

La formation du système solaire

Astrosurf, Thierry Lombry www.astrosurf.com

La raison et les lois (I)

Ainsi que je le relate dans le dossier consacré à la philosophie des sciences, la fin de la Renaissance reste marquée par le questionnement de l'homme devant les multiples facettes de son visage. Ne se suffisant plus de la parole de Dieu, l'homme pris la décision d'ouvrir le "Livre du Monde" pour y trouver une nouvelle interprétation de la réalité. Le XVII^{ème} siècle vit l'apparition des sciences expérimentales, basées non plus sur des concepts abstraits, sans lien avec la réalité, mais sur des données accumulées par l'expérience mainte fois répétée^{1[1]}.



Les lois physiques qui nous aident à comprendre la raison de toute chose sur Terre peuvent expliquer, *a priori*, les phénomènes qui se produisent sur les autres planètes du système solaire. Il nous suffit pour cela de déposer ou de larguer des sondes d'analyses automatiques sur le sol ou dans les atmosphères planétaires. Si nos modèles fonctionnent ailleurs, si cette observation est possible, cela confirme les idées exprimées par les chercheurs, expérimentateurs ou théoriciens dont la compréhension n'est jamais totalement vérifiée sans la comparaison ultime *in situ*.

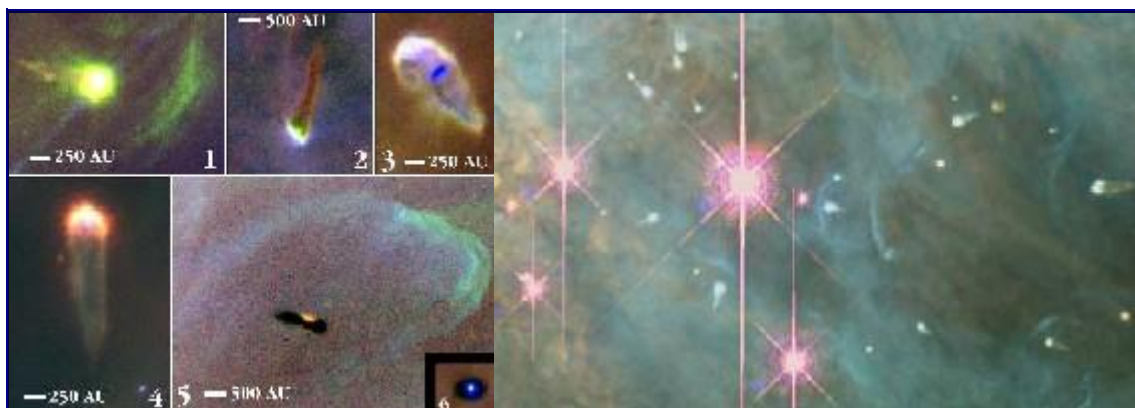
Cette curiosité intellectuelle, si elle semble gratuite en astronomie ne s'attachant qu'aux objets du ciel, par nature inaccessibles, a néanmoins de multiples retombées dans notre vie. Une parfaite maîtrise de la géologie peut réduire les effets des séismes ou des éruptions volcaniques sur Terre. Une compréhension aussi complète que possible des facteurs météorologiques permettra de prédire avec plus de précision l'évolution des tempêtes ou des ouragans et éventuellement, à terme, de modifier les climats sur Terre, sur Vénus ou sur Mars. L'étude des rayonnements permet de comprendre l'influence des particules élémentaires sur la biosphère en général, leurs interactions avec la matière et avec les gènes de nos chromosomes en particulier. Toutes ces disciplines et bien d'autres sont imbriquées dans les processus biologiques et nécessitent une approche multidisciplinaire. Mais nous reviendrons sur ce sujet. Commençons par analyser ce qu'Einstein appela "l'intelligence de l'extrême variété de l'expérience et des hypothèses fondamentales" en matière de planétologie, pour découvrir le visage du système solaire en ce nouveau millénaire.

La formation du système solaire

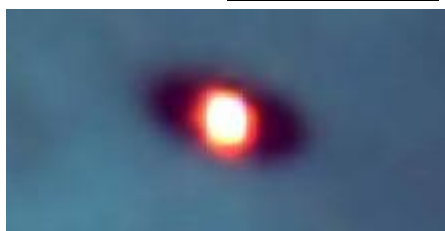
Jusqu'au XX^{ème} siècle les idées les plus farfelues ont été proposées pour expliquer la genèse du système solaire et de l'Univers. Pendant des siècles les philosophes et les savants ont cru que le Monde avait toujours existé. Les chrétiens pensaient qu'il s'était créé en six jours... Il y a peu de temps encore, l'évêque irlandais James Ussher croyait, lisant la Bible, que le Monde s'était créé en l'an -4004. Mais bientôt Darwin comme Lamarck se rendirent compte que c'était un mythe sans pour autant pouvoir expliquer ce qui s'était passé. Etudiant méticuleusement l'évolution des espèces et les traces fossilisées, tous deux suggérèrent au XIX^{ème} siècle que la Terre avait peut-être quelques millions d'années. Mais trop avant-gardistes leurs idées attendront le terrain fertile du XX^{ème} siècle pour poindre à nouveau le jour et recevoir une explication définitive.

En matière d'astronomie, c'est en 1943 seulement que le premier modèle protosolaire fut proposé par le physicien allemand Carl von Weizsäcker^{2[2]}. Ses calculs confirmaient dans le détail les observations des astrophysiciens.

Que nous dit la Science aujourd'hui ? Von Weizsäcker démontra que le Soleil et les planètes s'étaient formés à partir d'un nuage de gaz et de poussières en rotation il y a environ 4.55 milliards d'années. A cette époque le nuage protoplanétaire contenait déjà des agrégats de matière. Récemment en effet, G.Wasserburg et ses collègues de Caltech confirmèrent que certains échantillons météoritiques étaient âgés de 4.56 milliards d'années. Il devait donc exister des fragments de roches antérieurement à l'époque où le Soleil s'illumina.



Quelques proplydes parmi les quelque 150 découverts par le Télescope Spatial Hubble dans la région du Trapèze d'Orion. Ces nodules sombres seraient des systèmes proto-stellaires en gestation. Documents [HST/Univ.Toronto](#) et [HST/STSCI](#).



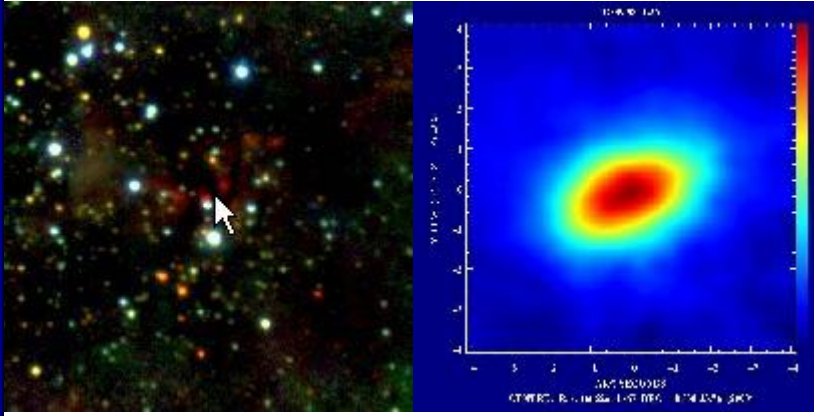
Ci-dessus des disques protoplanétaires au sein de la nébuleuse d'Orion M42. Ces disques ont une dimension comprise entre 50 et 1000 UA. Entourée chacune de son cocon de poussières, deux étoiles viennent de naître. Documents [MPIA/Rice University/NASA/STSCI-OPO](#).

Entraîné par la gravitation et le mouvement de rotation du système, ce nuage pris lentement la forme d'un disque aplati. Il se compose d'éléments enrichis par l'explosion des étoiles de la deuxième génération, dont une grande partie d'hydrogène et de beaucoup de poussières.

Le nuage n'étant pas trop massif, suite à l'accélération du mouvement gravitationnel, une masse sombre se condensa progressivement au centre du disque, prémice du futur Soleil. Ce corps central sombre est appelé une **globule de Bok**. Sa température est voisine de 15 K, -258°C, suffisamment faible pour que sa vitesse cinétique n'entrave pas l'effondrement du nuage.

Ainsi qu'en témoignent les images ci-dessus nous avons des preuves observationnelles qu'un tel processus est encore à l'oeuvre aujourd'hui dans les nébuleuses diffuses les plus denses telles M16 ou M42.

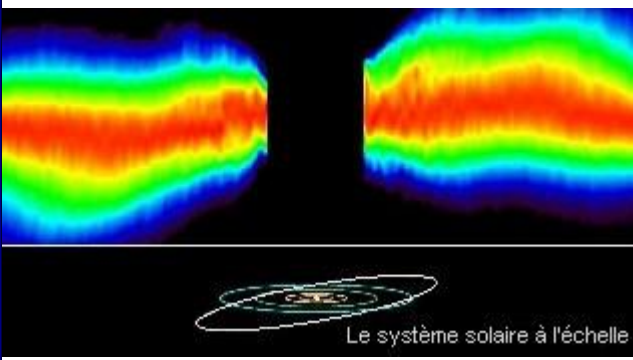
Disque protoplanétaire en formation



A gauche, une masse obscure se distingue à peine au centre de ce champ stellaire proche du radiosource G339.88-1.26. Pourtant des relevés submillimétriques à 10 mm de longueur d'onde révèlent qu'une étoile bleue et chaude (30000 K) de classe O9 est entourée d'un disque incliné de poussières et de molécules qui s'étend jusqu'à 20000 UA, un rayon de 0.3 années-lumière ! La question est maintenant de savoir comment se maintient-il autour d'une étoile aussi lumineuse et aussi massive. Document [ESO/TIMM](#).

Le problème central dans la formation de n'importe quelle étoile est ensuite de trouver un mécanisme expliquant le transfert du moment angulaire aux planètes pendant l'effondrement du nuage de gaz et de poussières. Calculs et simulations s'accordent pour considérer que ce transfert s'accomplit soit lors de la formation d'une étoile double soit durant la formation d'un disque planétaire perpendiculairement à l'axe de l'étoile.

Disque protoplanétaire



Aspect du disque protoplanétaire composé de molécules et de poussières qui entoure l'étoile β Pictoris situé à 50 a.l. Mesuré en infrarouge les couleurs sont arbitraires et indiquent la température. Un disque similaire de 80 à 140 UA existe également autour de l'étoile brillante Véga. Cliquer sur l'image pour l'agrandir. Document LASP/NASA-GSFC.

A quelques nuances près prononcées par le géophysicien russe Otto Schmidt et T.Nakano de l'Université de Kyoto, ce modèle est universellement reconnu.

Voyons à présent comment se forma le Soleil et son cortège de planètes.

Poussières d'étoiles (II)

Comment se forma le disque protosolaire ? En 1991, l'astrophysicien Alister G.Cameron présenta un modèle de l'histoire protosolaire, fondé sur l'explosion successive d'étoiles dans un immense nuage moléculaire. Selon Cameron, tout aurait commencé dans un nuage géant de gaz et de poussière de $10^5 M_{\odot}$.

qui s'étendait sur quelques milliers d'années-lumière. Ce nuage était constitué de 78% d'hydrogène, 20% d'hélium, 2% d'atomes lourds et d'un pourcent de grains de poussières. La concentration d'hydrogène n'était pas encore très élevée, de l'ordre de 10^{-17} atmosphères, quelque 1000 molécules /cm³.

Au coeur de ce nuage géant des poches de haute densité se sont formées, pouvant localement atteindre 100000 molécules/cm³. En s'effondrant sous l'effet de la gravitation, ces poches de gaz et de poussières ont donné naissance à plusieurs associations d'étoiles, dont les plus turbulentes furent de type O et B d'environ 10 M_☉.

Née dans la Lagune



Une étoile massive bleue turquoise est née. Elle est encore auréolée des gaz et des poussières protostellaires de la nébuleuse de la Lagune, M8. Illustration de T.Lombry.

Très massives, ces étoiles ne survécurent pas plus de 10 millions d'années. Elles explosèrent en supernova, libérant dans l'espace une immense bulle qui balaya le coeur du nuage moléculaire de son gaz et de ses poussières. Pendant ce temps, les étoiles moins massives et moins chaudes synthétisèrent des éléments lourds au cours des différentes phases de la nucléosynthèse. Quelques étoiles géantes, riches en carbone (branche géante asymptotique, AGB) transformèrent l'hélium en éléments plus lourds pendant qu'une fraction de leur enveloppe s'échappait dans l'espace, porteuse des germes des nouveaux éléments synthétisés.

Au bout de 130 millions d'années environ, le coeur du futur nuage protosolaire fut totalement désagrégé. Un nouveau coeur se reforma à partir de la matière enrichie en éléments lourds, à nouveau dominé par les étoiles chaudes du type O et B. 20 millions d'années plus tard, les étoiles plus massives ayant déjà explosées, seules les étoiles voisines d'une à deux masses solaires se transformèrent en étoiles géantes AGB. Elles moururent quelques millions d'années plus tard, mais bien calmement, en soufflant leur enveloppe superficielle dans l'espace, libérant environ 20% de leur masse. Leur coeur se transforma en étoile naine blanche.

Les nébuleuses planétaires : résidus de supernovae



A gauche, la nébuleuse du Crabe, M1, au centre la nébuleuse Eskimo et ci-dessous Mycn18. A chaque fois la matière première a été enrichie d'éléments lourds qui ont été synthétisés pendant l'explosion de la supernova. Un jour peut-être si la matière est suffisamment abondante et condensée ces nébuleuses donneront naissance à des systèmes protoplanétaires. Cliquer sur les images pour les agrandir. Documents [ESO](#) et [STSCI/HST](#).



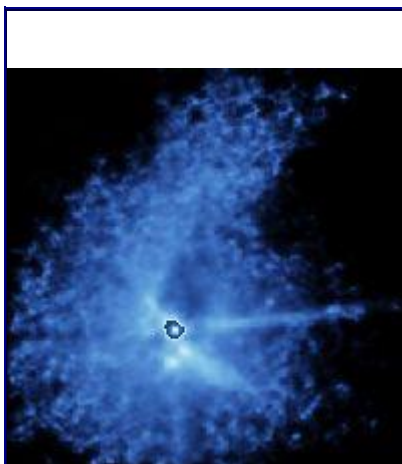
La bulle de gaz se déplaçant selon les lignes de force du champ magnétique galactique, leur mouvements s'inversèrent bientôt, comprimant le milieu interstellaire en petits nuages de quelques masses solaires. Ces nouvelles générations d'étoiles produisirent en fin de compte de nouvelles bulles de gaz qui servirent à leur tour de matière première à de nouvelles étoiles, parmi lesquelles on retrouva le futur Soleil.

Ces cascades de naissances et d'enrichissement stellaires permettent d'expliquer la présence dans les météorites de radioactivité éteinte et les grandes anomalies isotopiques. L'explosion d'une seule supernova ne peut expliquer une telle diversité.

Le disque protosolaire

De nombreuses questions restent en suspens concernant l'évolution de la température durant la phase de condensation et si cette température fut suffisante pour vaporiser les premiers grains de poussières. On ignore également quel fut le ciment qui maintena les grains condensés jusqu'à former des objets solides de l'ordre d'un mètre de diamètre. Pour expliquer à la fois la formation des planètes et des astéroïdes, leur existence et leur composition chimique, nous savons qu'au moins trois facteurs interviennent :

- La **lumière** : pour étonnant que cela soit, la pression de radiation exercée par les photons permet de déplacer les corps les plus légers, c'est le principe utilisé pour "propulser" les voiles solaires. De microscopiques particules de métaux, de roche, de glace et de gaz présents dans le disque protosolaire se sont ainsi rassemblés.
- La **gravité** : la masse la plus grande attire la plus petite et c'est l'effet boule de neige. Le centre du disque protosolaire s'effondrant sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité, un champ gravitationnel se développa et commença à différencier les éléments en fonction de leur masse; les métaux et les roches se rapprochèrent du futur Soleil tandis que les glaces et les gaz, beaucoup plus légers, restèrent à bonne distance.
- La **chaleur** : la température centrale du disque protosolaire augmentant jusqu'à dépasser 2000°C, à quelques millions de kilomètres de distances les glaces sont passées de l'état à l'état de vapeur par sublimation. Ces éléments volatils ont ensuite été poussés vers l'extérieur du disque protosolaire, au-delà de la ceinture d'astéroïdes.

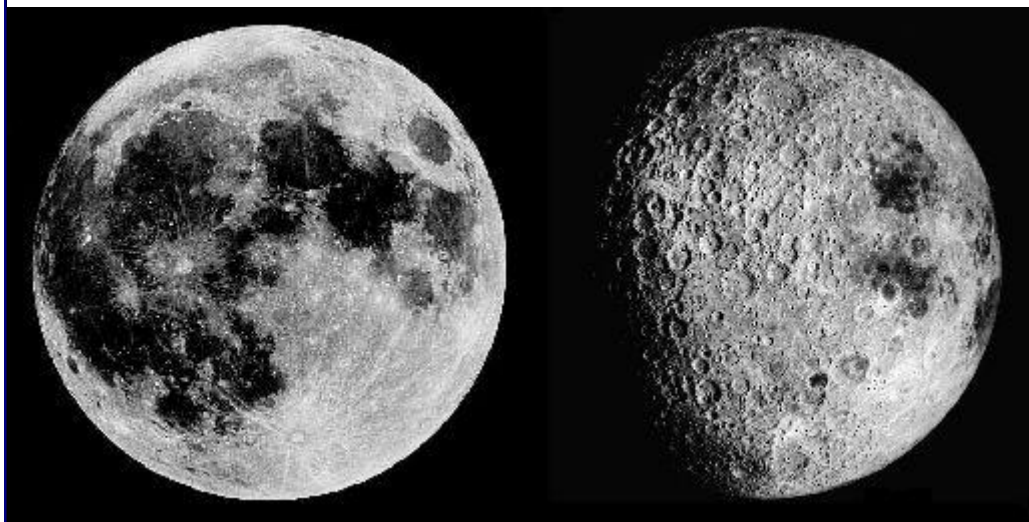


T Tauri est la représentante emblématique d'un jeune système stellaire né voici quelques millions d'années, assez semblable à ce que le système solaire devait ressembler à la même époque. Le halo bleuté est constitué d'un mélange de poussières circumstellaires et des résidus ayant donnés naissance à T Tauri. Cet astre est en fait un système binaire dont les deux composantes sont visibles au centre et légèrement au sud-est de l'image. Cette photographie a été prise en infrarouge avec une optique adaptative fixée sur le télescope du CFH. Document [CFHT](#).

Les chercheurs pensent en effet que la nébuleuse protosolaire produisit rapidement une température de 1700 à 2300°C, en particulier dans la région des astéroïdes à 2.5 UA. Car en fonction de la température nous savons que des réactions chimiques spécifiques se produisent et expliquent le paysage diversifié du système solaire. Nous savons que c'est vers 2000°C qu'apparaît le calcium, l'aluminium, le magnésium et le titane. A 1000°C subsistent les silicates et les oxydes métalliques. Vers -100°C l'eau devient glace entraînant une chute globale de la pression, et vers -250°C le méthane se glace. Cette distribution est confortée par la théorie de l'accrétion qui explique par ailleurs bien l'existence de deux types de planètes : les planètes telluriques proches du Soleil, et les planètes gazeuses, plus éloignées.

L'aggrégation des planétésimaux en objets de la taille des planètes est un autre défi. Il est possible que le processus d'accrétion ne démarra qu'une fois les planètes géantes, et Jupiter en particulier, provoquèrent suffisamment de perturbations pour briser les anneaux du système protoplanétaire. Il est également possible que la seconde vague d'impacts météoritiques visible sur la surface de la Lune et remontant à 3.8 milliards d'années représente le dernier enregistrement de cette accrétion forcée. Ces questions demeurent sans réponses. Que s'est-il passé ensuite ?

Les cicatrices du temps

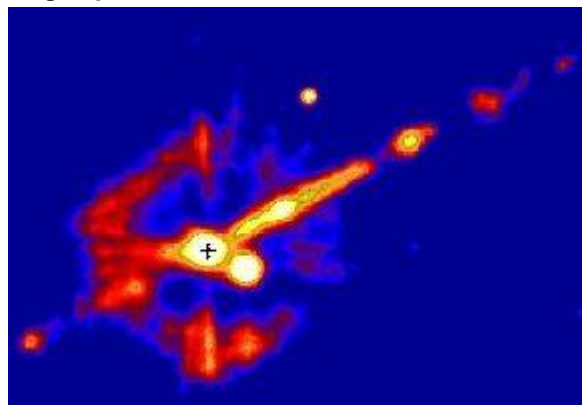
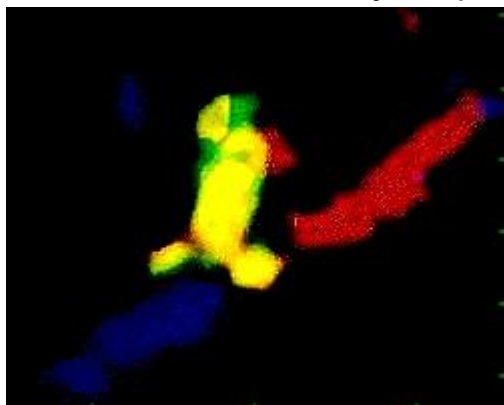


La Lune témoigne dans ses chairs que la naissance du système solaire fut violente. A gauche son visage habituel qui ne fut que légèrement exposé aux impacts météoritiques, les grandes formations ayant eu le temps de se combler de lave. A l'inverse l'image de droite présente sa face cachée avec la Mer des Crises à l'extrême droite. Cette hémisphère témoigne d'un passé marqué par un bombardement météoritique intense qui n'a eu de cesse que voici quelques millions d'années. Document T.Lombry et [NASA/ApolloXVI](#).

En l'espace de cent milles ans le futur Soleil commença à émettre des jets de matière perpendiculairement à son plan de rotation, jets qui participèrent au transfert de son moment angulaire aux planètes (la vitesse de rotation de l'un est transférée aux planètes) et qui s'échappèrent dans l'espace à quelques centaines de kilomètres par seconde. Ces jets bloquèrent l'augmentation de son volume et favorisèrent la formation d'un anneau équatorial. De tels phénomènes ne sont pas exceptionnels et ont été observés dans les nébuleuses de Herbig-Haro telles HH111 et L1551, cette dernière contenant des enveloppes en forme de tore protostellaire et autour de quelques étoiles pour citer RW Auriga et BKL 1623-2418.

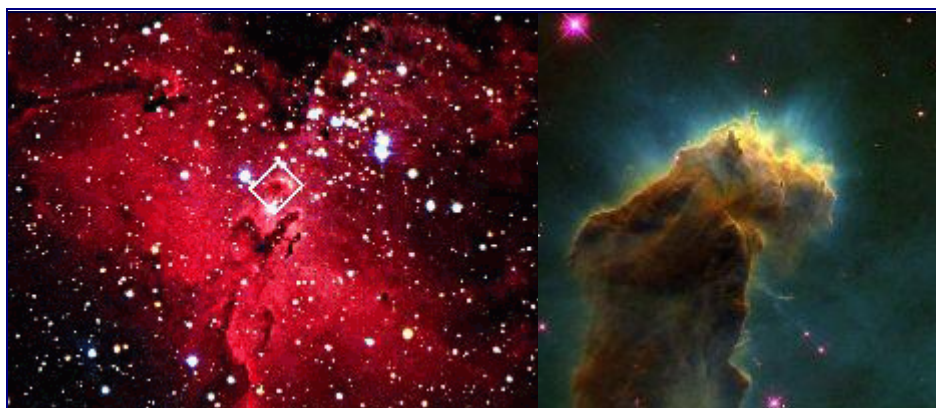
Selon le modèle stellaire élaboré par l'équipe de Willy Fowler le disque protosolaire s'effondra sur lui-même en l'espace de 50 millions d'années. Durant les 10 premiers millions d'années, alors que la nébuleuse se contractait, la température superficielle du proto-Soleil resta relativement constante, quelque 1300 K inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui. Sa luminosité décrivit également proportionnellement à sa dimension superficielle d'un facteur peut-être égal à 30. Il faudra encore attendre 40 millions d'années pour que l'effondrement gravitationnel porte la densité du coeur du futur Soleil à 150 g/cm^3 , 150 fois celle de l'eau et une température voisine de 10 millions de degrés pour déclencher la fusion de l'hydrogène dans son noyau. C'est alors que notre étoile s'illumina, au début rougeâtre pour rapidement devenir jaune et s'installer sur la Séquence principale du diagramme H-R qui matérialise l'évolution des étoiles.

La dynamique des nuages protostellaires



A gauche observé à 1.3mm de longueur d'onde dans la raie du CO au moyen du radiotélescope de 30m de l'IRAM, nous voyons ici clairement les jets polaires (en jaune) s'échapper de la proto-étoile 1623-2418 ainsi que son disque incliné (bleu et rouge). Document [VLA/IRAM](#). A droite l'étoile RW du Cocher est entourée d'un disque de poussières et émet un jet spectaculaire qui participe au transfert d'énergie vers le disque planétaire. Cette image a été prise dans les raies de l'OI et du SII par le [CFH/U.Strasbourg](#).

Alors que les astronomes désespéraient de pouvoir un jour observer ce phénomène, grâce au télescope spatial Hubble, l'équipe du Pr Hester de l'Université d'Arizona découvrit en 1995 une pépinière de jeunes étoiles au sein de la célèbre nébuleuse de l'Aigle, M16. La découverte fit sensation. Entourées de volutes de gaz et de poussières brun-ocre sur fond azur, on découvrait de scintillantes étoiles nées il y a à peine 7000 ans s'extraire de leur nuage dense de gaz et de poussière interstellaires.



Suspecté d'être une nurserie d'étoiles, le coeur de la nébuleuse M16 de l'Aigle abrite des nuages de poussières et de molécules organiques. La



matière en cours d'accrétion nous empêche encore d'observer les étoiles en formation. Cliquer sur les images pour les agrandir. **Cliquer ici** pour charger une animation de 760 KB. Documents [Astrooptik](#) et [STSCI/HST](#).

La formation des planètes (III)

Pourquoi la Terre à l'image des planètes telluriques qui lui ressemblent est-elle solide alors que les planètes géantes sont gazeuses ? Si nous pouvons répondre à cette question, nous comprendrions mieux l'évolution du système solaire et quelles sont les chances d'existence d'une planète similaire à la nôtre ailleurs dans l'Univers.

Nous avons vu comment le disque protoplanétaire s'était probablement différencié en fonction de différents facteurs, la lumière, la gravité et la chaleur. L'idée la plus logique qui vient à l'esprit est donc de se dire que si la Terre figure parmi les planètes inférieures, sa constitution actuelle, caractéristique des planètes telluriques dépend de la condensation des oxydes métalliques ou des silicates dans les régions internes du disque protosolaire.

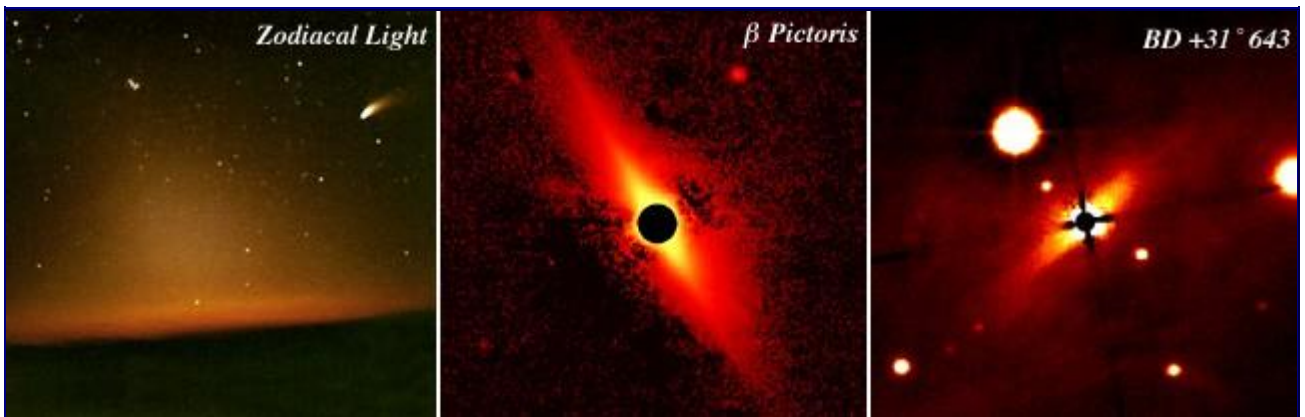
Jusqu'alors les scientifiques pensaient que les planètes telluriques s'étaient formées rapidement suite à l'effondrement gravitationnel du nuage de poussière, sa condensation ayant formé les corps les plus denses de Mercure, Vénus, la Terre et Mars.

La formation du système solaire	
	
Formation du système solaire (en anglais). AVI de 3.4 Mb Document NASA	Les orbites planétaires en ray-tracing. Mpeg de 1.9 MB. Université de York .

Grâce aux missions Apollo, on s'aperçut bientôt que cette théorie s'écroulait littéralement sous les impacts. En analysant la surface lunaire, on s'aperçut que la plupart des cratères d'impacts avaient été créés il y a environ 4.5 milliards d'années. Une seconde vague d'impacts météoritiques remontait à 3.8 milliards d'années. Les impacts furent donc très abondants durant cette période puis ils décreurent rapidement.

Cette observation raviva la théorie d'accrétion proposée par Otto Schmidt en 1944. Il supposait en effet que toutes les planètes s'étaient formées suite à l'accrétion de météorites, la surface lunaire et peut-être celle de Mercure représentant le dernier enregistrement de cette accrétion forcée. Selon Schmidt la poussière cosmique balayée par l'onde de choc de la supernova s'est graduellement transformé en petits grains qui, à l'instar de nos boules de neige sont devenus graviers, galets, rochers et finalement de petites planètes ou planétésimaux. Cette accrétion de poussières finit par former des corps de la taille de la Lune qui continuèrent à s'agglutiner. Par leurs dimensions ces corps n'étant pas très nombreux, à mesure que le temps s'écoula le nombre de collisions entre planétésimaux diminua.

Cette théorie explique aussi pourquoi les planètes géantes en sont toujours au stade primitif de la formation, car de moins en moins de planétésimaux ont pu fusionner sur la même période de temps. Selon George W. Wetherill du Carnegie Institution de Washington il faut compter environ 100 millions d'années pour que des fragments de 10 km de diamètre forment un objet de la taille de la Terre. Selon un nouveau modèle développé par Kenyon et Bromley et que nous allons voir, ce temps d'accrétion pourrait être cent fois plus rapide.



De nombreuses étoiles âgées de quelques millions d'années présentent un disque circumstellaire constitué de poussières. Cette structure apparaîtrait durant la dernière phase d'accrétion. Dans les quelques millions d'années qui suivent cette poussière servira de matière première à la formation des planétésimaux, des comètes et des planètes qui peut-être orbiteront autour de ces étoiles. A gauche, la lumière zodiacale, constituée de fines poussières abandonnées par les comètes actives et les astéroïdes entrant collision dans le système solaire est la seule trace ténue qu'il reste de la poussière du disque protoplanétaire solaire. A droite, les disques circumstellaires de Beta Pictoris et de BD+31°643 sont plus jeunes que les étoiles qu'ils abritent et sont la preuve que cette poussière a récemment été formée autour de ces étoiles. Documents aimablement communiqués par [David Jewitt](#), IfA Hawaii.

La nuance apportée par Nakano en 1987 suppose qu'un disque de poussière très mince se forma autour du Soleil, entouré de nappes de gaz concentriques. Le disque contenant de nombreuses masses à forte inertie se fragmenta au bout d'un million d'années pour former des "planétoïdes", roches indépendantes de quelques centaines de kilomètres de diamètre, entourées d'une atmosphère gazeuse très dense. L'accrétion de ces planétoïdes donnera naissance aux planètes. Les planétoïdes les plus proches du Soleil étaient constitués des plus petits agrégats de matière et formèrent les planètes telluriques. Les planétoïdes plus volumineux ont formés les planètes géantes tandis que des planétoïdes sans gaz formèrent Uranus et Neptune.

Simuler pour comprendre

En 2004 [Scott Kenyon](#) et [Benjamin Bromley](#) ont simulé sur ordinateur un nouveau modèle de disque protoplanétaire contenant un milliard de particules-tests représentant autant de planétésimaux de 1 km de diamètre gravitant autour d'une étoile centrale telle que le Soleil.

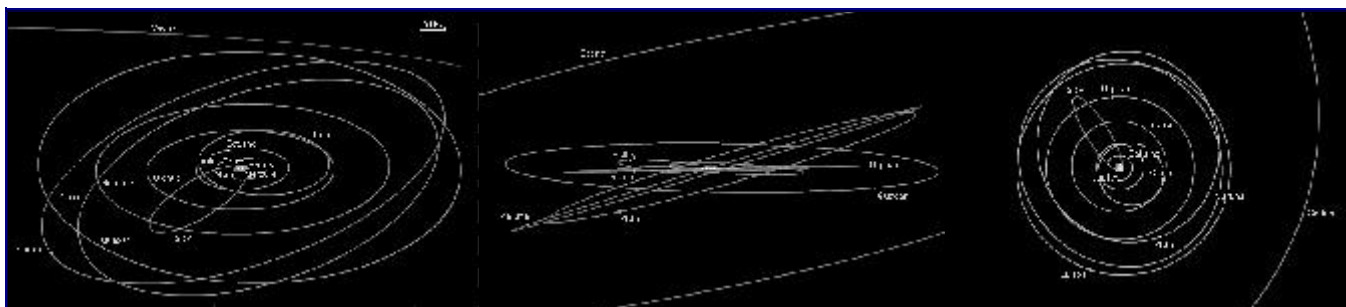
Ils ont découvert que le processus de formation des planètes était remarquablement efficace. Au commencement les collisions entre planétésimaux se produisent à des vitesses assez lentes, permettant aux objets qui se heurtent de fusionner et d'accroître leur masse. A une distance voisine de celle de la Terre (1 U.A) il faut compter seulement 1000 ans pour que des objets de 1 km se transforment en objet de 100 km. 10000 ans plus tard ces objets se sont transformés en protoplanètes de 1200 km de diamètre et il faut encore attendre 10000 ans pour obtenir des protoplanètes de 2000 km de diamètre. Des objets de la taille de la Lune peuvent donc se former en l'espace de 20000 ans.

Pendant que les planétésimaux du disque se développent par accrétion, leur pesanteur s'accroît en parallèle. Lorsque ces objets atteignent 1200 km de diamètre, ils commencent à perturber les plus petits. Par effet gravitationnel les gros planétésimaux donnent de l'impulsion aux plus petits qui gravitent si rapidement qu'il se heurtent au lieu de fusionner, ils se pulvérisent et augmentent la quantité de poussière dans l'environnement immédiat des protoplanètes. Tandis que ces dernières continuent à accumuler des planétésimaux par accrétion-fusion, les fragments restants se transforment progressivement en poussière interplanétaire. Cette poussière se forme donc à la même distance que la planète et sa température indique donc la température de la planète en cours de formation. Ainsi, la poussière qui suit Vénus sur son orbite est plus chaude que la poussière orbitant à hauteur de la Terre. Si une exoplanète en cours de formation est invisible, on peut malgré tout la détecter à travers le nuage de poussière qui s'agglomère autour d'elle et qui émet un rayonnement infrarouge.

Selon Kenyon et Bromley la taille des plus grands objets contenus dans le disque protoplanétaire détermine le taux de production de la poussière. Cette quantité est maximale lorsque les planétésimaux mesurent 1200 km.

Aujourd'hui, le modèle planétaire proposé par Kenyon et Bromley couvre seulement une fraction du système solaire, de l'orbite de Vénus jusqu'à la Ceinture des astéroïdes ainsi que la formation de la

Ceinture de Kuiper. A l'avenir, ils projettent d'inclure dans leur modèle les orbites de Mercure et de Mars. La prochaine étape sera de modéliser la formation de Jupiter et de Saturne.




Voici trois vues tridimensionnelles représentant les orbites des principaux astres du système solaire. A gauche une vue oblique, au centre une vue dans le plan de l'orbite terrestre et à droite une vue à la verticale du Soleil. Le champ de chaque image couvre environ 50 UA. Document de l'ESA où vous trouverez un simulateur Java interactif programmé par Dario Izza de l'ACT.

Les atmosphères planétaires

Quant à la question de savoir pourquoi l'atmosphère des planètes telluriques est différente de ce celles des planètes géantes, il faut se tourner vers le Soleil pour trouver la réponse. Le rayonnement solaire est en effet chargé électriquement et soufla les résidus ionisés de la nébuleuse primitive en l'espace de 50 millions d'années. Nakato suggère qu'en l'espace de 2 millions d'années, les quatre planètes les plus proches du Soleil devinrent solides et s'entourèrent d'une atmosphère. Il fallut attendre 50 millions d'années pour aboutir à la structure de Jupiter et Saturne, 1.3 milliards d'années pour former Uranus et 4 milliards d'années pour former Neptune. En se refroidissant, le gaz contenu dans l'écorce des planètes telluriques s'est libéré pour former leur atmosphère. Mais trop peu massive les composés volatils de Mercure, Vénus, de la Terre et dans une moindre mesure ceux de Mars se sont évaporés en quelques millions d'années. Seuls les composés réfractaires qui ne s'évaporent pas à faible température ont été conservés et s'est ainsi que les silicates et autres granites servirent de soubassement à l'écorce des planètes telluriques.

Les quatre planètes géantes ayant accumulé de nombreux planétoïdes et beaucoup de gaz elles se sont refroidies loin du souffle ionisant du Soleil et gardèrent leur atmosphère primitive. Entre-temps, Pluton quitta une orbite instable pour graviter seule aux confins du système solaire, croisant de temps en temps l'orbite de Neptune et des comètes qui pénétraient dans le système solaire. Enfin Sedna, découverte en 2003, est en fait un astéroïde probablement issu du Nuage d'Oort suite à une perturbation gravitationnelle.



Johannus Kepler

Si le cercle est la seule orbite fermée avec l'ellipse, pourquoi les planètes et les satellites orbitent-ils sur des orbites elliptiques et non pas circulaires ?

En 1609 Kepler démontra mathématiquement que les planètes orbitaient autour du Soleil sur des ellipses. Pourquoi pas un cercle ? La trajectoire des planètes et des satellites seraient un cercle s'ils se déplaçaient de façon rigoureusement orthogonale par rapport à l'axe planète-Soleil ou planète-satellite sans subir la moindre perturbation. Or tous les corps célestes sont pratiquement en interactions mutuelles les uns avec les autres de façon plus ou moins prononcée, les faisant dévier de leur trajectoire. Les trajectoires des planètes et des satellites sont des coniques caractérisées par le fait que la force d'attraction est inversement proportionnelle au carré de la distance. On fait donc référence à l'ellipse par abus de langage, en faisant en réalité une grossière approximation car en toute rigueur aucune trajectoire planétaire n'est vraiment elliptique.

A quelques variantes près, la théorie d'accrétion explique parfaitement bien la genèse du système solaire. Mais qu'en est-il de la genèse des planètes ? Cette théorie explique les flots de magma et les éruptions volcaniques que connu la Terre dans le passé. Le processus d'accrétion eut également des conséquences sur l'évolution thermodynamique de toutes les planètes. En ce qui concerne la Terre, le martèlement incessant des impacts météoritiques a fini par réchauffer l'intérieur, mélangeant les débris cosmiques aux

constituants du manteau. Cette contribution énergétique est aussi importante que les décharges électriques dans l'atmosphère. Entre 200 et 400 km de profondeur, un océan de magma entra en activité pendant des millions d'années et donna naissance aux éruptions volcaniques. Cette activité sera complétée par l'impact de gros planétésimaux et de comètes pouvant avoir la taille de la Lune ou même de Mars.

Pendant cette période, sur la troisième orbite se trouvait une planète rougeoyante très hostile, dont le sol était parsemé de lacs de laves portés à plus de 1100°C et l'atmosphère envahie de gaz carbonique suffocants. Une épaisse couche nuageuse nous voilait le visage de la Terre. Ce n'est qu'au bout d'un milliard d'années environ que le visage de Gaïa se métamorphosa. Après une longue période de dégazage qui donnera toute l'eau des océans, son atmosphère devint orange, zébrée de nuages de méthane et d'ammoniac. La température ambiante redescendit progressivement sous 40°C. Bientôt, le voile se dissipa, abandonnant nonchalamment quelques nuages dans l'atmosphère et nous laissant découvrir le dessin finement ciselé des mers et des continents qui porteront la vie.



Généralités

L'Académie Nationale des Sciences américaine définit une planète comme étant un corps de moins de 2 masses joviennes tournant autour d'une étoile. Et de fait, autour du Soleil gravitent onze planètes. En s'éloignant de lui nous trouvons dans l'ordre Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton et Sedna. Chacune gravite sur une orbite stable en accord avec les lois de Kepler et de Newton, en équilibre avec toutes les autres planètes. Les positions qu'elles occupent s'accordent également avec la loi empirique de Titius-Bode qui fonctionne jusqu'à Uranus^{3[5]}.

Le Soleil n'est pas la seule étoile à disposer d'un cortège planétaire et on compte aujourd'hui une bonne centaine d'exoplanètes gravitant autour d'autant de systèmes stellaires. Si le sujet vous intéresse, je vous propose de lire l'article que j'ai consacré aux exoplanètes.

Pour revenir au système solaire, toutes les planètes, à l'exception de Pluton et Sedna gravitent dans un même plan baptisé l'écliptique qui est large de 17 degrés et dont la projection sur le ciel couvre les douze constellations du zodiaque, du Bélier aux Poissons. Cela ne sert donc à rien de rechercher une planète dans la constellation d'Orion, vous ne la trouverez pas.

Depuis l'Antiquité, les observateurs connaissaient les cinq premières planètes jusque Saturne, les seules visibles à l'oeil nu tels des astres errants parmi les constellations. Les autres planètes, beaucoup trop pâles ne furent découvertes qu'à partir de la fin du XVIII^{ème} siècle sur base des perturbations orbitales que subissaient les planètes géantes Jupiter et Saturne. A cette époque, on recensa également les comètes et la ceinture d'astéroïdes, composée de rochers indépendants, éparpillés entre l'orbite de Mars et de Jupiter.

A l'inverse des étoiles, les planètes n'ont pas l'énergie suffisante pour produire leur propre luminescence. Leur éclat ne provient que de la réflexion de la lumière qu'elles reçoivent du Soleil. C'est le pouvoir

réfléchissant (l'albédo) de leur surface qui leur donne plus ou moins de clarté, qui varie bien entendu en fonction de leur phase et de la distance.



Tailles respectives des planètes par rapport au Soleil

Il faut distinguer les planètes inférieures (Mercure et Vénus) des planètes supérieures (Mars jusque Sedna). Mercure et Vénus étant situées en deçà de l'orbite terrestre, elles peuvent occasionnellement transiter devant le disque du Soleil. Vues depuis la Terre, ces deux planètes ne s'éloigneront pas à plus de quelques dizaines de degrés du Soleil. Cet écart leur permet de présenter des phases comme la Lune au cours de son évolution. Elles brilleront avec le plus vif éclat lorsqu'elles seront très rapprochées de la Terre, peu de jour avant ou après la conjonction inférieure, en présentant un croissant très échancré. Invisibles en pleine journée car noyées dans le rayonnement solaire, elles seront discernables à l'aube ou au crépuscule comme des étoiles de première grandeur. Souvent Vénus devient "l'étoile du berger".

Les planètes supérieures seront donc les seules à pouvoir être observées en pleine nuit, dans l'une des douze constellations du zodiaque. Ce n'est que lorsque ces planètes seront en quadrature, formant un angle droit avec la Terre et le Soleil, qu'elles présenteront une légère phase gibbeuse. Les planètes supérieures tournent toutes dans le même sens autour du Soleil mais il arrive qu'elles accusent un mouvement rétrograde parmi les constellations, pour se diriger en sens opposé pendant quelques semaines avant de reprendre une course normale. Ce phénomène est induit par les vitesses différentielles des planètes sur leur orbite.

Tous ces mouvements sont aisément quantifiables et peuvent être simulés sur ordinateur, ou mécaniquement dans les planétariums afin de prédire les conjonctions des planètes entre elles, avec la Lune ou les étoiles ou pour prédire d'autres phénomènes qui obéissent à la mécanique céleste, comme les éclipses.

A la lumière des découvertes spatiales^[6], nous pouvons à présent dresser un résumé des connaissances que nous avons acquises sur toutes les planètes. Pluton et Sedna restent les seules planètes ignorées des sondes spatiales, mais les relevés faits à partir du sol ou par le Télescope Spatial Hubble nous donnent déjà quelques éléments concernant leur structure. Cette revue est détaillée dans les autres pages de ce dossier.

[1] Consulter les différents chapitres du dossier consacré à la [philosophie des sciences](#) pour plus d'information.

[2] Un modèle similaire faisant appel à des tourbillons fut déjà proposé par Descartes en 1796 dans son "Exposition du Système du Monde".

[5] Consulter le dossier consacré aux [astéroïdes](#).

[6]1 1Pour tout savoir sur la planétologie, consulter les livres publiés par la NASA (Superintendent of Document), les magazines "Icarus", "Earth, Moon and Planets", "National Geographic" ainsi que les ouvrages de K.Beatty, B.O'Leary et A.Chaikin, "The New Solar System", Sky Publishing/Cambridge University Press, 1990 - R.Greenley et R.Batson, "The NASA atlas of the solar system", Cambridge University Press, 1997, autant de références toujours richement documentées. Vous trouverez un résumé de l'exploration planétaire dans K.Weaver et L.Pesek, "Voyage to the Planets", National Geographic, 138, aug 1970, p147 - R.Gore, "The Planets - between fire and ice", National Geographic, 167, jan 1985, p4.