

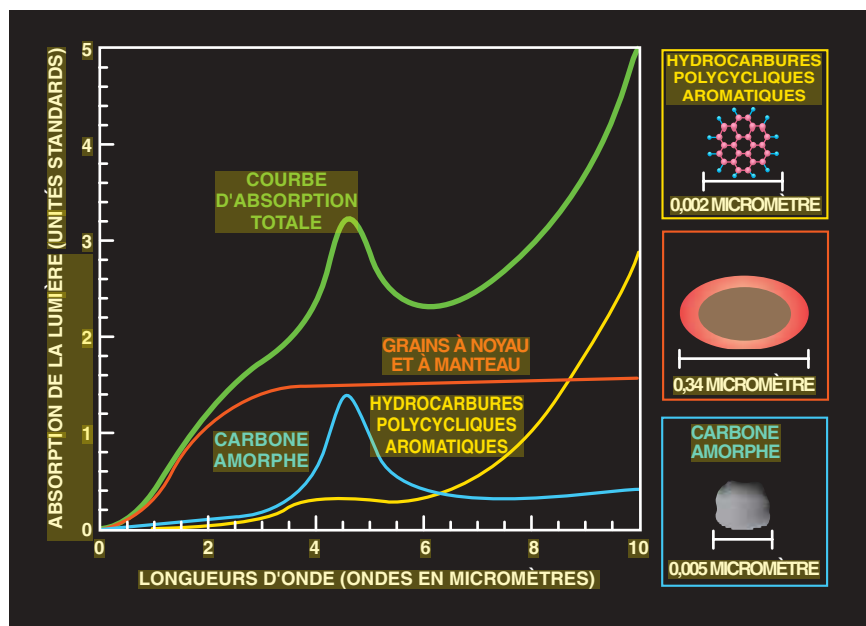
quelques éléments légers créés lors du Big Bang. Seuls les nuages d'hydrogène et d'hélium les plus massifs se contractaient pour former des étoiles, car les forces de gravitation devaient vaincre la pression liée à l'agitation des gaz. Ainsi, notre Galaxie était dominée par des étoiles géantes de types O et B, qui explosaient quelques millions d'années seulement après leur naissance, et se transformaient en supernovae.

En observant les galaxies primordiales à l'aide de télescopes dont les détecteurs sont sensibles aux longueurs d'onde inférieures à un millimètre, les astronomes ont montré que ces supernovae sont à l'origine des premières poussières. Cependant, la durée de vie de ces poussières dans le milieu interstellaire était très courte, car elles étaient rapidement détruites par les ondes de choc des supernovae ultérieures.

Au bout de quelque cinq milliards d'années, la tempête de supernovae se calma, et les étoiles un peu moins massives devinrent des géantes rouges. Tandis que ces étoiles refroidissaient et grossissaient, des particules de silicates se formèrent dans l'atmosphère de ces étoiles, puis furent expulsées dans l'espace interstellaire. Certaines de ces particules de silicates pénétrèrent dans les nuages de gaz moléculaire de ces étoiles : la température qui y régnait était très basse, et chaque atome ou molécule du gaz gelait instantanément à la surface des grains de silicates, comme lorsque les gouttes de vapeur d'eau gèlent sur une vitre glacée ; un manteau de glace enveloppa ainsi chaque noyau de silicate.

À mesure que la poussière se concentrait dans les nuages moléculaires, la densité des grains augmentait jusqu'à atteindre des dizaines de milliers de fois celle qui régnait à l'extérieur des nuages. Épaisse, la couche de poussières empêcha le rayonnement de pénétrer dans les nuages : la température du gaz (et par conséquent sa pression) diminua encore, et la masse requise pour vaincre la pression du gaz fut moindre. Les nuages de gaz les plus petits se contractèrent donc et donnèrent naissance à de « petites » étoiles, tel notre Soleil. En réduisant les contraintes qu'impose la formation des étoiles, les poussières ont notablement modifié l'évolution de la Voie Lactée.

En outre, les poussières de notre Galaxie sont constamment recyclées. Quand un nuage dense de gaz et de



3. L'ABSORPTION DE LA LUMIÈRE provenant d'étoiles situées derrière les nuages de poussières peu denses montre qu'il existe trois types de particules : de gros grains qui ont un noyau recouvert d'un manteau de glace (en rouge), des particules contenant du carbone amorphe (en bleu), et des molécules qui ressemblent aux hydrocarbures polycycliques aromatiques (en vert).

poussières se contracte en une étoile, les grains de poussière les plus proches de la région de formation stellaire s'évaporent : tandis qu'une petite partie de ces grains de poussière est engloutie par l'étoile, ou se condense en planètes rocheuses et en astéroïdes, l'immense majorité est expulsée et forme des nuages moins denses. Dans cet environnement plus hostile, les manteaux glacés des grains de poussière cessent de s'épaissir et sont détruits ou érodés par le rayonnement ultraviolet, par les collisions de particules et par les fronts d'onde de choc des supernovae. Toutefois, le manteau n'est pas totalement retiré : sous la couche externe de glace se trouve un manteau sous-jacent, composé de matériaux organiques complexes qui recouvre le noyau de silicates.

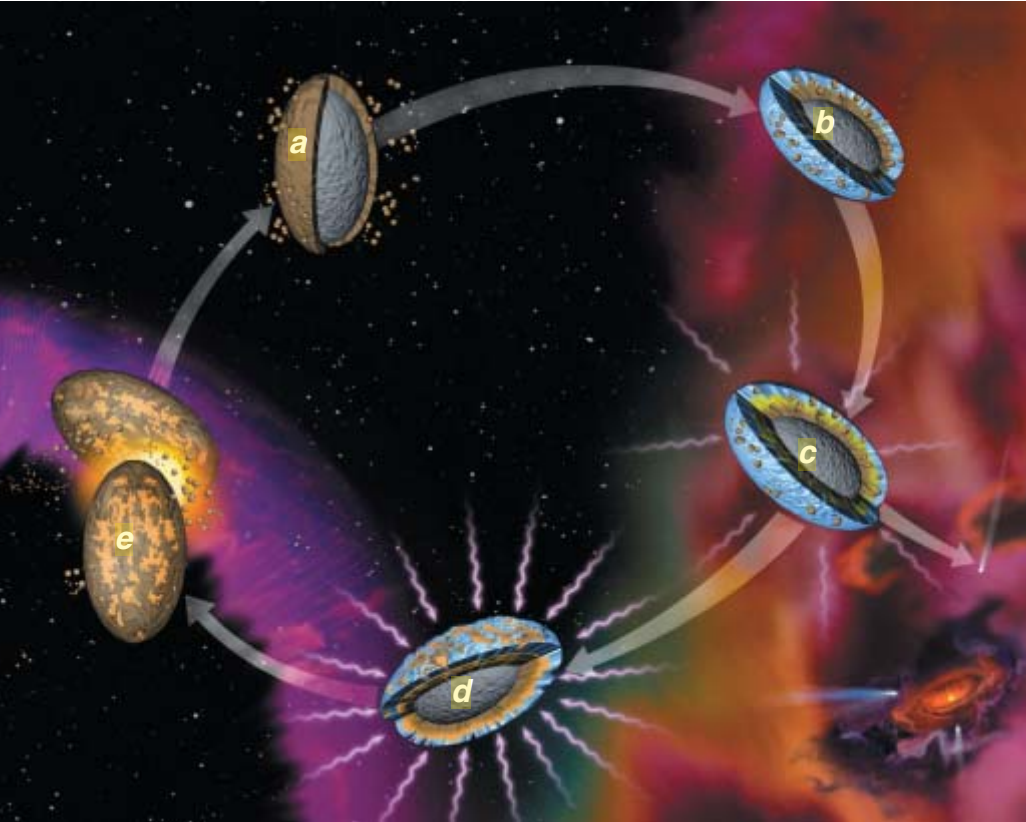
Il y a environ 30 ans, j'ai proposé l'existence de ce manteau organique pour justifier l'importance de l'atténuation de la luminosité par les poussières des nuages diffus, que les seuls silicates ne suffisaient pas à expliquer. J'ai postulé que la couche de matériau riche en carbone, à la surface des grains de poussière, résulte de réactions chimiques au sein du manteau de glace, qui commenceraient alors que le grain est encore dans le nuage dense de gaz moléculaires. Quand des photons ultraviolets énergétiques heurtent le manteau de glace, ils cassent les molécules

d'eau, de méthane et d'ammoniaque et libèrent des radicaux libres : ces derniers se recombinaient en molécules organiques tel le formaldéhyde. Une irradiation persistante par un rayonnement ultraviolet crée des composés plus complexes nommés composés organiques de première génération. Ceux-ci restent sur le noyau de silicate lorsque les grains de poussière quittent le nuage moléculaire et même lorsque le manteau de glace a été détruit. Le manteau de molécules organiques protège le noyau de silicates contre l'onde de choc des supernovae jusqu'à ce que les grains soient à nouveau à l'abri au sein d'un autre nuage de gaz dense.

Substance jaune, substance brune

Afin de tester cette hypothèse, nous avons soumis divers manteaux de glace (à $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$) à un rayonnement ultraviolet, puis nous avons chauffé les mélanges. Nous avons obtenu une substance jaune qui contenait du glycérol, du glycéramide, plusieurs acides aminés, telles la glycine, la sérine et l'alanine, ainsi que de nombreuses autres molécules complexes.

Au même moment, les astrophysiciens ont détecté la présence de composés organiques complexes dans les poussières des nuages diffus alors qu'ils mesuraient l'absorption de la



D. Dixon

4. LES GRAINS DE POUSSIÈRE INTERSTELLAIRE survivent à environ 50 cycles de 100 millions d'années, avant d'être détruits. Dans les nuages diffus, où le gaz est rare, les poussières sont soit de gros grains à noyau et à manteau, des particules carbonées amorphes ou des molécules d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (a). Quand ces particules pénètrent dans un nuage de gaz dense, les atomes et les molécules de ce gaz adhèrent aux gros grains et forment un manteau extérieur de glace où se figent aussi des particules carbonées et des hydrocarbures polycycliques aromatiques de glace (b). Le rayonnement ultraviolet transforme le matériau au sein du manteau de glace (c), et crée une couche de composés organiques complexes, la « substance jaune ». Alors que le nuage se contracte et forme une étoile, certains des gros grains s'assemblent et constituent des noyaux de comète (à droite) ; la grande majorité des poussières est dispersée. À nouveau dans un nuage diffus, les gros grains sont exposés à un rayonnement ultraviolet plus intense qui entraîne l'évaporation du manteau de glace et des réactions entre molécules organiques ; la substance jaune brunit (d). Sous l'effet des ondes de choc libérées par les supernovae, les grains sont accélérés et se heurtent violemment (e), de sorte que les manteaux organiques se désagrègent. Les débris deviennent les particules carbonées et les hydrocarbures polycycliques aromatiques présents dans les nuages diffus.

lumière stellaire qui les traverse. Toutefois, nos résultats ne reproduisaient pas exactement les raies d'absorption dans le domaine infrarouge ! Cette différence n'était pas une surprise : dans les nuages diffus, les grains de poussière sont exposés à un rayonnement ultraviolet 10 000 fois plus intense que dans les nuages denses. Ce rayonnement transforme la matière des manteaux internes en composés organiques de seconde génération. Comment pouvait-on reproduire les effets de ce rayonnement en laboratoire ?

À la fin des années 1980, Gerda Horneck, de l'Agence spatiale allemande, nous a proposé d'utiliser un satellite destiné à exposer pendant longtemps des échantillons biologiques aux ultraviolets. Le dispositif était bien adapté à l'étude de notre « substance jaune », que nous avons envoyée en orbite grâce à la navette spatiale en 1992.

Nous avons récupéré nos échantillons après quatre mois d'exposition

aux ultraviolets : ce qui était parti jaune est revenu brun. Le changement de couleur indique un enrichissement en carbone. Au spectromètre infrarouge, nous avons trouvé que la substance brune a les mêmes raies d'absorption que celles enregistrées lors de nos observations des poussières interstellaires. Bien qu'exposé à un rayonnement dix fois moins intense qu'au sein des nuages diffus, notre échantillon avait toutes les caractéristiques des matériaux réfractaires organiques des poussières cosmiques.

Nous avons alors mis au point un modèle où les gros grains soumis au rayonnement ultraviolet donnent la quasi-totalité des petites particules carbonées amorphes et des hydrocarbures polycycliques aromatiques présents dans la poussière interstellaire.

Grâce à un spectromètre de masse, Seb Gillette, de l'Université de Stanford, a confirmé que cette substance brune est riche en hydrocarbures polycycliques aromatiques. Dans les nuages

de gaz diffus, les petites particules se détacheraient des manteaux organiques à chaque fois qu'une onde de choc de supernova fracasse les gros grains de poussière (voir la figure 4) : chacun d'eux libérerait des centaines de milliers de minuscules grains.

Enfin, la totalité des poussières est capturée par un nuage moléculaire dense à l'intérieur duquel les collisions entre les particules de poussière et les atomes et les molécules du gaz sont fréquentes : un million d'années plus tard, les plus gros des grains de poussière s'entourent d'un manteau d'eau et de monoxyde de carbone gelés. Les observations des poussières dans les nuages très denses qui entourent des étoiles ont indiqué la présence de ces composés, ainsi que de quantités plus faibles de dioxyde de carbone, de formaldéhyde et d'ammoniaque. Bien que personne n'ait jamais observé directement ce qu'il advient des particules carbonées ni des hydrocarbures polycycliques aromatiques dans un nuage moléculaire, il est vraisemblable qu'ils se fixent sur les grains de poussière les plus gros et qu'ils sont engloutis dans leurs manteaux de glace. Les molécules organiques sont alors à nouveau transformées par le rayonnement ultraviolet, et le cycle recommence.

D'autres astrophysiciens expliquent l'absorption de la lumière par les poussières interstellaires sans recourir aux manteaux organiques qui recouvrent les gros grains de poussière. Par exemple, selon John Mathis, de l'Université du Wisconsin, les gros grains de poussière sont des agrégats poreux de petites particules de graphite et de silicates. Cependant, ces modèles expliquent mal la polarisation de la lumière qui traverse les nuages, c'est-à-dire l'orientation des ondes électromagnétiques dans une direction donnée.

Pour un tel phénomène, trois conditions sont nécessaires : les gros grains de poussière sont cylindriques ou sphériques ; ils tournent autour de leur axe le plus court ; enfin leurs axes de rotation sont parallèles et orientés dans la même direction. Ce sont peut-être les champs magnétiques qui, dans le nuage de poussière, alignent ces axes de rotation. En postulant l'existence de particules pourvues d'un noyau et d'un manteau, notre modèle explique que la lumière qui traverse les nuages est polarisée quelles que soient les longueurs d'onde.

De la poussière aux comètes

Les comètes sont les reliques les plus intactes de la nébuleuse protosolaire, le nuage de gaz qui a donné naissance à notre système solaire. Chaque nouvelle découverte sur la composition chimique des comètes et de la poussière interstellaire confirme l'idée selon laquelle les comètes se sont formées à partir d'agrégats de poussière. Ainsi, l'observation des comètes est une source d'informations sur les poussières cosmiques.

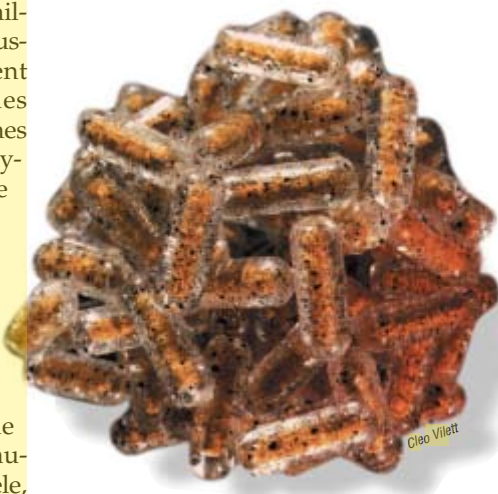
Quand le Soleil, les planètes et les comètes sont nés, il y a environ 4,6 milliards d'années, les gros grains de poussière du nuage protosolaire avaient sans doute déjà absorbé toutes les petites particules carbonées amorphes et les molécules d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, ainsi que le monoxyde de carbone et les autres composés volatils. Seul l'hydrogène et l'hélium restaient libres. Les grains de poussière se heurtaient souvent et s'assemblaient en gros agrégats floconneux. Ces amas auraient ensuite évolué pour former le noyau des comètes. Chaque noyau serait poreux, contenant beaucoup d'espace vide. Dans mon modèle, le noyau d'une comète contient 100 grains de poussière protosolaire de taille moyenne, entassés pêle-mêle (voir la figure 5) : environ 80 pour cent de cet agrégat (de trois micromètres de diamètre) est vide.

Depuis leur naissance, les comètes circulent autour du Soleil dans les régions du nuage de Oort et de la ceinture de Kuiper, très loin des orbites des planètes. Toutefois, des perturbations gravitationnelles expédient parfois les comètes sur des orbites plus proches du Soleil. En 1986, les sondes spatiales Giotto et Vega 1 et 2 sont passées à proximité de la comète de Halley, qui s'approche du Soleil tous les 76 ans : elles transportaient des spectromètres qui ont mesuré la masse et la composition chimique des particules de la chevelure de Halley, du nuage de gaz et des poussières qui entourent son noyau.

En frappant les détecteurs à une vitesse de 80 kilomètres par seconde, les particules de poussière sont décomposées sous le choc. Les instruments ont mesuré un large éventail de masses pour les particules, par exemple 10^{-14} gramme pour les gros grains de pou-

sière et 10^{-18} gramme pour les petites particules carbonées.

Jochen Kissel, de l'Institut Max Planck de Garching, Franz Krueger, du bureau d'études Krueger, à Darmstadt, et Elmar Jessberger, de l'Université de Munster ont ensuite confirmé que la poussière de la comète de Halley est constituée d'agrégats de particules dont le noyau est constitué de silicates et le manteau de composés organiques réfractaires. Ils avaient en effet constaté que les atomes d'oxygène, de carbone et d'azote des manteaux organiques externes heurtaient les



5. CE MODÈLE DE POUSSIÈRE DE COMÈTE, élaboré par l'auteur, montre 100 gros grains qui forment un amas peu dense de trois micromètres de diamètre. Riche en composés organiques, ces agrégats ont peut-être été des germes de vie sur Terre.

détecteurs des sondes avant les atomes de silicium, de magnésium et de fer enfouis dans les noyaux.

Quel est l'âge de la poussière contenue dans la comète de Halley et dans les autres comètes ? Au moment de son aggrégation, la poussière avait environ cinq milliards d'années, le temps que passe un grain de poussière dans l'espace avant d'être englouti dans une étoile en formation. Par ailleurs, les comètes ont elles-mêmes 4,6 milliards d'années : leur poussière est probablement âgée de dix milliards d'années. Ainsi, les comètes nous donnent accès à la prime enfance de la Voie Lactée.

Les poussières des comètes ont peut-être aussi apporté la vie sur Terre, car chaque amas floconneux de poussières de comète contient de la matière organique. En outre, leur structure caverneuse a peut-être favorisé les

réactions chimiques qui ont eu lieu après immersion dans l'eau. J. Kissel et F. Krueger ont montré que de petites molécules pénètrent facilement dans un amas, tandis que les grosses ne peuvent s'en échapper. Une telle structure aurait stimulé la synthèse de molécules plus grosses et plus complexes, et aurait joué le rôle d'incubateur des formes de vie les plus primitives. Une seule comète aurait pu déposer jusqu'à 10^{25} de ces «graines» de vie sur la Terre, alors qu'elle était toute jeune.

La NASA et l'Agence spatiale européenne préparent des missions d'étude des comètes et des poussières interstellaires. Le vaisseau *Stardust* (Poussière d'Étoiles) de la NASA, lancé en 2000, a un rendez-vous avec la comète Wild-2 en 2004 : de cette rencontre, il rapportera un échantillon des poussières de la chevelure de cette comète. Pendant son voyage, la sonde récoltera également des échantillons des poussières interstellaires du système solaire. La mission Rosetta de l'Agence spatiale européenne, à laquelle nous participons, est programmée pour 2003 : un vaisseau se placera en orbite autour de la comète Wirtanen, et enverra une sonde se poser à la surface de son corps poreux. Des instruments analyseront la structure physique et la composition chimique de la comète.

Ces missions spatiales feront sans doute passer les poussières cosmiques du statut de nuisance à un statut plus prestigieux. Aujourd'hui, on sait déjà qu'elles détiennent des informations sur la naissance des étoiles, des planètes et des comètes, et peut-être même sur l'origine de la vie.

J. MAYO GREENBERG dirige le Laboratoire d'astrophysique de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas.

J. GREENBERG, *The Structure and evolution of Interstellar Grains*, in *Scientific American*, vol. 250, n° 6, pp. 124-135, juin 1984.

A. LI et J. GREENBERG, *A Unified Model of Interstellar Dust*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 323, n° 2, pp. 566-584, 1997.

J. GREENBERG et C. SHEN, *Cosmic Dust in the 21st Century*, in *Astrophysics and Space Science*, vol. 269-270/1-4, pp. 33-35, 1999.
