

Planetary Sciences

Chap. 13.1

-Planets Formation-

Intro. 我々はどこから来たのか



Intro. 我々はどこから来たのか

- 太陽系の起源はScienceにおいて最も重要な課題である。
 - 宇宙の起源、生命の起源、そして人類の起源を知ることは大事
- 外の惑星系はわかっていることが少ない。
 - 太陽系形成モデルは98%が太陽系から得られた情報が基となっている。
 - 系外惑星、原始太陽系円盤、星形成領域の知識は予備知識程度
 - 惑星系の多様性については生命の進化や形成の議論に興味を持つことになる

13. 1 太陽系における制約

制約 (constrain) とは

1. 制限や条件をつけて、自由に活動させないこと。
2. 物事の成立に必要な条件や規定

→ 太陽系の成立に必要な条件

- このセクションでは現在観測されている事実を箇条書きで説明している

結果的に今の状態を説明するにはどんなことが起きたんだろう？

1. 軌道運動, 間隔, 惑星の自転

惑星に関して以下の制約

- 例外なく、同一平面を太陽の自転方向と同じ向きに周る
- 自転傾斜角は30度未満
例外: 金星 (177度), 天王星 (98度)
- 30AU以内を軌道

小惑星に関しては以下

- 離心率, 軌道傾斜角が大きく、自転軸はバラバラ

	軌道傾斜角	離心率
水星	7.00	0.21
金星	3.39	0.01
地球	0.00	0.02
火星	1.85	0.09
木星	1.31	0.05
土星	2.49	0.06
天王星	0.77	0.05
海王星	1.77	0.01

天文年鑑2002より：地球の軌道面が基準

☆チャーハンはパラパラに仕上げましょう——

2. 角運動量の分配

	太陽	惑星
質量	≧99.8%	≦0.2%
軌道角運動量	≦2%	≧98%

※軌道角運動量はほぼ巨大惑星の軌道運動に保存されている
 …ちなみに巨大惑星の自転角運動量>>天体の衛星系の軌道角運動量

球体の自転に関しては以下

$$S = I \times \omega$$

$$I = \frac{2}{5}mr^2$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ただしSは自転角運動量, Iは慣性モーメント

公転に関しては以下が成立

$$L = r \times p = rmv$$

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

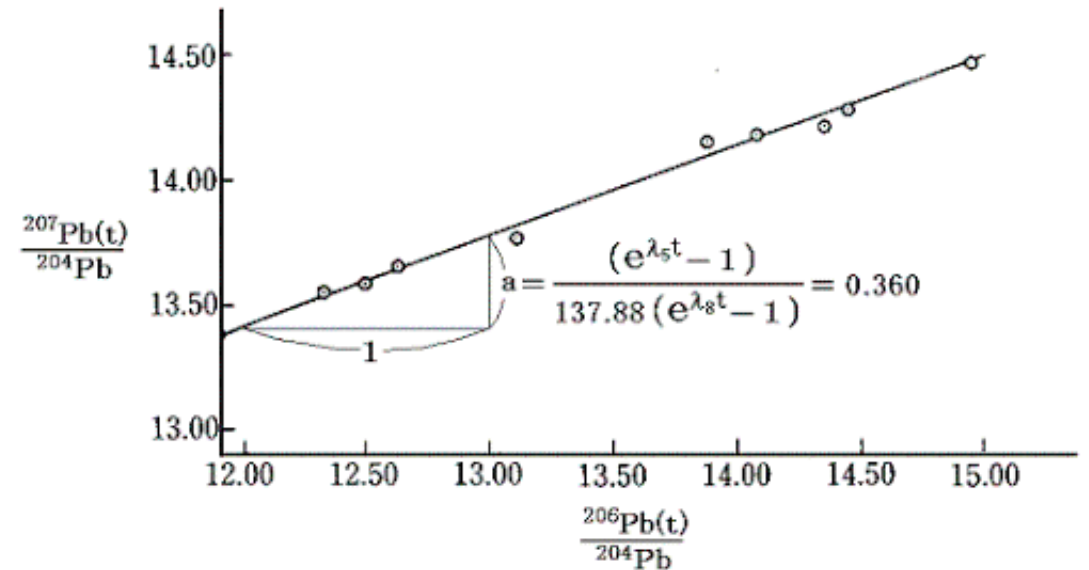
Lは公転角運動量, vは速度

これよりS, Lを求めることで巨大惑星が大きな角運動量を占めていることが分かる。

	質量 [kg]	平均軌道半径 [au]	公転周期 [yr]	地球と相対的な角運動量	%
太陽	332942	0.0047(半径)	25.37/365 (自転)	42.33	3.64
水星	0.05	0.39	88/365	0.0315	0.00271
金星	0.82	0.72	224/365	0.693	0.0596
地球	1	1	1	1	0.0860
火星	0.11	1.52	1.881	0.135	0.0116
木星	318	5.20	11.86	725	62.39
土星	95.2	9.54	29.46	294	22.72
天王星	1.45	19.2	84.01	6.36	0.547
海王星	17.1	30	164.79	93	8.00

3. 放射性同位体による年代測定

- コンドライト隕石中のCAI(Calcium Aluminium Inclusion)中の $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代は4.568Gaに最古の太陽系物質が固化したことを示している。
 - CAI : Ca, Al, Tiなどの難揮発性親石元素が濃縮した包有物。同時にNa, Mn, Fe, Niなどの親鉄元素に乏しい。
 - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年代 : プロットを打ち、近似して引いた直線(アイソクロン)の傾きが、時間の関数となるため、元素ごとの半減期(既知)を利用することで、岩石が固化した年代を知る



西グリーンランド, Amîtsoq 片麻岩に対する 全岩アイソクロンの Pb-Pb図
(Moorbath *et al.*, 1975)

兼岡一郎著「年代測定概論」東京大学出版会 1998年刊 P66の図を改変

http://fnorio.com/0078radioactive_age1/radioactive_age1.htm

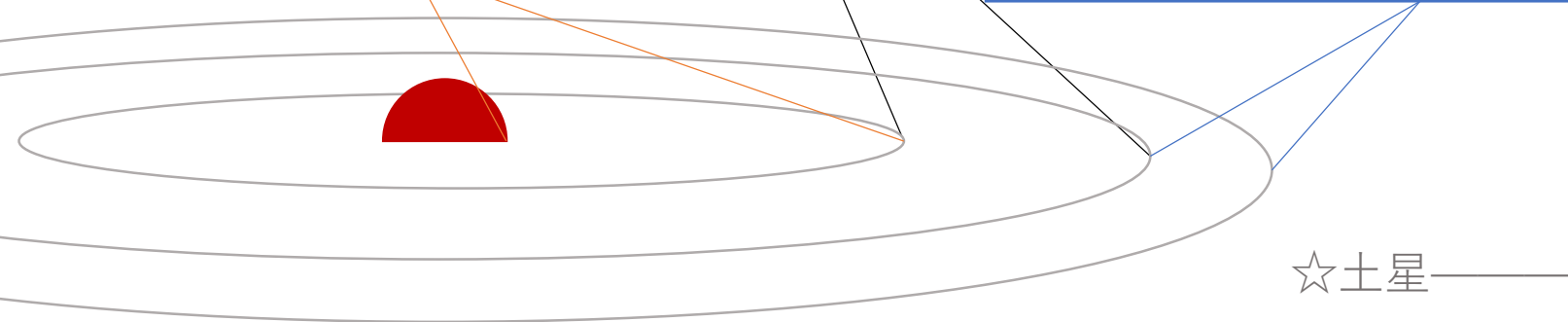
4. 惑星のサイズ、密度

	太陽	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
半径[km]	696,340	2,440	6,052	6,371	3,390	69,911	58,232	25,362	24,622
密度[kg/m ³]	1,410	5,440	5,240	5,515	3,933	1,326	687	1,318	1,638

●木星, 土星
HとHeを全質量の80~90%
含む

●岩石惑星, 小惑星帯
非圧縮密度が動径方向に減少

●天王星, 海王星
氷と岩を比較的多く含む (H, Heに対して10~15%)



	非圧縮密度 [kg/m ³]
水素ガス	0.052
氷	917
花崗岩	2600-2700
かんらん岩	3300-3500
鉄	7860

5. 小天体の形と密度

- **いびつな形**
 - 低重力（自己重力で全体がならされない）
 - 溶融・衝突を経験しない
- **R ≦ 100kmの天体**
 - 低密度の傾向
 - 高い空隙率(Porosity)を示唆する



	イトカワ	リュウグウ
サイズ[m]	535*294*209	870 (ほぼ球形)
平均密度[kg/m ³]	1.9	1.27

	非圧縮密度 [kg/m ³]
水素ガス	0.052
氷	917
花崗岩	2600-2700
かんらん岩	3300-3500
鉄	7860

Ice lineより内側は氷で密度を下げられない→空隙のせい



<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180625je/index.html>

6. 小惑星帯, カイパーベルト, 彗星

• 小惑星帯

総質量：月の~1/20

距離：2.1~3.3 AU

~ 10^6 個程度発見されている。

大きさの分布は衝突進化した結果の集団と類似する

• カイパーベルト

距離：35~50 AU

小惑星帯の20倍以上の質量を有する。

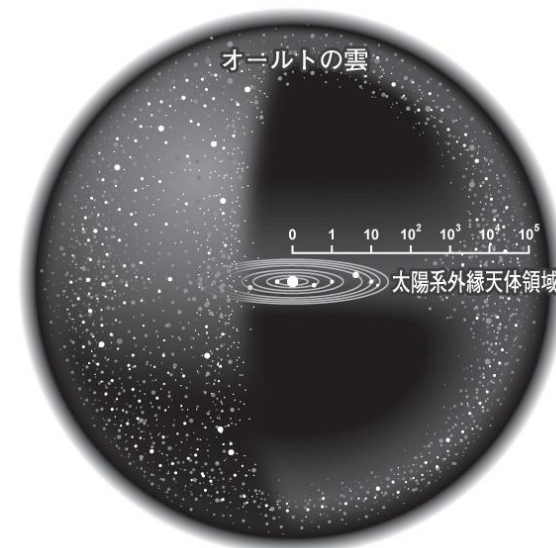
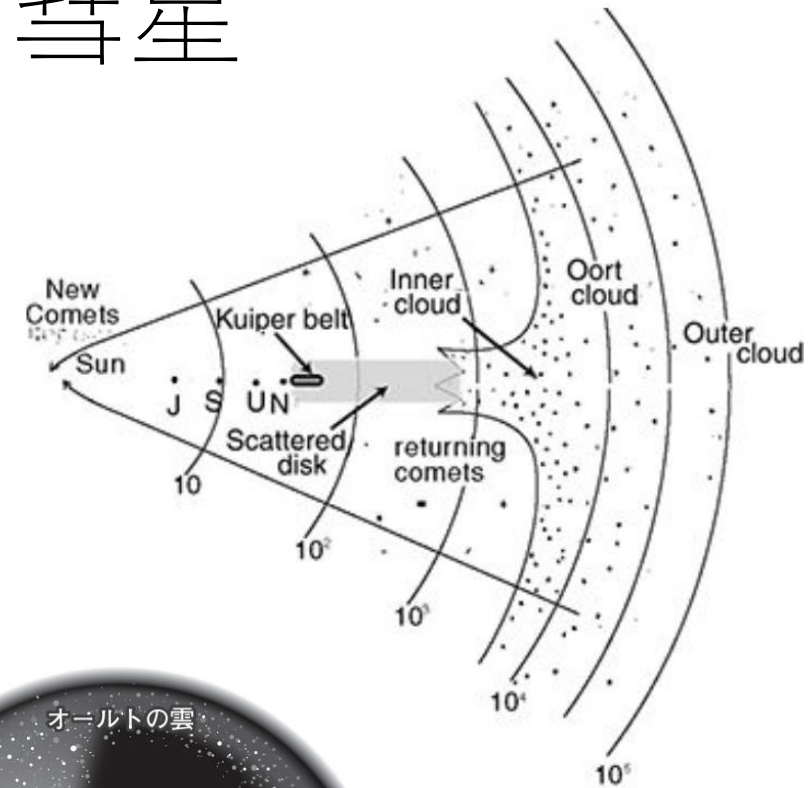
太陽系内のほとんどの小天体はこのゾーンにある。

• 彗星

10^4 AU以遠の場所の氷に富んだ固体の群れ(オールトの雲)を由来とする

• オールトの雲...

10^{12} ~ 10^{13} 個の1kmより大きな天体がその中に存在。



https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_011.html

7. 衛星, 惑星環, 小惑星の衛星

惑星環

- ・ 4つの巨大惑星すべてが有する。
- ・ 赤道面にあり、粒子は巡行する
- ・ ほとんどの環が衛星よりも内側に存在

Q. ロッシュ半径の見積もり方は? (時間あったら)

内側衛星

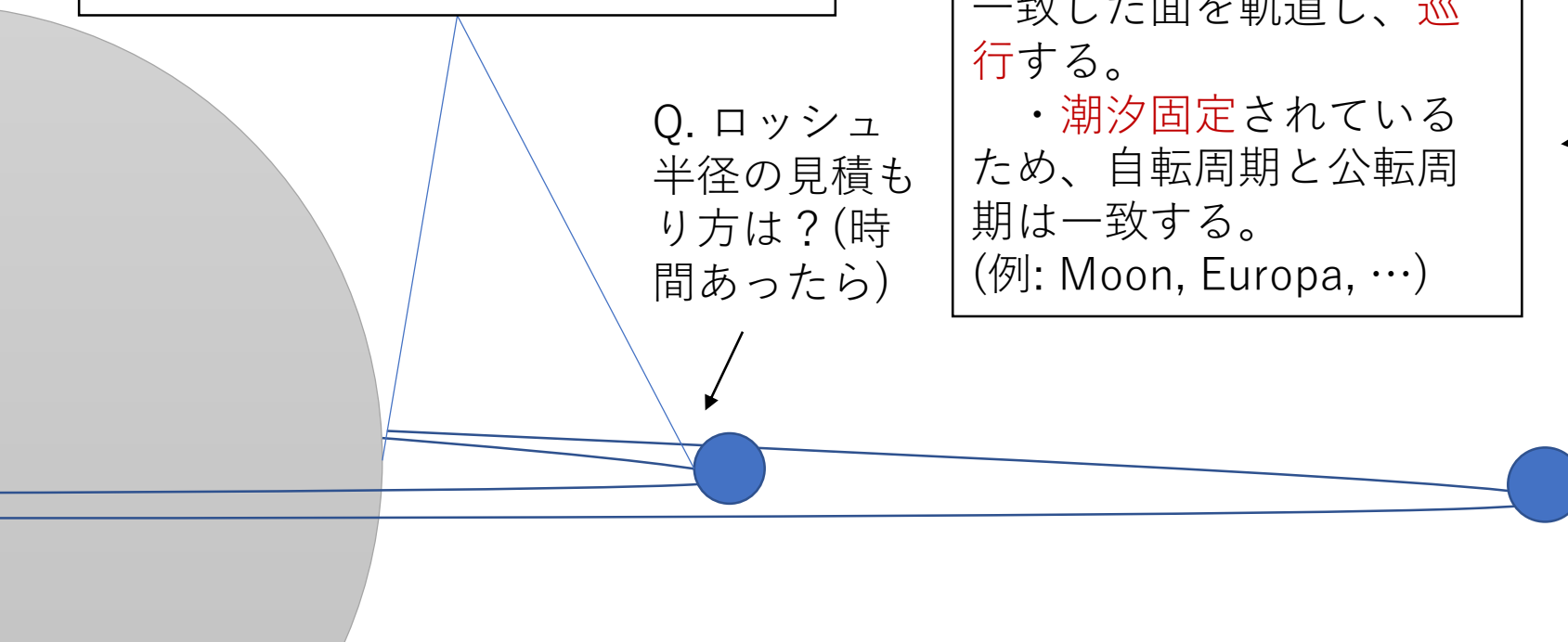
- ・ 主星の赤道面にほぼ一致した面を軌道し、**巡行**する。
- ・ **潮汐固定**されているため、自転周期と公転周期は一致する。(例: Moon, Europa, ...)

惑星の形成においてこういった制約を課すのだろうか?

Q. 潮汐固定について
どういう仕組み? (時間あったら)

外側の衛星

- ・ 比較的小サイズで(ほぼ)**逆行**する。
- ・ 高い離心率と軌道傾斜面を有する
(例: Tritonなど)



7. 衛星, 惑星環, 小惑星の衛星

- 小惑星の衛星

連星を成すものから大きさに差があるものまで様々

カイパーベルトと小惑星帯で小惑星衛星のサイズ, 軌道が異なる

知ってるのあったら教えてください

8. 隕石

- スペクトルから鉱物組み合わせまで様々
→そこから生成当初の環境を予測する



様々なインクルージョンが一つの隕石として入手できる
→固体物質が良く**攪拌**されていたことを示唆

コンドライト隕石中に短寿命核の崩壊生成物が様々存在
→固体物質が急速に降着 **?**

図: アエンデ隕石; コンドリュールとCAIがはっきり見える

始原的隕石のコンドリュール
→急激な加熱・冷却イベントを示唆

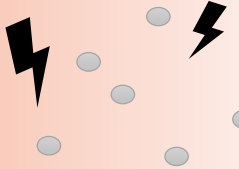
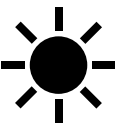
コンドライト隕石中の星間物質
→冷たいままだった場所もあったことを示唆

惑星形成時には局所的な磁場も存在

隕石の生成年代に差が少ない
→隕石の集積期間は短かったはず

あるインクルージョンは極めて高温を経験したことを明確に示す。

原始太陽系円盤 ダヨー



8. 隕石

- 倉本先生と圀本先生の研究 (1998)
<http://vigarano.ep.sci.hokudai.ac.jp/paper/kagaku.pdf>

インクルージョンの生成年代から物質の分化までを統一的に説明するモデルを提案している。
図は一部を抜粋。

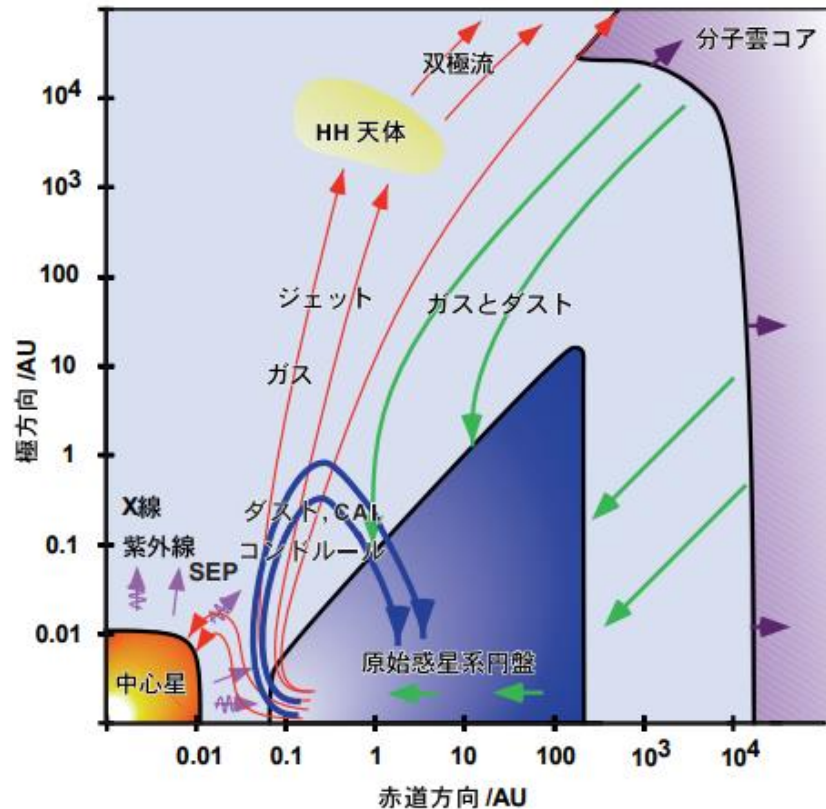


図 1 原始惑星系の模式図 (文献'に加筆)。座標軸が対数であることに注意。矢印は物質の流れを示す。中心星の周りを取り巻く原始惑星系円盤に分子雲コアからガスとダストが降着している。降着したダストは中心星へと運動する。中心星は可視光・紫外線・X線・高エネルギー粒子を活発に放出し、それにより円盤の最内縁領域は高温に加熱される。この領域で難揮発性ダスト・CAI・コンドルールが形成される。また円盤の最内縁部では中心星の双方の極方向に超音速で流れるガス流(双極流)が発生している。この双極流により円盤内のガスと固体の一部は中心星に落下せず、星間空間や中心星から離れた円盤上へと還流する。

やってんな

9. 同位体組成

- 太陽系内での元素の存在度に大きく差がある一方で、同位体比は驚くほど一致している。
 - その多くは質量分別と放射壊変で説明可能
 - 壊変生成物の中には、短寿命の放射性核種が存在したことの裏付けとなるものもある。
 - 同位体比の一致はよく攪拌された環境を示唆する。
- 酸素同位体、その他のトレーサー元素は少しだけズレがある
 - 分子レベルでは完全に攪拌していなかった。

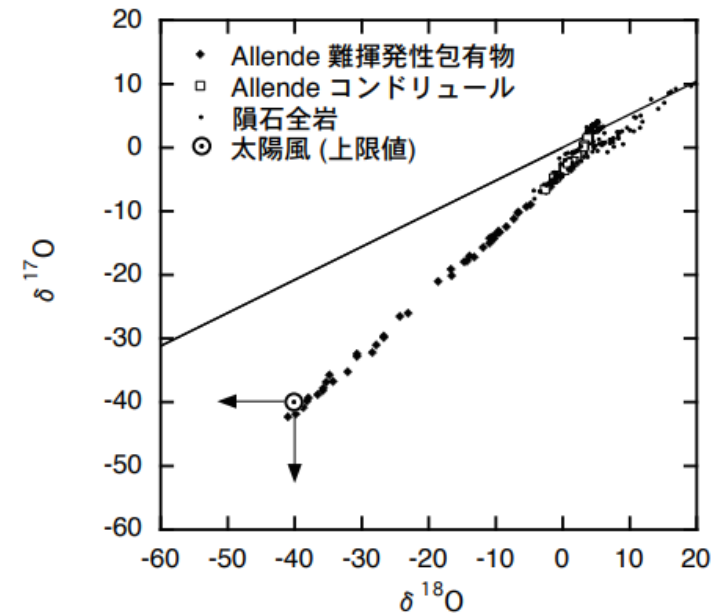


図: 倉本, 坂本(2005); 酸素は例外的に地球型分別線(地球, 火星, 分化隕石)と混合線(始原的隕石)で一致しない。

9. 同位体組成

- 倉本先生と圀本先生の研究 (2005)

<https://www.wakusei.jp/book/pp/2005/2005-4-05/2005-4-05.pdf>

太陽系内の酸素同位体の不均質を分子雲による紫外線の自己遮蔽を考慮することで説明する

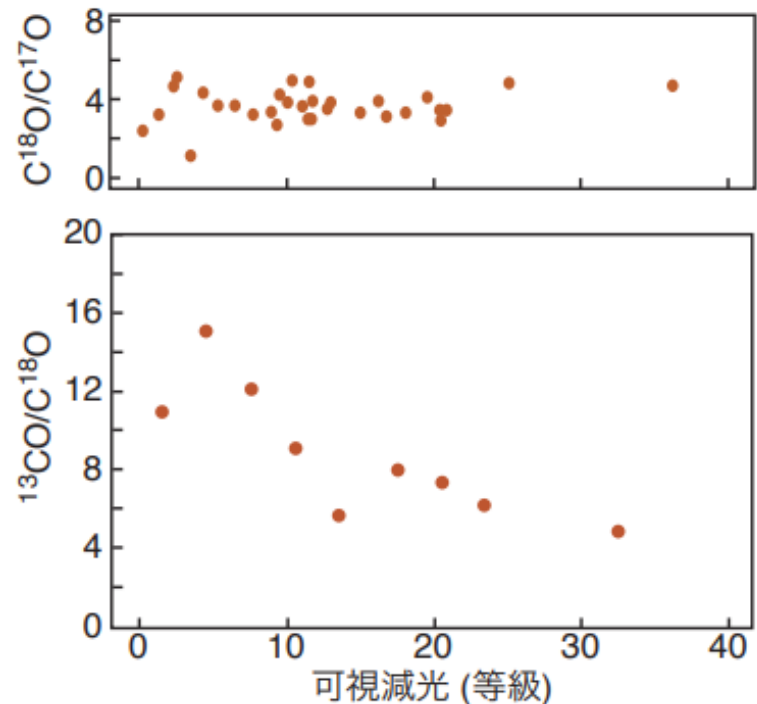


図2 : 分子雲IC5146の同位分子組成を可視減光の関数として示す。化学式の中で質量数を付していない元素記号は、その元素のうちでもっとも豊富な同位体(Cなら¹²C, Oなら¹⁶O)を示す。データは[12, 13]による。¹²C¹⁶Oの存在度を知ることができればベターだが、この同位分子は存在度が大きく分子輝線スペクトルが飽和しているため存在度を求めることが難しい。しかし次の発熱イオン分子反応 $^{13}\text{C}^+ + ^{12}\text{CO} \rightarrow ^{12}\text{C}^+ + ^{13}\text{CO}$ が効率よく進むため、¹³COの存在度は¹²COの存在度に概ね比例している (¹²Cと¹³Cの分別は小さい) と考えられる[例えば14].

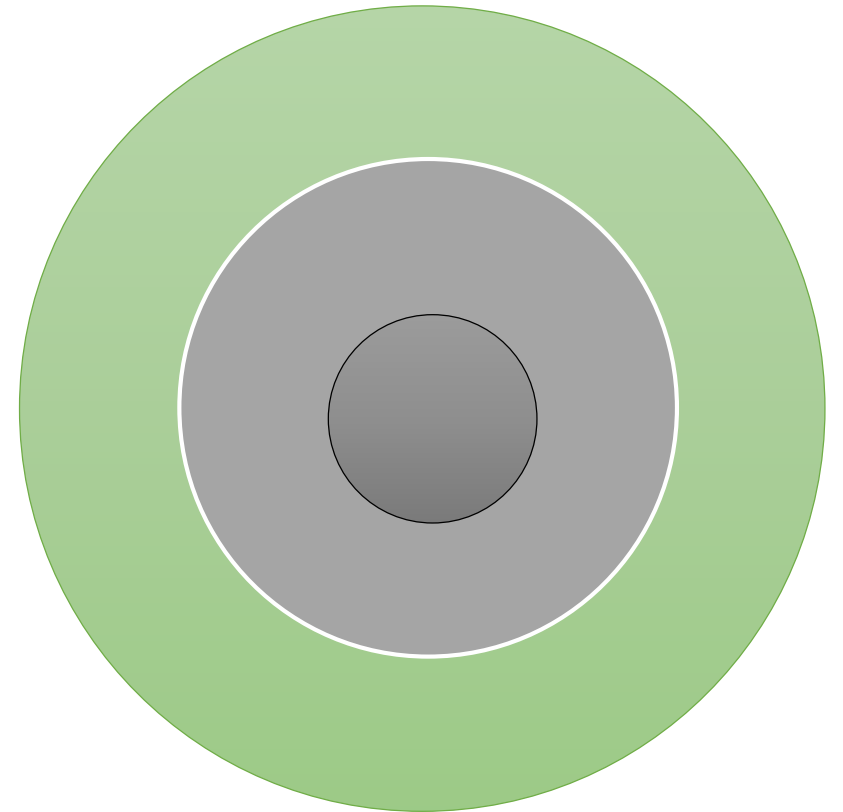
やってんな
(二度目)

10. メルトの分化

- 多くの天体 (大きめの衛星くらいまで) は内部が分化
- 重物質が核に存在

論理が良くわからなかったです

- そのような天体は かつて/今も熱を有していた/いる。



11. 大気組成

- 地球型惑星と衛星の大気的主要元素は当時の温度で凝縮可能な化合物を形成できる。
 - 大気のH₂と希ガス(He, etc)は宇宙存在度よりもかなり少なかった
- 巨大惑星では氷核形成によってH₂, Heの存在度は高まった
 - その傾向は木星→海王星につれて高まる。

12. 表面組成

表面の有する情報

- 衝突クレーター, 地質活動, 火山活動の証拠

終わりです、ありがとうございました



図: NASA; 水星表面も多様な情報を有している。
Let's 水星研究しませんか。