها مثل الديوتريوم (H-2) ، الهليوم 3- (He-3) ، الهليوم 4- (He-4).

التركيبات الكبرى اللاحقة:

بعد 380,000 سنة بدأت فترة التركيبات الكبرى اللاحقة التي شهدت تشكيل الذرات المحايدة بالترابط بين الإلكترونات الحرة والنوى الذرية المستقلة حتى الآن. قبل ذلك كانت كثافة المادة (الجسيمات) مرتفعة بـمكان بحيث لم يكن بوسع الفوتونات أن تنتشر. لذلك حُبس الضوء في المادة وكانت طاقة الفوتونات عالية جداً لدرجة أن الذرات انكسرت أو تحطمت حتى قبل أن تتشكل. لكن بعد 380.000 سنة، هبط درجة حرارة الكون إلى 3000 درجة كلفن، سمح انخفاض درجة الحرارة بإعادة التركيب: من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي، حيث ترتبط الإلكترونات الحرة بالنوى الذرية (النيوكليونات) لتشكيل الذرات الأولى (لم يعد للفوتونات طاقة كافية لتحطيمها). ذرات الليثيوم والهيليوم هي الذرات الأولى التي تم إنشاؤها، قبل ذرات الهيدروجين مباشرة. كانت الإلكترونات، التي كانت حرة في السابق، مرتبطة بالذرات، والفوتونات - التي لم تعد لديها طاقة كافية لامتصاصها من قبل الذرات - وصار بوسعها الدوران بحرية في الكون المرئي الذي أصبح شفافاً. في الواقع، إن الضوء تحرر من المادة وبات بوسع الانتشار بحرية بدون أن يتفاعل مع الذرات. إن فك الارتباط بين الإشعاعات الضوئية والمادة كان هو الأصل وراء إعادة التركيب والتنظيم الهرمي للمادة. وترك أثراً ما يزال ملحوظاً إلى يومنا هذا وهو المعروف بإشعاع الخلفية الكونية الميكروية الأحفورية المنتشرة الذي تنبأ به جورج غاموف سنة 1948 واكتشفه بالصدفة سنة 1964 أرنو بينزاس وروبير ويلسون، بواسطة مرسل الإشعاع الكهرومغناطيسي. لم يكن ممكناً قبل هذه الفترة إجراء أية مشاهدة أو رصد لأية أشعة لأن الضوء كان محتجزاً أو سجيناً لمدة 380,000 عام (وهذا هو السبب في أن الفيزيائيين يعيدون إنشاء الظروف تجريبياً عن طريق مصادم الجسيمات).

العصور المظلمة للكون المرئي تتوافق مع الحقبة الكونية الواقعة بين انبعاث "الخلفية الكونية الميكروية" واشتعال الجيل الأول من النجوم. خلال هذه الفترة، لا يمكن لأي عملية فيزيائية فلكية أن تنتج إشعاعاً من نوع الأشعة الكهرومغناطيسية، مما يجعل هذه الحالة من الكون غامضاً لا يسبر غوره. فقط الضوء الوحيد الموجود هو الإشعاع الأحفوري الميكروي. بردت الذرات تدريجياً لتكتف المادة وتشكل غازاً بارداً مظلماً. وهي ظلمة استمرت 200 مليون سنة. في ذلك الوقت، تشكلت 99 ٪ من المادة الحالية المكونة للكون، ولكن 1 ٪ المتبقية (جميع الذرات التي تحتوي على أكثر من بروتونين في النواة) كانت أساسية. تؤدي تلك الليلة الطويلة إلى فجر كوني: يزيد تفاعل الجاذبية من التقلبات داخل غيوم غاز الهيدروجين وتجذب ذرات الهيدروجين تجاه بعضها البعض. ولد أكبر نجم معروف بعد 200 مليون سنة بعد الانفجار الكبير، لذلك يقدر عمره بـ 13.6 مليار سنة. يتم التعرف على نجوم الجيل الأول من خلال نقائنها الكيميائي المكون فقط من الهيدروجين والهيليوم. إن إضاءة النجوم الأولى تشير إلى إعادة

تأين الغاز ونهاية "العصور المظلمة". وتشير ملاحظات القمر الصناعي بلانك إلى أن إعادة تأين الكون تصبح مهمة بعد 550 مليون سنة من الانفجار العظيم. تتكثف المادة الباريونية بكثافة لتكوين النجوم والمجرات الأولى. بالنسبة للغالبية العظمى من علماء الكون، فإن الطريقة التي تطور فيها الكون المرئي، منذ حقبة إعادة التركيب إلى مرحلة الهياكل والبنىات الكبرى وما يتعداها، إلى يومنا هذا، يمكن تفسيرها في إطار سيناريو حيث تشكلت المادة السوداء أو المظلمة بكميات تزيد بكثير عن المادة الباريونية، مكونة من جسيمات ذات كتل لكن سرعتها ضعيفة بالمقارنة مع سرعة الضوء. ولقد وفرت عمليات محاكاة متطورة ومتقدمة جداً من الناحية التكنولوجية مبررات وحججاً داعمة لهذا النموذج المعروف باسم (نموذج المادة السوداء أو المظلمة الباردة) وسمي هكذا بسبب ضعف سرعة جسيمات المادة السوداء التي افترضوا وجودها وانتجتها عملية المحاكاة الرقمية.

لا بد أن نتذكر أن هناك نوعان من الجسيمات، الجسيمات الذرية والجسيمات دون الذرية. من بين الجسيمات دون الذرية، هناك نوعان من الجسيمات: الجسيمات الأولية والجسيمات المركبة (مجموعات الجسيمات الأولية). من بين الجسيمات الأولية، هناك عائلتان كبيرتان: الفرميونات (الكواركات) [أعلى، أسفل، أسفل، ساحرة، قمة، غريبة. $up, down, bottom, charm, top, strange$]. الليبتونات كالإلكترونات والميونات والتاوات ونيوترينواتها والبوزونات: البوزون Z ، والبوزون W الفوتون، الغلوون، وبوزون هيغز). من بين الجسيمات المركبة، لدينا هادرونات، مقسمة إلى عائلتين: الباريونات (مجموعة الفرميونات، بما في ذلك البروتونات والنيوترونات) والميزونات (تجمع البوزونات). من بين الجسيمات الذرية هناك ذرات 94 من عناصر الجدول الدوري الموجودة في البيئة. تتكون الذرة من نواة ذرية تتكون من نوعين من النيوكليونات (البروتونات + النيوترونات) التي تجذب الإلكترونات حولها. ذرة الهيدروجين، العنصر الأول في الجدول الدوري، هي أبسط ذرة، تتكون من بروتون وإلكترون. على مستوى أعلى، تتجمع الذرات كيميائياً لتكوين جزيئات.

يعتقد الباحثون أن أيون هيدريد الهيليوم، HeH^+ ، كان أول جزيء يتشكل في الكون. لكنها نجت من الكشف في الفضاء. لقد أكدنا للتو اكتشافه في الوسط النجمي، في حطام نجم نهاية الحياة. أثناء ولادة الكون، أطلق الانفجار الكبير كمية كبيرة من الطاقة التي تحولت إلى حساء ساخن للغاية من الجسيمات الأساسية، وخاصة الإلكترونات والفوتونات والمكونات الأولية للنوى الذرية، الكواركات. تطورت هذه الوسيلة بسرعة ولكن ظهور الذرات والجزيئات جاء لاحقاً. إذا كان تاريخ تكوين الذرات مفهوماً جيداً وتأكد اليوم من خلال ملاحظات مختلفة، فإن تاريخ الجزيئات الأولى أكثر غموضاً. أي جزيء تم تكوينه أولاً؟ بالنسبة لعلماء الفلك، من المحتمل جداً أن يكون هيدريد الهيليوم، يتألف من ذرة هيدروجين وأخرى من الهيليوم. ولكن لتأكيد هذه الفرضية، كان من الضروري العثور على هذا الجزيء في الوسط النجمي. تم الانتهاء من هذا المسعى فقط في الآونة الأخيرة.

لفهم سبب تشكل هيدريد الهيليوم أولاً، عليك العودة إلى الحساء البدائي للكون. منذ ولادته، تم تحريك الكون بديناميكية التوسع المكاني مما أدى إلى انخفاض سريع في درجة حرارته. هذا التبريد سمح بتشكيل عناصر جديدة. في أقل من ميكروثانية بعد الانفجار العظيم، اجتمعت الكواركات معاً من خلال تفاعل قوي لإحداث البروتونات والنيوترونات. وفي الدقائق التي تلت ذلك، بدأت هذه البروتونات والنيوترونات تتحد وتشكل أبسط النوى الذرية: نوى الهيدروجين (بروتون بسيط)، الديوتريوم (بروتون ونيوترون)، الهيليوم (بروتونان ونيوترونان) ونادراً ما يكون الليثيوم (ثلاث بروتونات وثلاثة أو أربع نيوترونات). يتم تمثيل ذرات الكون الأولى هنا من خلال نماذجها المدارية، والتي تظهر مكوناتها دون

الذرية. في الصفحات التالية، سيتم تمثيل الجزيئات والأيونات، المكونة من ذرتين على الأقل، بطريقة أكثر كلاسيكية، بواسطة كرات - تمثل الذرات - متصلة بقضبان، والتي تمثل الإلكترونات المشاركة في الرابطة الكيميائية.

من خلال الاقتران مع العديد من الإلكترونات التي تحتوي على البروتونات، تشكل النوى ذرات محايدة كهربائياً. ولكن نظراً لأن درجة حرارة الحساء لا تزال مرتفعة للغاية، فقد انتزعت الفوتونات النشطة للغاية الإلكترونات من هذه الارتباطات على الفور. ظل الحساء البلازمي من المكونات المشحونة كهربائياً، والأنوية والإلكترونات، لمئات الآلاف من السنين. الفوتونات، في تفاعل دائم مع هذه الجسيمات المشحونة، التي لا يمكن أن تنتشر بحرية عبر مسافات طويلة. نتيجة لذلك، ظل الكون معتماً لما يقرب من 380.000 سنة. ثم، في ذلك الوقت، انخفضت درجة الحرارة بما يكفي لتشكيل الذرات المحايدة الأولى بشكل دائم، مما سمح للفوتونات بالانتشار والهروب، مما يشكل إشعاعاً بقياه، "الخلفية الكونية الميكروية".

من بين جميع النوى الذرية المتنافسة على الإلكترونات، كان الهيليوم أول من شكل ذرات محايدة. ماذا عن الهيدروجين أو الليثيوم؟ الهيليوم، العنصر الأول الخامل، أو "الغاز النبيل" (أو "الغاز النادر") في الجدول الدوري للعناصر، يكون مستقرًا بشكل خاص عندما يحتوي على إلكترونين. وبعبارة أخرى، يستغرق سحب الإلكترون طاقة أكثر بكثير مما يتطلبه، على سبيل المثال، للهيدروجين. يتم تفسير هذا الاستقرار من خلال البنية الطباقية للإلكترونات في الذرات. عندما تمتلئ الطبقة، يكون التجميع أكثر استقراراً؛ لكن الطبقة الإلكترونية الأولى تحتوي على مكانين. في ذرة الهيدروجين، التي تحتوي على إلكترون واحد فقط، لا يتم ملء هذه الطبقة الأولى، على عكس الهيليوم.

في بداية الكون، عندما بدأت نوى الهيليوم تلتقي بالإلكترونات، كانت تملأ الطبقة الأولى من السحابة الإلكترونية دون أن تتمكن نوى الهيدروجين من اللحاق بهذه العملية من الالتقاط الإلكترونات، وقبل فترة طويلة من وجود نوى الليثيوم لجمع كل الإلكترونات الثلاثة اللازمة لتصبح ذرات محايدة. مطاردة الإلكترون لفترة وجيزة، احتوى الكون على ذرات الهيليوم المحايدة والأغلبية العظمى من نوى الهيدروجين (البروتونات وحدها)، التي بدأت شحنتها الكهربائية تلعب دوراً مهماً في التطور الكوني. مع تبريد الوسيط، تباطأت البروتونات تدريجياً وانجذبت أكثر إلى الكيانات المشحونة سلباً. ولكن بما أن الهيليوم كان قد استولى بالفعل على جزء كبير من الإلكترونات، فإن الإلكترونات الحرة كانت نادرة، وكانت التقريبات المباشرة بين البروتون والإلكترون أكثر استثنائية. في المقابل، انجذبت البروتونات إلى الإلكترونات الموجودة في ذرات الهيليوم المشكلة حديثاً. على الرغم من أن الهيليوم بالكاد يفقد إلكتروناته، إلا أن بعض ذرات الهيليوم انتهى بها التصادم المتكرر لتجميع إلكترونهما مع نوى الهيدروجين. هذه هي الطريقة التي تشكلت فيها الروابط الكيميائية الأولى، مما أدى إلى ظهور أنواع كيميائية تتكون من الهيليوم والهيدروجين، تسمى "هيدريد الهيليوم" أو حتى "الهيليوم". مع الصيغة الكيميائية HeH^+ ، فإن هذا الأيون الجزيئي - سوف نسمح لأنفسنا بمصطلح "الجزيء" الذي، بعبارة أدق، يعين بنية محايدة كهربائياً - وبالتالي سيكون أول مركب معقد موجود بكميات كبيرة في الكون.

حقيقة أن الهيليوم كان العنصر الأول في تكوين روابط كيميائية يبدو مفاجئاً لنا، لأننا نعتبر عادةً الهيليوم كعنصر أقل احتمالاً للارتباط مع الآخرين، ذرات هذا الغاز النبيل. وجود عدد من الإلكترونات التي

تضمن ثباتًا عاليًا. ولكن في بدايات الكون، كان الوضع في الواقع خاصًا جدًا: كان الهيليوم "البنيك" الإلكتروني "الوحيد الراغب في" إفراض" الشحنات الإيجابية، البروتونات.

تم دعم هذا السيناريو بقوة من خلال الحجج النظرية لعدة عقود، لكن الملاحظات الملموسة كانت لا تزال تفتقر إلى تأكيده. الجزيء HeH^+ بعيد المنال بشكل خاص. لا يمكن أن تتكون بشكل طبيعي على الأرض، إلا في ظل ظروف مختبرية خاصة. كما أنه لم يلاحظه أحد في الفضاء لفترة طويلة جدًا؛ ولكن في عام 2019، أعلن رولف جوستن، من معهد ماكس بلانك لعلم الفلك الراديوي، في بون، ألمانيا، وفريقه أنهم لاحظوه لأول مرة، متربصين في السديم الكوكبي الناتج عن وفاة نجم. بدأ البحث قبل أربعين عامًا، وقد أثمر أخيرًا وملاً فراغًا في معرفتنا باللحظات الأولى للكون. لذلك تمت إضافة جزيء HH^+ إلى قائمة الجزيئات خارج كوكب الأرض المعروفة. حتى الآن، اكتشف العلماء أكثر من 200 نوع كيميائي في الفضاء. الكيمياء الفلكية، مجال الدراسة الذي يركز على الهياكل والظواهر الكيميائية خارج الأرض، يهدف إلى تحديد الجزيئات والأيونات الجزيئية الموجودة في الفضاء، وكيف تتشكل هذه المركبات، وما يجلب تطورها إلى الفيزياء الفلكية، من وجهة نظر نظرية وكذلك الملاحظة. من بين "الجزيئات الفلكية" المعروفة، تنتشر على نطاق واسع مثل الماء (H_2O) والأمونيا (NH_3) أو الفورمالديهايد (CH_2O). البعض الآخر غير عادي للغاية، مثل H_2Cl^+ ، تم الحصول عليه عن طريق إضافة بروتون إلى حمض الهيدروكلوريك (HCl) و HO_2 ، مقارنة مع بيروكسيد الهيدروجين أو "بيروكسيد الهيدروجين" (H_2O_2) المحروم من ذرة الهيدروجين. من بين المراوغات التي تمت ملاحظتها جزيئات مشحونة، وتجميعات مع إلكترونات غير متزاوجة، وأنماط غريبة من الجزيئات الأكثر شيوعًا. حتى أن العلماء رصدوا جزيئات متكونة من عناصر خاملة، مثل ArH^+ ، الذي يحتوي على الأرجون، و HeH^+ الوافد الجديد. تهدف معظم مجالات الكيمياء إلى التطبيقات المصممة لجعل العالم أكثر كفاءة أو أكثر متعة أو أكثر أمانًا. تهتم الكيمياء الفلكية بالخصائص الأساسية للجزيئات: أي فهم الروابط الكيميائية أو استقرار الجزيئات وتحديد سبب انتشار أنواع كيميائية معينة أكثر من غيرها. من خلال دراسة الكيمياء في العمل في بيئات مختلفة جدًا عن الأرض - بما في ذلك درجات الحرارة والضغط والمكونات غير العادية المتاحة - يكتشف العلماء الجزيئات التي تزج تمثيلاتهم المألوفة للفاعلات الذرية وبالتالي تعمق فهمهم الكيمياء. في نهاية المطاف، يأمل علماء الفلك في فهم كيف أدت الظواهر الكيميائية في الفضاء إلى المكونات التي انتهت بها الأمر على كواكب النظام الشمسي والتي أدت في النهاية إلى ظهور الحياة على الأرض.

أين يختبئ HeH^+ ؟

في عام 1925، اكتشف المختبر والعالم الكيميائي ثورفن هوغنس Thorfin Hogness ومساعدته إدوارد لون في مختبره بجامعة كاليفورنيا في بيركلي في الولايات المتحدة، أن خليطًا غازيًا من الهيليوم والهيدروجين داخل غرفة تفريغ أدى وجود قوس كهربائي إلى توليد أيونات مختلفة من كتل مختلفة. من أجل التعرف عليها، استخدموا التحليل الطيفي الكتلي الذي يقيس نسبة الكتلة / الشحنة للأيونات المنتجة؛ وقد أظهر تنفيذ هذه التقنية، التي كانت جديدة آنذاك وباتت شائعة جدًا اليوم، أن هذه النسبة كانت تساوي 5 لأيونات معينة. خلص هوغنس Hogness ولون Lunn، من البيانات المتاحة لهم، إلى أنهما قاما بتكوين الأيونات الجزيئية HeH^+ . في الواقع، كانت تحتوي على خمسة بروتونات أو نيوترونات، وبالتالي فإن كتلتها هي خمسة أضعاف الكتلة الأولية للبروتون (كتل البروتون والنيوترون قريبة جدًا، في

حين أن كتلة الإلكترونات لا تذكر بالمقارنة). من ناحية أخرى، تستحق شحنتها مرة واحدة الشحنة الأولية للبروتون. وبالتالي، فإن نسبة الكتلة / الحمل هي في الواقع 5 في هذه الوحدات.

ومع ذلك، فقد أثبت HeH^+ ، وهو "جزيء" غير مستقر للغاية بما في ذلك عنصر خامل، صعوبة بالغة في الدراسة، حتى في ظل ظروف مخبرية خاضعة للرقابة الدقيقة. في الكون الصغير، ربما كان HeH^+ أكثر استقرارًا، لأن هذا الأيون الجزيئي يميل إلى فقدان بروتون H^+ عند أدنى تأثير أو تفاعل مع ذرة أخرى. في هذا التجميع، يجمع الهيليوم إلكترونين، بينما لا يجلب الهيدروجين أيًا من هذا النوع من الروابط الكيميائية غير المستوية، يسمى "رابطة التنسيق التساهمي"، أضعف وبالتالي أكثر هشاشة من الرابطة التساهمية التقليدية، حيث تساهم الذرتان في تجميع الإلكترونات بطريقة أكثر تناسقًا.

في عام 1978، كان جون بلاك، الذي كان آنذاك في جامعة مينيسوتا، أول من دافع عن فكرة أن HeH^+ يمكن أن يظل في الفضاء على الرغم من عدم استقراره الكبير. واقترح أيضًا أن السدم الكوكبية، هذه السحب الساخنة جدًا للغاز والغبار التي طردتها النجوم الضخمة في نهاية حياتها، كانت أماكن جيدة للبحث عن هذا الجزيء. في هذه السحب الكروية التي يشغل نجمها مركزها، توجد بالفعل طبقة رقيقة من الهيليوم المتأين (وبالتالي مشحونة)، في وجود ذرات هيدروجين محايدة؛ إن الجاذبية القوية التي يمارسها الهيليوم المتأين على الإلكترونات تجعل الأيون عرضة لـ "استعارة" إلكترون من الهيدروجين (وهو الوضع المعاكس تقريبًا لحالة الكون البدائي). وهكذا فإن هذا الإلكترون المشترك سيخلق رابطة.

لهذا السبب، منذ أواخر السبعينيات، بحث الفلكيون، بالتعاون مع الكيميائيين، عن أيون الجزيء HeH^+ في العديد من الأماكن، من حدود الكون إلى محيط النجوم فائقة الكتلة. ولكن لعدة عقود، لم يسفر هذا البحث عن أي شيء، مما دفع البعض إلى الشك في الدور الحقيقي الذي يلعبه HeH^+ في الكيمياء البدائية للكون. هل شكل الهيليوم بالفعل روابط مع H^+ ؟ يبدو أنه يجب أن يكون، لأنه لم يكن هناك شيء آخر لتشكيل روابط كيميائية في تلك العصور القديمة. ولكن إذا كان HeH^+ قد تدرب جيدًا، فأين هو؟ التوقعات الجزيئية

في حين سعى البعض لاكتشاف HeH^+ دون جدوى، اكتشف علماء الفلك في الفضاء العديد من الجزيئات الأخرى التي لم يتوقعوها. بالنسبة للبعض، لم يتمكنوا حتى من التعرف عليهم. بدأت هذه القصة في عام 1919 عندما شاهدت ماري ليا هيجر، في مرصد ليك بجامعة كاليفورنيا، سلوك النظام الثنائي للنجوم (على غرار شمس تاتوين في ملحمة حرب النجوم). أسفرت ملاحظاتها عن نتائج مذهلة.

نظرًا لأن جزيء نوع كيميائي معين له ترتيب محدد جدًا للذرات والإلكترونات، فإنه يمتص الضوء بطريقة خاصة. هذا يعطيها توقيع فريد. بفضل التحليل الطيفي، وهي تقنية تتكون من تحطيم الضوء إلى مكوناته المختلفة التي تختلف في أطوالها الموجية، يكشف الفلكيون عن خطوط أو نطاقات أغمق. تتوافق "نطاقات الامتصاص" هذه مع الأطوال الموجية الممتصة بواسطة الجزيئات التي تشكل الوسط الذي يجتازه الضوء ال. وبالتالي، يساعد تحليل الطيف على تحديد الجزيئات.

في حالة النجوم التي درستها ماري ليا هيجر، حيث تدور النجمتان حول مركز الجاذبية المشترك، خضعت الخصائص الطيفية للضوء القادم من الغلاف الجوي لكل نجم من النجوم إلى اختلافات في أطوال موجاتها بواسطة | تأثير دوبلر: لكل نجم، تحولت الخطوط الطيفية نحو اللون الأزرق عندما

اقتربنا من النجم ونحو الأحمر عندما ابتعدنا. لكن عالم الفلك الأمريكي لاحظ أيضًا توقعات جزيئية غريبة: نطاقات بقيت ثابتة على الرغم من حركة النجوم. بملاحظة نظام ثنائي آخر، كرر نفس النمط نفسه. ثم أظهر علماء فلك آخرون أن هذه العصابات غير المتحركة كانت موجودة أيضًا عندما وجهوا تلسكوباتهم إلى نجوم مفردة. استنتجوا أن هذه العلامات يجب أن تكون تلك الجزيئات الموجودة ليس في الغلاف الجوي للنجوم نفسها، ولكن في المناطق الباردة الشاسعة التي تفصل بينها. كانت الحقيقة الأكثر إثارة للدهشة هي أن هذه التوقعات كانت متطابقة تقريبًا لجميع النجوم التي تمت ملاحظتها، وحتى للملاحظات خارج المجرة.

هذه العلامات، تسمى "العصابات بين النجوم المنتشرة" (BID)، كانت في كل مكان. ثم قام العلماء بفحص توقعات الجزيئات المعروفة للكيميائيين، سواء كانت موجودة في حالتها الطبيعية على الأرض، أو تم توليفها في المختبر أو ملاحظتها في الفضاء باستخدام التلسكوبات الراديوية. لا شيء يقابل BIDs: لذلك جاء الأخير من جزيئات غير معروفة.

اقترح ويليام كليمبر من جامعة هارفارد وأحد رواد الكيمياء الفلكية أن BIDs هي السمة المميزة لأيون S_3^- ، المكون من الجزيء S_3 trisulfur. عندما رفض الباحثون هذا الرصاص، كان ويليام كليمبر مغامرًا لدرجة أنه كتب: "لا توجد طريقة أفضل لفقد سمعتك العلمية من التكهّن بشأن أصل الفرق المنتشرة بين النجوم. تم تداول العديد من الفرضيات حول أصل BIDs لعقود، ولكن لم يثبت أي منها: تم اعتبار هذا اللغز الأكثر صعوبة في التحليل الطيفي. جزيء مدهش وغير متوقع

كانت واحدة من أكثر الفرضيات إثارة للفضول أن العصابات بين النجوم المنتشرة تنشأ من الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات أو PAHs. هذه الجزيئات، المكونة من صفائح ذرات الكربون التي تشكل سداسيات، هي المكونات الرئيسية للسخام والإسفلت والجرافيت. من غير المحتمل أن تتفاعل مع الجزيئات الأخرى، لكنها تميل إلى التمسك بها. بالنسبة للعلماء الفلكيين، فإن المشكلة مع PAHs هي أن لديهم العديد من الأصناف المتشابهة إلى حد ما التي لا يمكن تمييز علامات الطيفية تقريبًا عن بعضها البعض. لذلك من الصعب استخلاص تفاصيل توقعات PAH من مقياس شامل. يبدو أن الشيء نفسه ينطبق على BIDs: كان من الصعب استخراج خطوط امتصاص دقيقة من هذه النطاقات المنتشرة والمعقدة. هل يمكن أن تفسر الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات المنتشرة بين النجوم؟ مثال على هيدروكربون عطري متعدد الحلقات (PAH، علوي) وجزيء بنزونيتريل (أسفل)، هيدروكربون عطري نادر قريب من PAH، تم اكتشافه في الفضاء في عام 2018.

اكتسبت هذه الأنواع من الأفكار أرضية بين علماء الفلك بدءًا من السبعينيات، ولكن كانت تجربة واحدة مفيدة. في الثمانينيات، عمل الكيميائي هارولد كروتو في جامعة ساسكس في إنجلترا مع فريقه للكشف عن جزيئات جديدة في الفضاء. لقد سمع عن تجربة قام بها الكيميائيان روبرت كيرل وريتشارد سمالي، في جامعة رايس، في الولايات المتحدة، حيث قاما بتوجيه شعاع ليزر قوي جدًا على سطح من الألومنيوم لجعله يتبخّر جزء من المعدن. من خلال التصلب مرة أخرى، أدت هذه المادة إلى ظهور جزيئات ألومنيوم كبيرة جديدة. اقترح هارولد كروتو أن الأمريكيين يستبدلون الألومنيوم بالكربون لمعرفة ما إذا كان من الممكن تكوين جزيئات الكربون المرصودة في النجوم الحمراء العملاقة. ظهر جزيء غير عادي: C_{60} ، يتكون من ستين ذرة كربون مرتبة مثل كرة القدم. في عام 1996، حصل هارولد كروتو وروبرت كيرل وريتشارد سمالي على جائزة نوبل في الكيمياء لاكتشافهم عائلة الفوليرين التي تحتوي،

من بين أمور أخرى، على هذا الجزيء المسمى "footballene" أو "buckminsterfullerene" (على شرف المهندس المعماري Buckminster Fuller، معروفة بقبابها الجيوديسية).

كان هارولد كروتو مقتنعًا بأن الفوليرينات كانت موجودة في الفضاء وكانت مصدرًا لبعض المكونات بين النجوم المنتشرة. إلا أن القليل من العلماء تبعوه، ولم يصر على ذلك الاتجاه. ولكن في عام 2010، بعد ما يقرب من خمسة وعشرين عامًا من اكتشافها في المختبر، لوحظ الـ C60 وابن عمه C70 في مجال الأشعة تحت الحمراء، في السديم الكوكبي Tc1 لكوكبة Cygnus. لا يزال من غير المعروف ما إذا كانت هذه الجزيئات مرتبطة بـ BIDS في الضوء المرئي. وقد اقترح هذا العمل النظري، ولكن لم يكن لدى العلماء تأكيد تجريبي. في عام 2015، تم تصنيع كاتيون (أيون موجب الشحنة) من الفوليرين، C60⁺، في المختبر وتم تسجيل توقيعه الطيفي في الأشعة تحت الحمراء القريبة. واحد، ثم ارتبط اثنان من نطاقات الامتصاص لهذا الأيون بالأطوال الموجية للنطاقات بين النجوم المنتشرة المعروفة. بعد ذلك، أظهر الباحثون أن هذه التوقعات تتوافق مع أربعة أو خمس معرفات. ثم، في عام 2019، بفضل تلسكوب هابل الفضائي، مارتن كوردنر، من مركز غودارد لرحلات الفضاء التابع لناسا في الولايات المتحدة، وفريقه قاموا بدقة بقياس أطوال موجات BID المرئية في اتجاه أحد عشر النجوم، معظمهم نجوم عملاقة حمراء قديمة. وخلصوا إلى أن BIDS هذه تتوافق بالفعل مع البيانات التجريبية المتعلقة بـ C60⁺، مما يؤكد مساهمة هذا الأيون في BIDS معينة.

يكشف هذا الاكتشاف بشكل أعم أن نوعًا واحدًا على الأقل من الجزيئات يترك بصماته بالتأكيد على الفضاء بين النجوم. يعتقد أن الفوليرين يتشكل هناك من الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات، والتي يجب أن تكون موجودة أيضًا في الفضاء. بدأت القرائن الأولى في التراكم من عام 2018، عندما لاحظ الباحثون لأول مرة التوقيع الطيفي للجزيئات القريبة من عائلة PAH. الجزيء الذي اكتشفوه، البنزونيتريل (C6H5-CN)، هو هيدروكربون عطري نادر مع حلقة واحدة من ذرات الكربون، مما يجعل اكتشافه أسهل من PAHs. حتى وقت قريب، اكتشف العلماء سيانوفتالين من دورتين، مما يدل على أن الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات موجودة أيضًا في الفضاء بين النجوم. تم اكتشاف HeH⁺ على الرغم من كل هذه التطورات في الكيمياء الفلكية، ظل HeH⁺ غير مرئي في الكون. يعتقد أن الجزيئات الأولى اختفت بسرعة كبيرة في شباب الكون. مع توسعه وتبريده، بدأت نوى الهيدروجين المعزولة المتبقية في التقاط الإلكترونات نفسها. اصطدمت هذه الذرات أحيانًا بأيونات HeH⁺. عندما حدث ذلك، تم كسر رابطة He-H الضعيفة نسبيًا في الأيون وتم إنشاء رابطة أقوى بكثير بين ذرتي الهيدروجين لتكوين أيون H2⁺. من جانبها، وجدت ذرة الهيليوم نفسها معزولة. بعد تكوين HeH⁺، تقوم ذرات الهيدروجين في الوسط بتفكيك هذه الجزيئات ضعيفة الارتباط وترتبط بالبروتون وبالتالي يتم إطلاقها لتشكيل الجزيء H2⁺ الأكثر ارتباطًا بقوة.

إذا التزمنا بهذا السيناريو، فإن الوجود القصير لـ HeH⁺ لن يكون له أهمية تذكر في مجرى تاريخ الكون. لكنه أبعد ما تكون عن الحالة. استنادًا إلى نماذج التفاعلات الكيميائية المحتملة في ذلك الوقت، يعتقد علماء الفلك أنه بدون وجود HeH⁺، فإن أيون H2⁺، بالإضافة إلى جزيء الهيدروجين، H2، قد يكونان قد شكلوا ببطء أكبر: المسارات الأخرى مما يؤدي إلى هذه المركبات تتطلب المزيد من الطاقة. ثم ولد تكوين H2 للعديد من الأنواع الكيميائية الأخرى: H3⁺ أيون، الذي أنتج CH⁺، والذي أنتج نفسه CH2⁺ وسلسلة من الجزيئات الأخرى. في نهاية المطاف، أدى هذا التتالي إلى ظهور الماء (H2O) والإيثانول (C2H5OH) وجزيئات أكبر. كل هذه التحولات لها أصل الروابط الضعيفة وغير

المتكافئة في HeH^+ ؛ بدون هذا الأيون، سيكون الكون مختلفًا تمامًا عن الكون الذي نعرفه. $\text{HeH}^+ +$ يقود الطريق :

سمح تكوين هيدريد الهيليوم بتشكيل H_2^+ . هذا سمح بعد ذلك بتكوين العديد من الجزيئات الأخرى. بدون HeH^+ ، ولو كان الأمر غير ذلك لكانت عملية التركيب هذه في الكون أبطأ.

في عام 2013، شعر علماء الفلك بالإحباط لأنهم ما زالوا لا يستطيعون اكتشاف HeH^+ . ولكن في ذلك العام، ظهر بصيص من الأمل عندما اكتشف الباحثون أيون ArH^+ ، الذي يحتوي على الأرجون - عنصر خامل مثل الهيليوم - في سديم السرطان، من بقايا السوبرنوفات. ثم ركز العلماء أبحاثهم على HeH^+ في بيئات مماثلة شديدة الحرارة. ومع ذلك، نشأت مشكلة كبيرة. الخطوط الطيفية المستخدمة لتحديد حالة الأرض لـ HeH^+ قريبة جدًا من تلك الخاصة بانتقالين، من حالة داخلية إلى أخرى، للجزيء CH (أول جزيء تمت ملاحظته في الفضاء). لم يكن هناك تلسكوب في الخدمة قادرًا على تمييز توقيعاتهم الطيفية.

ثم تم استدعاء مرصد الستراتوسفير لعلم الفلك بالأشعة تحت الحمراء (صوفيا، لمرصد الستراتوسفير لعلم الفلك بالأشعة تحت الحمراء)، نتيجة للتعاون بين وكالة ناسا والمركز الألماني للملاحة الجوية والفضائية. (DLR) - وكالة الفضاء الألمانية. إنه تلسكوب الأشعة تحت الحمراء المحمولة جواً: في جانب الطائرة، طائرة بوينج 747 محولة، حيث تم استحداث فتحة للسماح للتلسكوب بعمل ملاحظات على علو شاهق. في مايو 2016، استخدم فريق دولي صوفيا لمدة ثلاث ليالٍ لمسح الفضاء. يمتلك تلسكوب صوفيا دقة طيفية كافية لتمييز المؤشر الطيفي الفريد لـ HeH^+ ، على تردد 2010.184 غيغا هرتز (في الأشعة تحت الحمراء البعيدة). بعد تحليل دقيق للبيانات التي تم جمعها، تم نشر النتيجة في عام 2019: إنها في بقايا نجم في نهاية الحياة في السديم الكوكبي NGC 7027، في كوكبة Cygnus، أن فريق رولف جوستين اكتشف التوقيع الكيميائي المطلوب لفترة طويلة.

من المؤكد أن أيونات HeH^+ المكتشفة ليست تلك الموجودة في الكون البدائي: إن المركبات التي أوضحها رولف جوستين وزملاؤه تم إنتاجها في الأونة الأخيرة بدون شك. لكن هذا الاختراق يساعد على صقل معرفتنا بهذه الأنواع الكيميائية. إنه يوفر أدلة للظروف السائدة في الكون البدائي عندما كان HeH^+ المركب الوحيد الموجود في الفضاء. من المحتمل أيضًا أن يوفر هذا الاكتشاف معلومات حول مكان العثور على HeH^+ في الفضاء اليوم: سيبحث العلماء في السدم الكوكبية الأخرى، أو في مناطق أخرى من الكون المرئي لم تستكشف حتى الآن، حيث ستشكل ملاحظتهم قفزة هائلة في الماضي. أسئلة أصعب من أي وقت مضى:

نحن نعيش في عصر مثير للكيمياء الفلكية. تم الرد على ثلاثة أسئلة رئيسية في وقت قصير. لقد لاحظ العلماء أول جزيء تشكل في الكون، تم تحديده لأول مرة من توقيعات كيميائية معينة للنطاقات المجهولة والغامضة المنتشرة، وأخيرًا، اكتشفوا الهيدروكربونات العطرية متعددة الحلقات في الفضاء.

بالإضافة إلى ذلك، تُظهر عمليات إعادة البناء المخبرية الجديدة للظروف المادية بين النجوم كيف أن قواعد النيتروجين والأحماض الأمينية، والكتل الأساسية لبناء الحمض النووي - أو الحمض النووي الريبي - والبروتينات، على التوالي. تقدم التلسكوبات المحمولة جواً مثل صوفيا أو التلسكوبات الفضائية مثل هابل أو حتى جيمس ويب في المستقبل، من خلال تحرير أنفسهم من الخسائر المرتبطة بالغلاف

الجوي للأرض، منظورات واعدة في الدراسة الطيفية للأجسام النجمية التي من المحتمل أن تقدم توافيق كيميائية جديدة.

الآن بعد أن قدمت الاكتشافات الجديدة إجابات على عدد من الأسئلة، تظهر المزيد من الأسئلة. يأمل علماء الفلك في الإجابة عن أسئلة أكثر صعوبة، مثل: "ما المركبات التي تستخدمها الطبيعة؟"، "ما هي الأصول الجزيئية للحياة؟" أو "ما هي الشروط الكيميائية اللازمة لتشكيل الكواكب الأرضية بدلاً من عمالة الغاز؟" إن مشاركة الإلكترونات بين الهيدروجين والهيليوم خلقت المادة كما نعرفها. مع اكتسابنا فهمًا أفضل لهذه العمليات الكيميائية، سنكتسب فهمًا أفضل للفيزياء الفلكية والتاريخ الشامل للكون.

التحقيق الطيفي في السديم:

يستخدم علماء الفلك بشكل رئيسي الضوء، وبشكل أعم، الإشعاع الكهرومغناطيسي لاستكشاف الكون. على سبيل المثال، من خلال تحليل طيف التردد (أو الطول الموجي) لهذا الإشعاع، حيث يمكنهم تحديد الجزيئات الموجودة في الفضاء.

عندما يكون للجزيء عزم ثنائي القطب غير صفري - أي توزيع غير متكافئ للشحنات الإيجابية والسلبية - فإنه يعرض العديد من حالات الإثارة المعروفة باسم "الدوران" أو العامل "الاهتزازي" أو "الإلكتروني"، والتي تعتمد على ظروف الطاقة مثل درجة حرارة أو كثافة المرحلة الغازية. يمكن الانتقال بين حالتين بفضل مصدر الطاقة، وامتصاص الفوتون على سبيل المثال. عادة، تتضمن التحولات الدورانية الفوتونات في مجالات الطول الموجي المليمتر وتحت المليمتر؛ التحولات الاهتزازية، في مجال الأشعة تحت الحمراء؛ التحولات الإلكترونية، أخيرًا، في المجالات المرئية والأشعة فوق البنفسجية و X. عندما يحلل الباحثون الضوء، تؤدي هذه الظواهر الانتقالية إلى خطوط طيفية يمكن ملاحظتها في الامتصاص أو الانبعاث أو تكون لها بنى معقدة للغاية مع أجزاء في الامتصاص وأخرى في الانبعاث.

لمراقبة خطوط الانبعاث، يجب استيفاء الشروط اللازمة (كثافة الغاز ودرجة الحرارة)؛ في بعض الحالات، تكون التحولات الدورانية موجودة في عشرات الترددات المختلفة. بالنسبة لخطوط الامتصاص - كما هو الحال في التجمعات بين النجوم المنتشرة - هناك حاجة إلى مصدر ينبعث منه خلفية قوية، مثل النجم، والجسم المدروس هو بشكل عام سحابة بين النجوم والتي تمتص الضوء من النجم إلى ترددات انتقال الجزيئات المدروسة. وأخيرًا، في بعض الحالات، يتكون الطيف من خطوط انبعاث قادمة من النجم (أو بيئته المباشرة)، وخطوط الامتصاص بسبب السحب الجزيئية الموجودة في مجال الرؤية.

في حالة هيدريد الهيليوم HeH^+ ، الذي له عزم ثنائي القطب قوي، يحدث الانتقال الدوراني الأساسي (من حالة الدوران الملحوظة $J = 1$ إلى الحالة $J = 0$) غيغا هرتز كما لوحظ ذلك في 2010. منذ أن قام العلماء بتجميع هذا الأيون الجزيئي في المختبر، تم التعرف على العديد من التحولات الاهتزازية في الأشعة تحت الحمراء، وتوقع أنه تم تشكيله في أوائل الكون. ساهم البحث الطويل عن HeH^+ في الفضاء أخيرًا في عام 2016، عندما اكتشف الفريق بقيادة Rolf Güsten، انتقال الدوران الأساسي لأول مرة، باستخدام المرصد صوفيا، تلسكوب يعمل بالأشعة تحت الحمراء مركب على طائرة مُعدلة. في السديم الكوكبي NGC 7027، يحتوي الغاز على درجة حرارة وكثافة كافية لإثارة الجزيء ويؤدي

إلى تحولات متكررة إلى حد ما لمستويات الطاقة $J = 1$ إلى $J = 0$ ، مما يجعل من الممكن بعد ذلك اكتشاف الخط في الانبعاثات. كانت هذه المهمة صعبة للغاية حتى الآن، إن لم تكن مستحيلة، من خلال وجود زوج من الخطوط الطيفية لجذر الميثيليدين CH الجذري، الذي تم فصله بواسطة بضع مئات فقط.