

LA SONDE PARKER « TOUCHE » LE SOLEIL

Lancée le 12 août 2018, la sonde *Parker* est un observatoire qui scrute le Soleil au plus près. Son objectif est d'étudier la dynamique de l'étoile et, en particulier, de déterminer les mécanismes qui conduisent à la naissance du vent solaire (qui se propage à travers tout le Système solaire et est capable de perturber les satellites artificiels de la Terre) et au réchauffement de la couronne, la partie la plus externe de l'atmosphère du Soleil. Alors que la température de la surface de l'astre est de 5 800 kelvins, celle de la couronne atteint 2 millions de degrés ! Le Soleil est une boule géante de plasma chaud dont la cohésion est assurée par sa propre gravité. Sous l'impulsion de la pression de radiation et de la température, une partie de cette matière diffuse hors de cette sphère. À proximité de l'astre, la gravité et le champ magnétique du Soleil retiennent ces particules, qui constituent alors son

atmosphère. Mais une fraction de cette matière parvient néanmoins à s'échapper, et forme le vent solaire. La région où les deux forces deviennent trop faibles pour retenir les particules expulsées est nommée la « surface critique d'Alfvén ». Cette frontière serait située à une distance d'entre dix et vingt fois le rayon du Soleil (soit entre 6,9 et 13,8 millions de kilomètres).



Avec sa trajectoire spirale, la sonde *Parker* s'est rapprochée de plus en plus près de cette surface critique. Lors de son huitième survol en 2021, elle a identifié la signature du champ magnétique et des particules caractéristiques de l'atmosphère (sur la photo, on observe un flux de plasma et, en arrière-plan, la Voie lactée). Ces données confirment que, pour la première fois, une machine conçue par l'humain a « touché le Soleil ». Si le premier contact a eu lieu à une distance de 18,8 rayons solaires, la sonde est entrée et sortie à plusieurs reprises de l'atmosphère, indiquant que la surface critique d'Alfvén est irrégulière, avec des creux et des bosses, ce qui était attendu. La mission se poursuivra jusqu'à l'épuisement du carburant, prévu pour 2025, et sera détruite, faute de pouvoir orienter son bouclier face au Soleil.

Sean Bailey

journaliste à *Pour la Science*

Si cette hypothèse est correcte, elle suggère qu'au cours des 10 000 dernières années seulement, la Terre a été frappée par au moins trois superéruptions solaires ; sans compter que d'autres événements se cachent peut-être dans les 84 % de cernes d'arbres qui restent à étudier. « Qu'il n'y en ait eu qu'une seule au cours des 10 000 dernières années ne semblait pas vraiment réaliste, confie Charlotte Pearson. Mais, jusqu'à présent, il pouvait ne s'agir que d'un cas isolé. Que nous en ayons trouvé deux autres, cela n'est pas très surprenant, mais peut être inquiétant. »

La principale préoccupation concerne les conséquences d'un tel événement qui, s'il se produisait aujourd'hui, pourrait être dévastateur pour les satellites en orbite et les infrastructures au sol. En mars 1989, un orage géomagnétique beaucoup plus faible que l'événement de Carrington a provoqué un *black-out* de douze heures au Québec en surchargeant le réseau électrique de toute la province. Aujourd'hui, un orage géomagnétique résultant d'un événement de Miyake aurait probablement des effets beaucoup plus vastes, notamment des pannes potentiellement catastrophiques du réseau électrique et des satellites.

Sangeetha Abdu Jyothi, de l'université de Californie à Irvine, a récemment calculé qu'un événement du niveau de Carrington aujourd'hui provoquerait une « apocalypse du Net ». Les particules énergétiques d'une telle tempête seraient capables d'endommager les câbles sous-marins entre les pays, perturbant ainsi le trafic internet mondial pendant des semaines, voire des mois. Rien qu'aux États-Unis, une telle catastrophe coûterait de l'ordre de 7 milliards de dollars par jour, estime la chercheuse. Un événement plus

puissant, tel que celui de Miyake, causerait des dommages presque incalculables. « Pour quelque chose de l'échelle de Carrington, nous pourrions éventuellement nous en remettre, car nos données elles-mêmes ne seraient pas effacées, explique Sangeetha Abdu Jyothi. Avec quelque chose de dix ou cent fois plus fort, je ne sais pas. Je ne pense pas que quelqu'un ait simulé cela. À mon avis, cela entraînerait une perte de données importante. Nous pourrions perdre tous nos dossiers, nos informations bancaires et de santé critiques et ne plus rien avoir pour les restaurer. »

Pour l'instant, la probabilité que notre civilisation mondiale connaisse un âge sombre à cause d'un événement de type Miyake semble faible. Mais, selon certaines estimations, la probabilité d'un événement de type Carrington serait comprise entre 7 % et 12 % par décennie. Nous sommes en mesure de nous préparer à une éruption de cette ampleur en surveillant l'activité solaire afin d'arrêter les satellites et les réseaux électriques avant l'arrivée d'une superéruption et de l'orage géomagnétique qui s'ensuivrait. Mais il sera plus difficile de se protéger contre un événement de type Miyake.

En attendant, les scientifiques continuent de chercher des preuves d'autres événements solaires extrêmes dans les cernes d'arbres et les carottes glaciaires. « Nous commençons à comprendre que le Soleil peut être beaucoup plus énergétique et actif que nous ne le pensions, explique Brian Thomas. Lorsque les gens étudiaient ces superéruptions sur d'autres étoiles, l'une des discussions était de savoir si le Soleil pouvait aussi faire cela. D'après ces enregistrements historiques, il semble que le Soleil soit capable de produire des événements de cette même ampleur. » ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Brehm et al., **Tree rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE**, soumis à *Nature*, 2021.

F. Miyake et al., **Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings**, *Nature Communications*, 2013.

S. Odenwald et J. Green, **En attendant la tempête solaire du millénaire**, *Pour la Science*, n° 374, décembre 2008.

L'ESSENTIEL

➤ Dans le modèle standard de la cosmologie, la matière noire est un ingrédient indispensable pour expliquer la dynamique des galaxies en rotation, les amas de galaxies ou le spectre du fond diffus cosmologique.

➤ Mais la matière noire reste de nature inconnue. Et les expériences de détection échouent pour l'instant à la mettre en évidence et à confirmer l'hypothèse de son existence.

➤ Une approche différente consistant à modifier la gravitation aux accélérations les plus faibles fonctionne bien à l'échelle des galaxies.

➤ Elle ne permettait pas de décrire le spectre du fond diffus cosmologique. Mais une nouvelle version de gravité modifiée vient de franchir cet obstacle.

L'AUTEUR



SEAN BAILLY
journaliste
à *Pour la Science*

Des galaxies spirales en rotation aux plus grandes échelles cosmologiques, un ingrédient semble manquer pour décrire correctement les observations. Les deux pistes principales sont celles de la matière noire et de la gravité modifiée.

Matière noire

La piste de la gravité modifiée passe un test crucial

Décrire les caractéristiques du premier rayonnement de l'Univers était jusqu'à présent un test fatal pour tous les scénarios concurrents de la matière noire. Or un nouveau modèle de gravité modifiée vient de passer cette épreuve. Il ouvre une voie inédite pour résoudre l'énigme de la matière noire.

La question de la matière noire est une épine dans le pied des cosmologistes. Qu'ils observent l'Univers à l'échelle des galaxies, des amas de galaxies ou aux plus grandes échelles, les chercheurs s'accordent pour dire qu'un ingrédient de nature encore inconnue est indispensable pour décrire correctement ces différentes structures. Une majorité de spécialistes pensent que cet élément prend la forme de « matière noire », composée de particules qu'il reste à identifier. Cette matière noire serait cinq fois plus abondante que la matière ordinaire (celle constituée d'atomes). Cette voie n'est pas la seule, d'autres pistes existent. Notamment, en modifiant les lois de la gravitation, il est possible d'obtenir des résultats intéressants, surtout

à l'échelle des galaxies. Cette approche, proposée il y a quarante ans, butait sur un obstacle que l'on pensait fatal: le fond diffus cosmologique, un rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans et que l'on observe encore aujourd'hui. Mais Constantinos Skordis et Tom Złośnik, de l'Académie tchèque des sciences, à Prague, ont récemment fait sauter ce verrou. Ils ont développé un modèle de gravité modifiée qui passe le test.

« C'est un véritable tour de force qui a été accompli, souligne Benoît Famaey, de l'observatoire de Strasbourg. À ce stade, il s'agit surtout d'une preuve de concept, mais ces deux chercheurs viennent de montrer qu'il est possible par l'approche de la gravité modifiée de reproduire à la fois le fond diffus cosmologique et la dynamique des galaxies. » Ce modèle

servira peut-être d'inspiration à une théorie physiquement mieux motivée qui en reprendra les ingrédients de base.

L'histoire de la matière noire a presque quatre-vingt-dix ans. Dans les années 1930, l'astronome Fritz Zwicky a noté des incohérences en étudiant la dynamique des galaxies au sein de l'amas de la Chevelure de Bérénice (aussi nommé amas de Coma). Le mouvement des galaxies régi par la gravitation n'était pas compatible avec la quantité de matière que l'amas semblait contenir. Il a suggéré la présence, avant l'heure, de matière sombre. La question a suscité peu d'interrogations jusqu'en 1970, quand Vera Rubin a commencé à observer le même problème en mesurant le profil de vitesse des galaxies spirales, c'est-à-dire la vitesse de rotation des objets en fonction de leur distance au centre de leur galaxie. Les lois de Newton décrivent assez simplement comment la vitesse devrait évoluer en fonction du rayon, ou, plus précisément, en fonction de la quantité de masse galactique incluse à l'intérieur de ce rayon. Or l'astrophysicienne constatait que les objets les plus éloignés dans la galaxie se déplaçaient bien trop rapidement et auraient donc dû être éjectés. En effet, au lieu de décroître à partir

la dynamique des amas de galaxies qui posait problème à Fritz Zwicky. Et, aux échelles plus vastes, cet ingrédient contribue à reproduire de façon satisfaisante la formation des grandes structures et le spectre du fond diffus cosmologique. La matière noire est ainsi devenue un élément incontournable du modèle cosmologique.

UN INGRÉDIENT MANQUANT ET OMNIPRÉSENT

Son rôle dans la compréhension du fond diffus cosmologique est particulièrement important. Ce rayonnement microonde est presque homogène et isotrope quand on mesure sa température sur l'ensemble de la voûte céleste. Elle est d'environ 2,7 kelvins, mais elle présente de petites fluctuations, de l'ordre de 10^{-5} en valeur relative autour de sa valeur moyenne. Ces fluctuations sont très intéressantes, car elles témoignent des conditions primordiales lors de l'émission du fond diffus quand l'Univers avait 380 000 ans. Elles sont dues à des variations de densité dans le plasma qui, en se refroidissant, a libéré ce fameux rayonnement primordial. Les régions plus denses ont produit des zones plus chaudes sur la carte céleste du fond diffus cosmologique, et, inversement, les régions moins denses, des zones plus froides.

Dans le plasma primordial, la matière ordinaire interagissait fortement avec les photons. Des forces antagonistes (la force gravitationnelle de la matière, attractive, et la pression radiative des photons, répulsive) ont fait osciller la matière produisant des zones de forte densité et d'autres de faible densité, à l'image d'«ondes acoustiques». Avec ces seuls ingrédients, il n'est pas possible de reproduire de façon satisfaisante ces fluctuations. Il faut ajouter un élément comme la matière noire, qui a accentué la formation des surdensités. Comme elle n'est soumise qu'à la force gravitationnelle, elle s'est accumulée dans certaines régions. Ces dernières, créant des puits gravitationnels d'autant plus intenses, ont attiré davantage de matière ordinaire.

Vers 380 000 ans, le plasma est devenu électriquement neutre et les photons se sont alors propagés librement et ont constitué le fond diffus cosmologique. Telle une photographie, ce dernier a enregistré l'état du plasma juste au moment de la fuite des photons. Le spectre de ce rayonnement indique ainsi la distribution des zones froides et chaudes dans le fond diffus cosmologique en fonction de leur taille angulaire sur la voûte céleste.

En considérant que la matière noire est cinq fois plus abondante que la matière ordinaire dans le cadre d'un modèle noté Λ CDM (CDM fait référence à la matière noire, dite *cold dark matter*; Λ renvoie à un autre ingrédient du

Les modèles de gravité modifiée butaient sur un obstacle que l'on pensait fatal : le fond diffus cosmologique

d'une certaine distance du centre galactique, le profil de vitesse formait un plateau constant.

En 1973, en s'appuyant sur des simulations numériques, le Prix Nobel de physique 2019 pour ses travaux en cosmologie, James Peebles, et Jeremiah Ostriker ont proposé que les galaxies étaient entourées d'un halo de matière n'émettant pas de lumière et n'interagissant pas avec la matière ordinaire sauf par son influence gravitationnelle sur le système. Cette «matière noire» expliquerait alors le profil de vitesse des galaxies.

Les cosmologistes ont ensuite montré que la matière noire permettait d'expliquer aussi