

Le scénario du Big Bang

C'était, il y a 13.7 milliards d'années
Toutes la matières que nous
connaissons aujourd'hui est issues de
d'un point infiniment petit.
L'univers était très dense et très
chaud.

Les Preuves du Big Bang

1. Expansion de l'univers

- **Albert Einstein** après avoir mis au point la théorie sur la gravitation de la relativité générale, l'idée vient à Einstein d'utiliser ses équations pour décrire l'univers entier. Ses équations lui montrent qu'il existe deux solutions possibles quant à l'attitude de l'univers : soit celui-ci est en expansion, soit il est en contraction. Mais Einstein avait pour idée que l'univers était stable, immobile. C'est pourquoi il bidouilla ses équations en y ajoutant une constante cosmologique appelée lambda

1. Expansion de l'univers

Chronologiquement, c'est **Alexandre Friedmann** (Savant russe né à Saint-Petersbourg en 1888) qui fut le premier à publier des travaux contestant la forme statique du modèle d'Einstein (lequel a rejeté pendant plus de dix ans l'idée d'univers évolutif). Pour ce faire, il s'attela à la compréhension de la théorie d'Einstein et décida de se débarrasser de la fameuse constante cosmologique qu'il qualifia de superflue. Il aboutit donc, comme **Einstein** au départ, à deux solutions possibles et il en déduit que soit l'univers est en expansion continue, soit il évolue vers un effondrement, la gravitation l'emportant sur l'expansion. Dans ce cas, toute la matière se concentre en un point de volume nul et ultra dense à partir duquel l'univers est de nouveau impliqué dans une expansion et ainsi de suite à l'infini. Malheureusement les solutions de Friedmann sont reniées par Einstein au départ, ce qui conduira les équations de Friedmann à sombrer dans l'oubli

1. Expansion de l'univers

C'est en s'appuyant sur ces équations que l'homme qu'on peut considérer comme père officiel parvint à formuler l'hypothèse de la théorie du big-bang. Cet homme était un prêtre belge du nom de **Georges Lemaître**. A la différence d'Einstein et de Friedmann, Lemaître intègre les observations des astronomes à ses calculs. Et c'est notamment à l'aide les observations de **Hubble**, selon lesquelles les galaxies se fuient, que Lemaître imagine et concrétise un mariage entre la relativité générale et ces observations selon lesquels l'univers est en expansion. Il bénéficiera de l'appui d'**Eddington** (le plus grand astronome de l'époque) et sera ainsi propulsé au top de la renommé scientifique.

Preuve expérimentale du Big Bang

Commençons tout d'abord par la première preuve : elle a été mise en évidence par Hubble en 1929. Il énonce alors la loi Hubble selon laquelle les galaxies s'éloignent de nous avec une vitesse qui dépend de la distance à laquelle elles se trouvent de nous. La vitesse d'une galaxie est égale à la distance à laquelle elle se trouve, multipliée par une constante H : plus elle est loin, plus elle va vite ...

- Loi de Hubble
 - $V = H_0 \times D$ (H_0 = Constante de Hubble)

« si les galaxies semblent nous fuir à plus grande vitesse selon leur éloignement c'est car l'univers est en expansion »

1. Expansion de l'univers

Et c'est précisément cette expansion qui appelle l'idée de big-bang car si on remonte le film de l'expansion à l'envers, on obtiendra un volume minuscule contenant toute la matière de l'univers.

La théorie qui n'a pas encore de nom va être baptisée par un de ses plus fervents adversaires : Fred Hoyle. En effet, voyant arriver l'abbé Lemaître à un congrès de cosmologie, celui-ci s'exclame : « Mais c'est Monsieur Big-bang ! »

*Alors que la thèse du Big-bang est soutenue par la majorité des astronomes, un astrophysicien anglais original, **Sir Fred Hoyle**, a toujours défendu l'idée controversée que l'Univers n'est pas issu d'une hypothétique explosion. Mais qu'au contraire Il conserverait en permanence le même état par un processus de création continue de matière.*

1. Expansion de l'univers

Le noir de la nuit comme preuve du big bang

- Dans un univers statique, les étoiles existent depuis toujours. L'énergie lumineuse s'accumule depuis un temps infini. Le ciel devrait donc briller d'un éclat infini.....
- L'Univers est né il y a 14 milliards d'années dans le big bang. Les étoiles et les galaxies n'ont pu émettre leur lumière avant. Ceci se traduit par une limite de l'observation à une distance de 14 milliards années-lumière : ce que nous voyons n'a pu naître avant l'Univers. Toutefois, un autre ingrédient renforce l'explication du noir de la nuit : le cosmos n'est pas immobile, il est en expansion.

Les Preuves du Big Bang

2. Composition chimique de l'univers

Le modèle prévoit que seuls quelques éléments chimiques ont pu être synthétisés au moment du big bang.

L'Univers à grande échelle possède une caractéristique très particulière. Sa composition s'avère dominée par les éléments chimiques les plus légers et les plus simples. L'hydrogène et l'hélium constituent ainsi 98% de notre Soleil.

En outre, il n'existe pas d'élément chimique stable dont la masse atomique vaut 5 ou 8 (c'est-à-dire composé d'autant de nucléons). Une bonne raison pour que la nucléosynthèse primordiale, «alchimie des origines», s'arrête à l'hélium.

Les Preuves du Big Bang

Exemple du deutérium (^2H)

Le deutérium est le plus fragile de tous les noyaux et ne résiste pas aux températures typiques des milieux stellaires où il est détruit par les réactions nucléaires. Son origine ne peut être expliquée que par le Big-Bang : la température élevée, aux débuts de l'Univers, a permis sa fabrication et le refroidissement rapide, dû à l'expansion, a permis sa conservation.

	$4\text{He}/\text{H}$	D/H
Calculs	0.248	2.6×10^{-5}
Observations	0.232 - 0.258	$(2.4-3.2) \times 10^{-5}$

⇒ Accord entre les prédictions et les observations

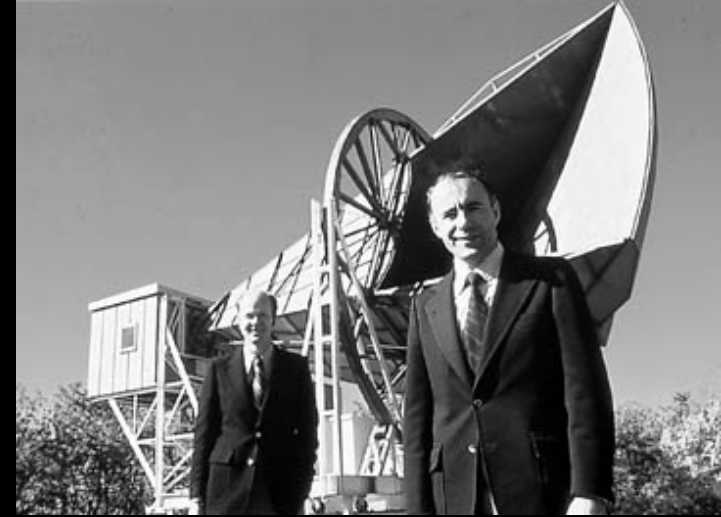
Les Preuves du Big Bang

3. Le rayonnement fossile

La première image de l'Univers.

L'idée est très simple. Si l'Univers se trouve en expansion, il a dû passer par une phase dense et chaude dans sa prime jeunesse. La matière s'est alors assemblée de manière très serrée. L'histoire ultérieure se résumera à sa dilatation et à son lent refroidissement. Pourtant, dès 1948, le facétieux physicien d'origine russe **George Gamow** note une conséquence inéluctable de ce scénario du big bang. La naissance du cosmos se serait accompagnée de l'émission d'un intense rayonnement. Certes, aujourd'hui, ce brouhaha primordial se serait singulièrement atténué, essoufflé, affaibli. Mais, le "rayonnement fossile" du cosmos, "fond diffus du ciel" ou "premier cri de l'Univers" devrait encore persister.

Découvert en 1965
par Penzias et Wilson et prédit dès
1948 par G. Gamow.

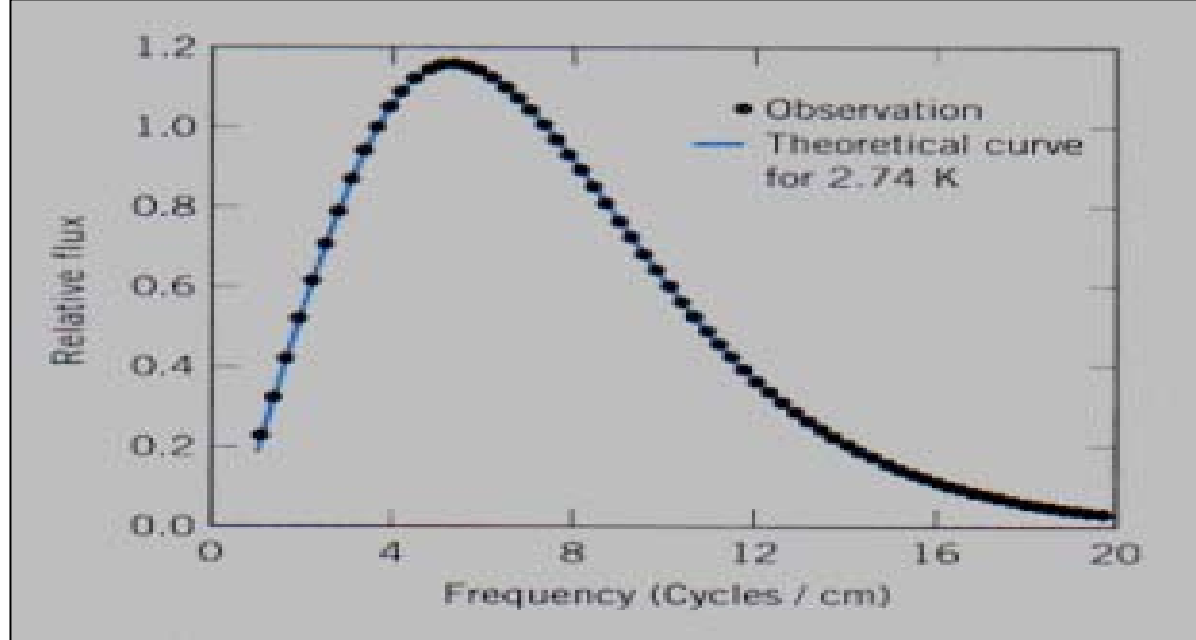


En 1965, deux jeunes radioastronomes du laboratoire de la Bell Telephone, Arno Penzias et Robert Wilson, ignorent ces travaux. Cependant, ils découvrent - par hasard - un fond diffus radio électrique qui envahit toute la voûte céleste. Le signal ne varie ni au fil du jour, ni au cours des saisons. Il est étranger au Soleil et à la Voie lactée. Penzias et Wilson viennent de démasquer le rayonnement fossile. Ils reçoivent le prix Nobel en 1978. C'est l'envolée.

3. Le rayonnement fossile

Première caractéristique relevée : le signal apparaît très homogène dans tout le ciel. Les spécialistes disent qu'il se comporte de manière "isotrope". Son intensité reste constante, quelle que soit la direction de visée. On peut en déduire qu'il puise sa source dans les régions les plus reculées. Il nous informe sur le passé lointain du cosmos.

Mais est-il vraiment parfaitement isotrope ?



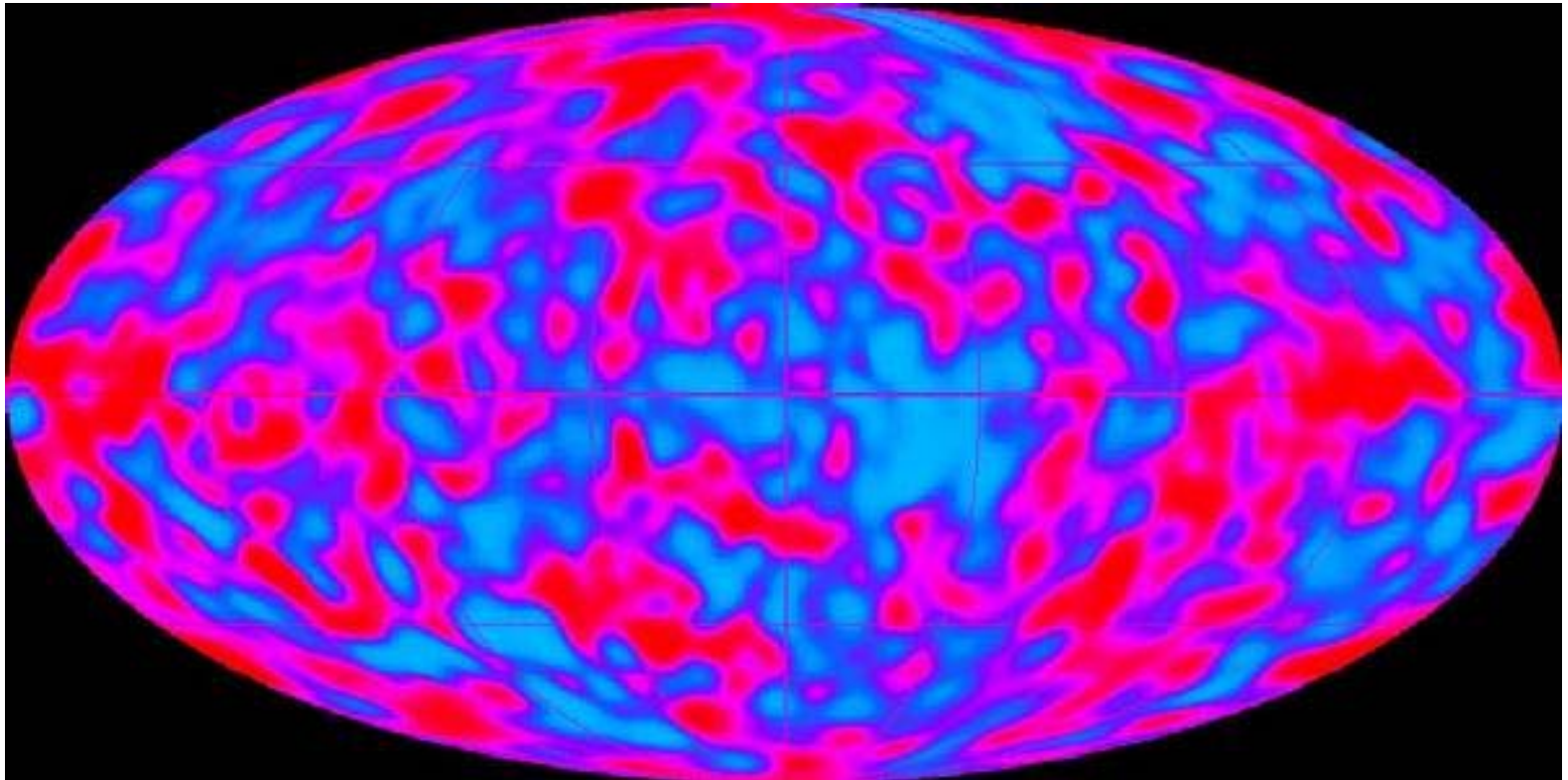
Seconde propriété : le bruit de fond se comporte comme le rayonnement d'un "corps noir", notent les physiciens. L'intensité de la rumeur relique suit la distribution théorique établie en 1900 par Max Planck. Celle-ci décrit l'émission idéale d'une substance chaude et opaque à l'équilibre, quelle que soit sa composition. Or la courbe trouvée présente un maximum, un "pic", vers trois millimètres de longueur d'onde. Ceci traduit la température effective du rayonnement et l'énergie collectée par l'antenne. On trouve environ trois degrés au-dessus du zéro absolu : c'est-à-dire 3 kelvins, soit -271 °Celsius à nos thermomètres plus classiques. Une valeur universelle à retenir. Elle fera date.

3. Le rayonnement fossile

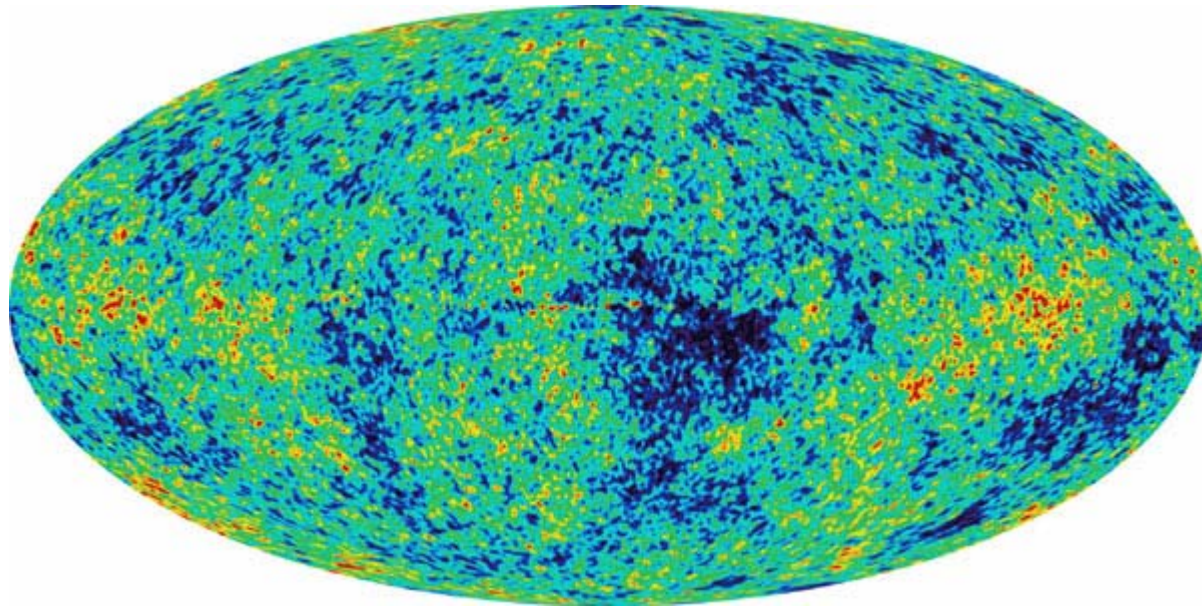
Il serait né à l'époque où l'Univers se composait de noyaux d'hydrogène et d'électrons portés à 3 000 degrés

La "lumière du big bang" aurait ainsi cheminé pendant 99,997% de l'histoire du cosmos. Cependant, l'expansion s'est poursuivie et les dimensions de l'espace se sont accrues d'un facteur 1 000. Dès lors, le rayonnement s'est affaibli et refroidi en conséquence. Sa température – sa vigueur – a été divisée par 1000. Elle a atteint les 3 degrés absolus constatés.

L'un des principaux attraits du rayonnement cosmologique tient à son extrême uniformité. Pourtant, paradoxe, ce n'est pas ce qui fascine le plus les spécialistes. Loin de là. On peut dire qu'ils se sont ingéniés à rechercher la faille : les petites incongruités dans un océan de tranquillité.
> *"L'effort a abouti en 1992 avec le satellite Cobe (Cosmic Background Explorer).*



Le rayonnement cosmologique fossile est une rumeur radio issue du fond des âges. Depuis sa découverte en 1965, il a été scruté sous toutes les coutures par les télescopes au sol et les instruments embarqués à bord de satellites ou dans des nacelles attachées sous des ballons. Ce fond diffus date d'environ 14 milliards d'années. Il transmet une cartographie des fluctuations de température qui agitait l'Univers primordial, 380 000 ans après sa naissance. Elles correspondent aux germes des futures galaxies. Les motifs de l'image comportent, enfouies, les réponses à d'importantes questions concernant la géométrie de l'Univers. Ici, la première photo détaillée établie par le satellite Wilkinson – Microwave Anisotropy Probe.



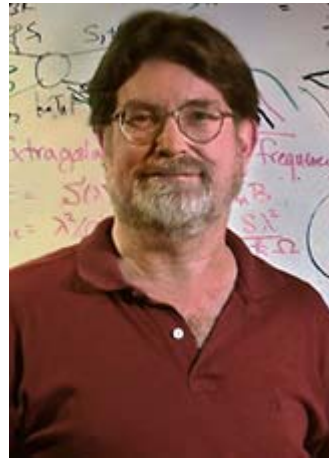
Prix Nobel de physique 2006

John C. Mather et George F. Smoot ont obtenu le prix Nobel de physique 2006 pour avoir montré que le rayonnement de fond cosmologique est anisotrope, et a les caractéristiques d'un rayonnement de type corps noir.

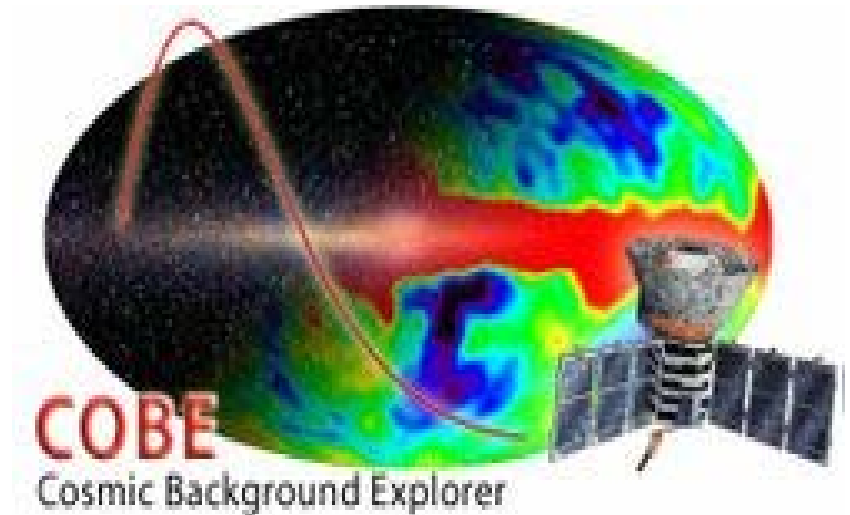
(Responsables du satellite COBE)



John C. Mather

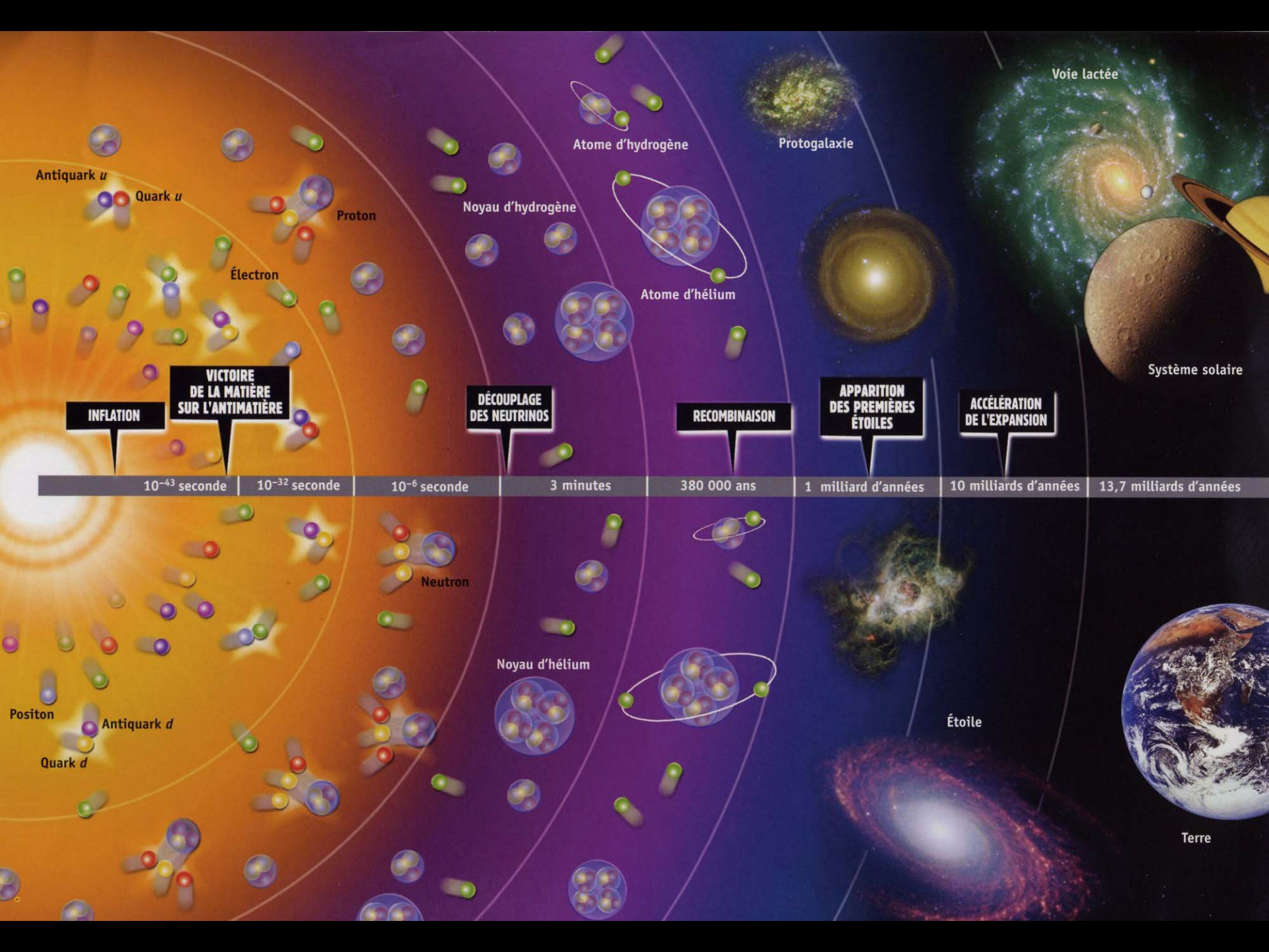


George F. Smoot



Nucléosynthèse et cycle de la matière dans l'univers





La synthèse primordiale

3 premières minutes de l'ère radiative:

Formation de 3 noyaux : **hydrogène**, deutérium, hélium

À $t \sim 300\,000$ ans, recombinaison :
formation des premiers atomes

L'abondance d'He observée est une preuve supplémentaire
en faveur du Big Bang

Le deutérium n'a pu être formé que durant le Big-Bang

Aujourd'hui : $d = 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ - $T = 2,73 \text{ K}$

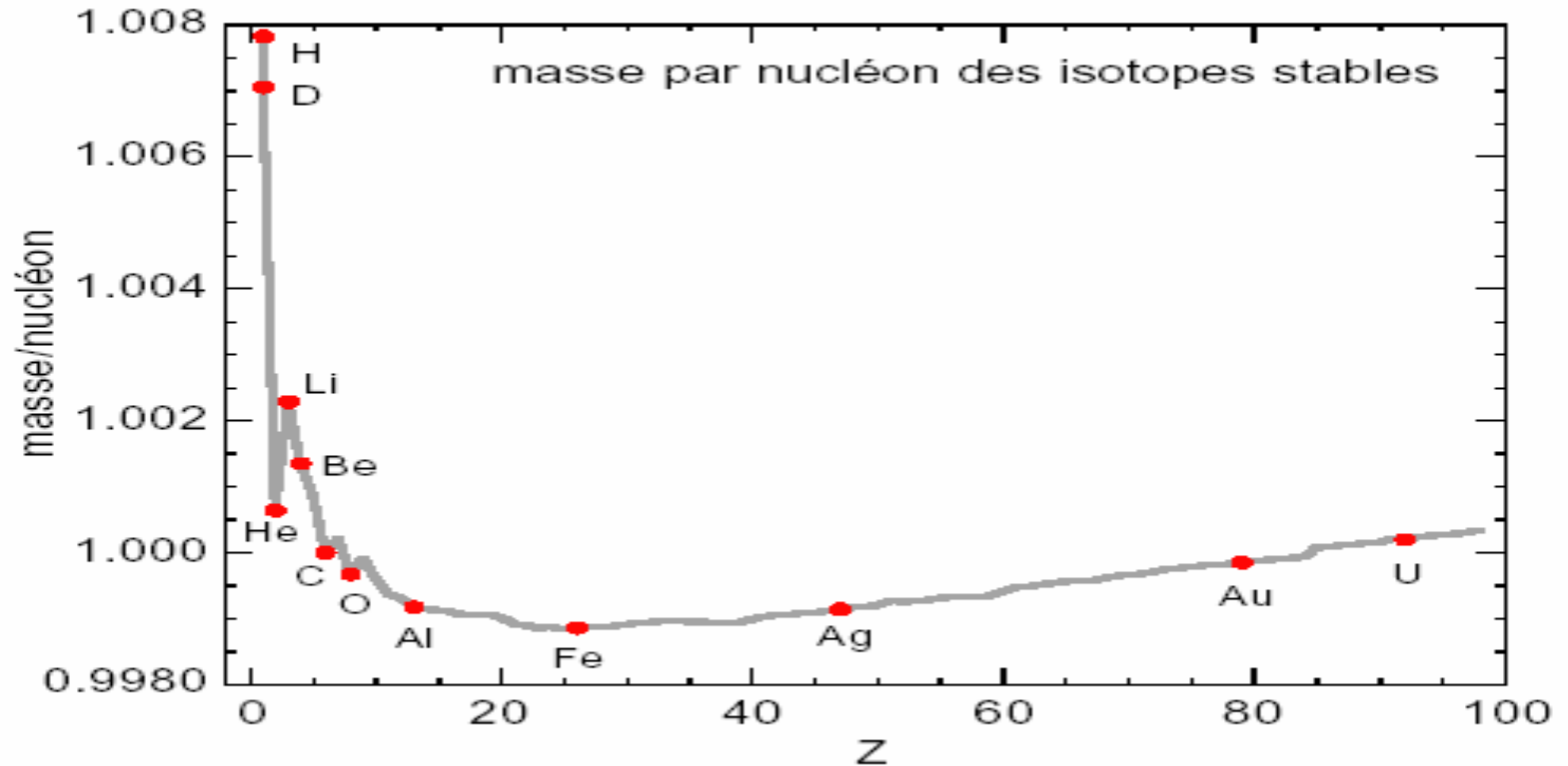
La synthèse stellaire par fusion nucléaire

Comment l'abondance des éléments était-elle répartie dans l'Univers ? Cette question était primordiale dans les années 1950 car celui qui pouvait y répondre avait une chance de comprendre comment la matière s'était formée à partir du Big Bang.

En 1946, **Fred Hoyle** publia un article de fond sur la nucléosynthèse stellaire. Adeptes de l'état stationnaire, Hoyle avait supprimé le Big Bang de son esprit et s'était vu contraint de créer les éléments chimiques à l'intérieur des étoiles. Son pressentiment était de bonne augure, même si la cause qu'il défendait était erronée. Il avait confiance en son idée car trois arguments venaient le reconforter. Il savait que quelques années auparavant Gamow avait tenté d'élaborer les éléments plus lourds que l'hélium dans le Big Bang. Or l'énergie du rayonnement baignait dans un froid si intense, 3000 K qu'à l'époque tous les processus de fusion avaient été figés.

Deuxième argument, depuis une bonne dizaine d'années, les spectres stellaires prouvaient que le Big Bang n'était pas la "panacée". Il existait trop d'étoiles de compositions différentes, les unes chaudes et riches en hydrogène, les autres froides mais riches en éléments lourds. Il était donc logique d'imaginer que ces éléments aient été fabriqués à l'intérieur des dites étoiles. Enfin, depuis l'article de **Bethe** sur le cycle CN, les physiciens nucléaires s'étaient rendus comptes que les réactions atomiques qu'ils analysaient *in vitro* avaient également lieu dans les étoiles.

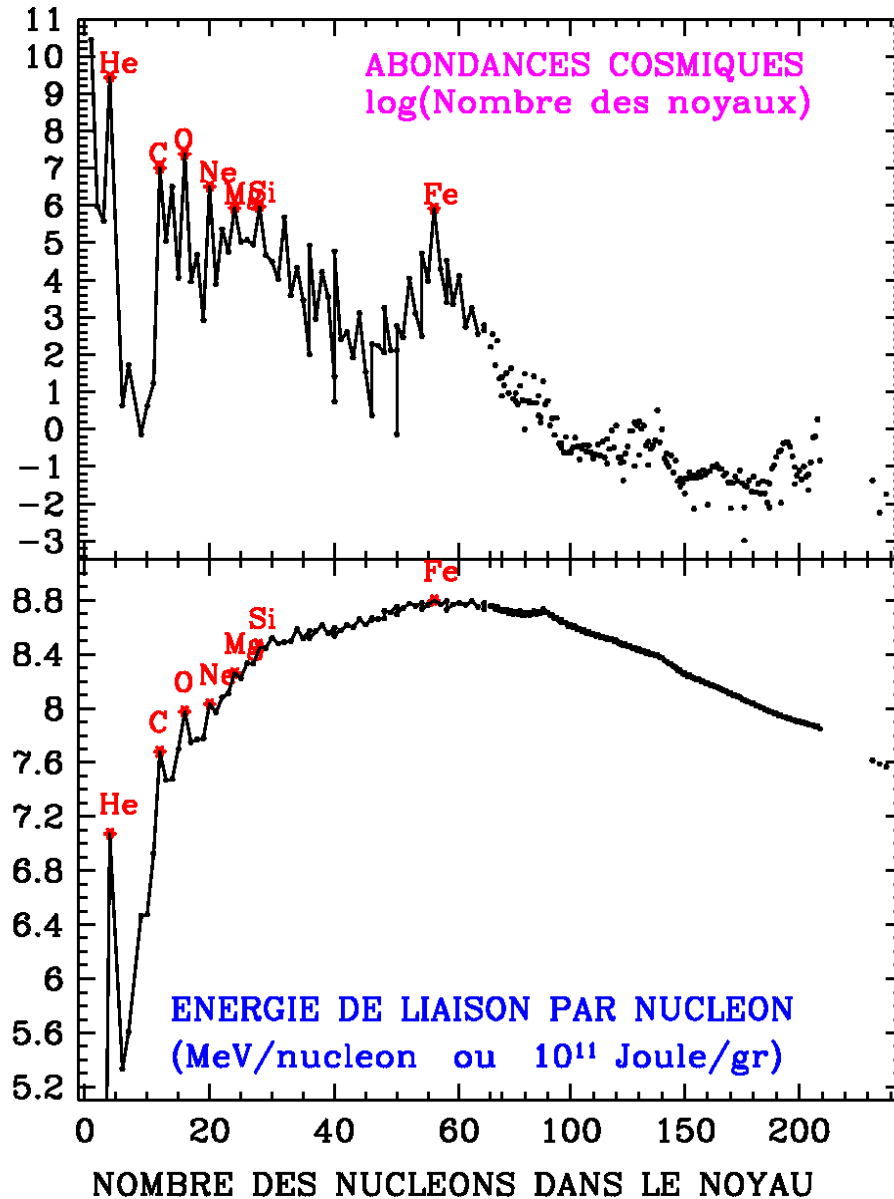
La synthèse stellaire par fusion nucléaire



La fusion de deux noyaux va dégager de l'énergie lorsque la somme de leurs énergies au repos est supérieur à l'énergie au repos du noyau résultant.

La fusion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd dégage de l'énergie jusqu'à la production du fer (Fe, Z=26, A=56). L'énergie du fer par nucléon est la plus faible – il est le noyau le plus stable. La fusion d'éléments plus lourd que le fer n'est pas possible dans les étoiles car l'énergie dégagé est indispensable à maintenir la stabilité de l'étoile.

La nucléosynthèse et l'abondance cosmique



Les atomes les plus abondants sont aussi ceux qui ont la plus grande énergie de liaison nucléaire

La panne de carburant : la phase géante rouge

Lorsque l'hydrogène du cœur devient insuffisant pour équilibrer la gravitation la contraction gravitationnelle reprend et la température augmente :

- l'hydrogène frais autour du cœur devient suffisamment chaud pour fusionner.
- L'Hélium du cœur fusionne à son tour ($T > 10^8$ K).
- L'étoile quitte la séquence principale

Pour une étoile comme le soleil

- Le cœur de l'étoile s'effondre à 1/50 de sa taille.
- Le diamètre de l'étoile augmente d'un facteur 10.
- La température de surface descend à 3500 K et la couleur devient rouge !!

La réaction nucléaire qui fusionne l'Hélium s'appelle Triple α (3α) :



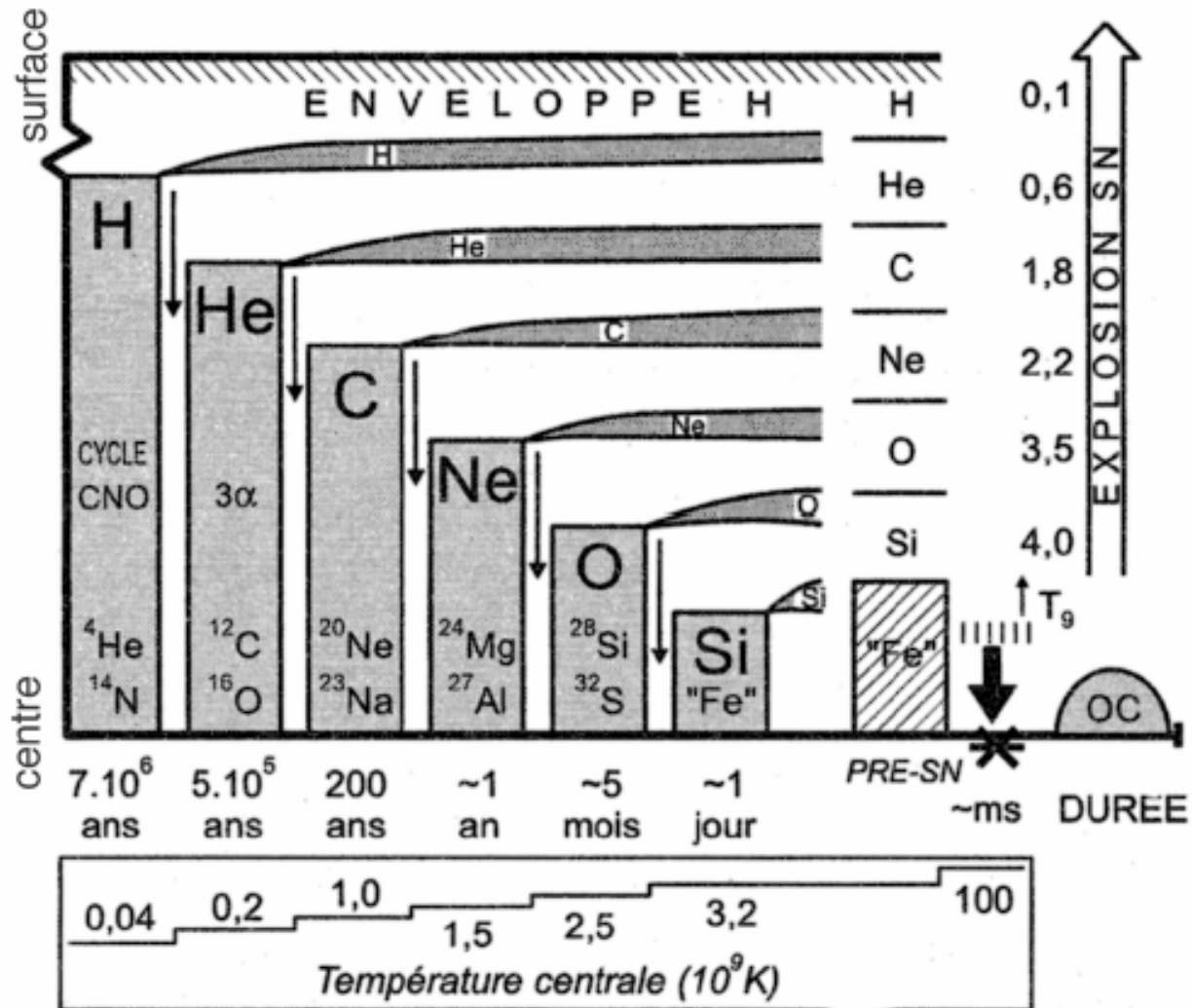
L'énergie dégagé par ce processus est 10 fois plus faible que celle dégagés par la fusion de l'Hydrogène. En conséquence, ce processus dure 10 fois moins longtemps et rapidement la contraction de l'étoile reprend car l'Hélium devient rare !!!

La fusion jusqu'au Fer

- Production d'Oxygène par capture de particule α à partir du carbone.
- La fusion du carbone produit Mg, Na, Ne
- La fusion de l'oxygène produit du silicium
- Le silicium ne fusionne pas avec lui même mais avec H et He et les éléments plus léger pour former S, Ar, Ca jusqu'au Fer.

La durée des fusions

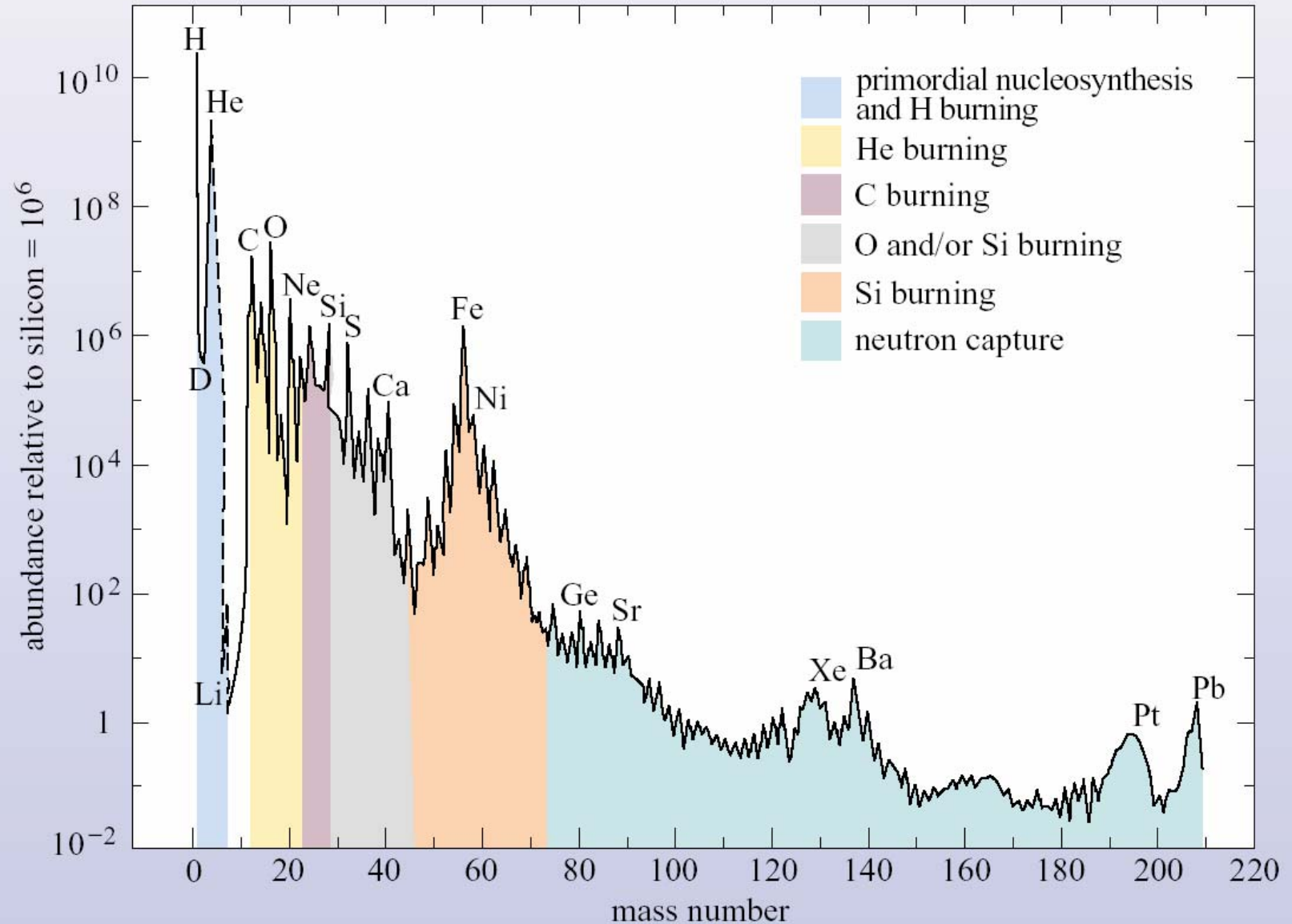
Etoile 25 fois la masse solaire



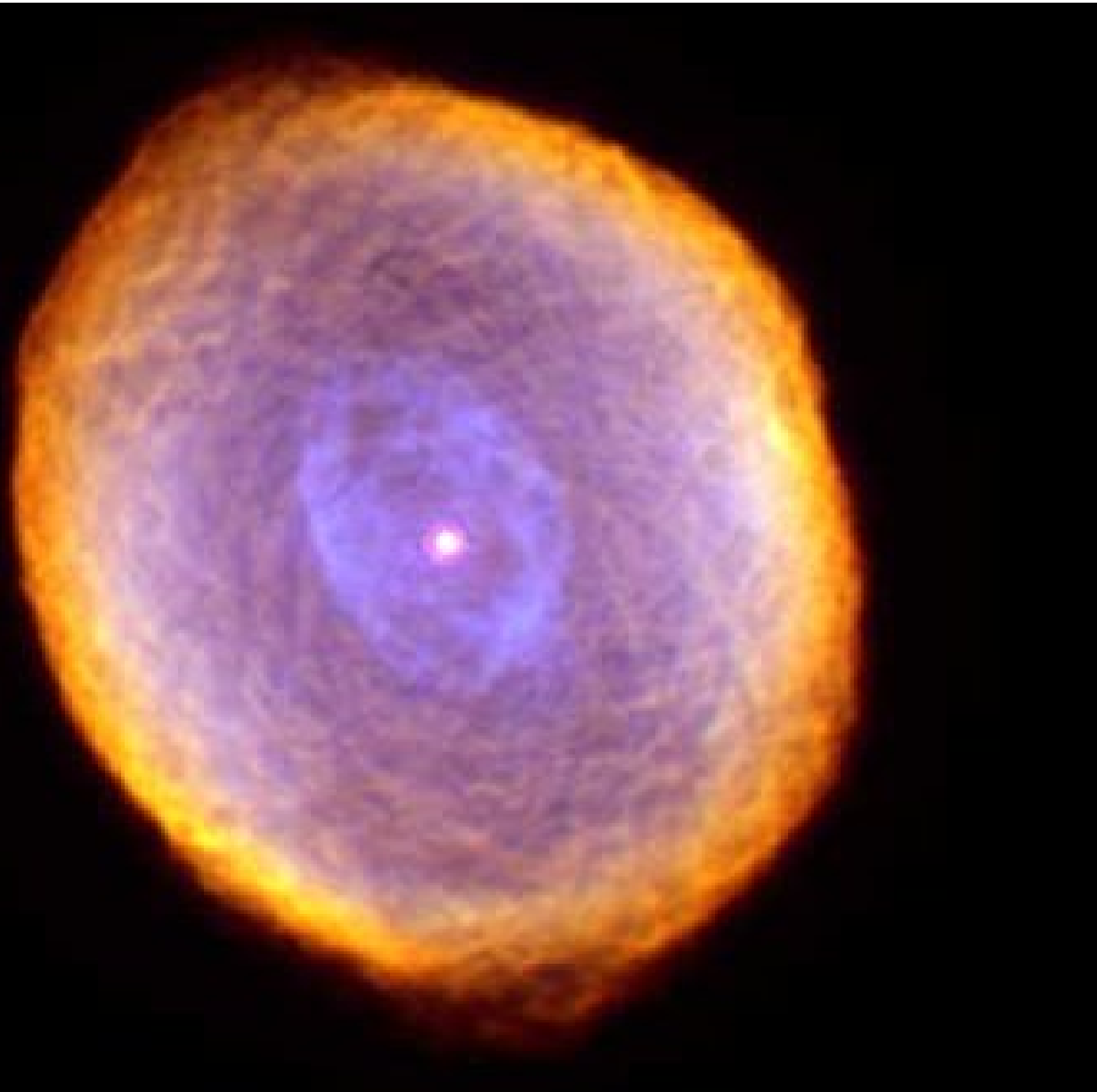
Masse initiale de l'étoile (en masses solaires, M_{\odot})	30 M_{\odot}	10 M_{\odot}	3 M_{\odot}	1 M_{\odot}	0,3 M_{\odot}
Luminosité (Soleil = 1) (pendant séq. princip.)	10 000	1 000	100	1	0,004
Vie sur séq. principale (en milliards d'années)	0,06	0,10	0,30	10	800
Vie comme géante rouge (en milliards d'années)	0,01	0,03	0,10	0,30	0,80
Les réactions nucléaires s'arrêtent aux noyaux de :	fer	silicium	oxygène	carbone	hélium
Phénomène terminal	super- nova	super- nova	nébuleuse planétaire	nébuleuse planétaire	nébuleuse planétaire
Masse éjectée	24 M_{\odot}	8,5 M_{\odot}	2,2 M_{\odot}	0,3 M_{\odot}	0,01 M_{\odot}
Noyau résiduel					
nature	trou noir	étoile à neutrons	naine blanche	naine blanche	naine blanche
masse	6 M_{\odot}	1,5 M_{\odot}	0,8 M_{\odot}	0,7 M_{\odot}	0,3 M_{\odot}
densité (g/cm^3)	5×10^{14}	3×10^{15}	2×10^7	10^7	10^6

Suivant la masse initiale de l'étoile, synthèse d'éléments plus ou moins lourds

Distribution des éléments atomiques qui ont permis la formation du système solaire



Nébuleuse planétaire : éjection de matière des étoiles peu massives



La nébuleuse planétaire IC 418. L'étoile au centre s'est transformée en nébuleuse planétaire il y a quelques milliers d'années. Le diamètre de la nébuleuse atteint maintenant 0,2 années-lumière. Elle sera visible environs 30000 ans. L'étoile a perdu 1/5 de sa masse. Elle finira en naine blanche, 0.6 à $1 M_{\odot}$ et 10000 km de diamètre.

Supernovae : éjection explosive des étoiles massives

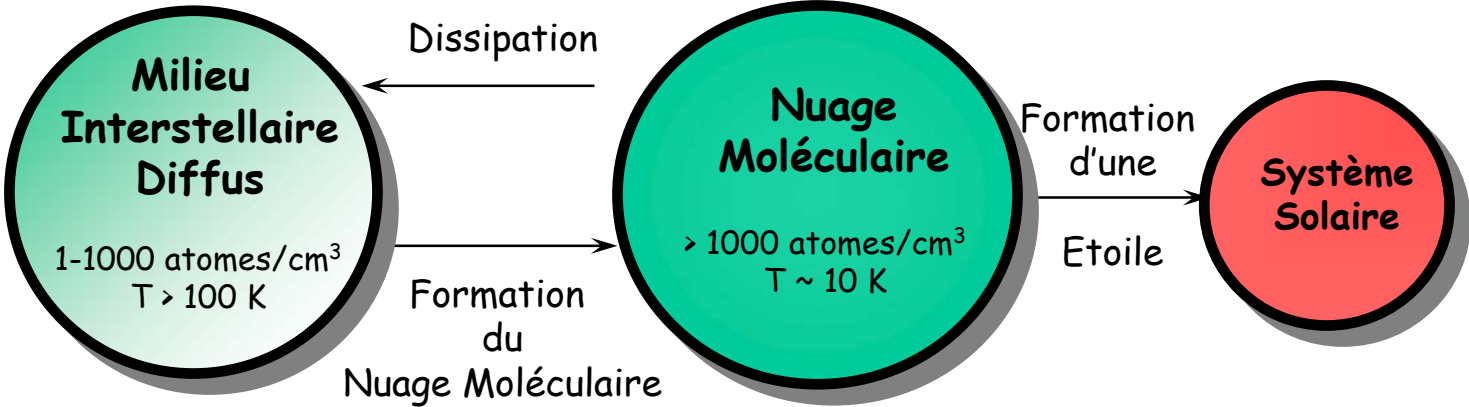


Nébuleuse du crabe,
reste d'une supernovae
(M1) qui mesure 10
années
lumière. L'explosion a
eu lieu en 1054.

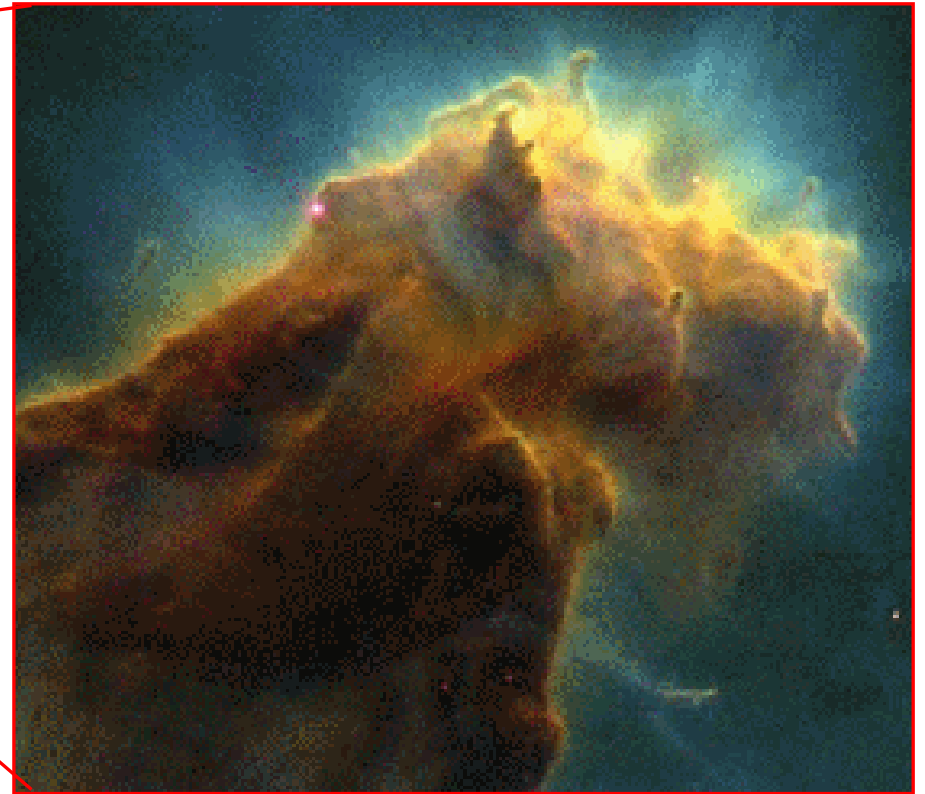
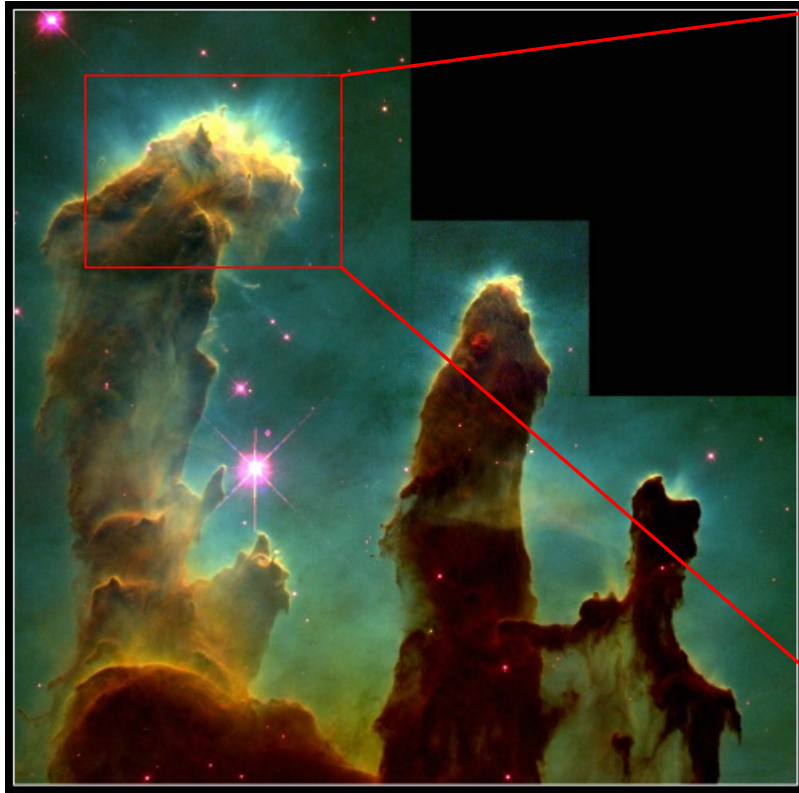
4. Formation du Système Solaire



Cycle des nuages Interstellaires



Les nuages denses : la nurserie interstellaire



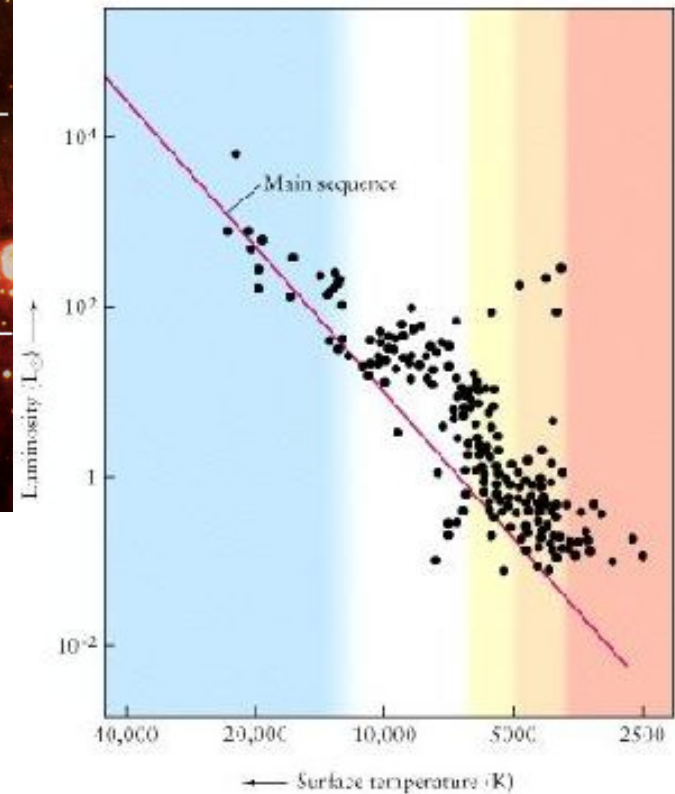
Les petits nodules, situés en haut du nuage, sont des nuages poussières et gaz dans lesquels des étoiles sont en train de naître

Le milieu interstellaire

- Les nuages denses : la nurserie interstellaire



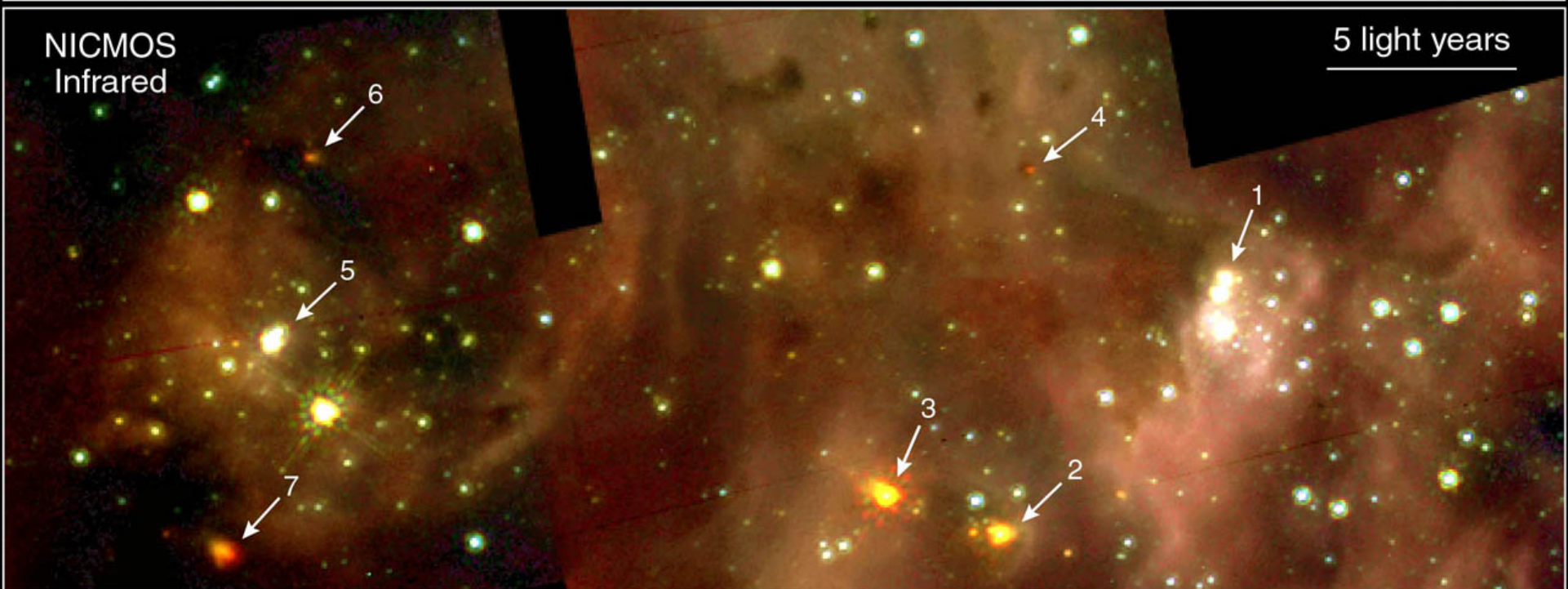
Amas d'étoile NGC2264



WFPC2
Visible Light

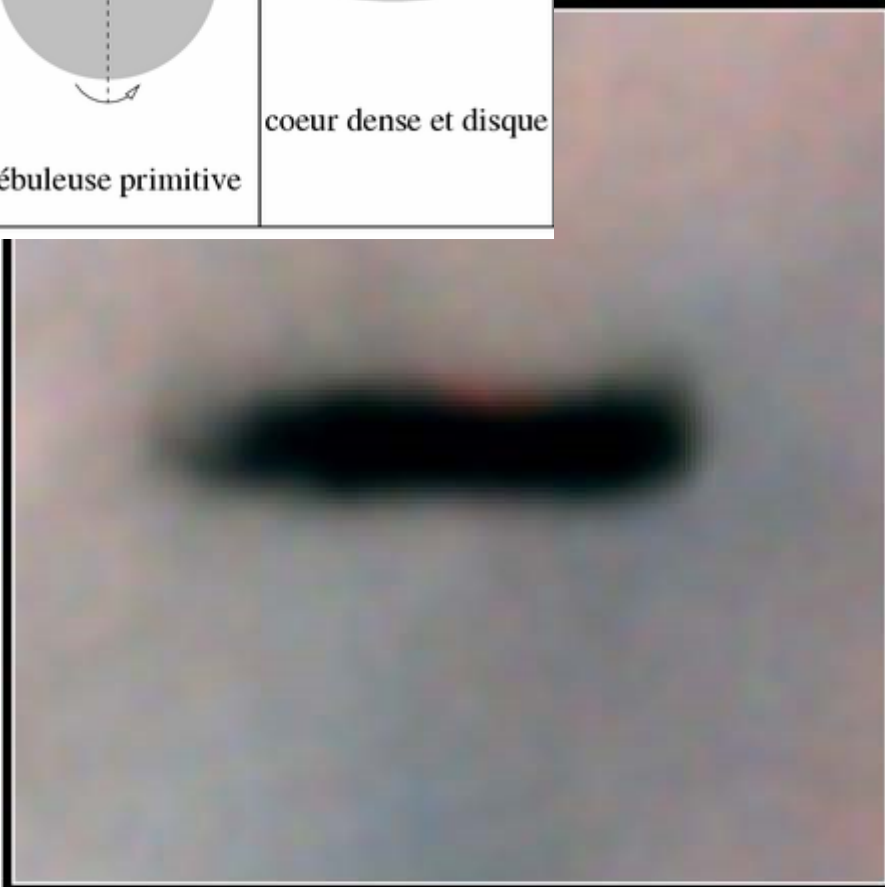
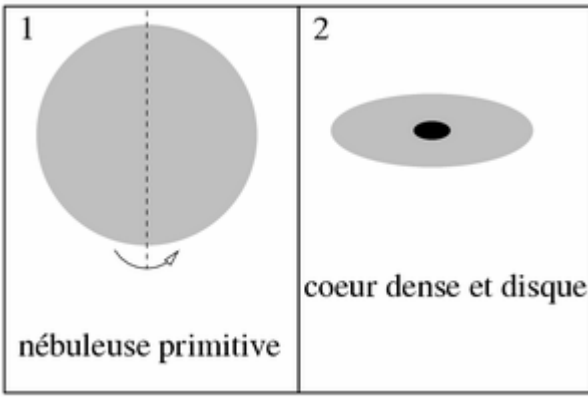


NICMOS
Infrared



5 light years

Formation du disque d'accrétion

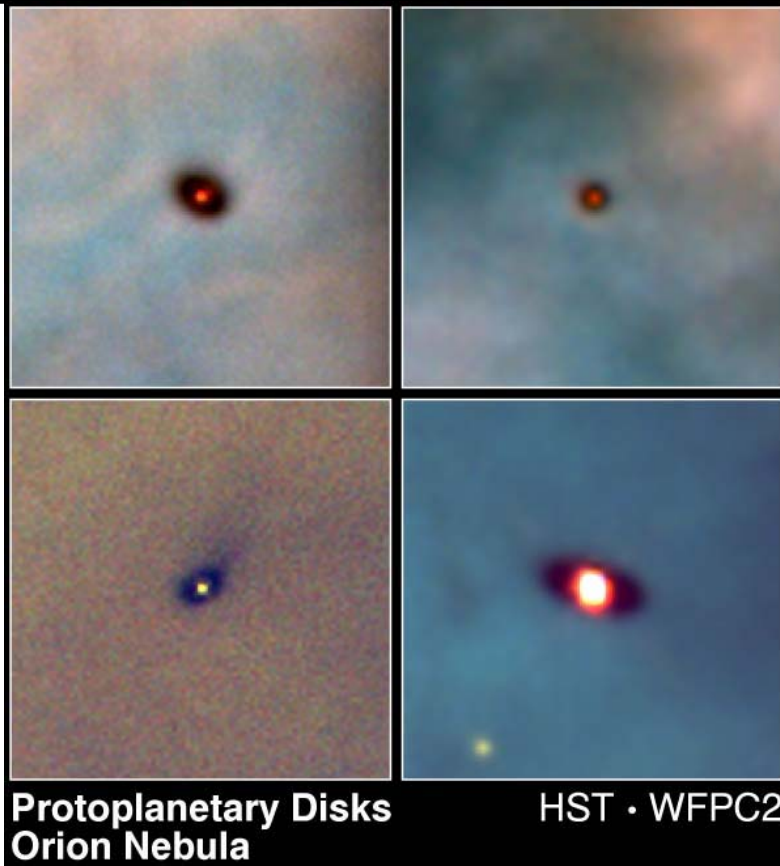
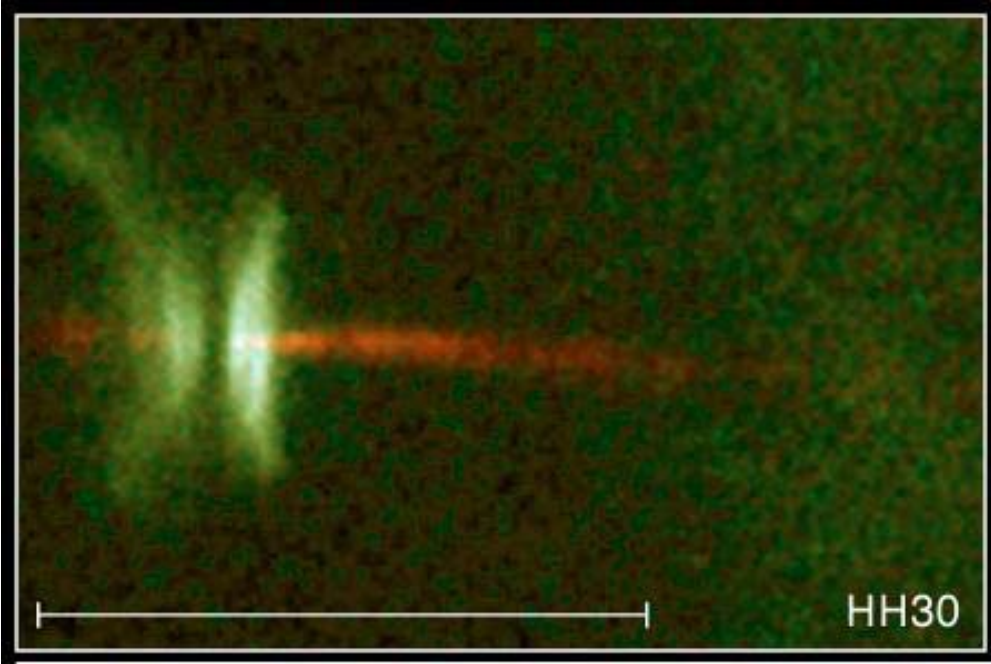
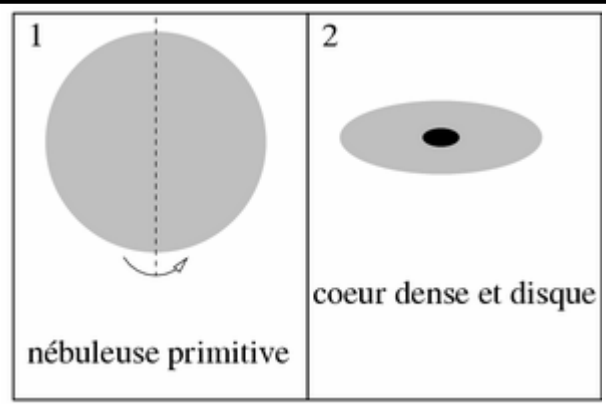


**Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula**

HST • WFPC2

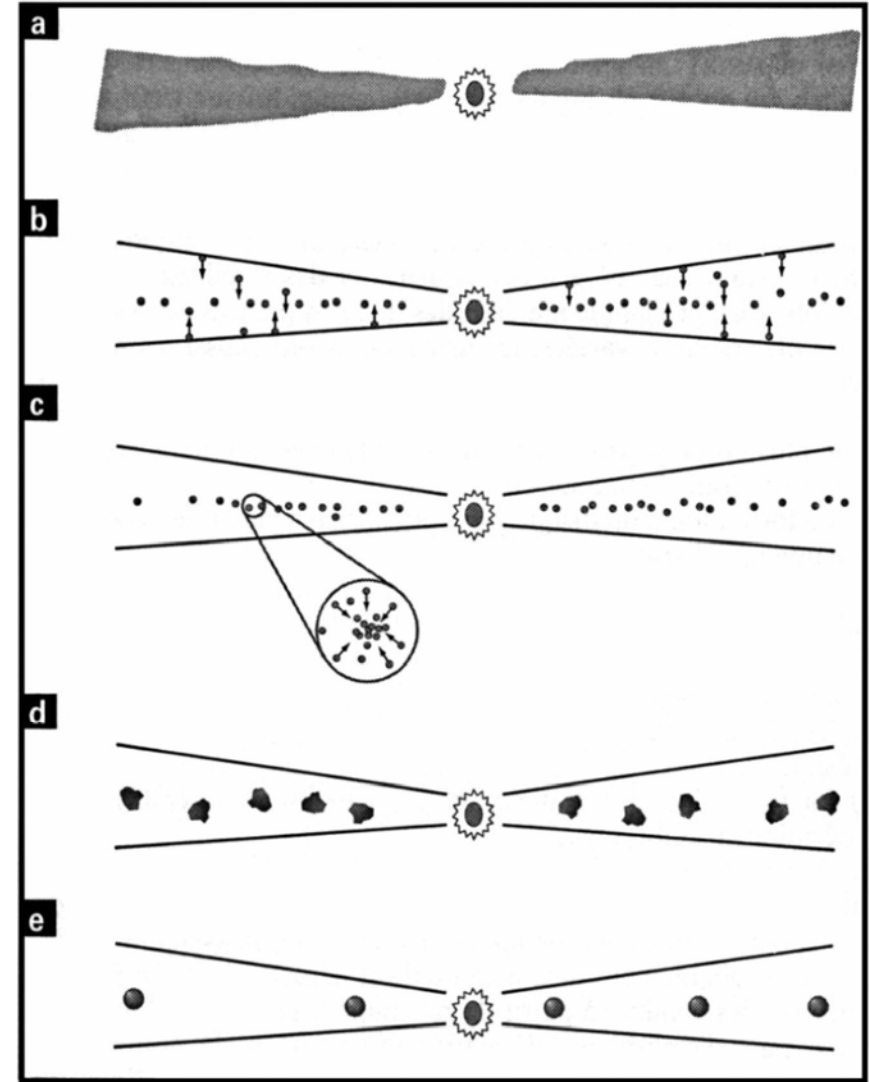
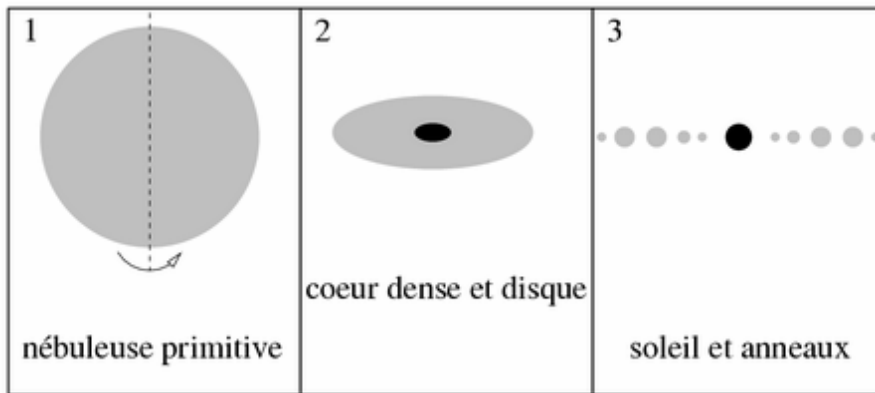
PRC95-45c • ST ScI OPO • November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Formation du disque d'accrétion



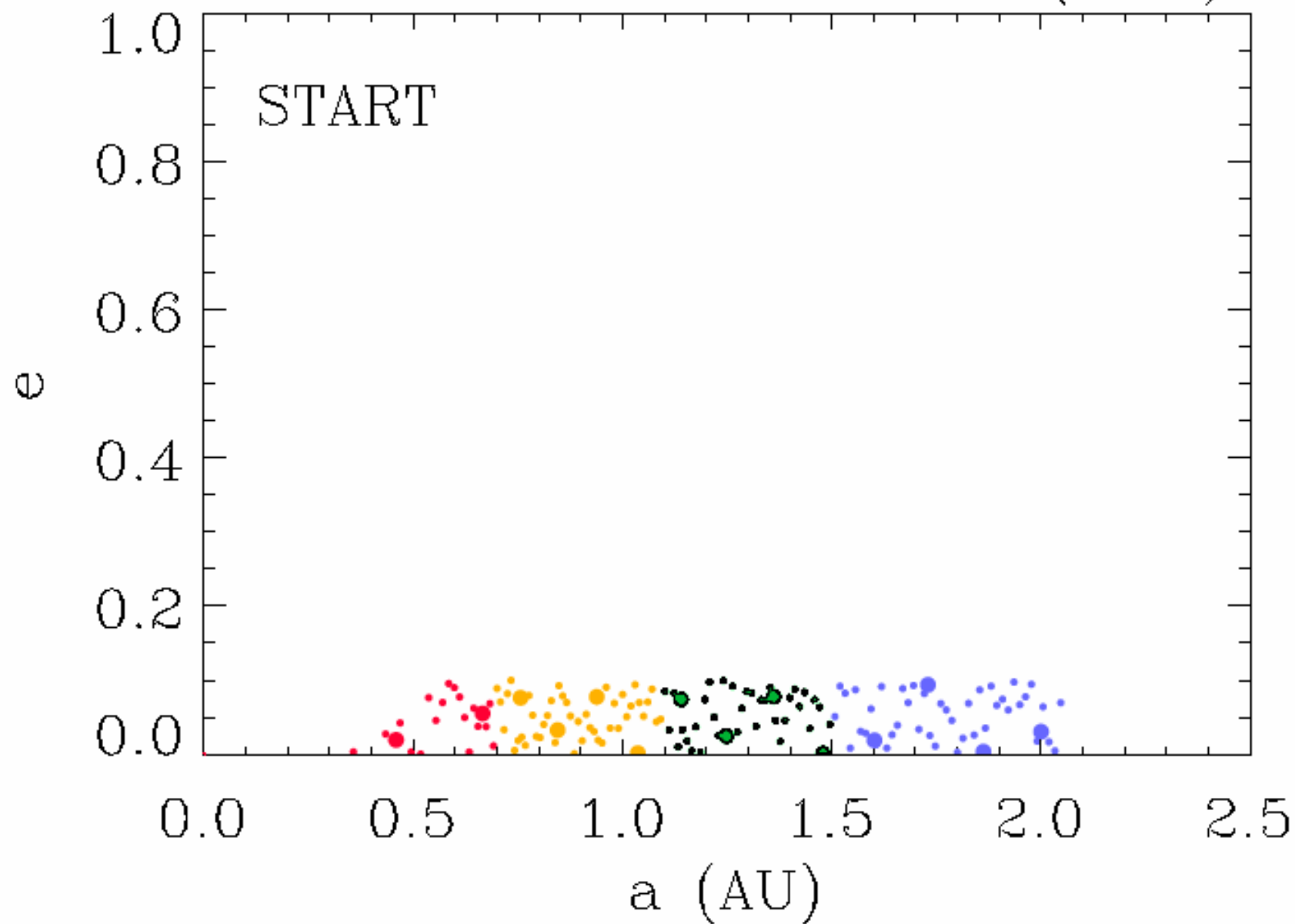
Lors de la formation du disque d'accrétion une partie de la matière est éjectée sous forme de jets

Formation des planétésimaux et des planètes

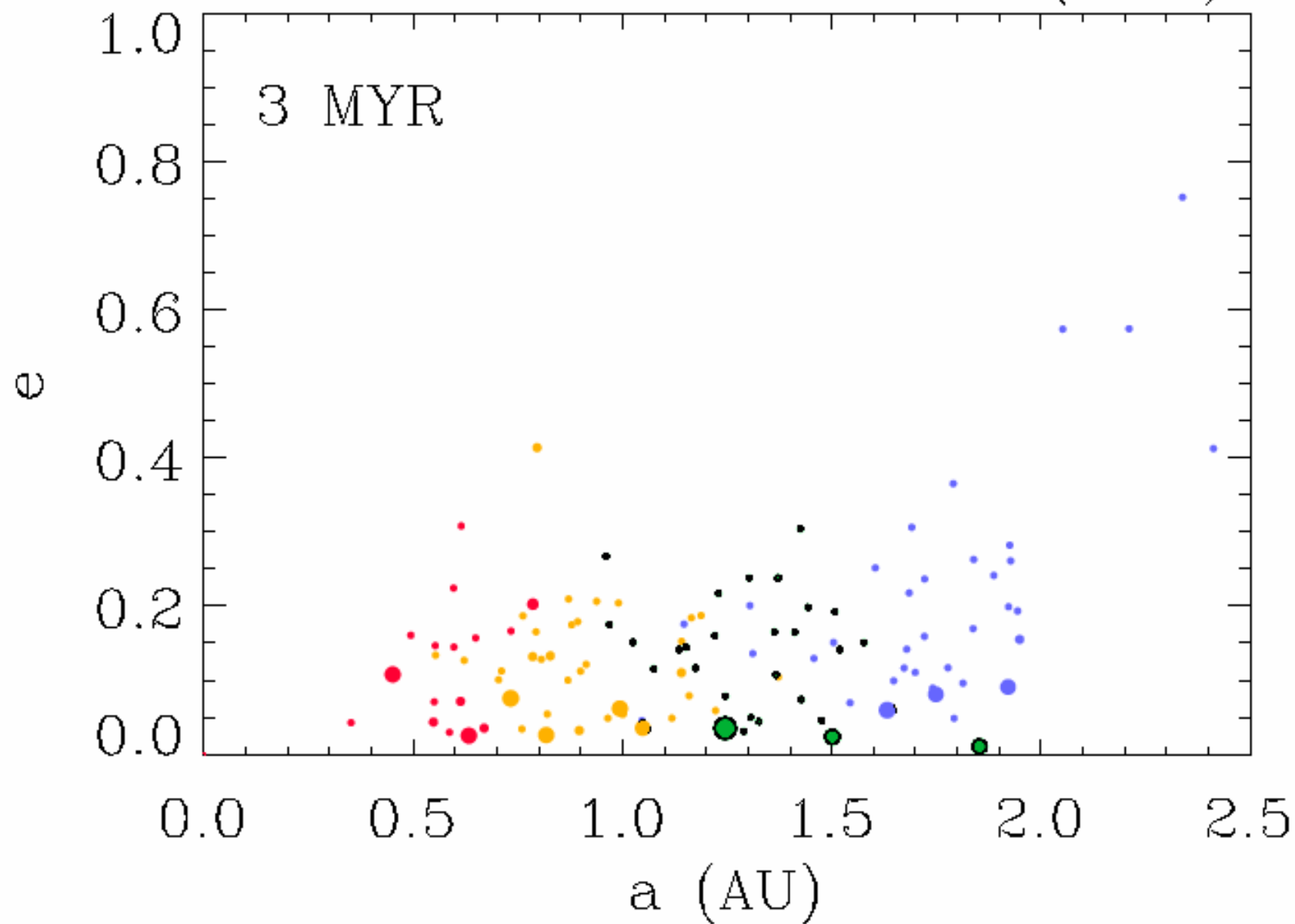


- (a) Formation du disque de gaz et de poussières
- (b) Les poussières migrent vers le plan équatorial
- (c) Agrégation des poussières, formation des planétésimaux
- (d) Formation d'embryons de planètes
- (e) Formation des planètes

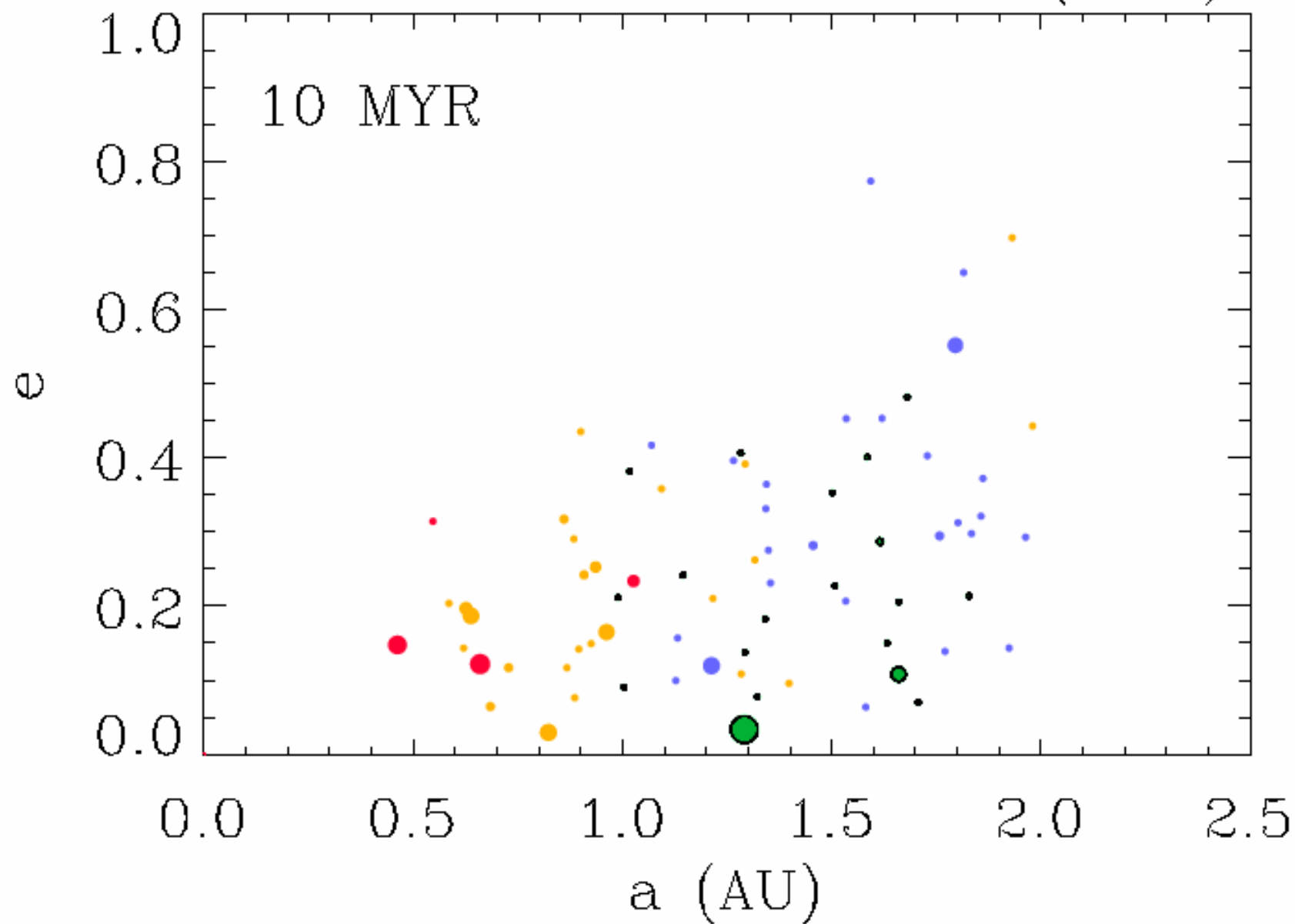
Simulation 23 of Chambers (2001)



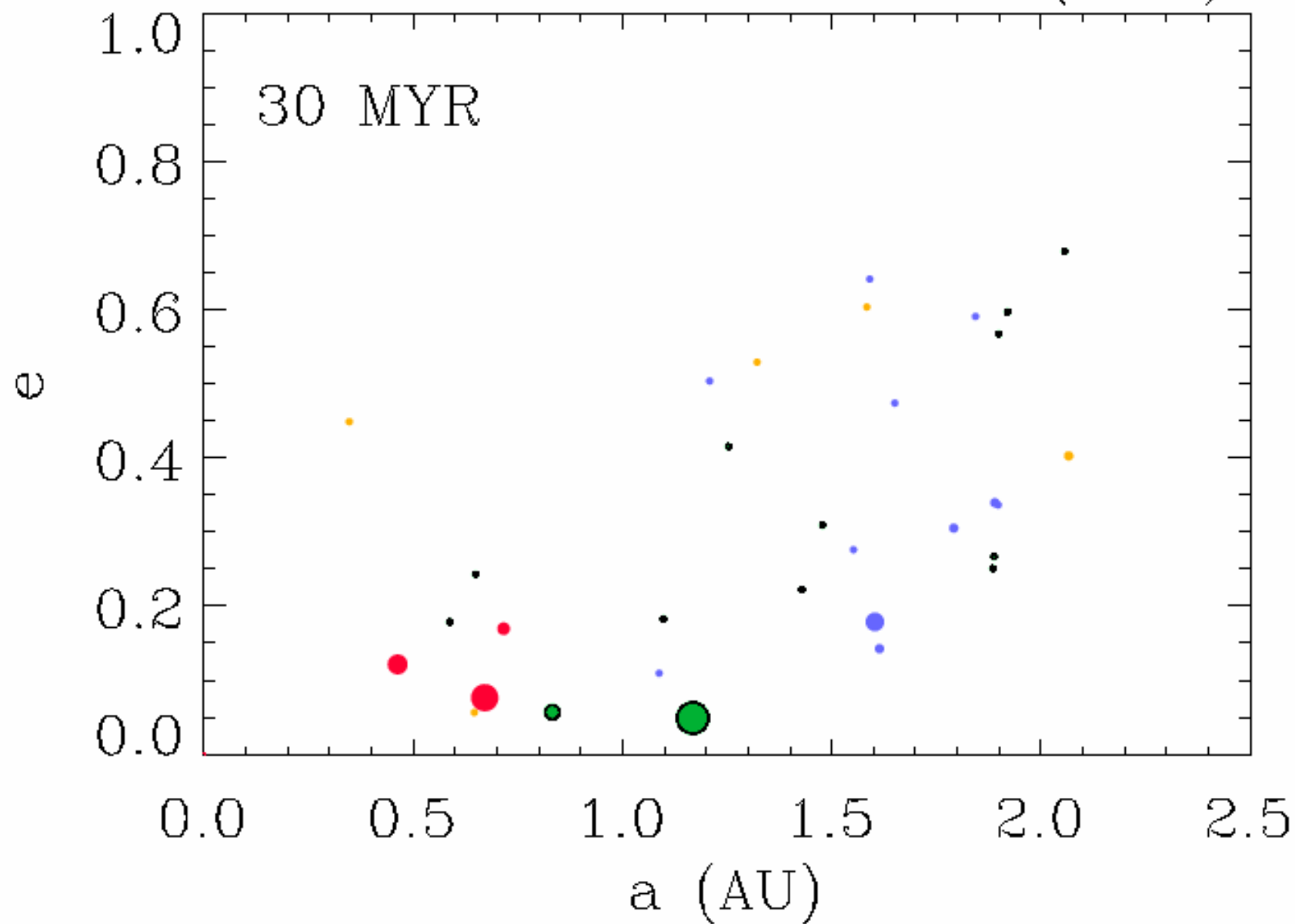
Simulation 23 of Chambers (2001)



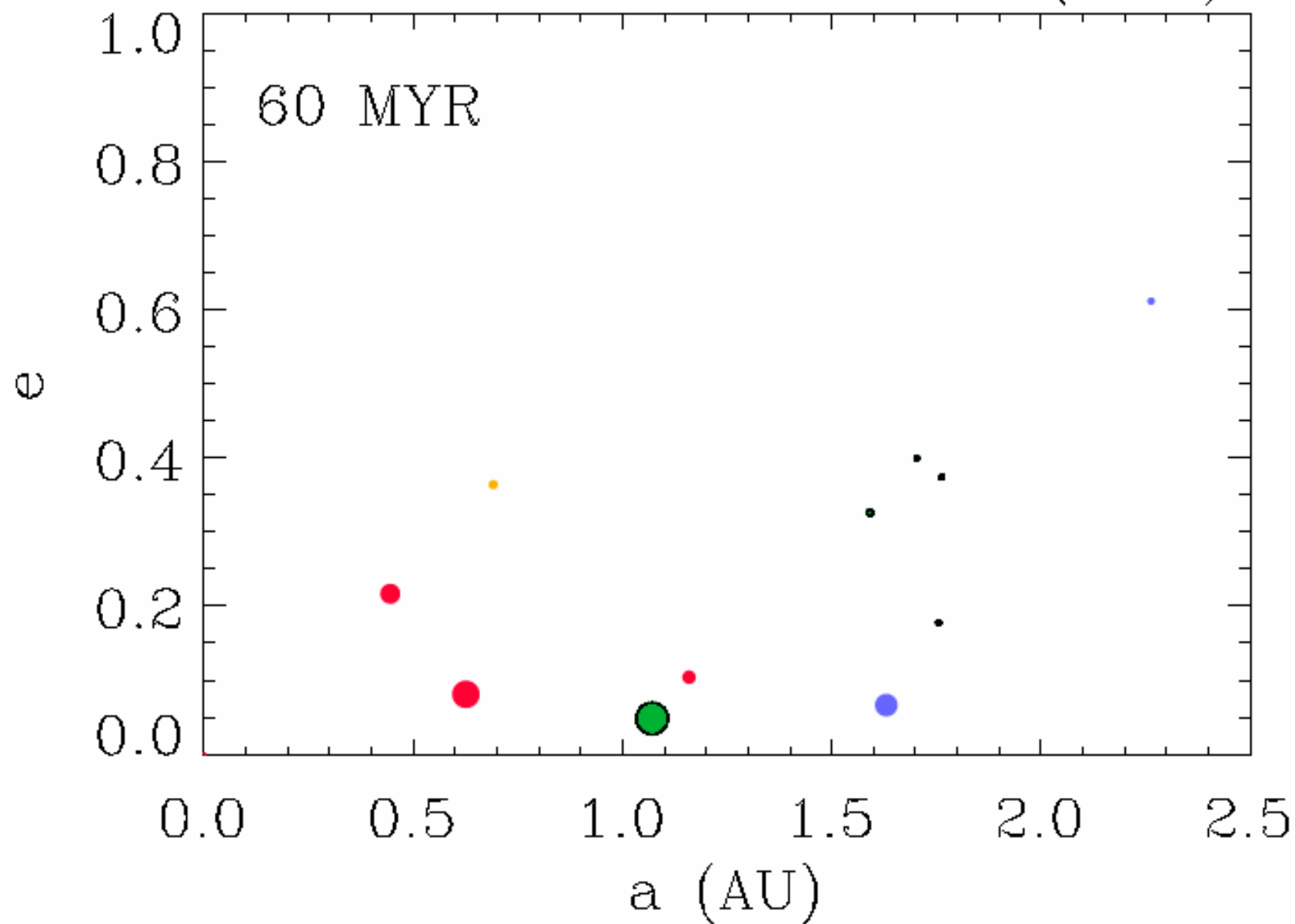
Simulation 23 of Chambers (2001)



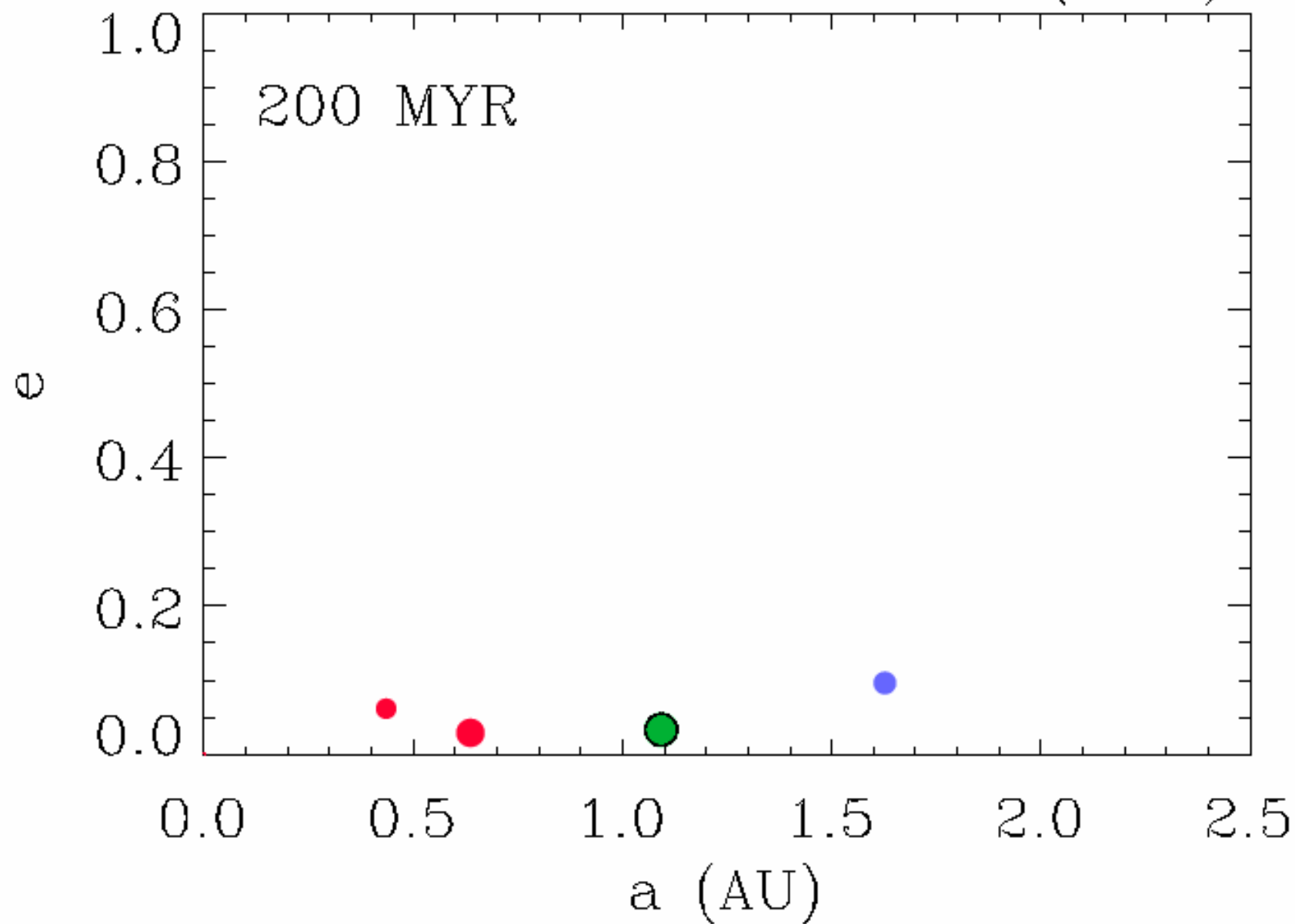
Simulation 23 of Chambers (2001)

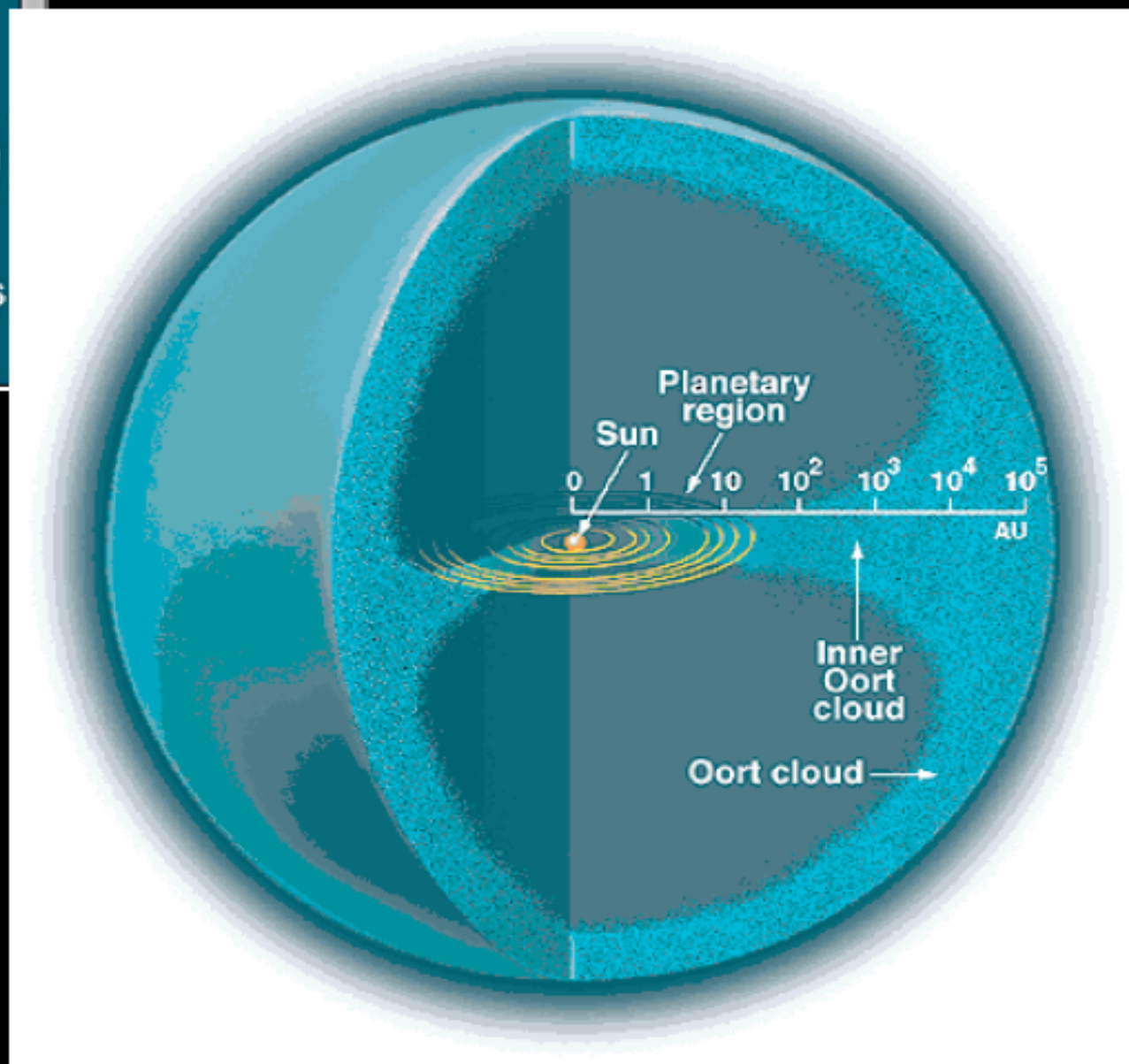
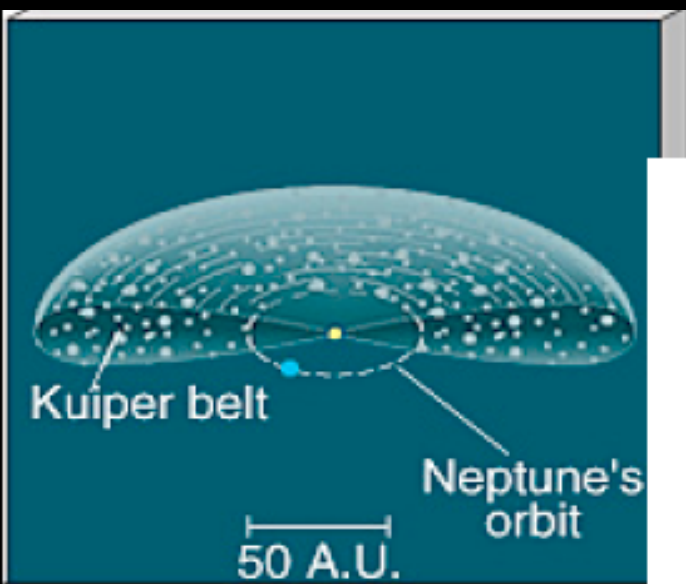


Simulation 23 of Chambers (2001)



Simulation 23 of Chambers (2001)





Ceinture de Kuiper :
10⁵ objets d>100 km

Nuage d'Oort :
10¹²-10¹³ objets

Une Chronologie

Sédimentation des poussières du disque (il y a 4,56 milliards d'années)	Age zéro
Planétésimales, taille 10 km	10 000 ans
Planétésimales de 50 à 500 km	100 000 ans
Emballement de l'accrétion, embryon de Jupiter	1 million d'années
Une trentaine de protoplanètes (tailles de la Lune à Mars) dans la zone des planètes terrestres	1 million d'années
Emballement de l'accrétion, embryon de Saturne	1 million d'années
Fin de la dissipation du gaz nébulaire	2 millions d'années
Emballement de l'accrétion, embryon d'Uranus	5 millions d'années
Emballement de l'accrétion, embryon de Neptune	7 millions d'années
L'accumulation de la Terre est terminée à 99 %	14 millions d'années
	40 millions d'années