Rôle des conditions primitives d'accrétion dans le disque solaire

Autor(en): **Cuénod, Solange**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **49 (1991)**

Heft 242

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-898922

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Rôle des conditions primitives d'accrétion dans le disque solaire

SOLANGE CUÉNOD

Résumé: La distribution de la quantité de matière en orbite autour du Soleil est le reflet des conditions physiques qui régnaient dans le disque d'accrétion au moment où la matière condensée commençait à s'agglomérer. On y voit ce qui pourrait être l'empreinte du fort vent T Tauri émis par le Soleil dans sa jeunesse. La petite taille de Mars et la ceinture des astéroïdes sont expliqués par la lenteur du processus d'accrétion dans leurs régions respectives. La théorie exposée permet aussi d'expliquer la présence des anneaux entourant les planètes géantes ainsi que l'existence d'un immense anneau contenant la réserve des noyaux de comètes.

Introduction

Tout comme d'autres étoiles, le Soleil est issu de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz, composé essentiellement d'hydrogène moléculaire et, pour une plus faible part, d'hélium, ainsi que de traces d'autres gaz et de poussières de compositions chimiques variées. Une partie de la matière s'accumule au centre où naît une étoile, tandis que le reste, retenu par la force centrifuge, s'étale en un disque au sein duquel gaz et poussières sont vigoureusement brassés, permettant la formation d'un système planétaire tel que celui que nous connaissons.

Dans un premier temps, les poussières se concentrent dans le plan équatorial, non sans s'être, pour beaucoup d'entre elles, agglutinées les unes aux autres au cours de leur «chute», les plus gros amas arrivant les premiers (1).

Grâce à la viscosité du gaz, les amas les plus gros grossissent, formant des blocs peu compacts dont la taille est de l'ordre de plusieurs kilomètres, ce sont les planétésimaux.

Par la suite, ces planétésimaux engendrent des corps plus compacts appelés planétoïdes, qui, au cours de rencontres brutales, se fracturent, les débris pouvant être capturés par attraction gravitationnelle (2). Ainsi, au gré des probabilités de rencontres, qui dépendent vraisemblablement de la quantité de matière présente, dans certaines régions, une grosse planète pourra se former, alors que dans d'autres, seulement une petite planète naîtra ou même aucune. Existe-t-il une relation consistante entre la quantité de matière présente actuellement en diverses régions du système solaire et les conditions qui pouvaient régner dans le disque protoplanétaire au moment de l'élaboration des planétésimaux? C'est l'objet du présent article que de proposer une réponse positive à cette question. En supposant que là où l'accrétion de la matière condensée a pu se faire rapidement, beaucoup de matière est finalement présente, mais que, par contre, la petite taille de Mars et l'absence de planète dans la région de la ceinture des astéroïdes sont dues à la lenteur du processus dans cette région, on pourra expliquer pourquoi, au-delà de l'orbite de Pluton, seuls des planétésimaux peuvent être actuellement présents et pourquoi les planètes géantes sont entourées d'anneaux de matière peu accrétée .

Mécanisme de formation des planétésimaux

En l'absence de gaz, un corps solide (ou liquide) de masse m, tourne autour du Soleil (ou d'une autre étoile) dont la masse est M, à la vitesse, dite képlerienne, V_k. Cette vitesse varie avec la distance héliocentrique R suivant la loi: $V_k^2 = GM/R$, où G est la constante universelle de la gravitation.

En présence d'un gaz, il existe une poussée dirigée vers les pressions décroissantes que nous pouvons négliger car la densité de la matière condensée est bien supérieure à celle du gaz. Par contre, pour le gaz lui-même, cette poussée doit être prise en considération (3). Elle a pour effet de diminuer sa vitesse qui sera inférieure à V_k, cela tout au moins suivant l'hypothèse généralement admise de la décroissance de la pression quant R augmente. La valeur de cette poussée est égale au produit du volume de gaz considéré par le gradient de la pression P. Si ρ est la densité et en posant P' pour le gradient de P, la vitesse V du gaz est telle que:

$$V_k^2 = GM/R + (R/\rho)P'$$

Pour la différence u entre la vitesse des corps solides et celle du gaz, on peut faire l'approximation:

$$(I) \quad u = V_k - V \cong \frac{1}{2}\left(R^3/GM\right)^{\frac{1}{2}} \frac{-P'}{\rho} = -\frac{1}{2\Omega_k}\frac{P'}{\rho}$$

où Ω_κ est la vitesse angulaire képlerienne.

Comme on le remarque, les calculs précédents concernent des trajectoires circulaires et c'est la viscosité du gaz qui nous vaut cette appréciable simplification, car elle tend à arrondir les orbites des corps solides. Un autre effet simplificateur de la viscosité est qu'elle réduit l'inclinaison de ces orbites. Par contre, le problème se complique quand un autre effet doit être pris en compte, celui dû au cisaillement des couches adjacentes du gaz dont les vitesses angulaires diffèrent suivant les distances héliocentriques. Ce frottement du gaz sur lui-même engendre une perte d'énergie permanente dont la conséquence est de faire «tomber» vers le Soleil la partie intérieure du disque alors que la partie la plus éloignée est entraînée vers l'extérieur (4). Mais les vitesses ainsi induites sont extrêmement faibles et nous pouvons les négliger pour l'instant en oubliant que les trajectoires, plutôt que circulaires, sont des spirales.

Weidenschilling a étudié l'effet de la viscosité du gaz sur les corps solides qui répondent de manière différente à la vitesse relative u du gaz suivant leur dimension (5). Dans le cas qu'il a pris en considération, où u>0, les corps solides vont plus vite que le gaz et sont freinés. Il s'agit donc d'une perte d'énergie qui va les faire dériver sur des orbites plus intérieures, favorisant ainsi les rencontres. Cependant les particules les plus fines vont coller au gaz et seront entraînées par lui. Les corps les plus gros, étant soumis à une véritable tempête de sable, vont grossir, cette croissance étant d'autant plus rapide que les corps seront gros. Tout ce qui aura pu se déposer sur les planétésimaux contribuera à l'élaboration du système planétaire, alors que le reste sera finalement éliminé avec le gaz.

Ceci donne l'idée que le processus permettant aux planétésimaux d'acquérir de la matière est limité par la durée de la présence du gaz.

Montrons que, pendant une durée fixe Δt symbolisant la durée limitée de croissance des planétésimaux, leur rayon r augmente proportionnellement à ρu:

L'augmentation de matière est le produit du volume balayé $\pi r^2 u\ dt$ par la densité de matière condensée sous forme de grains dans le gaz $\mu\rho$, où μ est le volume des grains contenus dans 1g de gaz. On a donc:

$$\frac{d\omega}{dt} = \pi r^2 u \cdot \mu \rho$$

D'autre part, le taux d'accroissement de volume du planétésimal est

$$4\pi r^2 \frac{dr}{dt}$$

qui est égal à $\frac{d\omega}{dt}$. On en tire $\frac{dr}{dt} \sim \rho u$.

En intégrant sur la période Δt, il vient

$$(II) \qquad r \sim \rho u \Delta t$$

Si l'on suppose que la répartition des plus gros planétésimaux fut uniforme dans le disque, leur volume total qui, en fin de compte, se retrouvera dans une planète unique, serait proportionnel à la surface de son aire d'alimentation et à r^3. Ainsi r^3 serait-il proportionnel au rapport λ entre le volume d'une planète et la surface de son aire d'alimentation. En s'occupant du volume plutôt que de la masse de la matière accrétée, on atténue l'effet de la température sur la composition chimique et donc sur la densité. Suivant notre raisonnement très simplificateur, on voit, en appliquant la relation (II) que, pour une durée Δt fixée, $\lambda^{1/3}$ est proportionnel à ρu. Vu que λ fait partie des données actuellement disponibles, il est intéressant de pouvoir remonter à la répartition de ρu, même si c'est de manière imparfaite. Les résultats obtenus justifieront la méthode.

Interprétation des conditions actuelles

Une première remarque s'impose. Quand on considère l'étendue de la ceinture des astéroïdes, de 2,5 à 4 UA, on est amené à constater qu'elle correspond exactement à ce qu'aurait été la zone d'alimentation d'une planète qui s'y trouverait. Cela conduit à penser que les astéroïdes sont des planétoïdes dont l'accrétion n'a pu aboutir. On accuse souvent Jupiter d'avoir perturbé les mécanismes d'accrétion dans son entourage, à cause de son énorme masse (6). Mais cette explication comporte de lourd inconvénient de présupposer une croissance précoce de cette planète, ce qui est d'autant plus embarrassant que c'est à son atmosphère, et non à son noyau, que Jupiter doit son gigantisme. Alors, proposons une autre explication, non sans avoir remarqué au préalable que la quantité de matière constituant la ceinture des astéroïdes est extrêmement faible (environ 1/1000 de la masse terrestre). Supposons simplement que u avait une valeur très petite dans cette région. Qu'est-ce qui pouvait agir de la sorte sur la valeur de u? Un coup d'oeil à la relation (I) nous fait voir qu'il suffit que P' soit presque nul. Or cela peut se produire de deux façons: soit la pression passe par un maximum non loin de là, soit elle comporte une inflexion à tangente horizontale. La première possibilité paraît la plus vraisemblable, bien qu'elle implique alors que la pression ne soit pas décroissante pour toute valeur de R, ce qui est considéré comme une «hypothèse raisonnable» d'une façon générale (voir 5). Or il semble que le vent solaire, dans sa phase T Tauri, aurait bien pu repousser le disque, transformant la lente chute de matière due à la viscosité, en un flux dirigé en sens inverse. Ce reflux de matière aurait créé une zone de maximum de densité, celle-ci se serait alors éloignée à mesure que l'intensité du vent agissait. Les conditions dans la partie interne du disque évoluaient avec le temps. Nous sommes ainsi obligés de regarder u comme une fonction de R et de t, alors que λ n'est fonction que de R. Il ne faut donc pas perdre de vue que les valeurs de λ pour des distances héliocentriques < 5 UA ne représentent que le résultat final de conditions variables.

De la relation (I) on peut tirer $P' \sim \rho u \Omega_k$,

donc: $P' \sim \lambda^{\frac{1}{3}} \Omega_k$.

Tout se passe, en fin de compte, comme si P avait été croissante dans la région intérieure (à la ceinture des astéroïdes) et décroissante dans la région extérieure. Ceci implique que la poussée due au gradient de la pression aurait été héliocentrique dans la région intérieure, ce qui aurait donné au gaz une vitesse supérieure à la vitesse képlerienne. On aurait donc dans cette région $u<0$ ce qui nécessiterait de considérer que λ aussi y est négatif. Dans la région extérieure, P' est conforme au modèle stationnaire d'une pression décroissant suivant une loi $P/P_o=(R/R_o)^{-n}$, mais il faut reconnaître que l'incertitude est grande quant aux valeurs de λ, étant donné que les rayons des noyaux des planètes extérieures ne sont actuellement connus que très approximativement.

Un argument en faveur de l'hypothèse d'un maximum de pression aux environs de la ceinture des astéroïdes est que le maximum de densité doit se situer plus loin car la température décroît en s'éloignant du Soleil. Si Jupiter avait capté son atmosphère lors d'un maximum de densité, on comprendrait pourquoi elle est aussi énorme. En supposant que le maximum de densité soit resté assez longtemps au même endroit, cela pourrait servir à comprendre pourquoi l'axe de rotation de cette planète est presque parallèle à celui du disque. En effet, les noyaux planétaires se forment par rencontres brutales de planétoïdes. Dans un gaz de forte densité, ils avaient plus de chances d'avoir des orbites coplanaires.

La présence des planètes troyennes sur la même orbite que Jupiter ne serait possible en présence de gaz que si sa vitesse était képlerienne, car allant à la même vitesse que les corps solides, les traînées agissant sur des planètes de différentes tailles seraient toutes nulles, donc égales. Ceci nous porte à croire que, dans sa phase finale, le vent solaire aurait poussé le maximum de pression jusqu'à la distance de Jupiter. Dans ce cas, le maximum de densité se serait trouvé encore plus loin, ce qui pourrait avoir provoqué une nouvelle capture d'atmosphère. En effet, les satellites de Jupiter semblent avoir été formés par groupes, de manière épisodique.

Par contre, les satellites de Saturne, à part les deux plus éloignés, gravitent dans le plan équatorial de la planète, ce qui permet de penser qu'ils sont nés lors d'une même capture d'atmosphère. Voilà alors un bon modèle pour vérifier nos hypothèses! Il faut pourtant se garder de croire que le système saturnien est un système solaire en miniature. D'abord, l'astre central n'étant pas une étoile, il est exclu d'avoir une dépression centrale. Au contraire, on ne peut envisager autre chose qu'une pression fortement croissante en s'approchant du centre. Ensuite, la matière première était plus diversifiée que celle qui a engendré les planètes. De nombreux astéroïdes circulent

et les risques de captures gravitationnelles ne sont pas négligeables. Certains peuvent tomber sur la planète et faire grossir son noyau, d'autres peuvent se joindre au cortège des satellites en formation, comme il semble bien que ce soit le cas pour Hypérion, gros caillou de forme irrégulière. Mieux vaut ne pas en tenir compte si nous recherchons, dans le système saturnien, l'allure de la fonction λ en vue de la comparer à ce qu'elle est dans le système circumsolaire. Enfin, les valeurs de λ sont beaucoup plus élevées en moyenne. Comme elles représentent, rappelons-le, la densité superficielle de matière, comptée en volume accrété, pour chaque satellite, dans son aire d'alimentation, elles donnent l'idée d'une grande promiscuité dans laquelle des effets de marée et des interactions d'un satellite à l'autre n'ont rien d'étonnant. Alors que pour l'ensemble des planètes, la région la plus dense est celle de Vénus avec une valeur de 1,5 cm^3/cm^2, λ atteint son maximum à presque 500 dans le système saturnien (pour Téthys) et 5000 dans le système jovien (pour Io). La promiscuité des satellites, dans une région de forte densité du gaz ne peut que s'en trouver accrue car, allant plus vite que le gaz, les corps accrétés perdent de l'énergie par frottement, ce qui les fait dériver sur des orbites plus intérieures.

A partir des valeurs de $\lambda^{1/3}\Omega_k$, qui varient comme le gradient de la pression, si l'on néglige l'effet légèrement accélérateur de la viscosité, on obtient un profil relativement régulier, à condition de ne pas prendre en compte la valeur correspondant à Téthys qui est trop grande. Par intégration, on trouve le profil de P à une constante d'intégration près, mais on ne sait pas dans quel système d'unité, puisqu'on est parti d'une proportionnalité et non d'une égalité.

La formation des anneaux

Dans nos calculs relatifs au disque protoplanétaire, nous avons pu négliger l'effet de la viscosité du gaz. Nous allons voir que le phénomène de l'apparition d'anneaux proches de la planète peut s'expliquer par une diminution du gradient de pression dans le voisinage de l'orbite stationnaire. On appelle ainsi l'orbite pour laquelle la vitesse angulaire képlerienne est égale à la vitesse angulaire de la planète centrale. Par la suite, nous appellerons R_o le rayon de cette orbite. Ce rayon vaut 1,8 fois le rayon de Saturne et, pour Jupiter, il vaut 2,2 rayons jovien. Ce n'est certes pas un hasard si R_o est situé dans la région des anneaux. La viscosité du gaz est responsable d'un changement de régime dont la frontière est le cercle de rayon R_o.

Pour les distances $R>R_o$ le gaz tourne autour de la planète centrale à des vitesses qui dépendent de la distance. Les couches adjacentes frottent les unes sur les autres ce qui engendre une perte d'énergie. Le gaz, qui est contraint de graviter sur des orbites quasi-circulaires, va «tomber» sur une orbite plus intérieure. Remarquons en passant qu'une perte d'énergie, au lieu de le ralentir, va lui imprimer une vitesse plus grande, ce qui peut sembler paradoxal, mais cela contribue à entretenir le phénomène. L'effet global est un lent écoulement du gaz vers l'intérieur dont la vitesse radiale V_R est négative. Pringle (7) a établi, dans le cas d'un disque d'accrétion autour d'une étoile, en considérant le moment cinétique et en faisant l'hypothèse que les conditions ne changent pas avec le temps, une équation d'où nous pouvons tirer la densité superficielle du gaz:

$$(III)\quad \sigma = \frac{C/R^3}{(-V_R)\Omega - \gamma\left(-\frac{d\Omega}{dR}\right)}$$

où C est une constante d'intégration, Ω, la vitesse angulaire du gaz et γ, le coefficient de viscosité.

Nous allons voir que cette valeur de σ diminue assez brusquement quand le gaz arrive à une distance voisine de R_o.

Les considérations de Lynden-Bell & Pringle (4) au sujet de la couche frontière entre une étoile et son disque d'accrétion trouvent une application ici, et peuvent facilement être transposées.

Les couches de gaz qui entrent en contact avec la planète ont une vitesse angulaire Ω_o qui est la même que celle des couches en orbite à la distance R_o. La viscosité du gaz empêche la vitesse angulaire de croître au-delà d'une valeur maximale Ω_c, dite vitesse angulaire critique, Ω_c étant inférieur à la vitesse angulaire képlerienne à cette distance critique R_c.

On peut comprendre cela par une représentation très schématique: à l'extérieur de l'orbite stationnaire, le gaz dérive lentement en empruntant successivement des orbites circulaires, mais à partir de la distance R_o, il tombe radialement en rotation solide. Dans la réalité, il y a une transition entre les deux régimes, c'est pourquoi la vitesse angulaire du gaz continue d'augmenter après avoir atteint la valeur Ω_o, avant de décroître à nouveau. La vitesse $(-V_R)$ n'est plus une vitesse de dérive, mais presque une vitesse de chute libre. Elle devient donc beaucoup plus grande et diminue considérablement la valeur de σ donnée par l'équation (III) dans laquelle

$$\frac{d\Omega}{dR} \cong 0$$

Cette diminution de σ va se répercuter sur la valeur de la pression qui va baisser.

Dans la région extérieure à R_o, la pression augmente lorsqu'on se rapproche du centre, tout comme dans la partie extérieure du disque circumsolaire. Mais dans la région proche de R_o, la pression s'infléchit, entraînant une forte diminution de la valeur absolue de son gradient, peut-être même une annulation locale. L'effet ralentisseur du gradient de la pression peut, s'il est faible, être compensé par l'effet légèrement accélérateur dû au cisaillement du gaz, et ainsi le gaz peut approcher, atteindre ou même dépasser la vitesse képlerienne dans le voisinage de R_o. La matière va donc s'accréter très lentement formant un anneau dont la durée de vie va dépendre du taux de croissance de la planète centrale. A mesure que sa masse augmente, l'intérieur de l'anneau tombe, mais d'autre part la rotation de la planète ralentit, donc R_o augmente. L'anneau va naître par l'extérieur jusqu'au jour où, le gaz faisant défaut, les choses en resteront là.

On peut en conclure que les anneaux les plus extérieurs sont les plus récents. Ils se sont formés dans une région où la vitesse u avait précédemment une valeur plus élevée et qui a, par conséquent, permis l'accrétion de petits satellites. Il n'y a, finalement, rien de contradictoire dans la cohabitation de petits satellites avec de la matière qui n'a pas eu assez de temps pour évoluer au-delà du stade de planétésimaux.

On a découvert des satellites co-orbitaux à l'extérieur des anneaux de Saturne, mais aussi à l'extérieur de l'anneau de Jupiter. Cela fait penser aux planètes troyennes dont nous avons parlé plus haut, et nous pouvons y voir aussi l'effet d'une vitesse képlerienne commune au gaz et aux corps de matière condensée. Cependant, Téthys et Dione partagent aussi leurs orbites avec d'autres satellites. Il ne me paraît pas possible que u ait jamais pu avoir une valeur nulle à cette distance. Peut-être s'agit-il de captures ayant eu lieu après la disparition du gaz.

Les comètes

Au-delà de l'orbite de Neptune, seule une très petite planète a pu naître car le gradient de la pression tend vers zéro pour de grandes distances héliocentriques. Si on venait à découvrir une dixième planète, elle serait certainement encore plus petite que Pluton. Plus on s'éloigne du Soleil, plus les phénomènes d'accrétion sont lents. Aux confins du disque, la matière solide n'a pu dépasser le stade planétésimal, ce qui est bien confirmé par l'observation des comètes qui viennent jusqu'à nous. L'image du nuage de Oort paraît moins adéquate que celle d'un immense anneau contenant la réserve de comètes.

Comme tous les corps qui se sont formés loin de l'astre central, les inclinaisons de leurs orbites sur le plan médian sont considérables. On peut y voir, tout simplement, la preuve que la densité du gaz était trop faible pour offrir des forces de frottement capables de réduire les inclinaisons.

Conclusion

Moyennant l'hypothèse que la durée limite les possibilités d'accrétion dans les régions où elle se poursuit avec lenteur, alors que là où le processus se déroule rapidement, les planétésimaux grossissent sans épuiser les réserves, on est amené à en déduire que la quantité de grains qui alimentent le disque est bien supérieure à la quantité de matière actuellement présente. Nous sommes donc bien loin de la «nébuleuse minimale» dont on calcule la masse en ajoutant tout juste assez de composants chimiques à la matière actuellement présente, pour obtenir exactement la composition que la nébuleuse avait au départ (c'est-à-dire la composition du Soleil).

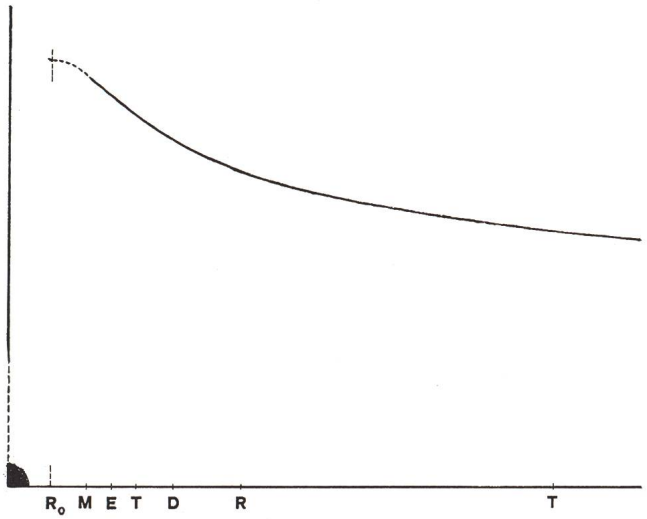
Cette hypothèse nous permet aussi de comprendre que la diversité des constituants du système solaire est due à différents stades d'évolution de la matière accrétée: planétésimaux (anneaux, comètes), planétoïdes et fragments (astéroïdes et météorites), planètes (planètes intérieures et Pluton ainsi que les noyaux des planètes extérieures), effondrements localisés du disque autour des noyaux des planètes extérieures (atmosphère et système de satellites).

Une dernière remarque s'impose. Si les grains contenus dans la nébuleuse ont pu s'agglomérer sous forme de planétésimaux, c'est à cause des propriétés physiques (mécaniques en particulier) du disque gazeux. Il y a donc tout lieu de penser que les autres systèmes planétaires doivent avoir quelque ressemblance avec le nôtre, du moins en ce qui concerne la répartition de la matière.

Système solaire		Système saturnien	
	λ cm		λ cm
Mercure	- 0.34	Anneaux	~ 0
Vénus	- 1.5	Petits sat.	~ 0
Terre-Lune	- 0.27	Mimas	60
Mars	- 0.05	Encelade	85
Ceint.	~ 0	Téthys	475
Jupiter	~ 1.3	Dione	256
Saturne	~ 0.44	Rhéa	105
Uranus	~ 0.13	Titan	460
Neptune	~ 0.1	Japet	0,8
Pluton	~ 0	Phoebe	~ 0
Comètes	~ 0		

SOLANGE CUÉNOD,
Ch. de la Roue, Villard, F-01220 Divonne

Mes remerciements vont au Pr B. Hauck pour les encouragements qu'il m'a apportés et pour l'opportunité de ce travail qui m'a été offerte au travers du séminaire d'Astronomie qu'il a créé à l'intention des maîtres du second degré.



La courbe en trait plein représente la valeur de la pression en fonction de la distance au centre de Saturne. Elle a été obtenue par intégration de

$$-\lambda^{1/3}\Omega_k$$

R_o représente le rayon de l'orbite stationnaire et les satellites sont indiqués par leurs initiales.

Bibliographie:

1. Weidenschilling S.J., 1980, Icarus 44: 172
2. HARTMANN W.K., 1978, ICARUS **33**: 50
3. WHIPPLE F.L., 1964, Proc. nat. Acad. Sci. **52**: 565
4. LYNDEN-BELL D. & PRINGLE J.E. 1974 Mon. Not. R. astr. Soc. **168**: 603
5. WEIDENSCHILLING S.J., 1977, Mon. Not. R. astr. Soc. **180**: 57
6. CAMERON A.G.W., 1988, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **26**: 441
7. PRINGLE J.E., 1981, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **19**: 137

15. Sonnentagung

der VdS-Fachgruppe Sonne vom 9.-12. Mai 1991

in Violau

Das Treffen für alle aktiven Sonnenbeobachter und jene, die es werden wollen.
Einführung in die Sonnenbeobachtung, Kurzberichte, Vorträge, Arbeitsgruppen Exkursionen, Beobachtungen, Kontakte

Organisation: Walter Diehl (Wetzlar), Kurt Hopf (VSW Hof)
Anmeldungen durch Überweisung von DM 160 auf folgendes Konto: Walter Diehl, Sparkasse Wetzlar, BLZ 515 500 35, Kto. Nr. 15317175

Informationen gegen Internationalen Rückantwortschein von W. Diehl Braunfelser Str. 79, D-6330 Wetzlar. Anmeldeschluss 31. 3. 1991