

Formation des protoplanètes

Hugo Legalois

May 2024

1 Introduction

La formation des protoplanètes représente une étape cruciale et fascinante de la formation des systèmes planétaires, un processus qui a forgé les planètes de notre Système solaire, mais aussi de nombreux autres systèmes exoplanétaires. Ce processus de formation des planètes commence par une étoile naissante, appelée protoétoile, s'entourant d'un disque de gaz et de poussière formant un disque protoplanétaire. Ce disque est le résultat de la contraction gravitationnelle d'un nuage moléculaire géant. Les matériaux dans le disque sont soumis à des forces gravitationnelles, ainsi qu'à des forces de pression et centrifuges qui influencent leur mouvement et leur distribution. Les grains de poussière vont s'agréger par collisions et accréation mutuelle pour former des agrégats plus grands, appelés planétésimaux. Lorsque les planétésimaux continuent de croître, ils deviennent des protoplanètes, des embryons planétaires ayant une masse suffisante pour influencer leur environnement gravitationnellement. Les protoplanètes continuent de croître en absorbant les planétésimaux environnants et en fusionnant avec d'autres protoplanètes pour ainsi former les planètes.

Nous allons principalement nous intéresser à l'étape de formation des protoplanètes et donc la manière précise dont les agrégats initiaux, de la taille de grains, évoluent pour devenir des protoplanètes.

2 La théorie

Les théories actuelles de la formation des protoplanètes reposent sur l'interaction de plusieurs forces fondamentales : la gravité:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

la pression du gaz avec les gradient de pression:

$$\nabla p = \frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}$$

et la force centrifuge:

$$\mathbf{F}_{\text{centrifuge}} = m\omega^2 \mathbf{r}$$

. avec

$$\omega^2$$

la vitesse angulaire du disque

\mathbf{r} est le vecteur position de la particule par rapport au centre de rotation du disque.

m la masse de la particule.

La gravité attire les particules vers

le centre du disque protoplanétaire, favorisant l'accrétion de matière, tandis que la pression du gaz agit dans le sens contraire pour empêcher une contraction trop rapide du disque, mais possède aussi un rôle attractif. La force centrifuge, résultante de la rotation du disque, contribue à maintenir un équilibre entre ces deux forces. Le gaz est dit Keplerien, avec pour vitesse orbitale v d'un corps en orbite circulaire autour d'un autre corps plus massif la formule

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

où :

- v : Vitesse orbitale (en m/s)
- G : Constante gravitationnelle ($G \approx 6.67430 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)
- M : Masse du corps central (en kg)
- r : Distance entre les centres des deux corps (en m)

Le gaz peut aussi être défini par le nombre de Stokes:

$$St = \frac{\eta \cdot \rho \cdot U}{\gamma}$$

où :

- St : Nombre de Stokes (sans unité)
- η : Viscosité dynamique du fluide (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
- ρ : Densité du fluide (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- U : Vitesse caractéristique du fluide (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- γ : Tension de surface du fluide (en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Si St supérieur à 1 les effets d'inertie des poussières prédomine sur les effets visqueux du gaz, les protoplanètes tournent alors plus vite que le gaz. Si $st=1$ les effets de force centrifuge de pression et de gravité sont du même ordre de grandeur ce qui peut entraîner un effondrement.

Toutefois, ce modèle simplifié doit encore être confronté à la complexité des interactions dynamiques et thermodynamiques réelles dans les disques protoplanétaires. Une problématique majeure dans l'étude de la formation des protoplanètes réside dans la compréhension de l'évolution des petits grains de poussière en planétésimaux de taille kilométrique, puis en protoplanètes. Les collisions entre particules de poussière, les effets de la turbulence, ainsi que les forces d'attraction et de répulsion à diverses échelles jouent un rôle crucial, mais leur contribution exacte et leur interaction ne demeurent que partiellement élucidées. En outre, les mécanismes par lesquels les protoplanètes migrent et se stabilisent dans leurs orbites finales posent également des défis théoriques et observationnels significatifs. Dans ce projet, nous nous intéresserons à l'agrégation de ces grains à grande et petite échelle

3 Modèle à grande dimension

On a pour objectif de réaliser un modèle numérique permettant de simuler la formation des protoplanètes. Pour ce faire, nous allons commencer par placer quelques grains dans un espace en orbite autour d'une étoile centrale, chaque grains est caractérisé par

6 paramètres, qui sont: leur position en x et en y , leur vitesse angulaire ω_x et ω_y , leur masse et pour finir leur existence. Pour commencer la simulation et pour faciliter notre modèle, on suppose que le disque protoplanétaire est déjà relativement bien formé à l'instant $t=0$ et donc que les grains sont tous sur un même plan z , Chaque grains possède la même masse initiale et sont répartis autour d'un disque à une distance aléatoire d'un point central. On considérera la présence d'un soleil de masse largement supérieur situé au niveau du point central. Le fluide est supposé de même densité.

Grâce aux différentes forces vues ci-dessus, nous pouvons faire évoluer chaque paramètres de chaque grain au cours du temps, et ainsi suivre la trajectoire des grains en calculant la sommes de forces exercée pour un grain par ses voisins, ainsi que lui-même. La force totale est la somme de la force centrifuge, de la force de gravitation et de la force de pression :

$$\vec{F}_{\text{totale}} = \vec{F}_{\text{centrifuge}} + \vec{F}_{\text{gravitation}} + \vec{F}_{\text{pression}}$$

En décomposant chaque composante de la force :

- Force centrifuge : $\vec{F}_{\text{centrifuge}} = m(\omega_x^2 x + \omega_y^2 y) \hat{r}$
- Force de gravitation : $\vec{F}_{\text{gravitation}} = -\frac{GMm}{(x^2+y^2)} \hat{r}$
- Force de pression : $\vec{F}_{\text{pression}} = -\frac{1}{\rho} \nabla P$

où :

- m est la masse de l'objet en orbite.
- ω_x et ω_y sont les vitesses angulaires selon x et y .

- x et y sont les positions selon les axes x et y .
- G est la constante gravitationnelle.
- M est la masse de l'objet central (par exemple, une étoile).
- ρ est la densité du fluide.
- P est la pression du fluide.
- \hat{r} est le vecteur unitaire radial.

En combinant ces forces, l'équation complète devient :

$$\vec{F}_{\text{totale}} = m(\omega_x^2 x + \omega_y^2 y) \hat{r} - \frac{GMm}{(x^2 + y^2)} \hat{r} - \frac{1}{\rho} \nabla P$$

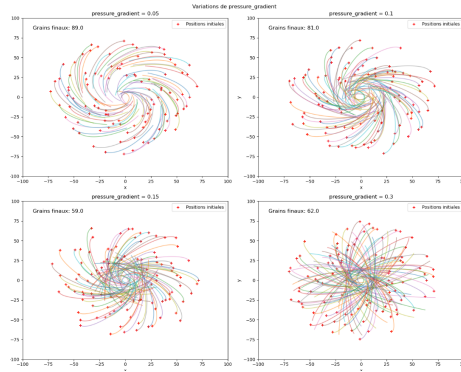
Pour simuler les collisions entre grains, on supposera simplement que les grains fusionnent entre eux lorsque la distance les séparant est suffisamment petite. Cela aura pour effet de créer un nouveau grain dont la position, la vitesse angulaire sont la moyenne des positions et vitesses des deux grains, et dont la masse est la somme des deux masses.

4 Résultats

Dans un premier temps j'ai fait varier les paramètres suivant: l'intensité exercée par le gradient de pression du gas, la masse de l'étoile central, la vitesse angulaire, et la valeur de la constante G .

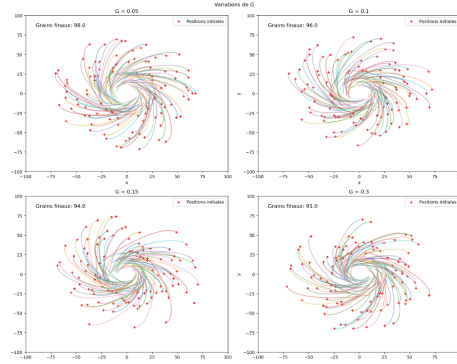
4.1 La pression

Dans le cas de la variation de la force exercée par la pression, nous pouvons observer que plus le paramètre du gradient de pression est élevé et plus les grains se rapprochant de l'étoile vont se retrouver repoussés. Ce phénomène caractérise bien la pression créée par la compression du gaz et des grains lorsqu'il se comprime autour de l'étoile centrale. Si p n'est pas assez grand alors les grains vont se écraser sur l'étoile, inversement si p est trop grand alors les grains vont alors après s'être approchée de l'étoile être éjecté.



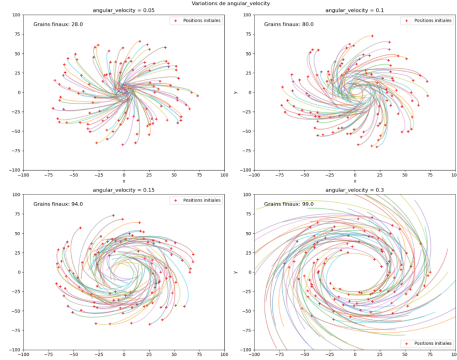
4.2 La constante gravitationnelle

En faisant varier le paramètre G , nous pouvons observer une trajectoire se rapprochant un peu plus rapidement de l'étoile centrale, et est accompagnée d'une diminution du nombre de grains. Ce phénomène est dû à l'interaction gravitationnelle attractive qui augmente entre chaque corps.



4.3 La vitesse angulaire

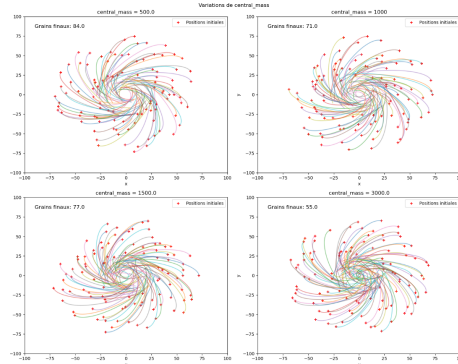
Nous avons ensuite fait varier le paramètre de la vitesse angulaire (et donc la force centrifuge). Nous pouvons observer que les grains se rapprochent plus lentement de l'étoile centrale et parcourent des distances plus longues ainsi que des trajectoires plus circulaires. Si la vitesse n'est pas assez grande il y a effondrement, inversement si elle est trop grande il y a éjection des grains.



4.4 La masse de l'étoile centrale

Pour finir, en faisant varier la masse de l'étoile centrale et donc la force d'attraction entre les grains et cette étoile, nous pouvons observer que les

grains ont une trajectoire moins circulaire et ont tendance à s'effondrer sur l'étoile si les autres paramètres ne permettent pas de compenser l'effondrement. De plus on peut aussi observer une diminution plus importante du nombre de grains qui pourrait être lié à l'accumulation des grains dans espace plus réduit (un rayon autour de l'étoile plus petit).



Ainsi, afin de permettre la formations des protoplanètes puis des planètes, il nous faut avoir un juste équilibre entre les différents paramètres permettant de garder les grains en orbites autour du soleil sans qu'ils s'effondrent ni s'éjectent tout en garantissant leur rotation et l'accrétion des grains.

5 Pour aller plus loin

J'aurais pu aller plus loin dans mon modèle avec des grains de masses de départ différentes, mais aussi donc des vitesses différentes et des positions de départ différentes tout en gardant une cohérence entre ses grandeurs.

J'aurais aussi pu améliorer le modèle de collision car en effet dans la réalité, les grains ne s'agglomèrent pas nécessairement mais peuvent autrement se diviser en se fracturant ou encore ricocher entre eux sans

nécessairement impliquer une accrétion directe ou totale. Je n'ai pas non plus considéré l'accrétion des grains sur l'étoile.

Pour finir, une des principales limites de mon problème est qu'il est incomplet car il ne prend pas non plus en compte certaines lois thermodynamiques ou de densité du gaz qui est inhomogène..

6 Etude des grains

Après avoir étudié les trajectoires des grains au voisinage d'une étoile, nous avons décidé de focaliser sur les nuages de poussière présents dans les disques protoplanétaires, et plus précisément dans un petit espace délimité. Cette transition d'échelle nous permettra peut-être de mieux comprendre les interactions locales entre les grains de poussière, qui sont cruciales pour la formation des protoplanètes.

L'objectif de cette étude est d'analyser les interactions entre les grains de poussière dans un disque protoplanétaire en tenant compte des phénomènes d'instabilité et de turbulence. Ces phénomènes jouent un rôle essentiel dans l'agrégation des grains et, est un processus fondamental pour la formation des planétésimaux puis des protoplanètes et par conséquent des planètes.

Les phénomènes mis en jeu seront l'instabilité de Kelvin-Helmholtz qui se produit lorsque deux couches de fluides de densités différentes se déplacent à des vitesses relatives. Dans les disques protoplanétaires, cette instabilité peut entraîner la formation de structures turbulentes qui concentrent la poussière, facilitant l'agrégation des grains, et les mouvements chaotiques et les perturbations aléatoires dans le

disque protoplanétaire peuvent augmenter les collisions entre les grains. La turbulence peut être causée par diverses sources, comme l'agitation thermique, les instabilités gravitationnelles ou les vents stellaires. Dans notre cas nous nous concentrerons particulièrement sur la partie instabilité dû au chaos et des mouvements aléatoire.

7 Méthode à petite dimension

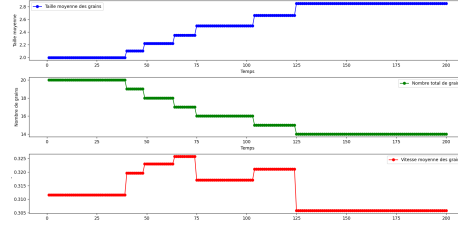
Dans un premier temps, nous avons simulé le mouvement des grains de poussière dans un espace restreint sans inclure les effets d'instabilité et de turbulence. Chaque grain se déplace avec une vitesse constante et rebondit sur les parois de l'espace de simulation et entre eux. Les grains peuvent également s'agglomérer en fonction de leur vitesse relative lors de la collision. Puis dans un second temps, nous avons introduit les effets d'instabilité de Kelvin-Helmholtz et de turbulence dans notre simulation. Les perturbations aléatoires ont été ajoutées aux vitesses des grains pour simuler la turbulence en faisant varier aléatoirement la vitesse des grains.

8 Résultats

Nous pouvons observer sur nos vidéos que le modèle fonctionne bien, en jouant avec le paramètre de proba on peut augmenter ou réduire la fréquence des phénomènes de collage. On peut observer après l'ajout des paramètres d'instabilité et turbulence que les grains ont une vitesse et une direction qui n'est plus uniquement dépendante de sa vitesse initiale et des grains en-

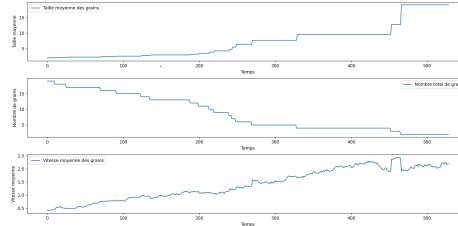
vironnant, mais aussi de paramètres extérieur modifiant très légèrement la trajectoire ou la vitesse.

8.1 Sans insatbilité et turbulence



On observe une symétrie avec une anti corrélation entre la variation du nombre de grains et de la taille des grains au cours du temps. La vitesse moyenne des grains semble très peu évoluer.

8.2 Avec Instabilité et turbulence



On retrouve la symétrie. Lorsque les grains sont soumis à des perturbations turbulentes, ils montrent des mouvements chaotiques et les collisions semblent plus fréquentes, ce qui favorise une croissance plus rapide en video, meme si le résultats inverse est montré sur les graphes en raison d'une proba de collage des grains qui est plus forte dans le premier cas indépendamment du paramètre de collage. Pour finir, on peut observer que la vitesse moyenne des grains varie plus fortement et semble augmenter en moyenne.

9 Pour aller plus loin

Pour aller plus loin, on aurait pu inclure les effets de gravité et d'attraction entre les grains (en fonction de leur taille pourquoi pas). On pourrait aussi corriger certains bugs au niveau de la limite de l'espace avec des grains qui interagissent étrangement.

10 Conclusion

En conclusion, la formation des protoplanètes est un processus complexe influencé par divers paramètres tels que la pression du gaz, la constante gravitationnelle, la vitesse angulaire, et la masse de l'étoile centrale. Nos simulations ont montré que l'équilibre entre ces paramètres est crucial pour éviter l'effondrement ou l'éjection des grains, permettant ainsi leur accréation et la formation progressive de planétésimaux puis de

protoplanètes. Une pression de gaz adéquate permettrait de maintenir les grains en orbite sans qu'ils s'écrasent sur l'étoile ou ne soient éjectés, tandis que des variations de la constante gravitationnelle et de la vitesse angulaire influencent la trajectoire et la concentration des grains. De même, la masse de l'étoile centrale joue un rôle essentiel dans la dynamique du disque protoplanétaire. Pour approfondir ce modèle, des études futures pourraient intégrer des grains de masses initiales différentes, des modèles de collision plus réalistes, et l'accréation des grains sur l'étoile, afin de mieux représenter les conditions réelles dans les disques protoplanétaires. Les phénomènes d'instabilité et de turbulence semblent avoir une influence sur la façon dont vont s'agglomérer les grains, en influençant le collage, la vitesse des grains et donc leur fréquence de collage.

11 Graphes

