

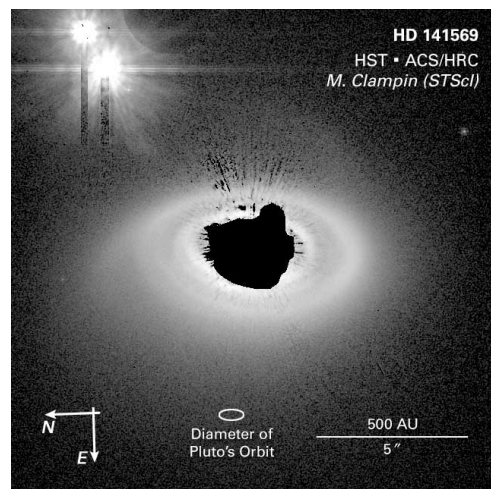
Des Disques aux planètes

ou

De l'Universalité de la Formation Planétaire

E. Pantin

(Service d'Astrophysique, CEA Saclay, eric.pantin@cea.fr)



Comment se forment les étoiles ? Comment naissent les planètes ? Ces questions fondamentales sur nos origines, dont les implications à la fois physiques et philosophiques nombreuses et vertigineuses, trouvent dans les récentes découvertes astrophysiques, des éléments (certes encore très fragmentaires !) de réponse plus étonnants les uns que les autres.

Une des constatations que nous faisons aujourd'hui grâce à l'apport d'observations astronomiques toutes récentes, est que la formation naturelle d'un disque de gaz et de poussières autour d'une étoile entrain de se former est un **phénomène universel**. Que ce soit autour des naines brunes, dont la masse est à peine une vingtaine de fois celle de Jupiter (à peine 2/100 de celle du Soleil), ou bien à l'autre extrême, autour d'étoiles géantes, ultramassives et ultra-lumineuses, de masses atteignant la limite physique d'Eddington (100 fois la masse du soleil), force est de

constater par l'observation, que des disques de matière sont bel et bien présents dans tous les cas.

Les premières théories de formation du système solaire datent du 18^{ème} siècle. En 1755, Emmanuel Kant imaginait que le système solaire était né d'un nuage de matière dont les particules finiraient par s'agglomérer pour former des planètes. Cette idée était ensuite reprise en 1796 par Pierre Simon de Laplace dans son « hypothèse de la Nébuleuse », expliquant la formation physique du Soleil et de son cortège de planètes à partir d'un nuage de gaz et de poussières en rotation, qui se contracte tout en se refroidissant. Cette hypothèse posait cependant un gros problème : si la formation du Soleil et des Planètes était purement co-génétique, le soleil aurait une vitesse de rotation telle qu'il se disloquerait sous l'effet de la force centrifuge !

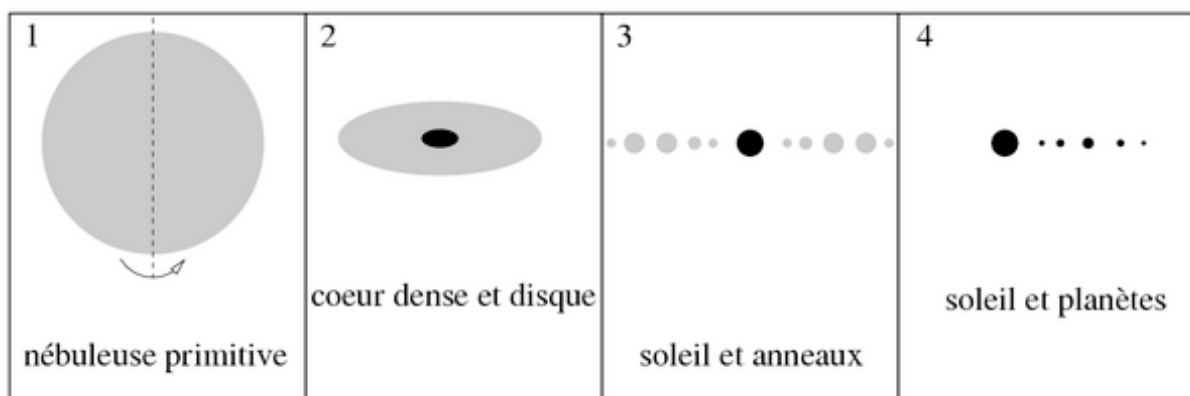


Figure 1 : Théorie de la nébuleuse primitive, donnant naissance à un système planétaire par condensation (Kant-Laplace)

L'hypothèse concurrente du scénario catastrophique est suggérée par Buffon dans son *Histoire naturelle* (1778). Elle postule que le passage d'une étoile au voisinage du soleil en aurait arraché un filament de matière générant les planètes. Russell montra en 1935 qu'une collision avec les vitesses stellaires observées, de l'ordre de

quelques dizaines de km/s (typiquement cent mille kilomètres par heure), ne peut permettre d'arracher au Soleil de la matière possédant suffisamment de moment cinétique et Spitzer (1939) rajouta que le filament de matière supposément obtenu est instable.

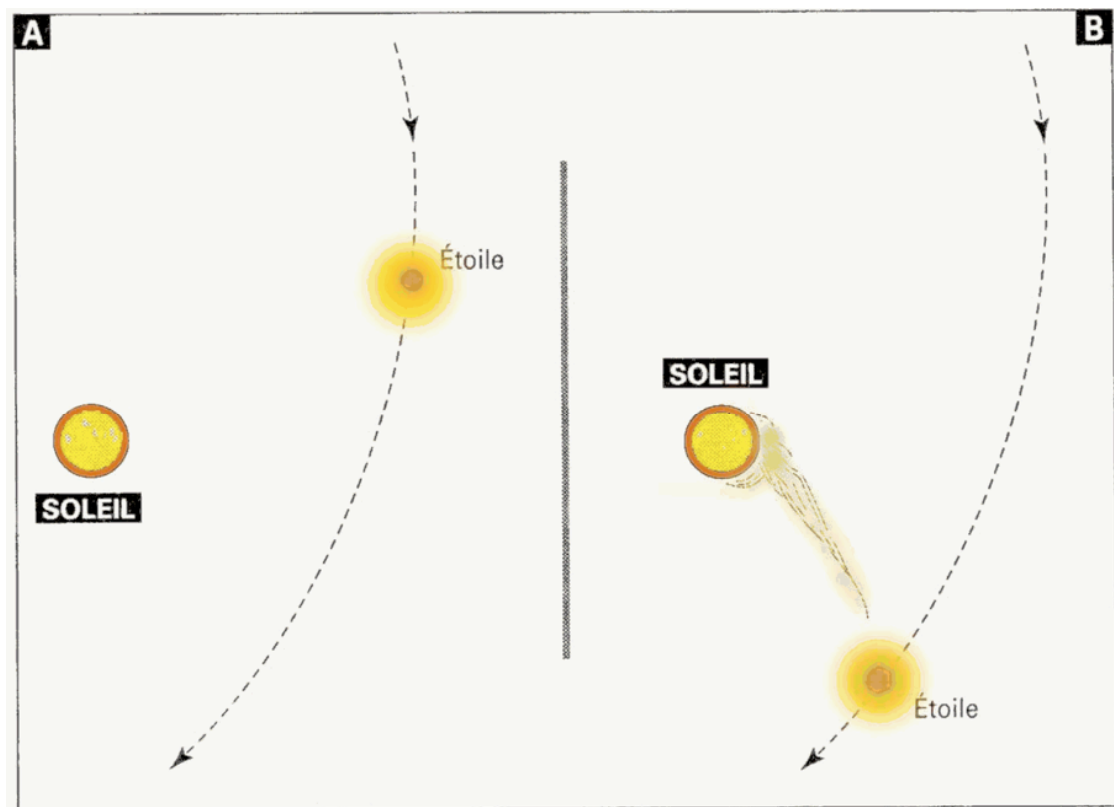


Figure 2 : Théorie dite « catastrophique » de formation du système solaire selon Buffon. Dans ce scénario, le passage d'une étoile au voisinage du soleil lui arrache de la matière par effet de marée. Ce lambeau de matière, en se refroidissant, se condense en planètes.

Au final, même si la théorie de la nébuleuse, bien qu'elle contienne toujours un certain nombre de problèmes intrinsèques, finit par gagner dans un « concours par élimination », ce qui bien sûr, nous laisse avec un certain nombre de doutes concernant l'universalité de la genèse d'un système solaire identique au nôtre, et bien évidemment, nous incite à nous poser des questions sur la possibilité de vie au delà du système solaire.

En 1995, coup de théâtre : Michel Mayor et Didier Queloz, de l'observatoire de Genève, montrent de façon incontournable, que le mouvement apparent d'une étoile, 51 Pégase, ne peut être expliqué que par la présence d'une planète massive (probablement quelque chose s'approchant de Jupiter) sur une orbite très proche de l'étoile (0.05 fois la distance Terre-Soleil,) et tournant autour de celle-ci en 4.2 jours ! Aujourd'hui, plus de 200 planètes ont été découvertes par cette même méthode dite des « vitesses radiales ». Un nombre significatif d'entre-elles sont des « Jupiters Chauds », comme 51 Peg, ce qui pose un certain nombre de questions, et notamment : Pourquoi notre système solaire ne contient pas un tel « Jupiter Chaud » ? De façon plus globale, statistiquement, ce sont au moins 10% des étoiles de type solaire qui sont pourvues d'un cortège planétaire.

Dans ce contexte, on peut se poser la question suivante :

Existe-t'il un processus universel créant des conditions physiques favorables à la formation de planètes ?

Le processus « standard » de formation planétaire postule aujourd'hui que les planètes se forment dans des disques de gaz et de poussières, dont la structure permet à la matière d'atteindre les densités critiques nécessaires pour déclencher le processus qui va permettre de passer de grains de poussières de type interstellaires (0.01 à 1 μm) aux briques de base des planètes. Ces briques, appelées

planétésimaux, ont des tailles de quelques dizaines de kilomètres, c'est à dire que l'on a affaire à un processus de croissance sur plus de **10 ordres de grandeur** !

On pense aujourd'hui que l'on trouve dans notre système solaire de « planétésimaux fossiles », sous forme d'**astéroïdes** ou de **comètes**.

La réponse à cette question fondamentale passe donc par l'étude de ces disques.

Dans l'exposé qui suit, nous allons suivre la naissance et l'évolution d'un disque, et montrer comment celui-ci va de manière très naturelle, générer les conditions nécessaires pour la formation de planètes. Nous allons voir qu'il existe aussi toute une famille de disques de 2^{ème} génération, re-crées par collisions cataclysmiques de planétésimaux, à une époque où les planètes sont (supposément !) déjà formées.

Leur morphologie est très sensible à la présence de planètes ; leur étude est donc à la fois une méthode indirecte de détection de planètes, mais aussi une façon de retracer l'histoire de notre système solaire, et mieux comprendre une époque (très !) chaotique autour de quelques dizaines de millions d'années.

Bibliographie :

Articles de vulgarisation

Pour la science, hors-série de Janvier 2001 :

- Jérôme Bouvier & Fabien Malbet, *L'environnement des étoiles jeunes*
- Steven Stahler, *L'enfance des étoiles*
- Caroline Terquem & Alain Lecavelier des Étangs, *Des disques aux planètes*
- Mohammad Heydari-Malayeri, *Pouponnières d'étoiles massives.*
- Caroline Terquem : Dossier pour la Science : *Les exoplanètes, nouvelles Terres en vue*, 347, Septembre 2006
- WIKIPEDIA : http://fr.wikipedia.org/wiki/Naissance_des_étoiles

Articles spécialisés

- Claude Bertout (1989), *T Tauri stars — Wild as dust*, in *Annual review of Astronomy and Astrophysics*, **27**, 351 (en anglais)
- Philippe André (1994), *Observations of protostars and protostellar stages* in *The cold Universe* (series Moriond Astrophysics Meetings, Éditions Frontière), p. 179 (en anglais)

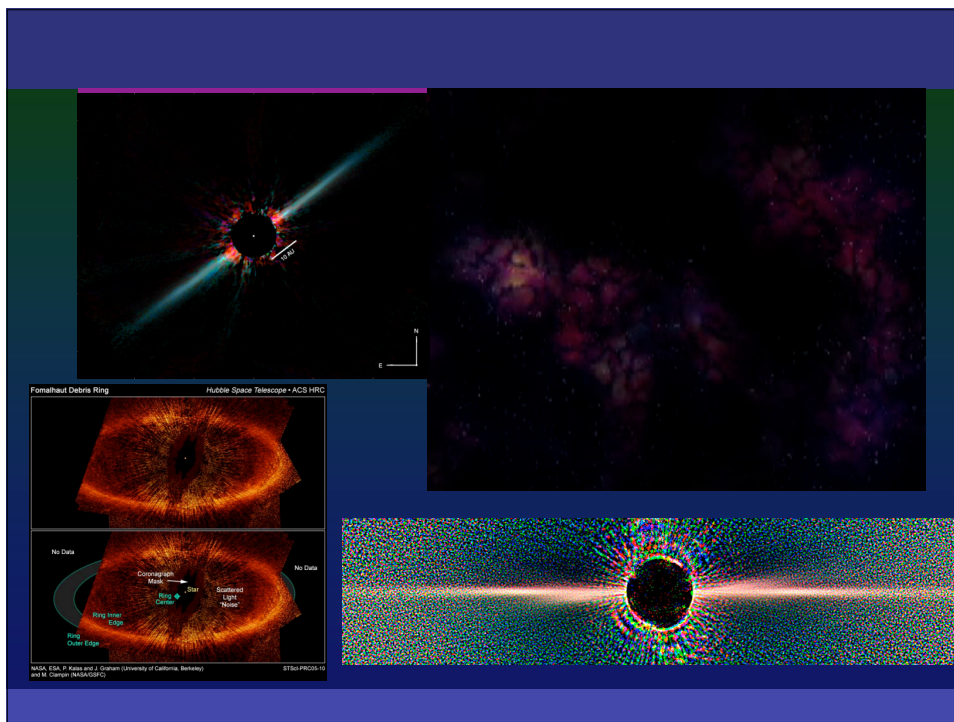
Disques circumstellaires et formation planétaire

E. Pantin
SAp, CE Saclay

7 Août 2007

Festival de Fleurance

1



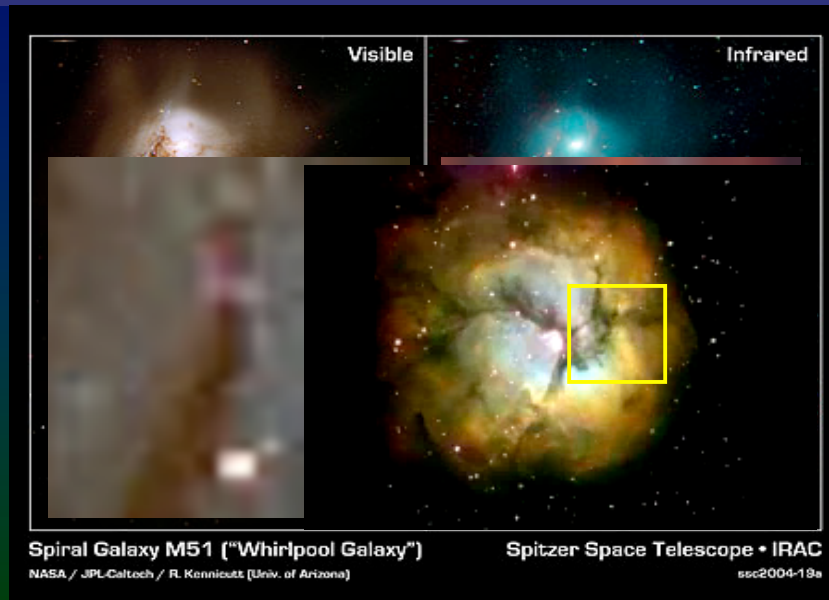
Des nuages moléculaires aux étoiles

7 Août 2007

Festival de Fleurance

3

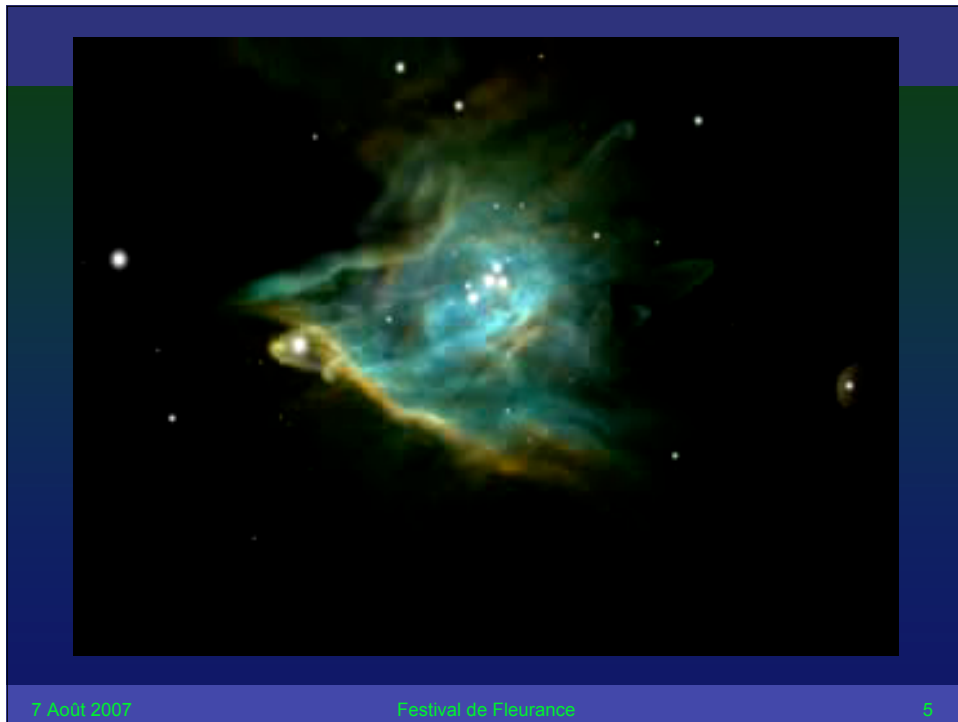
De la formation du système solaire à la formation des comètes



7 Août 2007

Festival de Fleurance

4



Des nuages moléculaires aux étoiles

Une question de moment angulaire

Pourquoi va t'on former des disques ??



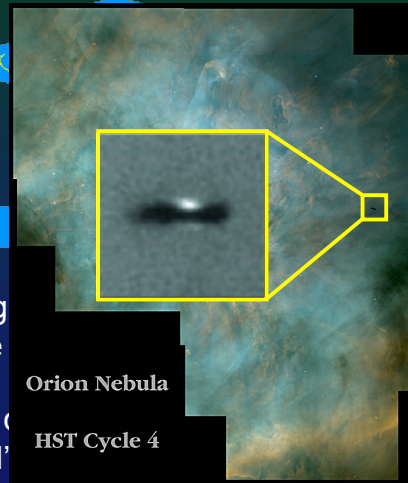
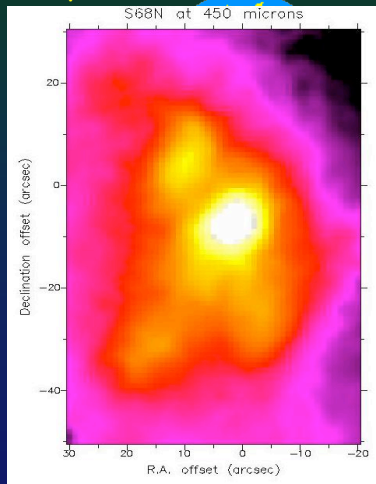
Conservation du moment angulaire + dissipation
→ aplatissement du système (disque)

Quelques années-lumière → quelques dizaines d'unités astronomiques : contraction d'un facteur 10 000 !!

Des nuages moléculaires aux étoiles

Une question de moment angulaire

Pourquoi va t'on former des disques ??



ment ang
système
mière →
traction d'

7 Août 2007

Festival de Fleurance

7

Des nuages moléculaires aux étoiles

Autres preuves observationnelles de la présence de disques très tôt dans l'histoire des étoiles

- Observation de l'émission infrarouge

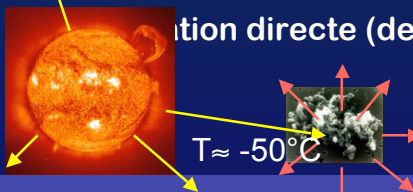
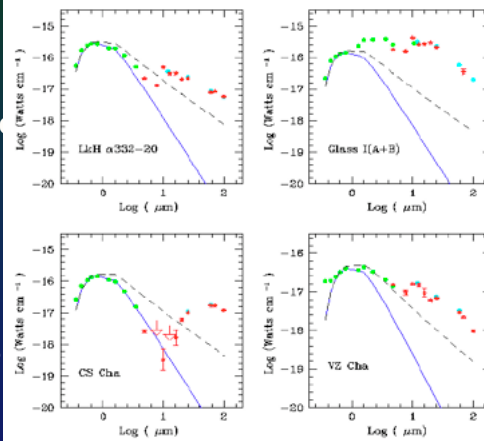
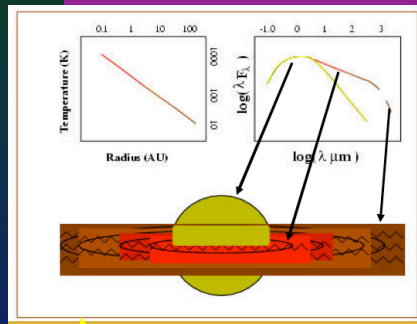
7 Août 2007

Festival de Fleurance

8

Des nuages moléculaires aux étoiles

Autres preuves observationnelles de la présence de disques très tôt dans l'histoire des étoiles



7 Août 2007

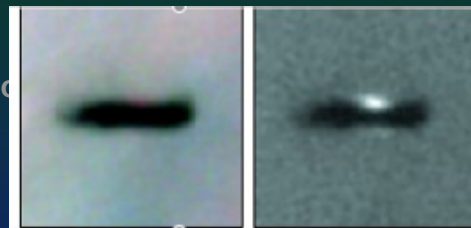
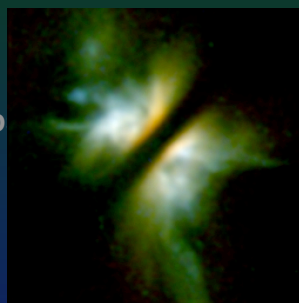
Festival de Fleurance

9

Des nuages moléculaires aux étoiles

Autres preuves observationnelles de la présence de disques très tôt dans l'histoire des étoiles

➤ Observation directe



➤ Observation directe (depuis ~1994)

7 Août 2007

Festival de Fleurance

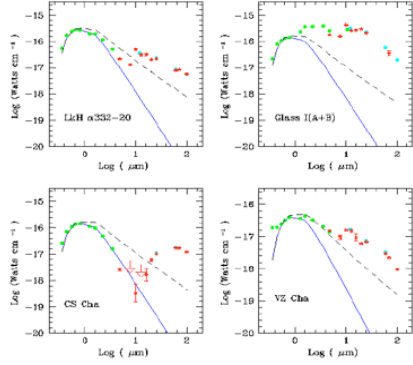
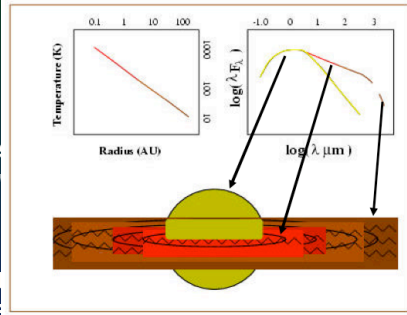
10

Des nuages moléculaires aux étoiles

Des disques autour des étoiles jeunes

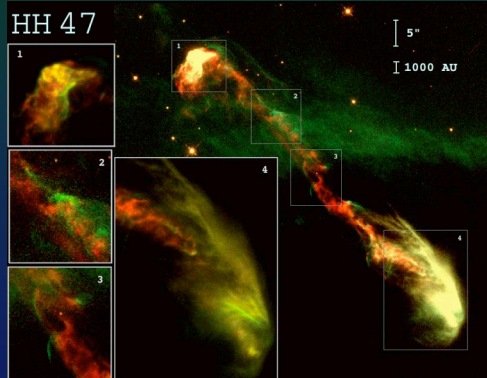
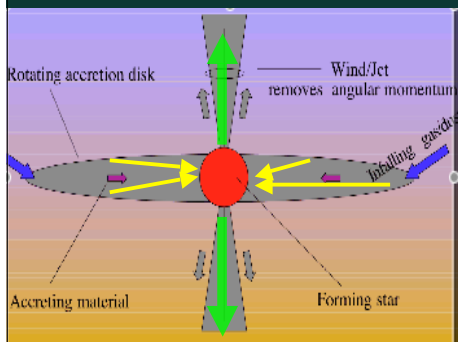
Pourquoi ?

- Il reste de la matière
- Arguments cinétiques (dissipation)
- Observation de l'émission infrarouge
- Observation directe (depuis ~1994)



Des nuages moléculaires aux étoiles

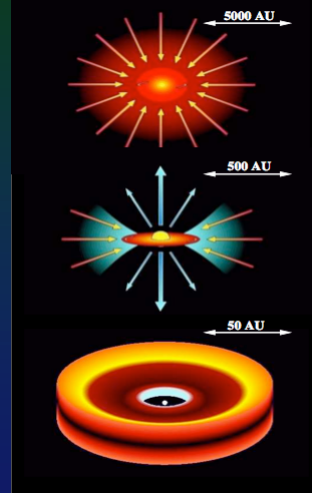
Des preuves indirectes dans les objets très jeunes (10-100 mille ans) : éjections spectaculaires de matière



Des nuages moléculaires aux étoiles

Résumé

- Les étoiles naissent au sein des **nuages moléculaires par effondrement (gravité) de la matière sur elle-même**
- De manière **naturelle**, il y a formation d'un disque : **universalité** de la présence de disques lors de la formation des étoiles (0.01-10 masses solaires)
- Ces disques contiennent de **grandes quantités** (0.01-0.1 masses solaires) de **gaz et de poussières** (taille $\sim 1 \mu\text{m}$), matériaux nécessaires à la construction des planètes

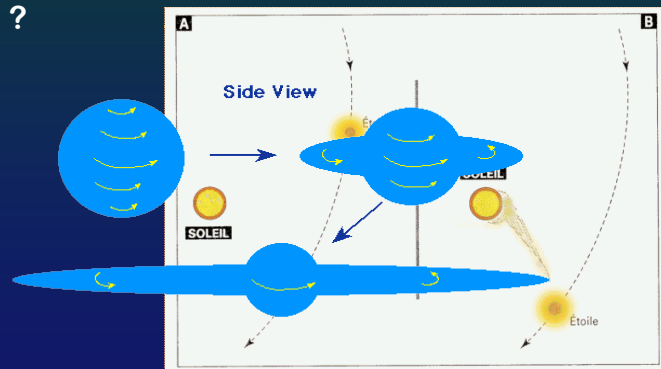


Formation des disques et formation planétaire

Formation des disques et des planètes

Différentes théories ...

- Mécanismes régissant la formation planétaire ?
- Universalité : le système solaire est il une exception ?
- ou la règle ?



7 Août 2007

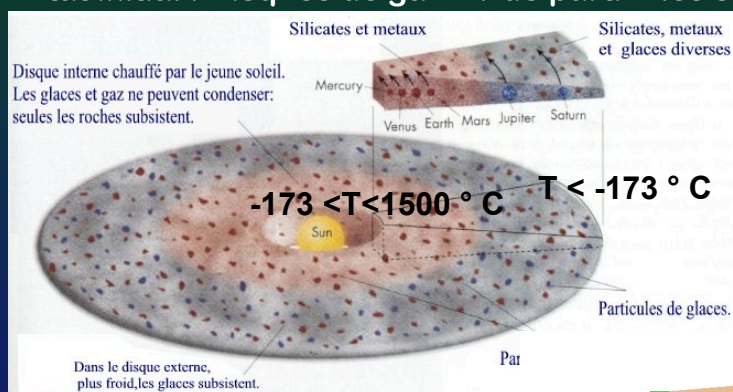
Festival de Fleurance

15

Formation des disques et des planètes

Un disque initial composé essentiellement de **petites** particules !

Etat initial : Disques de gaz ET de particules solides



A noter : formation des "briques" de la terre dans environnement anhydre

Disques évasés

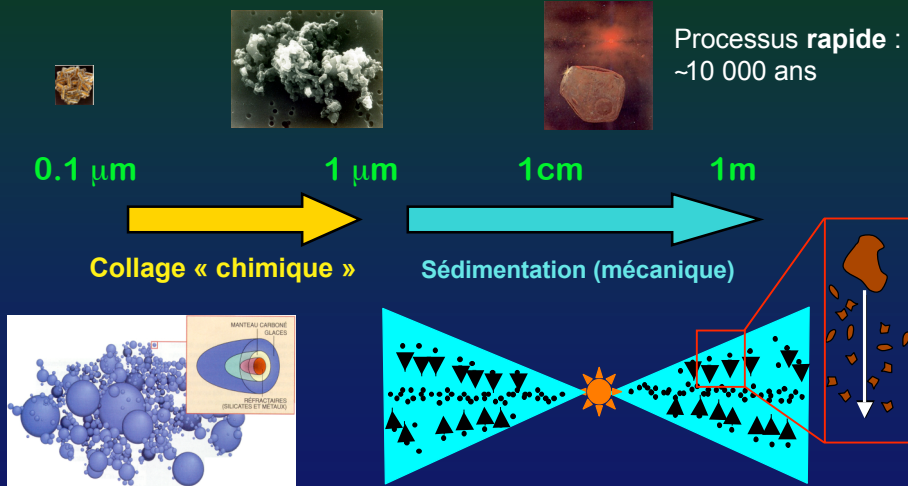
7 Août

Festival de Fleurance

16

Formation des disques et des planètes

Des particules de 1m aux planétésimaux



7 Août 2007

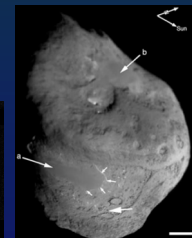
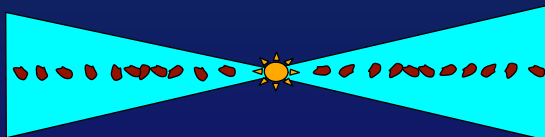
Festival de Fleurance

17

Formation des disques et des planètes

Des particules de 1m aux planétésimaux

- Mécanisme mal connu. Plusieurs hypothèses (tourbillons, instabilité gravitationnelle ?)
- Doit agir en moins de 100 ans, sinon disparition du matériau ! → mécanisme ? très efficace !
- → disque de planétésimaux (qq km en taille) == briques de base pour former les planètes. Quelques uns retrouvés aujourd'hui sous forme d'astéroïdes et comètes.



7 Août 2007

Festival de Fleurance

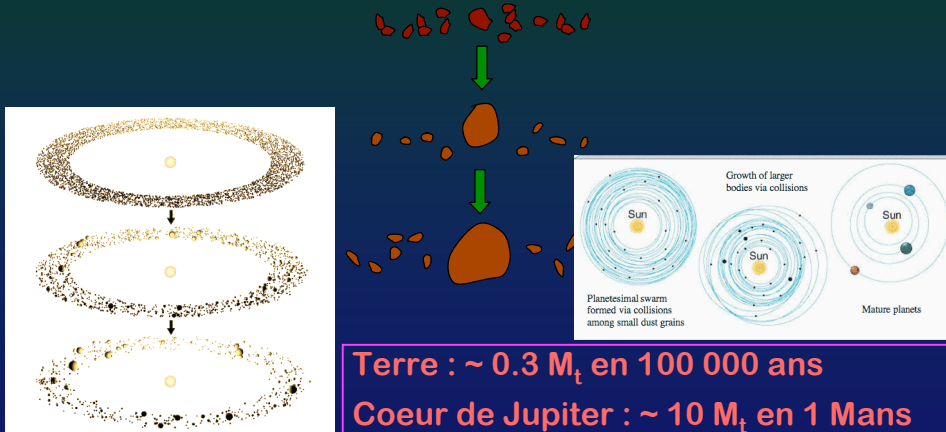
18



Formation des disques et des planètes

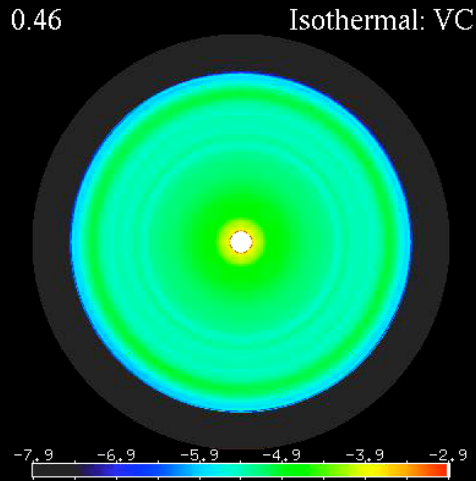
Des "particules" de 1m aux planétésimaux

Des planétésimaux aux proto-planètes : effet « boule de neige » (les « gros » grossissent plus vite)



Formation des disques et des planètes

Un scénario alternatif :
formation planètes géantes par effondrement gravitationnel



Extrêmement rapide !
(1000 ans) et
"universel"

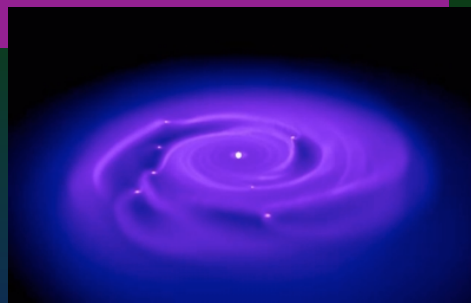
Problème : comment
résister au cisaillement
Képlerien ???!

7 Août 2007

Festival de Fleurance

21

Formation des disques et des planètes



(Painting by William K. Hartmann.
Used with permission.)

7 Août 2007

Festival de Fleurance

22

Formation des disques et des planètes

Résumé

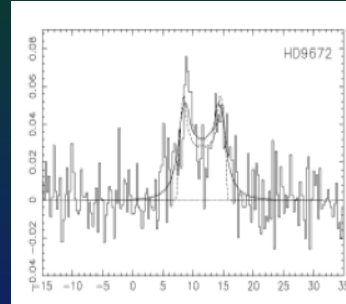
- Les planètes naissent **au sein de disques** de gaz et de poussières (100 x plus de gaz en masse).
- Par un processus de **croissance hiérarchique (agglomération**, par opposition à la formation d'étoiles par **effondrement gravitationnel**), on passe de d'une taille de grains de $0.1 \mu\text{m}$ à des planétésimaux (1-10 km)
- Les planétésimaux s'agglomèrent de façon « catastrophique » pour former des planètes telluriques et les noyaux de planètes géantes
- Les noyaux des planètes géantes **accrètent par la suite le gaz** environnant

Proto-planètes et disques proto-planétaires

Proto-planètes et disques protoplanétaires

Comment sait-on qu'il y a du gaz ?

- Matière de composition proche du milieu interstellaire
- Signature spectrale de gaz détectée dans certains cas
- Géométrie des disques : évasés

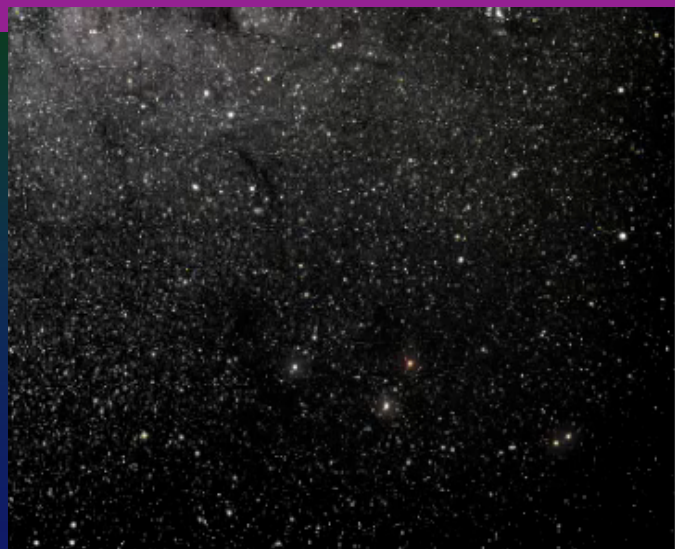


7 Août 2007

Festival de Fleurance

25

HD97408 : un exemple spectaculaire de géométrie évasée



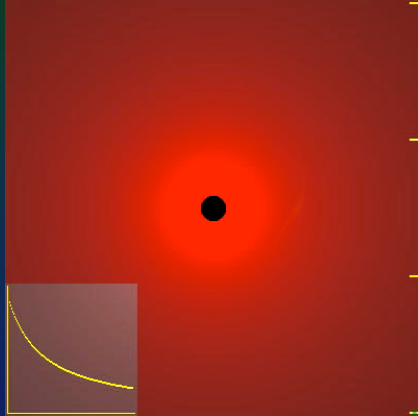
7 Août 2007

Festival de Fleurance

26

Proto-planètes et disques protoplanétaires

Une forte interaction entre disque (de **gaz**) et proto-planètes géantes



Interaction avec
disque → migration
très rapide (quelque
100000 ans) de la
planète vers l'étoile !!

Accrétion de matière sur
embryon ?

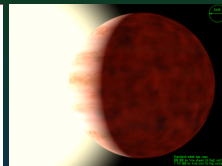
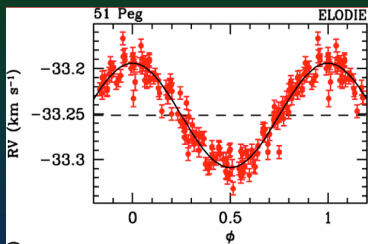
7 Août 2007

Festival de Fleurance

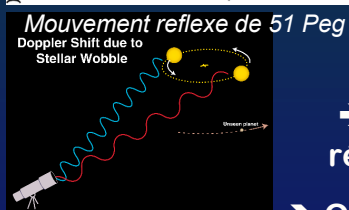
27

Proto-planètes et disques protoplanétaires

Lien avec les exo-planètes



Février 1995 : première planète extrasolaire
détectée : une planète **géante** en orbite à
1/20 distance Terre-Soleil !!



→ Les "jupiters chauds" sont-ils le
résultat de la migration planétaire ??

→ Quel mécanisme a stoppé la migration
avant la chute inéluctable sur l'étoile ???

7 Août 2007

Festival de Fleurance

28

Proto-planètes et disques protoplanétaires

Résumé

- Les proto-planètes se nourrissent des grandes quantités de gaz et de poussières présentes dans les disques protoplanétaires
- Elles perturbent gravitationnellement ces disques (formation de sillons (« gaps »))
- Les disques en retour, exercent un moment de forces négatif sur les proto-planètes, et les font migrer vers l' étoile

Disques de poussières de 2ème génération (disques de « débris »)

Disques de 2ème génération

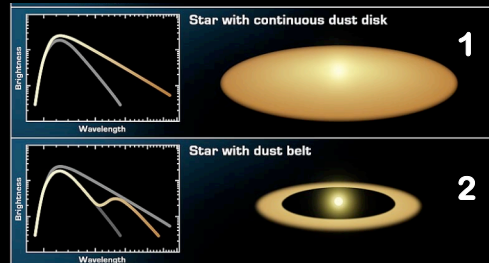
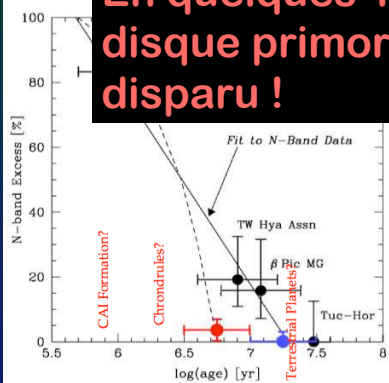
Le déclin du disque primordial



Disques de 2ème génération

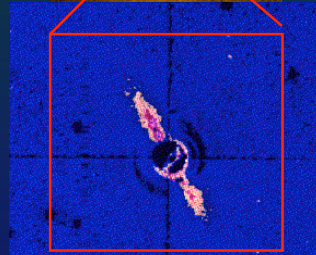
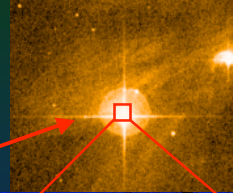
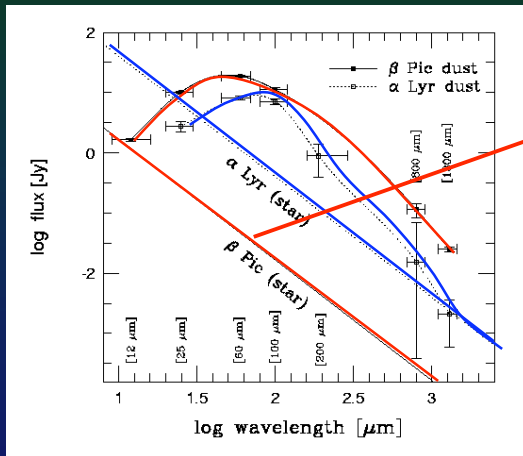
Observations : Les disques primordiaux disparaissent avec le temps !

En quelques 10 millions d'années, le disque primordial a complètement disparu !



Disques de 2ème génération

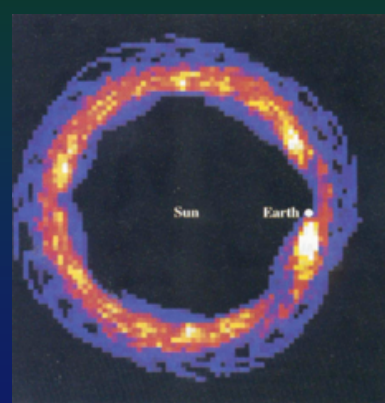
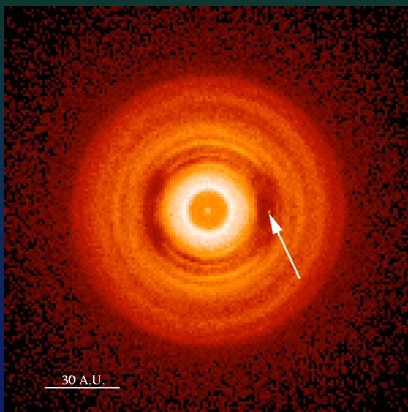
La surprise apportée par IRAS (1984)



Grains très petits $\sim 1 \mu\text{m}$

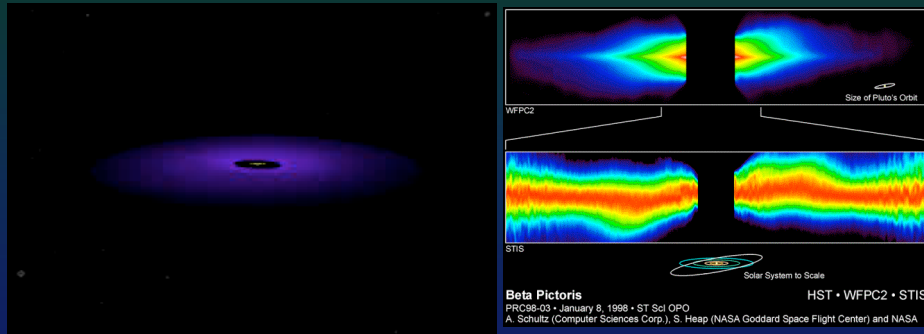
Disques de 2ème génération

Une méthode de détection indirecte de planètes !



Disques de 2ème génération

Interaction planètes-disques



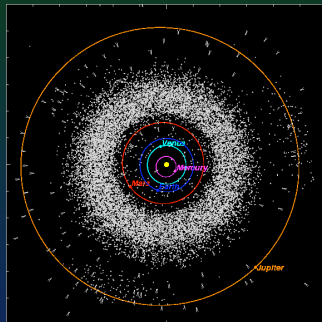
7 Août 2007

Festival de Fleurance

35

Disques de 2ème génération

Et dans les régions les plus centrales ?



Observations avec un coronographe
(intensité étoile/disque = 10 000 !)

Informations intéressantes
MAIS les régions centrales
inaccessibles

60 UA



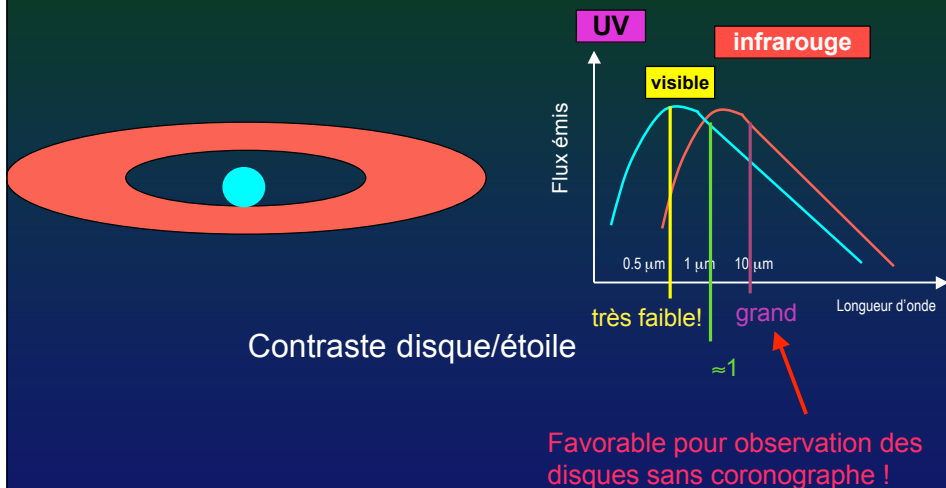
7 Août 2007

Festival de Fleurance

36

Disques de 2ème génération

Comment observer une bougie à coté d'un phare



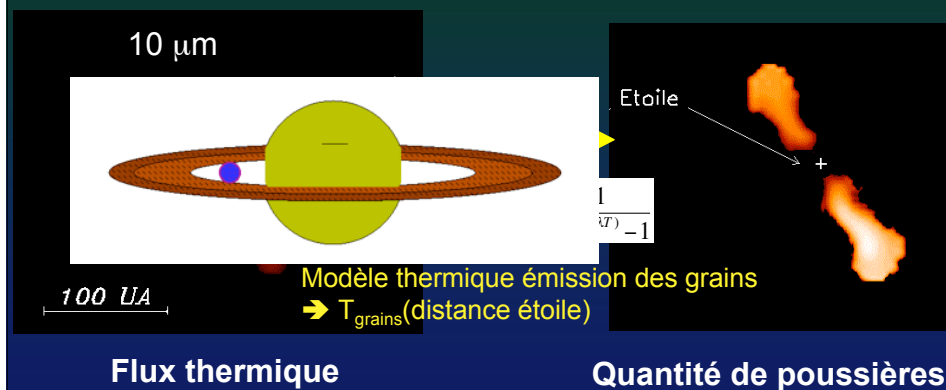
7 Août 2007

Festival de Fleurance

37

Disques de 2ème génération

Observations en infrarouge (10 μm) ou comment détecter la "chaleur" émise par les grains de poussières



7 Août 2007

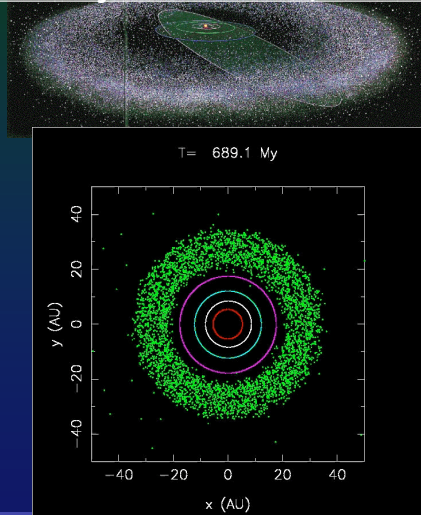
Festival de Fleurance

38

Disques de 2ème génération

Comment régénérer "brusquement" un disque de poussière ?

Notre système Solaire, T=800-900 Ma :



« Late Heavy Bombardment »
(bombardement tardif massif) :

- Formation des cratères sur la Lune.
- Le système solaire "s'agrandit" (20 → 40 UA)
- Apport de l'eau sur Terre par les comètes ??



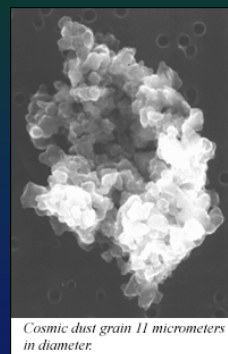
7 Août 2007

Festival de Fleurance

39

Disques de 2ème génération

Des collisions titanesques !



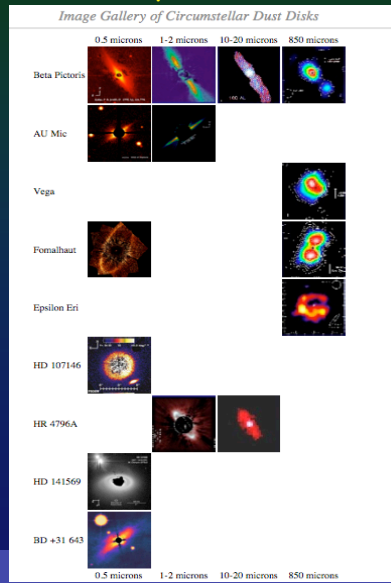
7 Août 2007

Festival de Fleurance

40

Disques de 2ème génération

Bien d'autres disques découverts par la suite

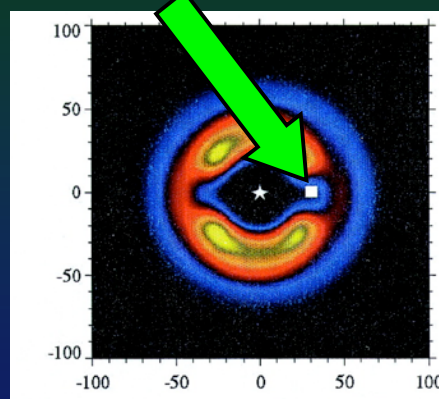
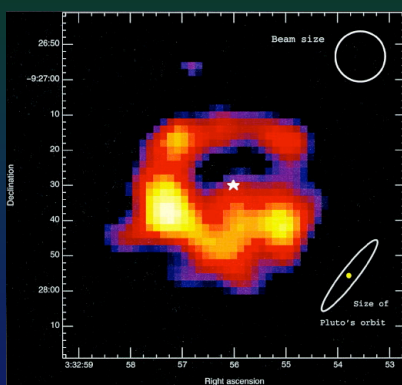


7 Août 2007

41

Disques de 2ème génération

Epsilon Eridani



Particularité : planète découverte par vitesses radiales !

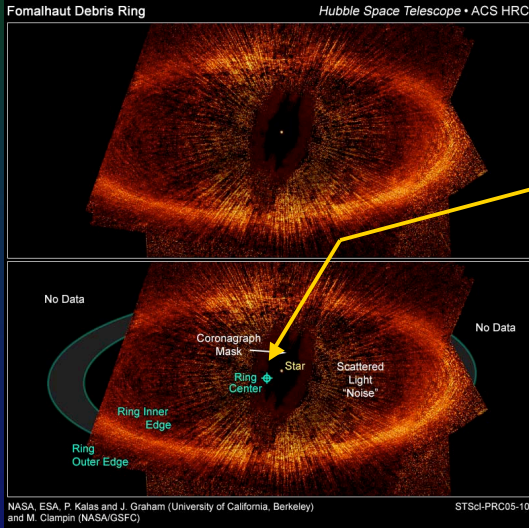
7 Août 2007

Festival de Fleurance

42

Disques de 2ème génération

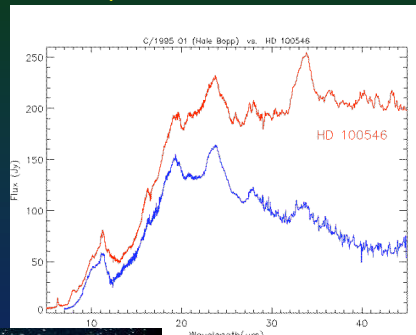
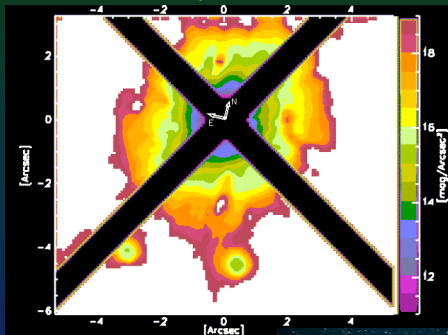
Fomalhaut



Décentrage du disque : présence d'une planète ??

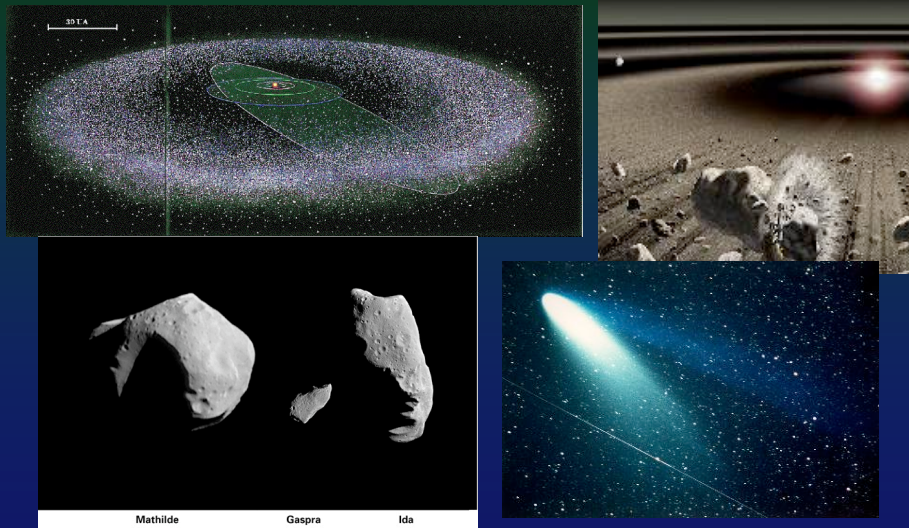
Disques de 2ème génération

Des disques de « débris » à notre système solaire



Disques de 2^{ème} génération

Des disques de « débris » à notre système solaire



7 Août 2007

Festival de Fleurance

48

Des nuages moléculaires aux étoiles

Résumé

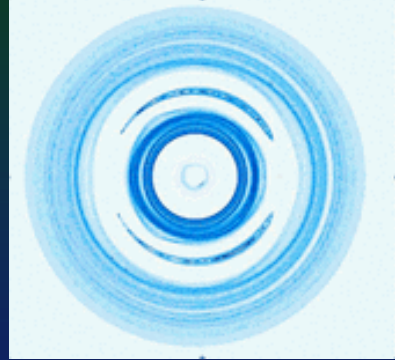
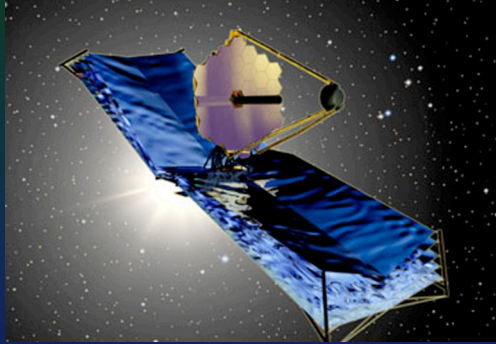
- Les disques de débris sont des disques de 2^{ème} génération
- Probablement régénérés lors de collisions titanesques entre corps de tailles 0.1-10 km (planétésimaux ??)
- mécanisme nécessairement continu, car temps de survie des grains \approx 1000 ans seulement
- Les planètes interagissent avec les disques de poussières et créent des structures (vides de matière au centre, gauchissements, asymétries) par interaction gravitationnelle à outil de détection indirecte de planètes
- Liens étroits avec le système solaire (comètes ...)

7 Août 2007

Festival de Fleurance

48

Epilogue : le futur de l'observation des disques



**NGST Rebaptisé JWST :
James Webb Space Telescope**

7 Août 2007

Festival de Fleurance

47

Conclusions

- Il y a 30 ans, incertitudes sur existence de disques, rôle dans la formation de planètes
- Aujourd'hui : des disques partout ! Phénomène "universel", autour d'étoiles de 1/100 à 10 fois la masse du Soleil !
- Les disques permettent de "concentrer" (densifier) la matière, créent les conditions physiques pour former les planètes (=> universalité de présence de planètes), pouponnières à planètes.
- Les disques de "débris" (2^{ème} génération) nous apportent des méthodes nouvelles de détection (indirecte) de planètes
- Liens évidents avec notre système solaire : "l'histoire se reproduit" dans ces disques, nous permet de mieux comprendre ce qui s'est passé chez nous.

7 Août 2007

Festival de Fleurance

48

Questions ouvertes :

- Causes exactes du « déclin » des disques jeunes (transition "très" rapide, 100000 ans)
- Comment stopper la migration "inéluçtable" des planètes géantes vers leurs étoiles ?
- Les disques de débris sont-ils l'exception ou la règle ? (15 % de détection, dépendance/masse étoile ?)
- Lien avec à l'apparition/disparition de la vie ? Conditions favorisant (défavorisant) son apparition ?

7 Août 2007

Festival de Fleurance

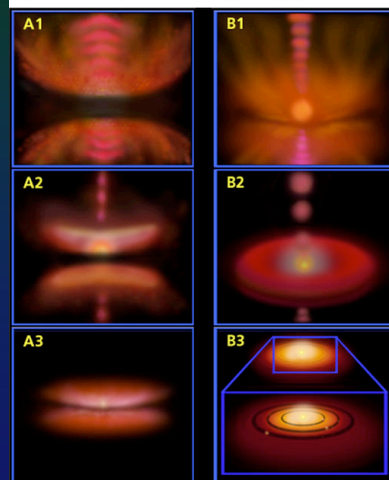
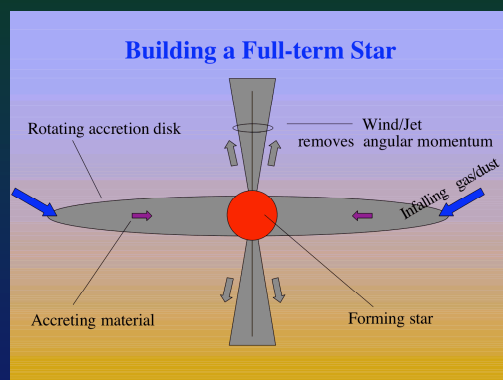
49

Des nuages moléculaires aux étoiles

Résumé phase de
10 000 à 1 000 000 ans

How Circumstellar Disks Form and Evolve

This illustration is an artist's conception of how gas and dust around a newborn star evolves into a planetary system. Three stages of star and planet formation are depicted in panels 1, 2, 3. For each stage, the circumstellar disk is shown edge-on ("A" panels), with the disk eclipsing the star, and at a tilt halfway between edge-on and face-on ("B" panels). For the "B" illustrations, the brightness of the young star has been de-emphasized to show details in the evolving planetary system.



7 Août 2007

Festival de Fleurance

50