

やさしい惑星科学ゼミ
13章7節
ガス惑星の形成
2020/7/27

北海道大学理学部地球惑星科学科惑星宇宙グループB4
重綱理音

・概要

巨大ガス惑星の形成論についてこの章では考える。

まず条件を確認し、その後モデルに軽く触れる。そして主に以下の2つの説を議論する。

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

Core Nucleated Accretion(コア集積理論)

後半ではこの2つについて原始惑星系円盤から実際に惑星が作られるまでの物理過程を追う。

イントロダクション

各巨大惑星の基礎データ
(地球惑星科学入門より)

イントロダクション

黄色は最大値,水色は最小値

	木星	土星	天王星	海王星
質量(地球単位)	317.8	95.2	14.5	17.1
赤道半径(地球単位)	11.2	9.45	4.01	3.88
平均密度(g/cm ³)	1.33	0.69	1.27	1.64
自転周期(日)	0.414	0.444	0.718	0.671
公転周期(年)	11.9	29.5	84	164.8
軌道長半径(AU)	5.204	9.555	19.2	30.05

13.7 ガス惑星の形成 条件について

- ・惑星の形成論を考える上で以下のことを留意しておくべきである。



- ・必ず満たすべき条件(束縛条件)

土星や木星が大量のH₂, Heを含んでいることから**原始太陽系円盤からガスが吹き飛ばされる前に形成された**(10⁷年以内) という時間的
条件(タイムスケール)。

含まれる同位体の組成, 熱フラックスの存在, 軸の傾き, リングや衛星の軌道や組成の条件。

13.7ガス惑星の形成 組成について

ヘリウムより重い組成の割合(太陽は2wt%未満)

	太陽	木星	土星	天王星	海王星
Heより重い元素の質量(太陽の値で規格化している)	1	5	10	300	300

木星→天/海王星に進むにつれて

水素、ヘリウム質量 → 10^2 オーダーで変化(木星が多い)

重元素総質量 → 10^1 オーダーで変化(海王星が多い)

(NH₃は例外 → N₂なら当てはまる)

13.7 ガス惑星の形成 (NH₃の例外について)

NH₃から窒素混合比を求めると海王星に向かって重元素の高まり方が増えるという法則に合わなくなってしまう。しかしこれは**N₂**から窒素混合比を考えると法則に合う。(N元素の代表をどちらとして考えるかということだと思われる。)

(ちなみに硫黄の混合比としてはH₂Sが使われてるがこれは木星でしか直接検出されていない。)

(疑問)木星など天体によってはやはりNH₃として存在するのが自然に思える。->内側の還元的な環境ではNH₃が多く、木星に多い。木星はrockyな微惑星を、海王星はicyな微惑星を取り込んでおり、それらの性質(ex.彗星はNH₃を含む)によって変わってくる。

13.7 ガス惑星の形成

巨大惑星の大気組成

表4.6(次ページ)

Gas	Element ^b	Protosolar ^c	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune	References	
Major gases								
H ₂	H	0.835	0.864	0.88	~0.83	~0.82	1, 2, 3, 4, 5	
He	He	0.162	0.136	0.119	~0.15	~0.15	1, 3, 5, 6	
Condensable gases								
H ₂ O	O	8.56 × 10 ⁻⁴	>4.2 × 10 ⁻⁴	?	?	?	7	
			in stratosphere	1.5 × 10 ⁻⁹	2–20 × 10 ⁻⁹	5–12 × 10 ⁻⁹	1.5–3.5 × 10 ⁻⁹	8
			Galileo, 18–21 bar	4.2 × 10 ⁻⁴				9
CH ₄	C	4.60 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻³	4.5 × 10 ⁻³	0.023	0.03	4, 5, 9, 10	
NH ₃	N	1.13 × 10 ⁻⁴						
			microwave data ^d	7 × 10 ⁻⁵	5 × 10 ⁻⁴	<1.5 × 10 ⁻⁴	<1.5 × 10 ⁻⁴	11, 12
			at pressures Galileo, >8 bar	1–2 bar 7 × 10 ⁻⁴	> few bar	>10 bar	>10 bar	7
H ₂ S	S	2.59 × 10 ⁻⁵						
			microwave data ^d		4.6 × 10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁴	0.001	11
			at pressures Galileo, 12–16 bar	7.7 × 10 ⁻⁵	>few bar	>10 bar	>10 bar	7
Noble gases								
²⁰ Ne	Ne	1.29 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻⁵				7	
³⁶ Ar	Ar	2.84 × 10 ⁻⁶	1.6 × 10 ⁻⁵				7	
⁸⁴ Kr	Kr	3.33 × 10 ⁻⁹	7.6 × 10 ⁻⁹				7	
¹³² Xe	Xe	3.26 × 10 ⁻¹⁰	7.6 × 10 ⁻¹⁰				7	
Disequilibrium species								
PH ₃	P	4.29 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁶	6 × 10 ⁻⁶			13	
GeH ₄			6 × 10 ⁻⁹	3.5 × 10 ⁻¹⁰			13	
AsH ₃			2 × 10 ⁻¹⁰	2.6 × 10 ⁻⁹			13	
CO ^e			1.3 × 10 ⁻⁹	1.8 × 10 ⁻⁹	2.5 × 10 ⁻⁸	1 × 10 ⁻⁶	8	
CO ₂ ^e			2.5 × 10 ⁻¹⁰	2.5 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻¹¹	4 × 10 ⁻¹⁰	8, 14	
HCN ^e			detected ^f			2.5 × 10 ⁻¹⁰	8	
Photochemical species in stratosphere (~1 μbar – 10 mbar)								
CH ₃			detection	3 × 10 ⁻⁷		7 × 10 ⁻¹⁰	15	
C ₂ H ₂			2–200 × 10 ⁻⁸	2–30 × 10 ⁻⁷	1–200 × 10 ⁻⁸	4–300 × 10 ⁻⁹	15	
C ₂ H ₄			5 × 10 ⁻¹⁰ – 1 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻⁹	detection	3–50 × 10 ⁻¹⁰	15	
C ₂ H ₆			2–9 × 10 ⁻⁶	3–10 × 10 ⁻⁶	2 × 10 ⁻⁸	1–3 × 10 ⁻⁶	15	
C ₃ H ₄			3 × 10 ⁻⁹	2 × 10 ⁻⁹	2 × 10 ⁻¹⁰	few × 10 ⁻¹⁰	15	
C ₃ H ₈			<1 × 10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁸			15	
C ₄ H ₂			detection	3 × 10 ⁻¹⁰	2 × 10 ⁻¹⁰	detection	15	
C ₆ H ₆			2 × 10 ⁻¹⁰	4 × 10 ⁻¹²		detection?	15	

13.7ガス惑星の形成 組成について

このような単調な質量, 組成関係(単調増加, 単調減少) からすべての巨大惑星は同じ形成されたシナリオを辿ったと考えられる.

->もし惑星ごとに形成シナリオが異なると

木→土→天→海と見た時の質量, 組成の変化の仕方が単調でなくなる.

13.7 ガス惑星の形成 組成について D/H比

巨大惑星の大気D/H比から形成史を探ることができる。



重水素化されたメタンから測定する。

木星と土星のD/H比は星間空間の値, 2×10^{-5} に等しい

(木星、土星のH+He質量割合はそれぞれ90%,70%)

天王星と海王星のD/H比は星間空間の値よりも高く、氷リザーバーとの重水素交換が原因の可能性もある(レイリー分別の逆?)。

(木星、土星のH+He質量割合は共に10%程度)

モデルについて

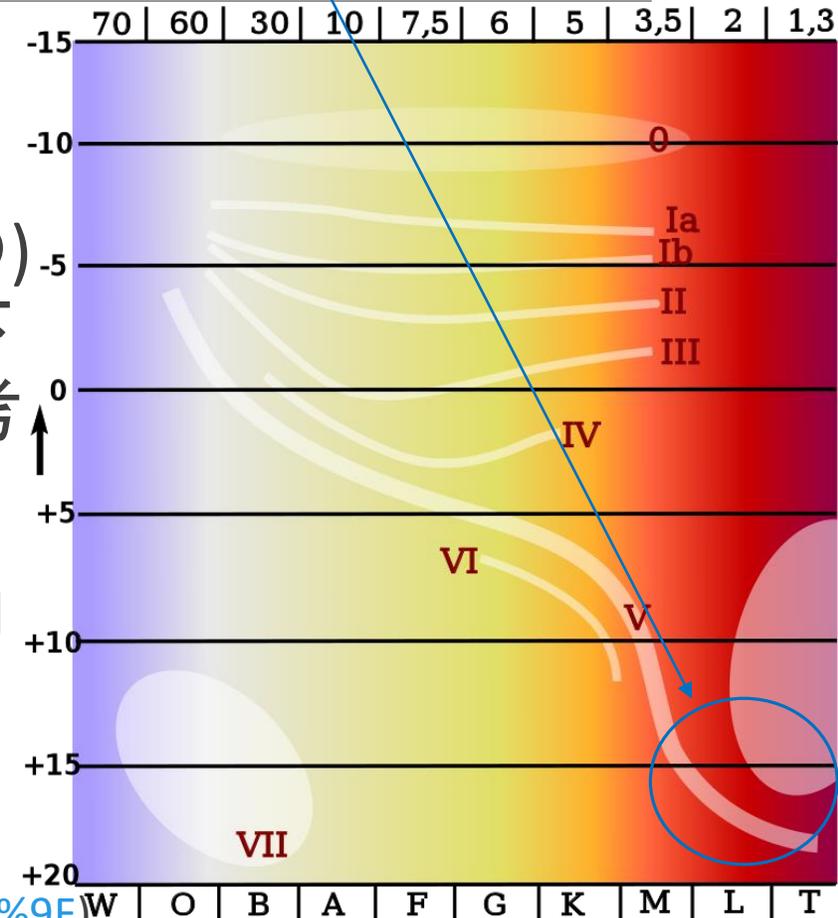
この辺りが褐色矮星
(横軸スペクトル型, 縦軸絶対等級)

モデルは**巨大惑星のみならず褐色矮星の成因も説明できる**ように作る.

->褐色矮星は天体(恒星になり切れなかったもの)が崩壊することで亜恒星天体(0.08太陽質量を下回る天体, 褐色矮星も含む.)が生まれ出されると考えられている.

->褐色矮星と高い惑星質量を持つ天体はこの崩壊プロセスによって生じたと考えられる(ただし主星から遠く孤立した場合). だから同じモデルで扱うことにする. (画像参考:Wikipedia「褐色矮星」)

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A4%90%E8%89%B2%E7%9F%AE%E6%98%9F>



モデルについて(褐色矮星)

褐色矮星:重水素燃焼が起こせず恒星になれなかった高質量天体.

Brown dwarf desert(褐色矮星の砂漠)という, 伴星として褐色矮星が存在できない領域が存在する. 太陽的恒星の数AU内を公転する伴星の質量関数に10~50木星質量に及ぶ深い落ち込みがあり, それがBrown dwarf desertである.

->太陽質量主星のこの領域(5AU以内)では褐色矮星(10~50木星質量)は, 主星に落下するため.

多くの**系外の巨大惑星形成**はこの崩壊と異なるメカニズム.

~~(実際恒星の近くに存在する巨大惑星が多く確認されているから?)~~

(登場する用語について)

質量関数

物質の存在量を質量の関数として表すもの. この値が高い点において物質が質量的に豊富であり, 低ければ質量が乏しいという指標になる.

(登場する用語について)

Condensable(凝縮可能)

condensableという概念は比エントロピーに関連したものであり、例えばH₂とHeは1barで圧密されても10Kの環境であっても**condensation**(凝縮)の境界を大きく超えるエントロピーを持つため気体の状態を保つ。

このようなエントロピー基準の状態変化に着目して**condensable**と表現している。

->我々の太陽系内では地球質量未満の天体はほぼ全て**condensable**な物質でできている。15地球質量未満のものでさえほとんどが**condensable**な物質。(つまり気体から液体や固体になれる物質のこと?)

■ 概要

巨大ガス惑星の形成論について主に以下の2つの説を議論する.

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

Core Nucleated Accretion(コア集積理論)

この2つについて原始惑星系円盤から実際に惑星が作られるまでの過程を追い、その物理過程をシミュレーションする.

スライド2ページの再掲

2つの形成論

Core Nucleated Accretion model(コア集積理論)

成長の途中まで地球型と全く同じだが、数地球質量にまで成長したところで周囲の星雲ガスを取り込み始める。(多くの研究者に好まれている。)

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

原始惑星系円盤の星雲ガスに生じた重力不安定により生じた塊から直接生じる。前者と異なり暴走的ガス獲得のフェーズが無い?準球崩壊は起こらないと思われる。(恒星のようにガスから直接形成されるイメージ。)

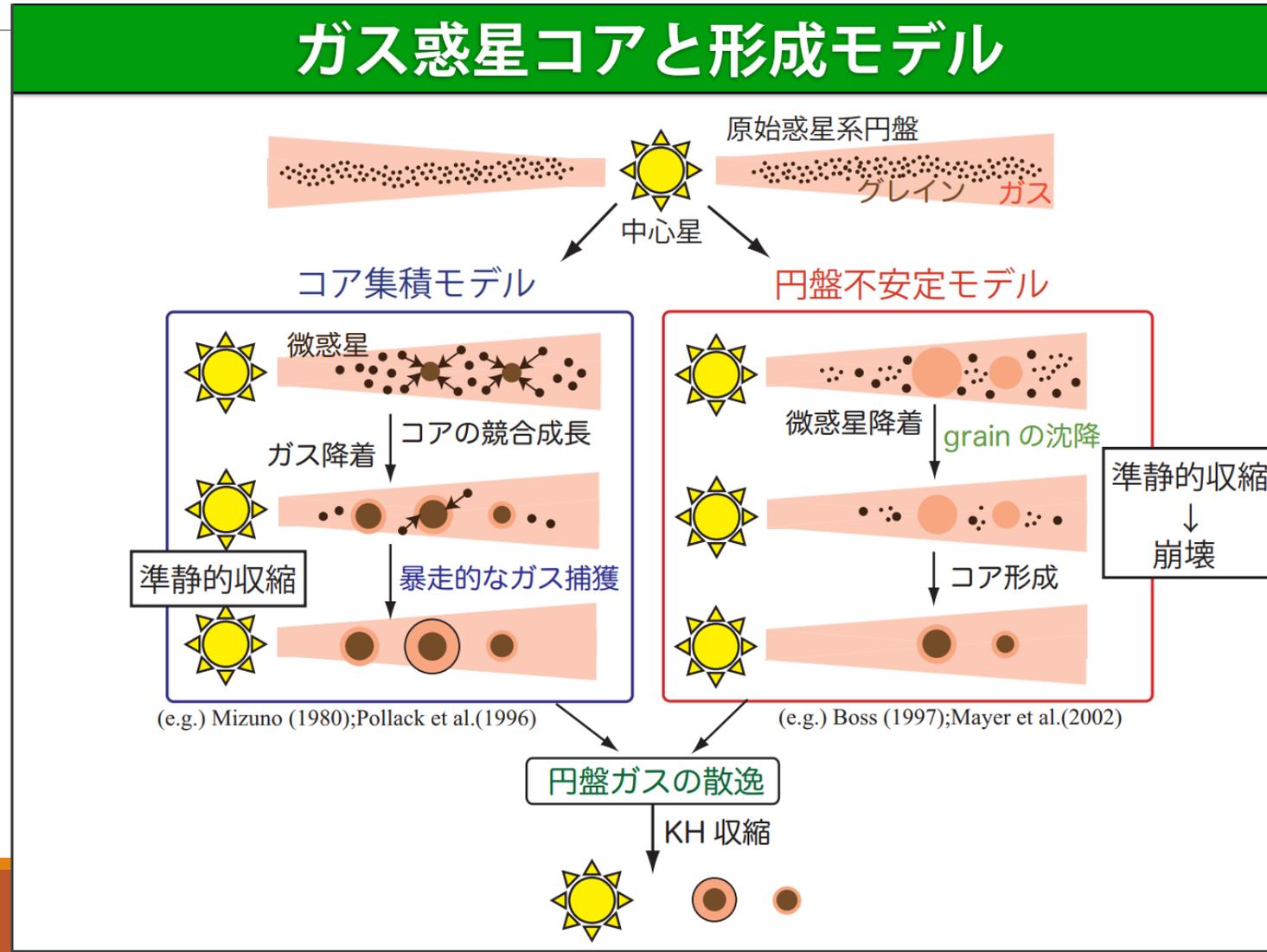
2つの形成論のイメージ

画像参考:ガス惑星本体の形成過程と内部組成 2012/8/22-24

衛星系形成小研究会@小樽 堀 安範 国立天文台 理論研究部

URL:

https://www.cps-jp.org/~mosir/public/2012/2012-08-22/03_hori/public-web/03_hori.pdf



13.7.1

Disk Instability Hypothesis
(円盤不安定性理論)

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

原始惑星系円盤の星雲ガスに生じた重力不安定により生じた塊から直接生じる。前者と異なり暴走的ガス獲得のフェーズが無い?準球崩壊は起こらないと思われる。
(恒星のようにガスやダストから直接形成されるイメージ.)

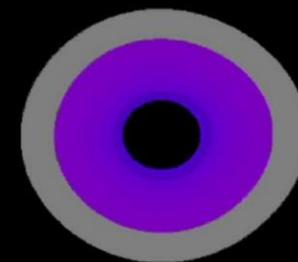
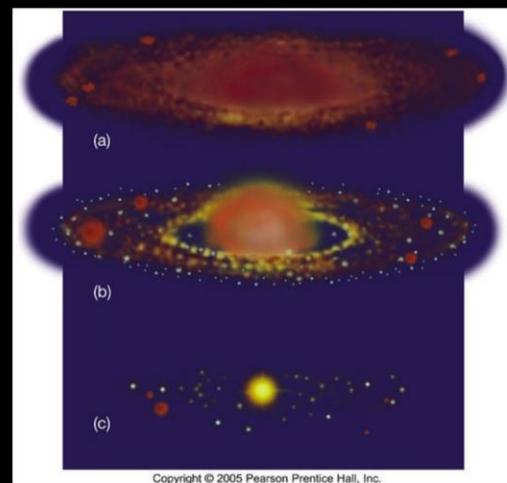
画像参考: 天文学概論(第7回)

系外惑星 2 ~「第二の地球」へ向けて~ 東京工業大学 佐々木貴教

<https://www.slideshare.net/noinoi79528/20131106-27962179>

おまけ：重力不安定による惑星形成

Clip slide



原始惑星系円盤から直接ガス惑星が形成される可能性

スライド17ページの内容

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

前スライドのような成因だがその理論について式で見えていく。

定量的な安定, 不安定

数値計算上では重力的に不安定な円盤から1木星質量程度の惑星が生じる。(下の方程式11.13において $Q_T < \sim 1$ という条件)

Q_T : Toomre's stability parameter,

κ =epicyclic period(周転円周期): 太陽に近づいたり遠ざかったりする周期,

$C_v = \text{Hz } \mu$,

σ_ρ =リングの表面質量密度

$$Q_T = \frac{\kappa C_v}{\pi G \sigma_\rho}$$

方程式11.13について

QTはToomre's stability parameterと呼ばれている。これが1より小さい時、粒子の速度分散が小さくなり、集合体の重力効果が重要になる。この時円盤は不安定になり、軸対称の塊の波長は以下のように書ける。

$$\lambda = \frac{4\pi G \sigma \rho}{\kappa^2} \quad \text{式(11.15)}$$

土星のリングの典型的な値では $\lambda=10\sim 100\text{m}$ である。塊は約 $(2\pi)^{-1}$ の時間で λ スケール凝集できるかもしれない。

方程式11.13について

κ は n よりわずかに小さく以下のような式で表される。
なお n は公転周期(orbital frequency)

$$n^2 = \frac{Gm}{r^3} \left[1 + \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{r} \right)^2 - \frac{15}{8} J_4 \left(\frac{R}{r} \right)^4 + \frac{35}{16} J_6 \left(\frac{R}{r} \right)^6 - \frac{315}{128} J_8 \left(\frac{R}{r} \right)^8 + \dots \right], \quad (2.34)$$

$$\kappa^2 = \frac{Gm}{r^3} \left[1 - \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{r} \right)^2 + \frac{45}{8} J_4 \left(\frac{R}{r} \right)^4 - \frac{175}{16} J_6 \left(\frac{R}{r} \right)^6 + \frac{2205}{128} J_8 \left(\frac{R}{r} \right)^8 + \dots \right], \quad (2.35)$$

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

一方弱い重力的不安定は「らせん密度波」を引き起こし角運動量を輸送する.

->重力的に安定化させるセンスが働く.

->結果円盤が拡大し, 表面密度が低下する.

(安定化させてしまうということは降着を妨げてしまう?)

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

ではどのように不安定を実現するか?

- >急速な冷却(面密度増加により Q_T が低下) や急速な質量増大
- >非定型、不規則な物理特性の原始惑星系円盤でのみ
惑星サイズに塊は成長できる.



円盤ガスが不安定になると恒星組成を持つ重い惑星が生じる. しかし木星と土星での重元素の高まりと, 太陽系内の小天体を説明できるような別の別の仕組みが必要である.

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

全ページの分別の仕組みの説明に加えて木星, 土星に比べて中間的な組成を持つ天王星, 海王星やHD149026 b のような高密度系外惑星の形成シナリオを説明するのが特に難しい.

補足:HD149026 b とは

地球から約257光年の位置にある恒星HD149026の周りを公転する惑星である. トランジット法で発見されたが、同方法で発見された惑星の中でも特に直径が小さく巨大ガス惑星の中では最小である.半径は $0.356(+0.013,-0.011)$ 木星半径だが質量は $0.357(+0.0135,-0.0114)$ 木星質量もある.

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

金属(=metal, 水素とヘリウム以降の元素のこと)の影響

金属が豊富な恒星はそうでないものに比べて巨大惑星を**数AU**以内に持ちやすいと予想されている(次ページの図12.24参照).

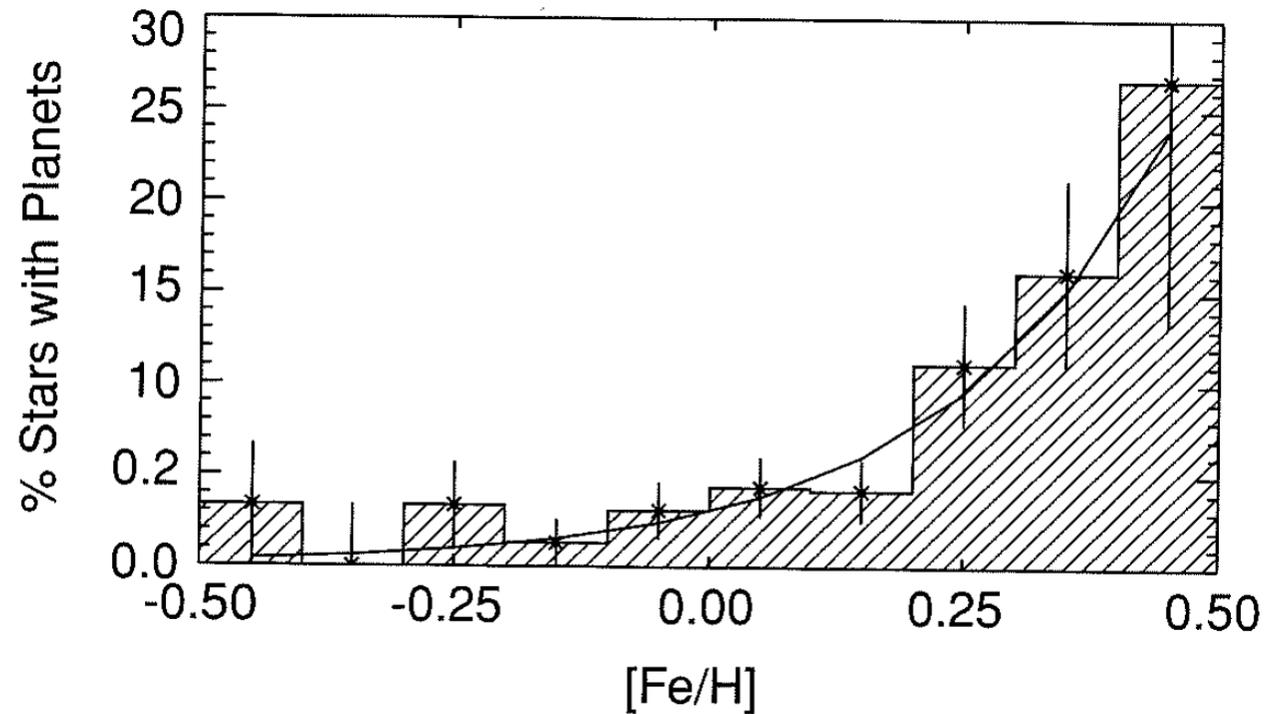
->重いコアを形成するために十分な凝縮性を持つべき(condensable) という条件としては整合.



しかし長寿命な塊を生み出す重力不安定に欠かせない**急速冷却(太陽から遠いかつmetallicityが低い)** という条件は同時に満たせない.

図12.24

太陽的恒星について4年以下の公転周期の巨大惑星保有比を恒星の金属性の関数として示す. 金属性は対数目盛で測定され, 0は太陽の値に対応する.



Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

金属の影響-不安定条件の矛盾

木星(土星)は重力不安定と、微惑星合体による重元素過多によって形成したという論があり、これでは先ほどの矛盾は生じない。

->しかし重力不安定は質量再配分をするよりも、密度波によって円盤安定化の方向にやがて向かっていき形成を妨げるかもしれない。

結論:はっきりわかっていない

Disk Instability Hypothesis(円盤不安定性理論)

重力不安定と微惑星の合体を合わせた説について

前のスライドで述べたように急速冷却の条件を満たす上に太陽系の4天体に共通のシナリオを作ることができる。

それでもなお、円盤不安定性理論によって生じた巨大惑星が存在する可能性があり、ケプラーシアの小さい(公転タイムスケールが長く、中心星から離れている)領域において特にその可能性が高いという。

13.7.2

**Core Nucleated Accretion
model**

(コア集積理論)

Core Nucleated Accretion(コア集積理論)

成長の途中まで地球型と全く同じだが、数地球質量にまで成長したところで周囲の星雲ガスを取り込み始める。(多くの研究者に好まれている.)

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

このモデルは微惑星の凝集とガスの重力的集積の組み合わせによるものである。最初は地球型惑星と同じ形成プロセスを辿る。

プロセス

- ダストは原始惑星系円盤の中央平面向かって安定していき、最低でもキロメートルサイズの天体に凝集して非弾性衝突によって成長する。
- 惑星が成長すると重力ポテンシャルは深くなり、脱出速度が円盤のガスの熱的速度を超えるようになるとガス外層を獲得し始める。
- 獲得に伴い、最初は光学的に薄く円盤ガスに対して等温的だった外層は、光学的に厚くなり深さが増すにつれて高温になる。

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

プロセス(続き)

- ガスの獲得によって当然惑星の重力も増加するため、成長につれて円盤から強くガスを引き付けるようになる一方で、惑星外層による熱的圧力が凝集を妨げる働きをしてしまう。
- 惑星のガスの蓄積を制限する最初の要因は、微惑星の集積と外層の収縮から生じる重力エネルギーを惑星が放射する能力であり、大部分の成長期間に効く。
- このエネルギーを放射して逃がす能力は外層を収縮させてより多くのガスを獲得するために必要である。(ガスは温まると膨張してしまい圧力で新たなガスの侵入を阻止してしまうため冷やしたいイメージ)

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

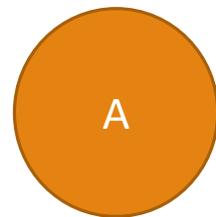
最終的に外層は典型的に惑星のヒル半球の数10%であり, 以下の方程式(2.22)から与えられる.

$$R_H = \left(\frac{m_2}{3(m_1 + m_2)} \right)^{1/3} a \quad (2.22)$$

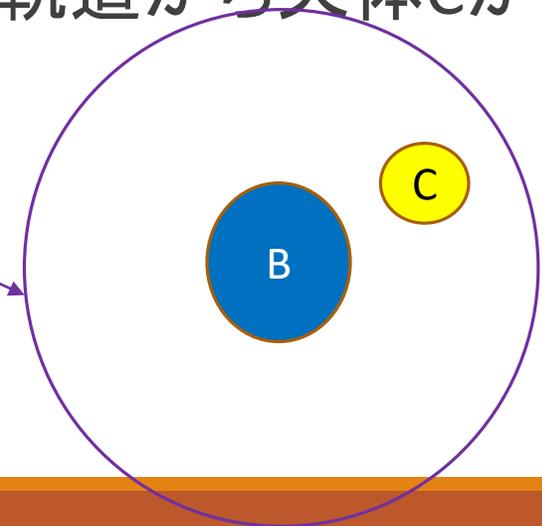
結局外層を急速に縮ませる要因は惑星の質量増加と先ほどのエネルギー放出である. この点から惑星の成長率を制限する要因は周囲の原始惑星系円盤からのガスの流れであると言える.

補足:ヒル球とは

天体A, B, Cがあるとする. いま天体Cの質量は他の2天体に比べて十分に小さい. 例としてAが太陽, Bが地球, Cが月であるとする. 月は太陽から重力摂動を受けながらも地球の周りを公転し続ける. この時月は地球のヒル球の中にあると言う, つまり月は地球の重力が支配的な領域の中にあるのである. この領域がヒル球であり, この中では他の天体の重力の影響を受けながらも天体Bの軌道から天体Cが外れることはない.

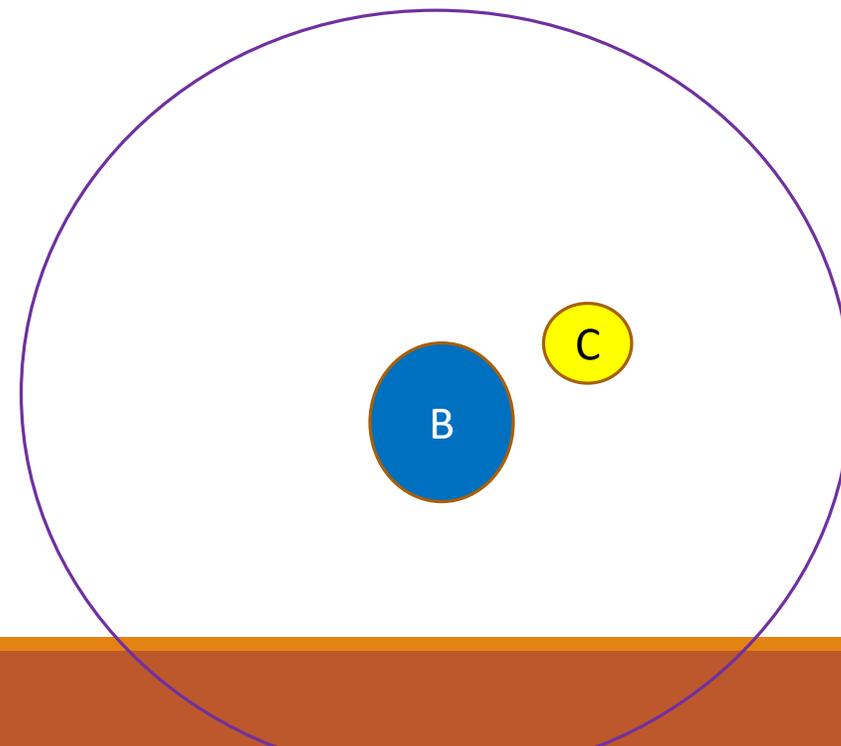
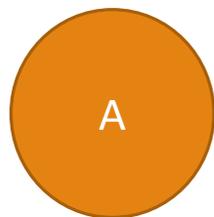


天体Bのヒル球



補足:ヒル球とは

なお, 惑星系においてある惑星のヒル球は主星と惑星の距離, 質量で決まる. そのため質量最大ではないものの太陽からの距離が遠い海王星のヒル球が太陽系の惑星では最大となる.



Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

巨大惑星の固体の降着様式, 割合はガス引き付け能力に影響を及ぼす.

- 始めは集まった固体が惑星のコアを形成し, 周囲のガスを蓄積するようになる.
- ガス捕獲率は惑星総質量に対して強い増加関数の傾向を示すと予測される.
->原始惑星系円盤が消失する前に十分なガスを惑星が得るためには, コアの急速な成長は重要な要素であることを示唆する.

降着の継続によって重力ポテンシャルが十分深くなり惑星の成長時間を短くするが, コア付近に沈んだ固体からの熱を外層と外層上部に解放された粒子による大気の不透明さの上昇に与えることでそれを打ち消す効果もある.

(訳がよくわからなかったので次ページに掲載)

原始惑星系円盤の巨大惑星領域での固体降着に関して, 様々な予測をもたらす最先端のモデルにはまだ疑問点が残っている(完璧ではない).

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

降着の継続によって重力ポテンシャルが十分深くなり惑星の成長時間を短くするが、コア付近に沈んだ固体からの熱を外層と外層上部に解放された粒子による大気の不透明さの上昇に与えることでそれを打ち消す効果もある。

原文:Continued accretion of solids acts to reduce the planet's growth time by increasing the depth of its gravitational potential well, but has counteracting effects by providing additional thermal energy to the envelope (from solids that sink to or near the core) and increased atmospheric opacity from grains that are released in the upper parts of the envelope.

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

1地球質量程度の惑星での脱出速度は円盤内のガスの熱的速度より大きい

この惑星は円盤ガスから大気を獲得可能.

しかし惑星の重力限界の外側に押し出す方向の熱的圧力が働きさらなるガス降着を制限.

このような大気は薄く広がってしまう.

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

原文: However, such an atmosphere is very tenuous and distended, with thermal pressure **pushing outwards to the limits of the planet's gravitational reach** and thereby limiting further accretion of gas.

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

結論: この段階の惑星の進化を支配する重要な要因

- >惑星の重力領域により多くのガスを入れるための外層の収縮
- >そのためにエネルギーを放射する能力

順序

- ・内部温度と熱的圧力が増加してガス獲得を妨げる.
- >供給が切れると(微惑星の?) 原始惑星の成長速度と温度と熱的圧力は減少.
- >降着を妨げる効果が弱まり更なるガスを降着.
惑星総質量が増加するほどガスの降着率が増加し, 暴走的にガスを獲得.
- >最終的にはガス質量は固体質量に匹敵する.
この時静水圧平衡解が存在しなくなる

Core Nucleated Accretion (コア集積理論) (図13.22)

1木星質量にまで成長した惑星の質量はcore nucleated accretion modelを元にしたある特定のシミュレーションに従って時間の関数として記述.

点破線(M_p): 惑星の総質量
実線(M_Z): 固体構成物の質量
点線(M_{XY}): ガスの質量.

- 固体のコアは暴走的な降着によって最初の 4×10^5 yearsで急速に成長.
- 惑星が重力圏内の凝縮された物質のほぼ全てを降着すると蓄積率は減少.
- 集積エネルギーの放射能力によって定められた割合で外層を徐々に蓄積.
- 最終的に, 惑星はガスを急速に降着できるほど十分に冷え, 重くなる.
- このシミュレーションは1太陽質量の恒星から5.2AU離れた惑星の成長, 固体表面での質量的密度は 10g/cm^2 .

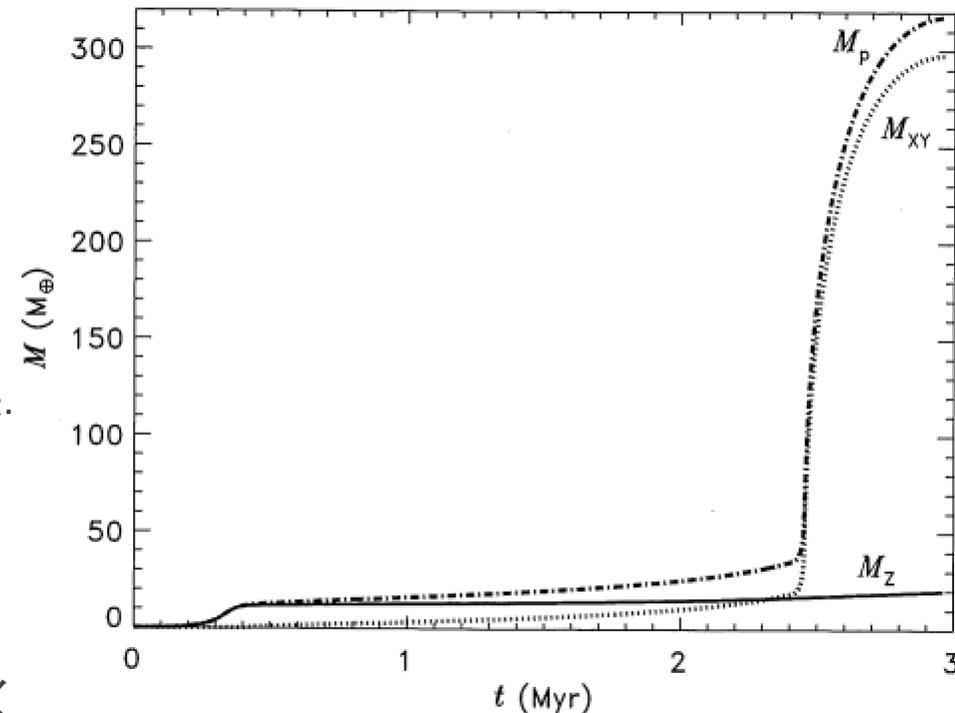


図13.22 微惑星融合に伴う原始惑星の質量の増加.

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

外層を自己重力で圧縮できるほどの質量を得た惑星のさらなるガス捕獲の効率性は捕獲済みのガスの量だけが条件.

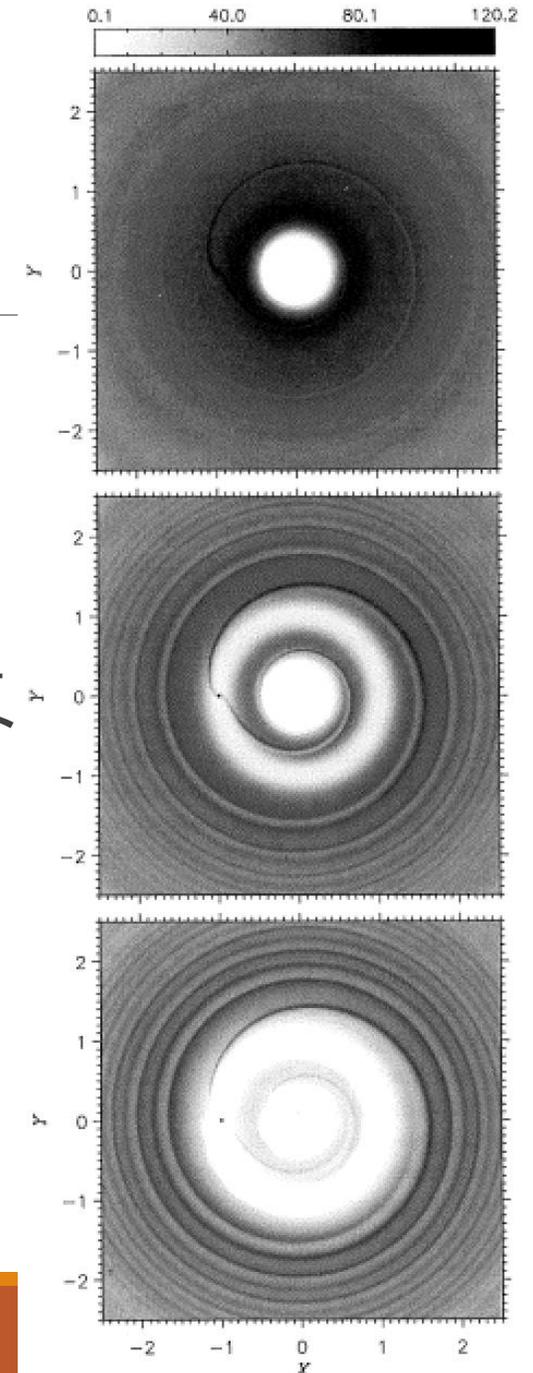
10地球質量～1木星質量の惑星に流体力学的制限によってかなり高速のガスの流れがもたらされる.

惑星が成長するにつれて, 円盤から物質を降着させ, 重力トルクを円盤に働かせるので円盤が変化し(alter), このプロセスによってギャップ構造が生じて周囲のガスから惑星を孤立させる.

Core Nucleated Accretion (コア集積理論) 図13.23

1太陽質量の恒星から5.2AU離れた公転軌道に固定された惑星を囲むガス状の恒星円盤の表面密度. 円盤のスケールハイトに対する恒星からの距離の比は, $H_z/r = 1/20$ であり粘性は $\nu_v = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^2 / \text{s}$ である. この図での1の長さは惑星の公転半径であり, スケールバーは表面密度を g/cm^3 の単位で与える. 惑星は $(-1, 0)$ に, 恒星は $(0, 0)$ に位置する. (どの時間のスナップショットなのか不明.)

(a) $M_P = 10$ 地球質量. (b) $M_P = 0.3$ 木星質量. (c) $M_P = 1$ 木星質量.



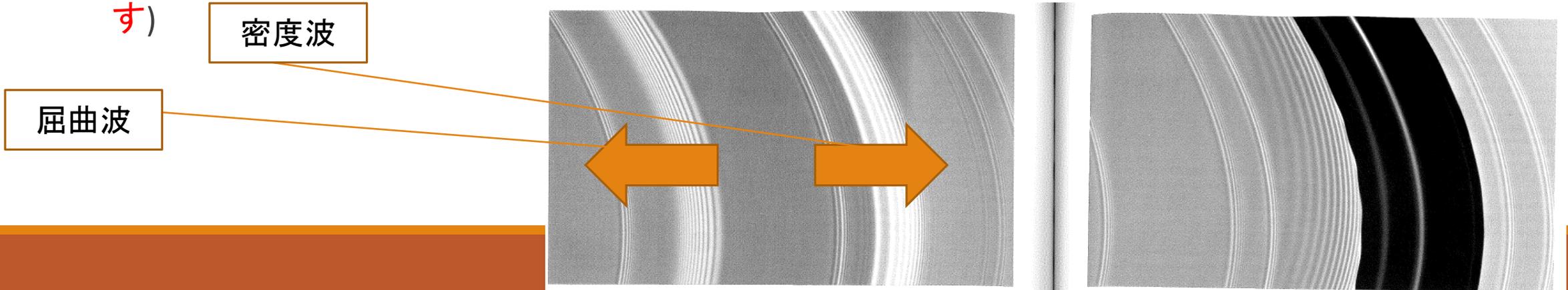
Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

図11.24

似たようなプロセスによって衛星が作ったギャップが土星のリングに見られる。

土星のリングの明るい面の一部分を撮ったカッシーニの連続写真。土星は左側に見切れている。

衛星の重力摂動によって生じる様々な特徴が形成背景以外について見られる。左図で最も顕著な特徴は惑星の内部方向へと伝搬するミマス5:3屈曲波であり、ミマス5:3密度波は土星と逆方向に伝搬する。2つの波の配置の境界は、土星の扁平率が原因でできた非閉鎖軌道によって生じる。別の密度波はJanus/Epimetheus, Pandora, Prometheusらの衛星によって引き起こされる。右図の暗い領域はEnckeギャップである。内部構造を揺り動かす内側の波状の縁と関連する衛星は小衛星のPanによって生じる。(不安定によって構造が崩れたものを密度波がなます)



Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

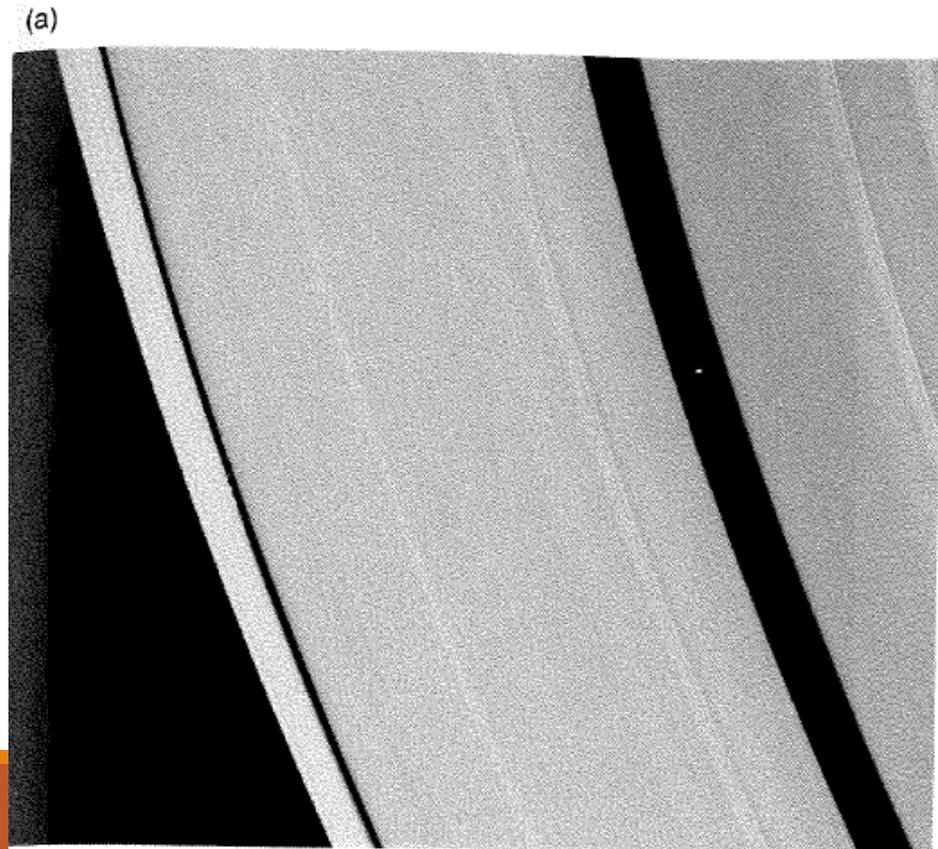
図11.30

(a) カッシーニからの土星のリングの画像. Enckeギャップ内にある衛星のPanとKeelerギャップ内のDaphnisを示している.

PanはDaphnisよりも質量が大きいが, Daphnisより衛星とギャップの縁からの距離が遠い. これはPanのエッジ波が非常により長い波長(方程式11.23)とより小さい振幅を持つことで, 方位角方向に短縮されて現れた時を除いてエッジ波を見づらくすることが原因である. この光景はリングの板から約24度南の太陽に照らされた面に向いている. 位相角は21度である.

$$\lambda_{\text{edge}} = 3\pi |\Delta a| \frac{n}{\kappa} \approx 3\pi |\Delta a|, \quad (11.23)$$

$\Delta a \equiv a_{\Gamma} - a_s$ リングと衛星の軌道長半径内の間隔

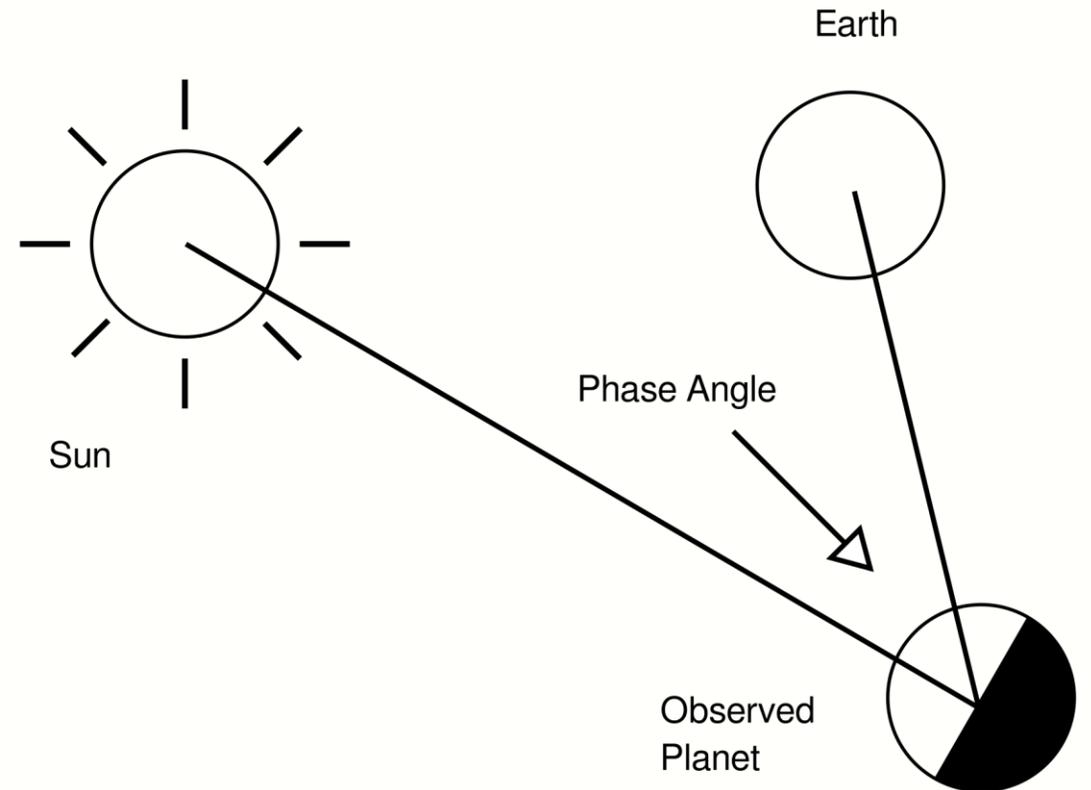


位相角とは

このように対象天体に対して地球と太陽がなす角のことである。

画像参考:Wikipedia「Phase angle (astronomy)」

[https://en.wikipedia.org/wiki/Phase_angle_\(astronomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Phase_angle_(astronomy))

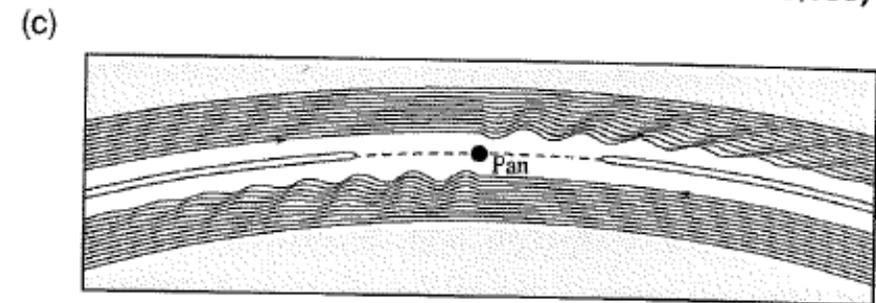
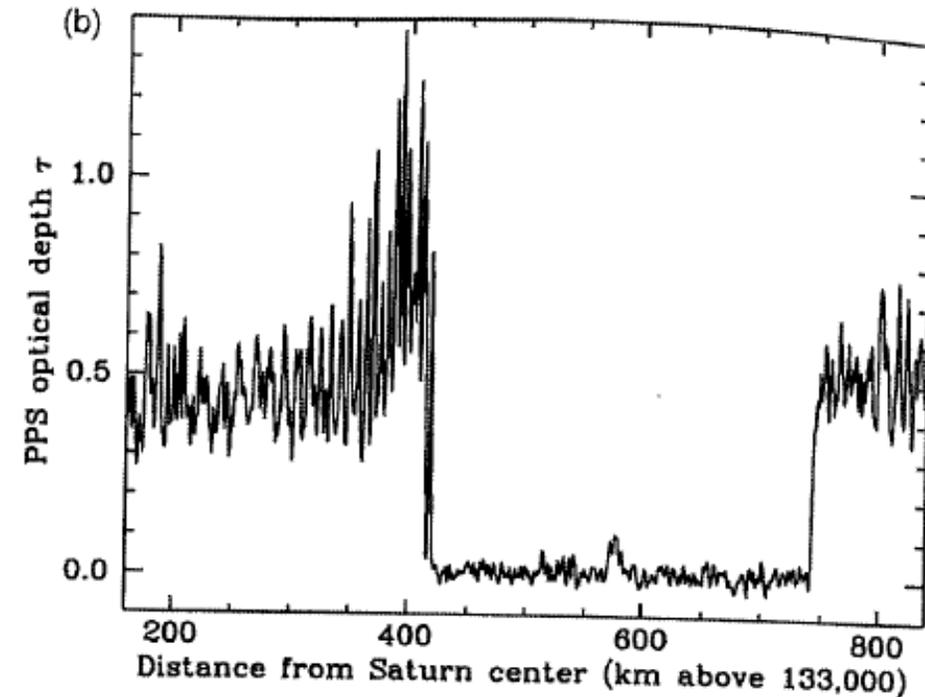


Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

図11.30

(b) ボイジャーの星による掩蔽から得られるEnckeギャップと周囲の光学的深さの特性. Aリングのすぐ近くのギャップの内部領域での規則的な振動のパターンはPanのサテライトウェイクが原因の光学的深さの変化の断面図を描写している. これらのデータは同じ星による掩蔽での異なる区画から図11.29を用いて得たものである(Showalter 1991).

(c) 小衛星Panが土星のリング内のEnckeギャップの縁上や近くで作るパターンの概略図. このパターンは小衛星の軌道周期で公転する縁の中では定常である. 明確化のために半径スケールは角スケールに比べてかなり誇張している.



Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

ガス蓄積率を制限する要因が
内部の熱的圧力から円盤のガス補給能力に遷移する際、
惑星は収縮し始める。

最初の収縮はケルビン-ヘルムホルツ時間 t_{KH} で起こる。これは以下の式(13.29)のように惑星の重力ポテンシャルエネルギーの光度(放射エネルギーの)に対する比で記述可能。

$$t_{KH} \equiv \frac{E_G}{\mathcal{L}} \sim \frac{GM^2}{R\mathcal{L}}$$

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

原始惑星が収縮すると外層での温度は急激に増加し、放射エネルギーの発光率が一定になる。

- 勢いの良い対流はこの間に外層をかき混ぜ、重元素の分布は均一化。

数千年後、収縮は流体の外層の非圧縮(凝縮?)性が増加することによって減速し、温度と光度が時間経過とともに減少。

外層のゆっくりとした冷却は巨大惑星が宇宙へ放出する熱エネルギーの余剰源となる。

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

天王星と海王星が木星と土星より少ないH₂とHeしか含まない

- おそらく天王星と海王星は微惑星の合体が遅いことが原因で暴走したガス獲得状態には至らなかったことを示唆.

方程式(13.26)から, 固体の降着率は凝縮物の表面密度と軌道周波数に依存するがこれらは太陽からの距離に伴い減少.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\frac{dM}{dt}}{4\pi\rho_p R^2} = \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{\sigma_p n}{4\rho_p} \mathcal{F}_g \quad (13.26)$$

Core Nucleated Accretion (コア集積理論)

現在の巨大惑星の大気組成

- 主に惑星外層にてどれくらい重い物質が軽い質量の物質と混合したかで決まった.

コアの質量が0.01地球質量を超えると、温度は水を蒸発させ原始惑星外層にするのに十分なほど高くなる.

降着が続く一方で、外層はより大質量になり降着後期の微惑星は成長中の外層を通り抜けることが難しくなっていく.

巨大惑星外層で取り込まれた天体は昇華し、それゆえ外側領域での重元素の成分量をかなり高める.