

Our Solar System

# 地球惑星圏物理学

太陽系の構造と元素組成

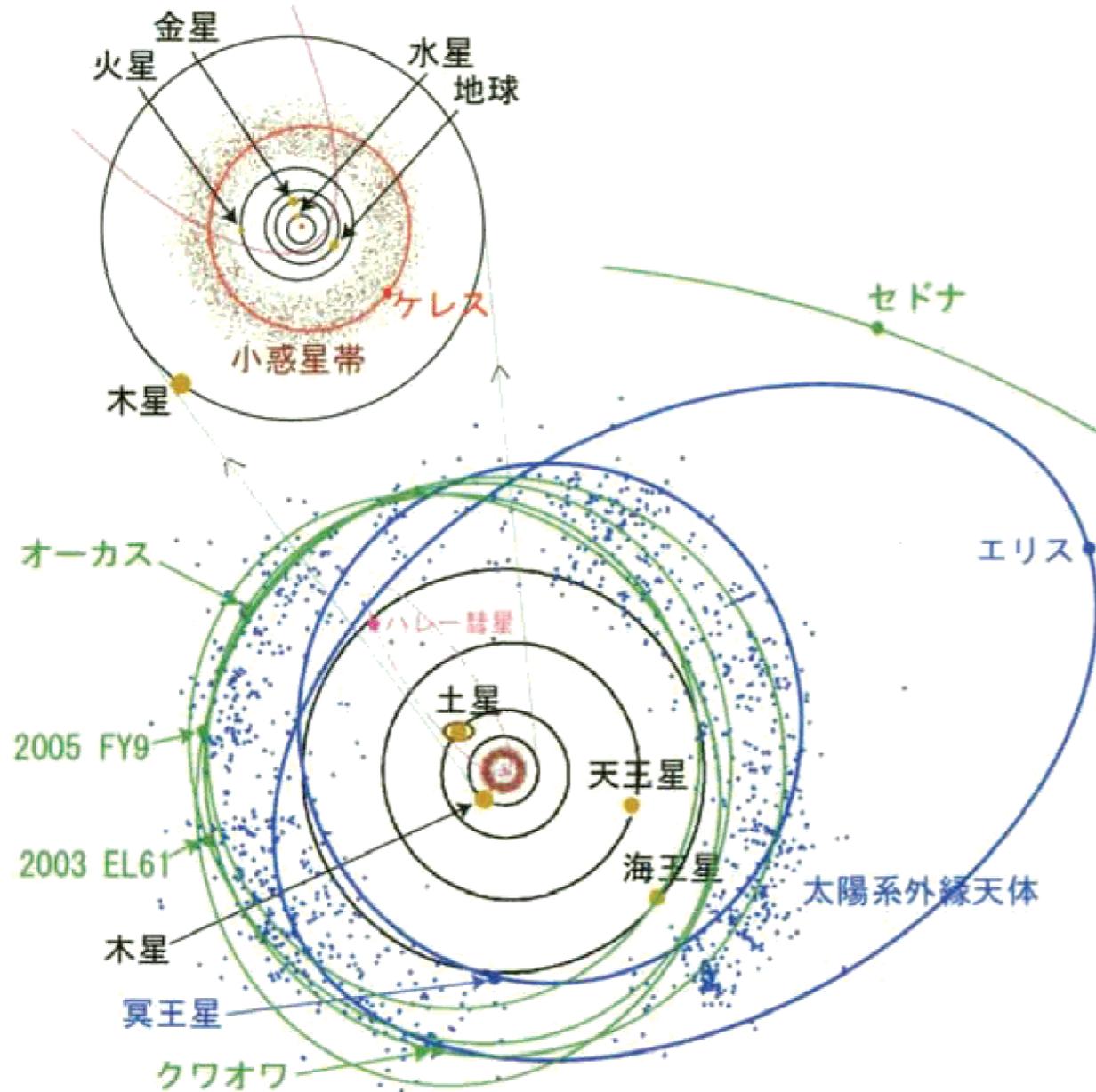
# 天体の運動

## ケプラーの法則

1619年にヨハネス・ケプラーによって発見

1. 惑星は、太陽をひとつの焦点とする楕円軌道上を動く
2. 惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に描く面積は、一定である (面積速度一定)
3. 惑星の公転周期の2乗は、軌道の長半径の3乗に比例する

太陽系の天体の運動は、  
太陽とその天体の2体問題でほぼ近似できる



# 太陽系の構造

## Our Solar System 太陽 (Sun)

- 惑星 (Planet)

a) 太陽の周りを公転し、 b) 自己重力によって球形となり、  
c) 軌道上から他の天体を一掃している 天体

- 岩石惑星…水星, 金星, 地球, 火星
- 巨大ガス惑星(木星型惑星)…木星, 土星
- 巨大氷惑星(海王星型惑星)…天王星, 海王星

- 準惑星 (Dwarf Planet)

…冥王星(2006年国際天文学連合決議), ケレス, 他

- 太陽系小天体 (Small Solar System Bodies)

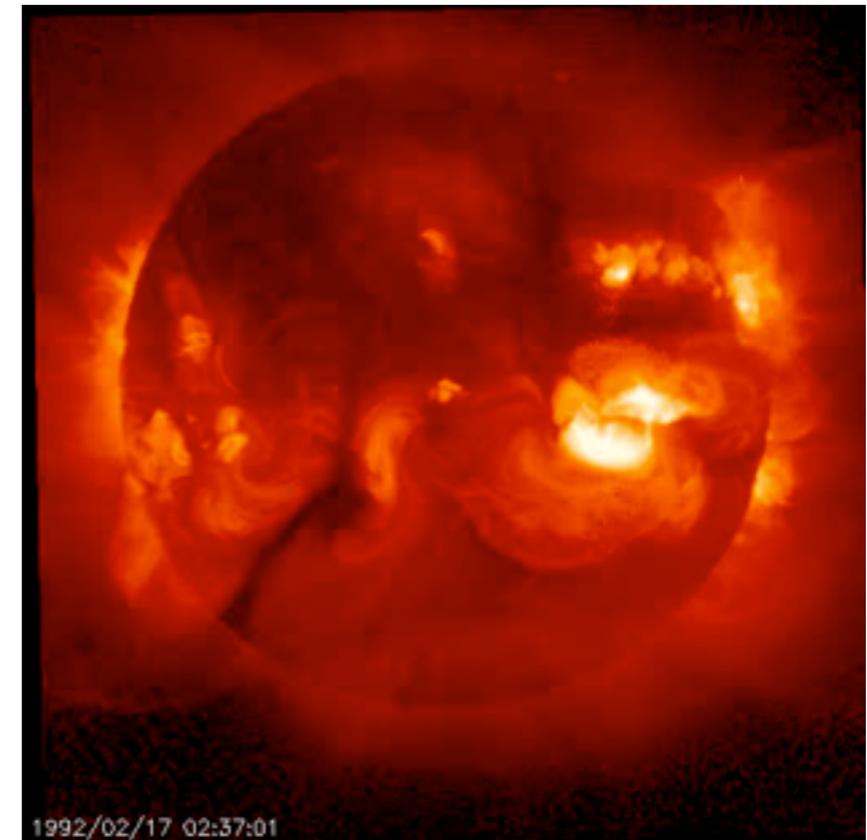
…小惑星, 彗星, 塵

# 太陽

## 質量

- ・ 太陽系全体の質量の99.87%を占める  
太陽質量： $1.989 \times 10^{30}$  kg
- ・ 太陽系内の天体の運動は、  
太陽の重力に支配されている

太陽観測衛星「ようこう」による太陽コロナ観測(軟X線)  
<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/yohkoh/best10.shtml>



## 太陽放射

- ・ 水素核融合反応 ⇨ 電磁波として放射

## 太陽風

- ・ 太陽コロナから吹き出す高温プラズマ

# 惑星



1AU：太陽-地球間の距離,  $1.5 \times 10^{11} \text{m}$

表 1-1. 惑星の諸物理量

	公転半径	質量 (地球質量=1)	分類	備考
水星 (Mercury)	0.38 AU	0.055	岩石惑星	大気なし、磁場あり
金星 (Venus)	0.72 AU	0.82	岩石惑星	CO <sub>2</sub> 大気、磁場なし
地球 (Earth)	1.00 AU	1	岩石惑星	N <sub>2</sub> ・O <sub>2</sub> 大気、磁場あり
火星 (Mars)	1.52 AU	0.11	岩石惑星	CO <sub>2</sub> 大気、磁場なし
木星 (Jupiter)	5.20 AU	317.83	巨大ガス惑星	磁場あり
土星 (Saturn)	9.54 AU	95.16	巨大ガス惑星	磁場あり
天王星 (Uranus)	19.22 AU	14.54	巨大氷惑星	H <sub>2</sub> ・He 大気、磁場あり
海王星 (Neptune)	30.06 AU	17.15	巨大氷惑星	H <sub>2</sub> ・He 大気、磁場あり

# 準惑星

- a) 太陽の周りを公転し、b) 自己重力によって球形を保つが、  
c) 軌道上から他の天体を一掃していない 天体

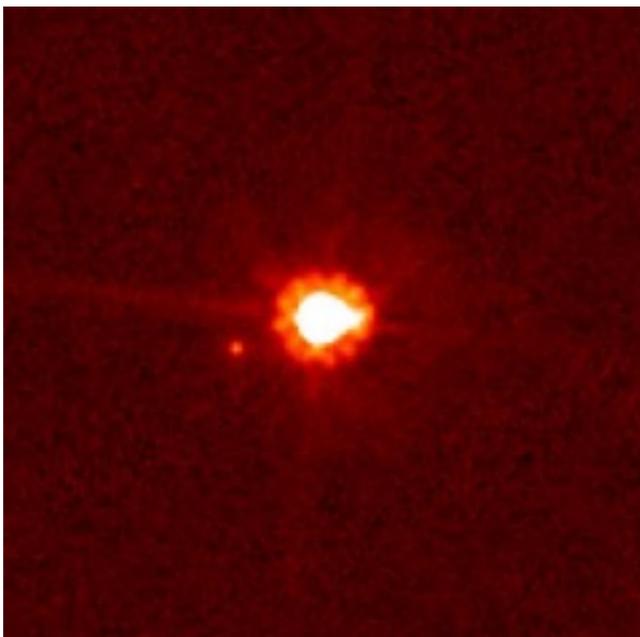


## 冥王星 (Pluto)

軌道半径：39.5 AU (平均値)

天体半径： $1.185 \times 10^3$  km

天体質量： $1.303 \times 10^{22}$  kg



## エリス (Eris)

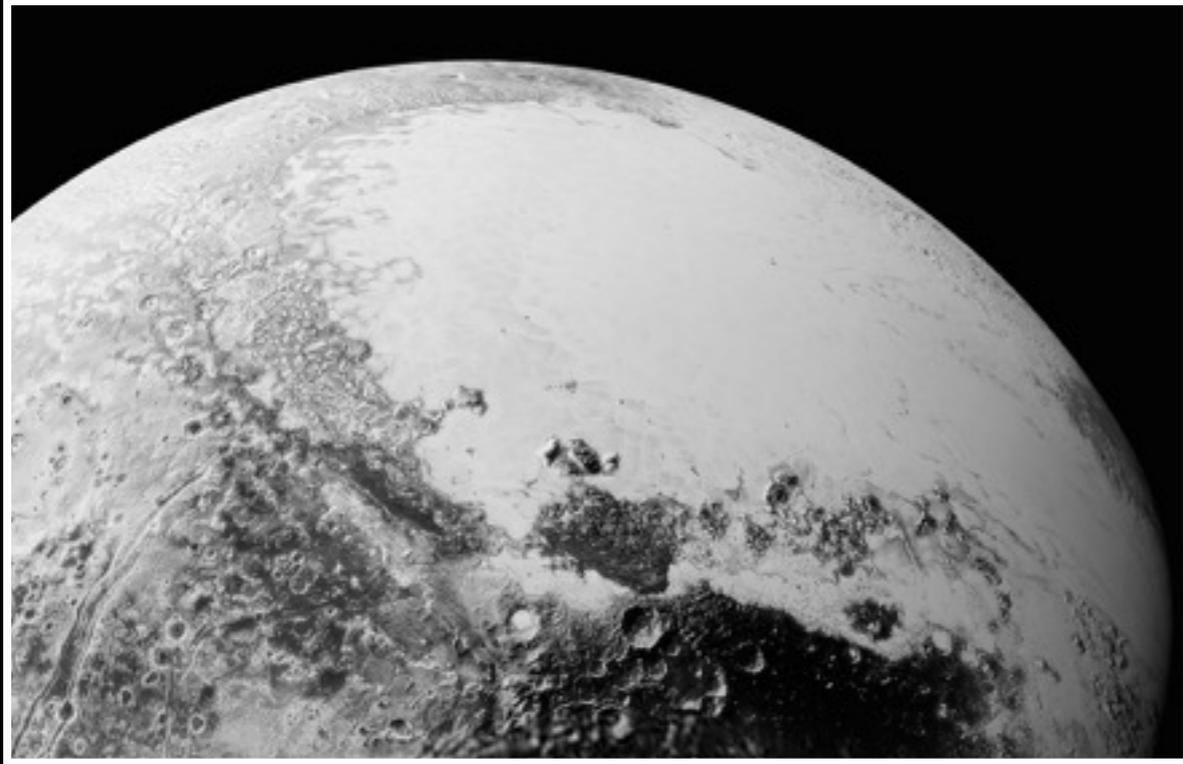
軌道半径：68.0 AU (平均値)

天体半径： $2.3 \times 10^3$  km

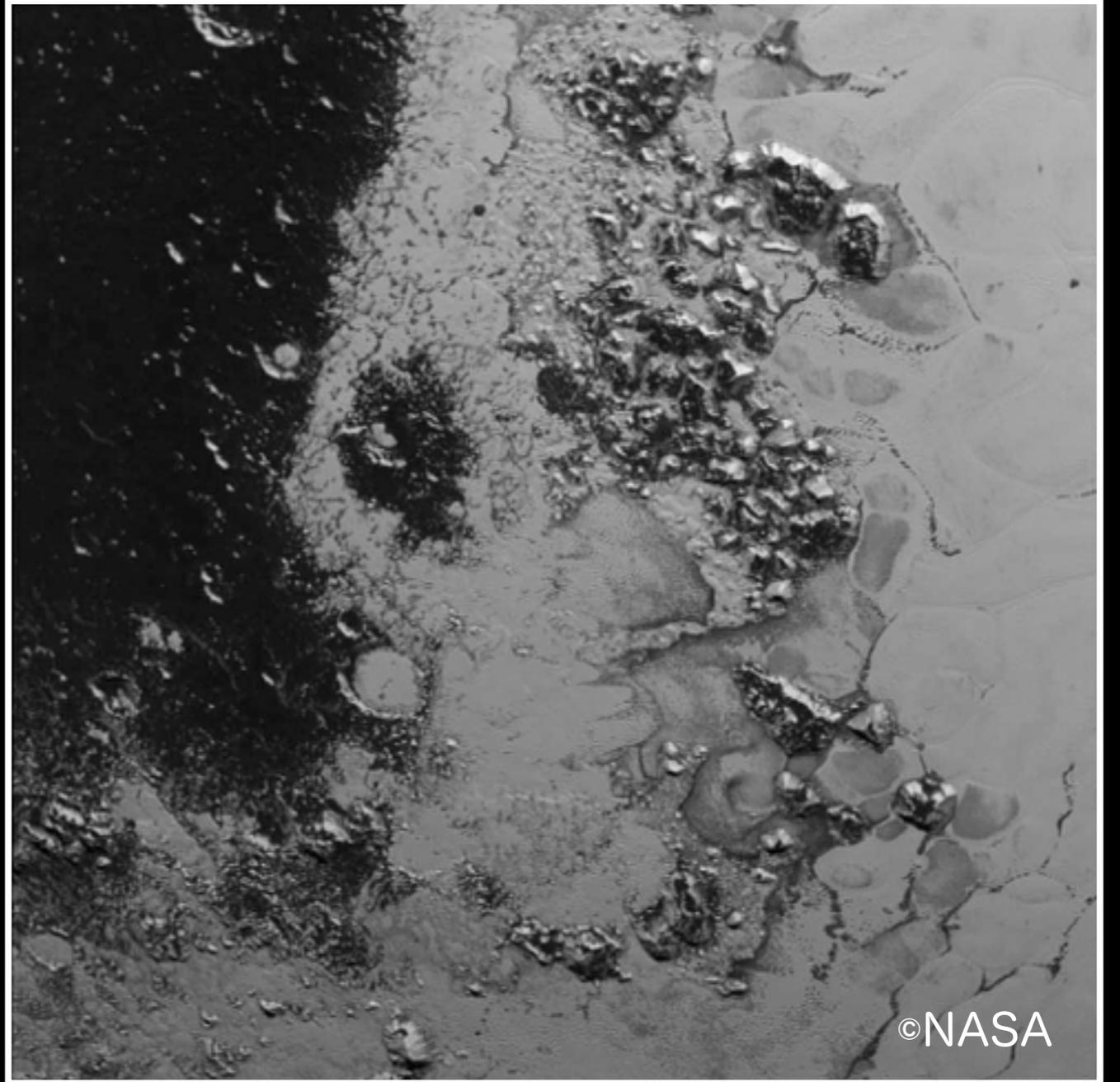
天体質量： $1.67 \times 10^{22}$  kg

# 探査機 New Horizons の捉えた冥王星

クレーターのない“若い”領域 = 最近の地質活動



山岳地形, 氷河に埋められたクレーター



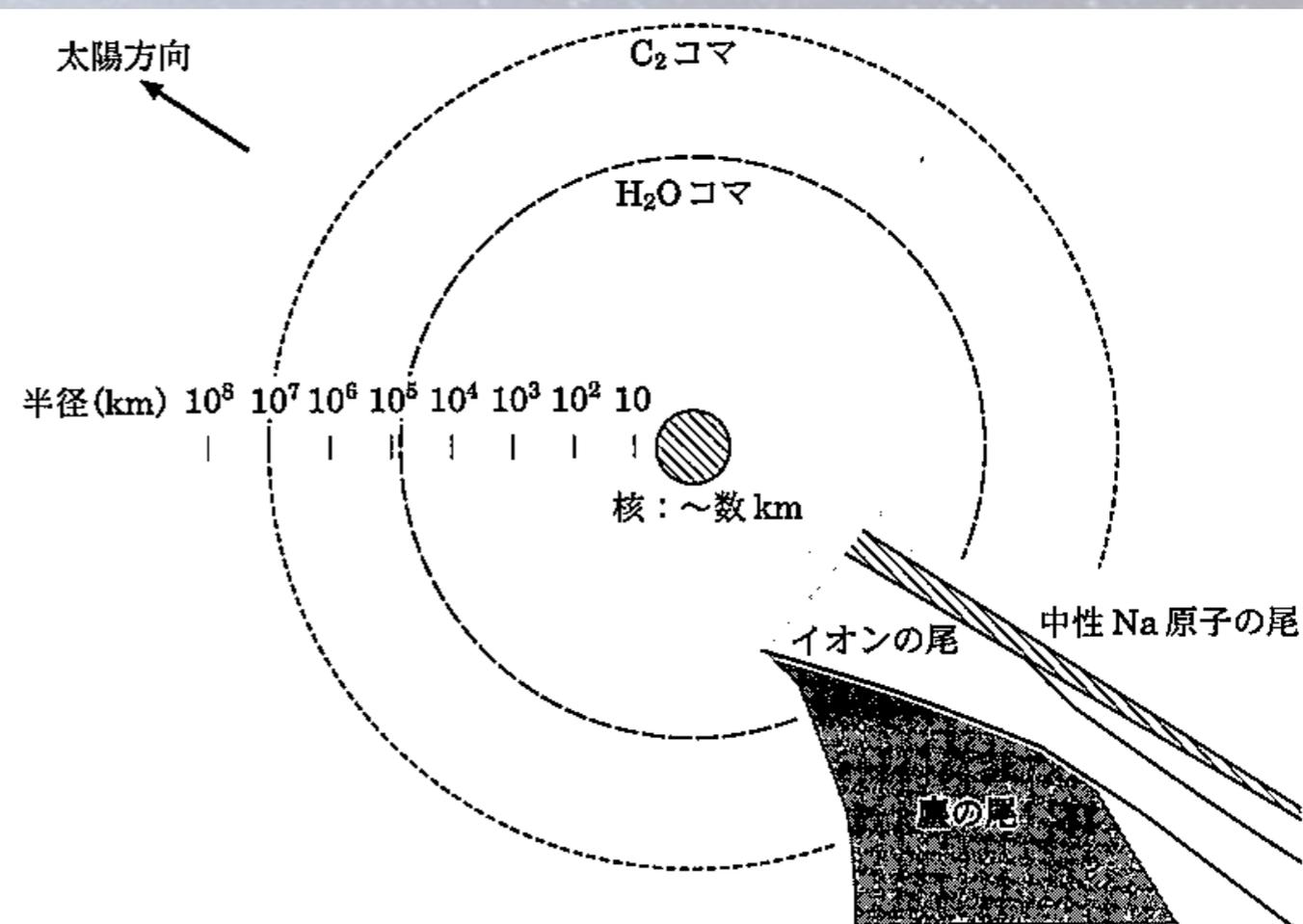
大気中の二層化した“もや”



©NASA

# 彗星

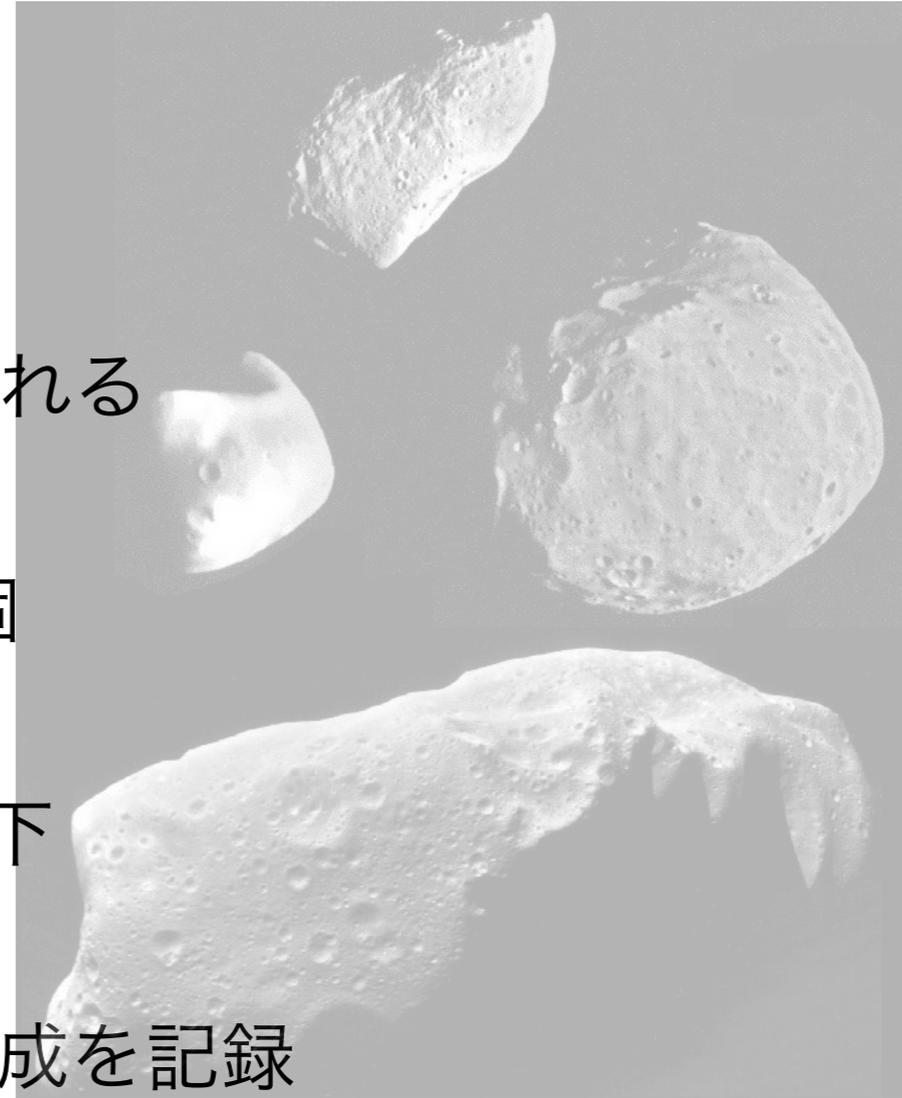
- 惑星や準惑星を除く、太陽の周りを公転する天体のうち、コマや尾を伴うもの
- 固体の彗星核は数km程度だが、ガスと塵のコマ・尾ははるかに大きく広がっている
- 成分：H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO, CH<sub>3</sub>OH…地球やその他の惑星の水・有機物の起源？
- 太陽系外縁天体、オールト雲が起源
- 流星群の起源



日本評論社『太陽系と惑星』より

# 小惑星

- 惑星や準惑星を除く、太陽の周りを公転する天体のうち、コマや尾を伴っていないもの
- 火星と木星間の小惑星群は**小惑星帯**、海王星以遠の小惑星群は**太陽系外縁天体**と呼ばれる
- 現在(2008年1月時点)までの発見数：約40万個
- 全質量を合わせても、地球の質量の1/1000以下
- 太陽系の元素組成や、惑星の材料物質の元素組成を記録  
(小惑星探査機はやぶさ、隕石の化学分析)
- 彗星と合わせて、水や有機物の起源と考えられている (L-アミノ酸)



# 太陽系の元素組成

Our Solar System

太陽は太陽系全体の 99.87%の質量を占めるため、  
大まかに太陽系の元素組成 = 太陽の元素組成

- 元素組成の推定手法
- 太陽系の元素組成の特徴
- 元素の起源

# 太陽系元素組成の推定

揮発性元素 … 太陽大気スペクトル(フラウンホーファー線)

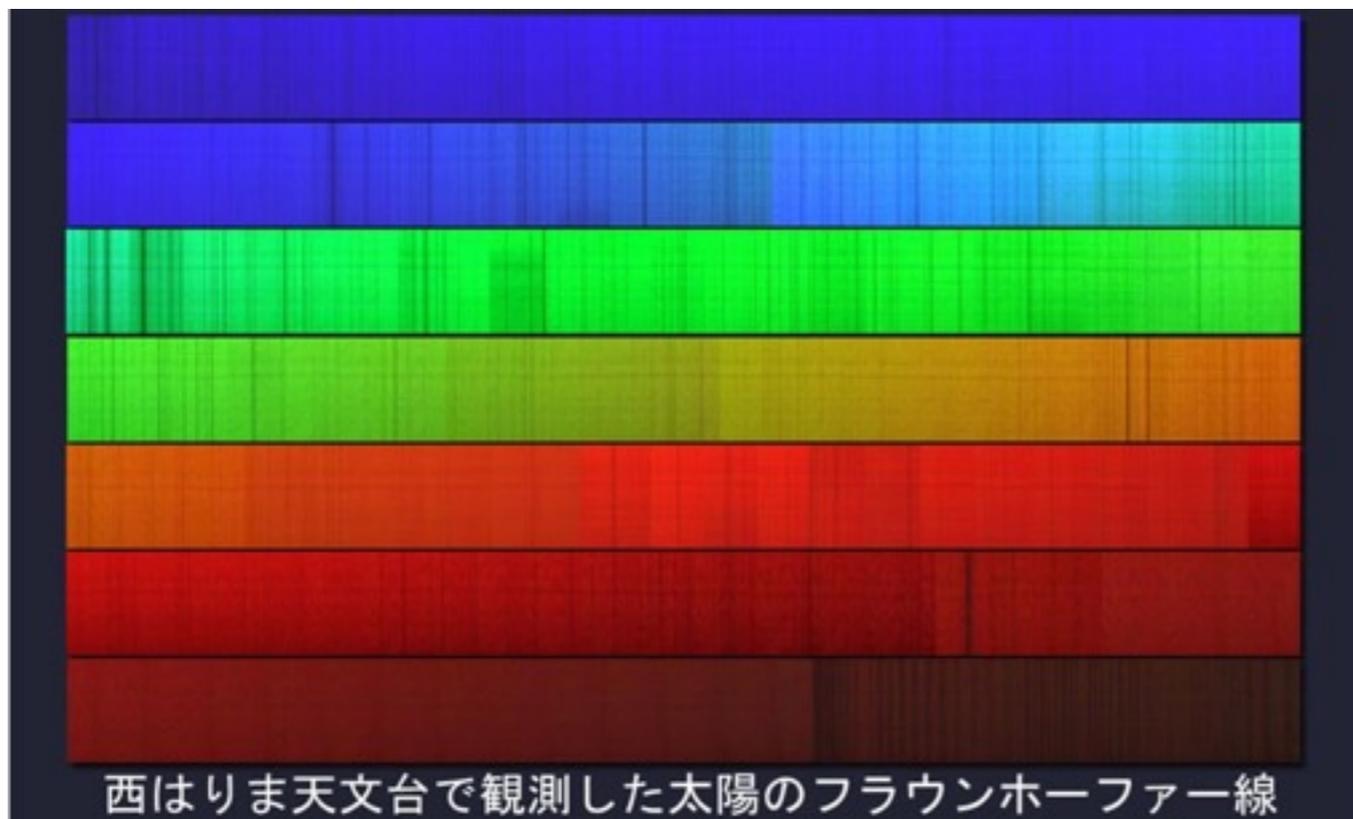
※揮発性：蒸発(凝縮)する温度の大小

揮発性元素 H, He, Cなど 難揮発性元素 Mg, Siなど

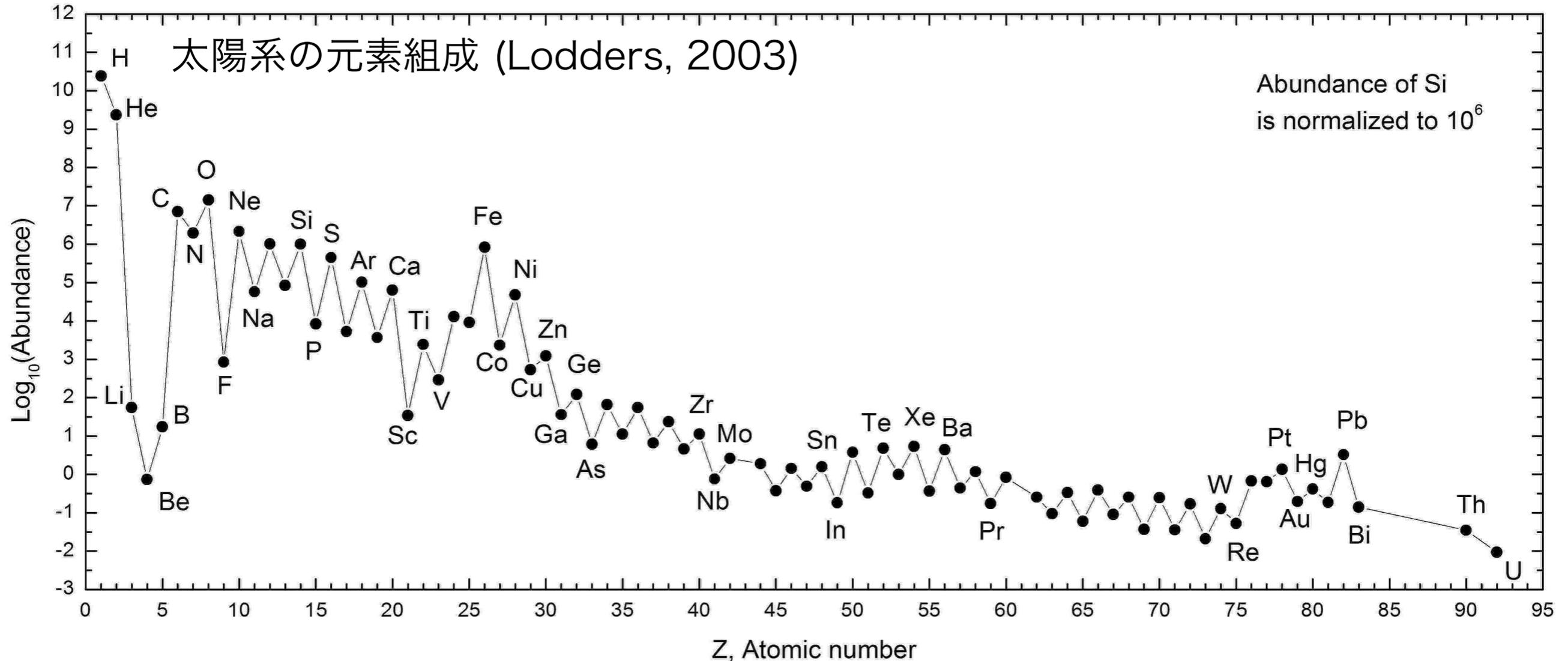
※フラウンホーファー線 … 太陽大気スペクトル中の暗線(吸収線)

不揮発性元素 … 炭素質コンドライト隕石の分析

※炭素質コンドライト隕石 … 隕石の分類。太陽系形成時の始原的組成を記録している



# 太陽系元素組成の特徴

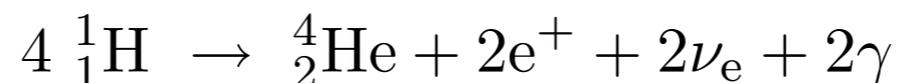


1. HとHeが99%以上を占める。次いで多いのはO, C
2. 原子番号が大きくなると存在比が減少する傾向がある
3. Li, Be, Bは周辺のエ元素に比べて存在度が極端に低い
4. 原子番号が偶数の元素の存在度が高い
5. Fe周辺の元素の存在度が高い



# 恒星内部での元素合成

## 水素燃焼反応 (Proton-Proton I Chain Reaction PP I 反応)



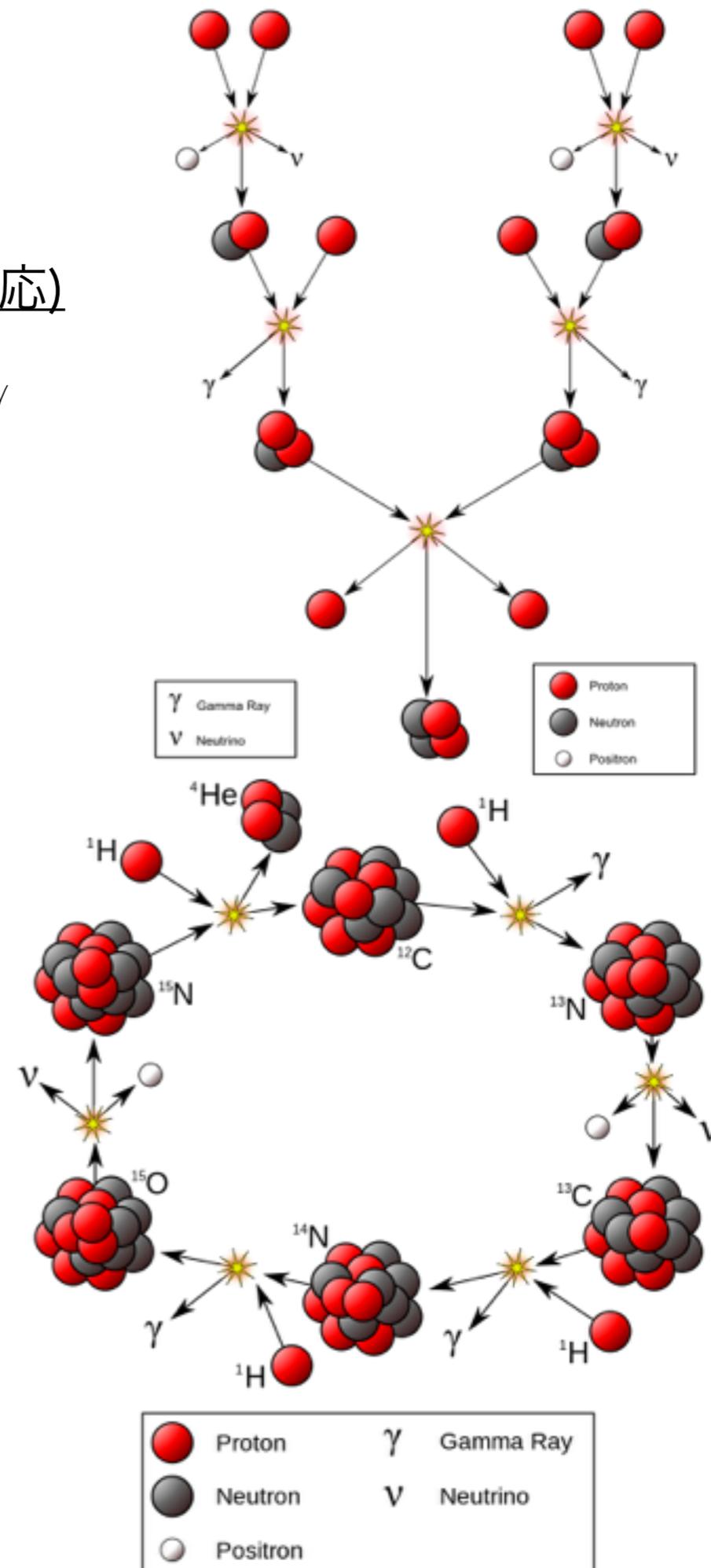
- ・現在の太陽活動の主要なエネルギー源
- ・トンネル効果により水素原子核が反応

## PP II 反応・PP III 反応

- ・Li, Be, Bを分解してヘリウムを生成する反応
- ・ヘリウム合成の割合としては多くない

## CNOサイクル

- ・C, N, Oを介して水素からヘリウムを生成
- ・太陽より重い恒星での主要なエネルギー生成過程



# 恒星内部での元素合成

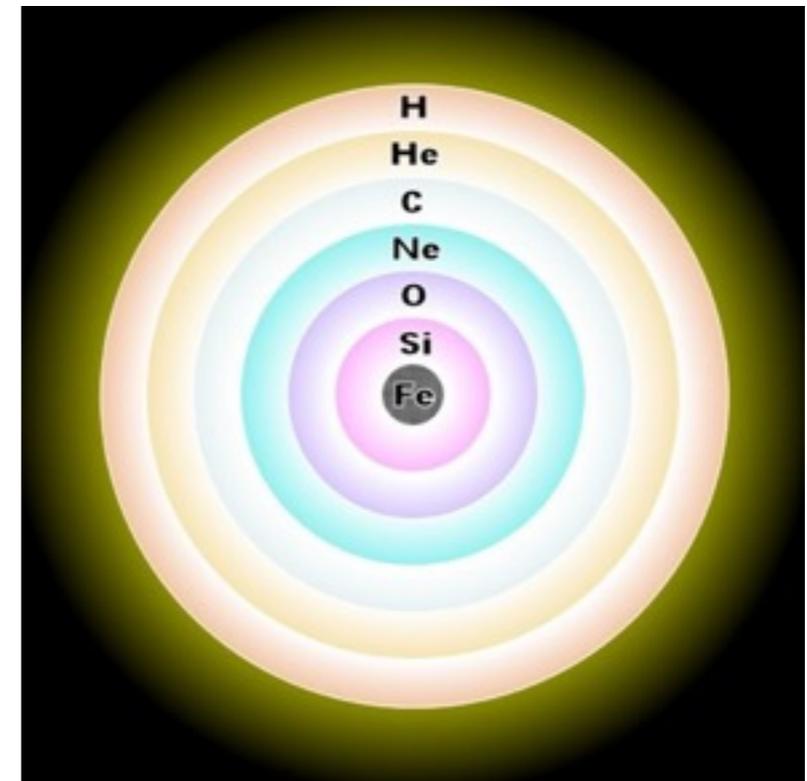
- ・ 恒星中心部で水素燃焼の燃料である水素がなくなると、恒星内部は収縮により高圧となり、ヘリウム以降の元素の核融合が起こる
- ・ どの元素まで燃焼が進むかは恒星の質量に依存
- ・ 恒星内部では鉄まで生成

## ヘリウム燃焼

- ・ ヘリウム原子核3個から炭素を生成(トリプルアルファ反応)

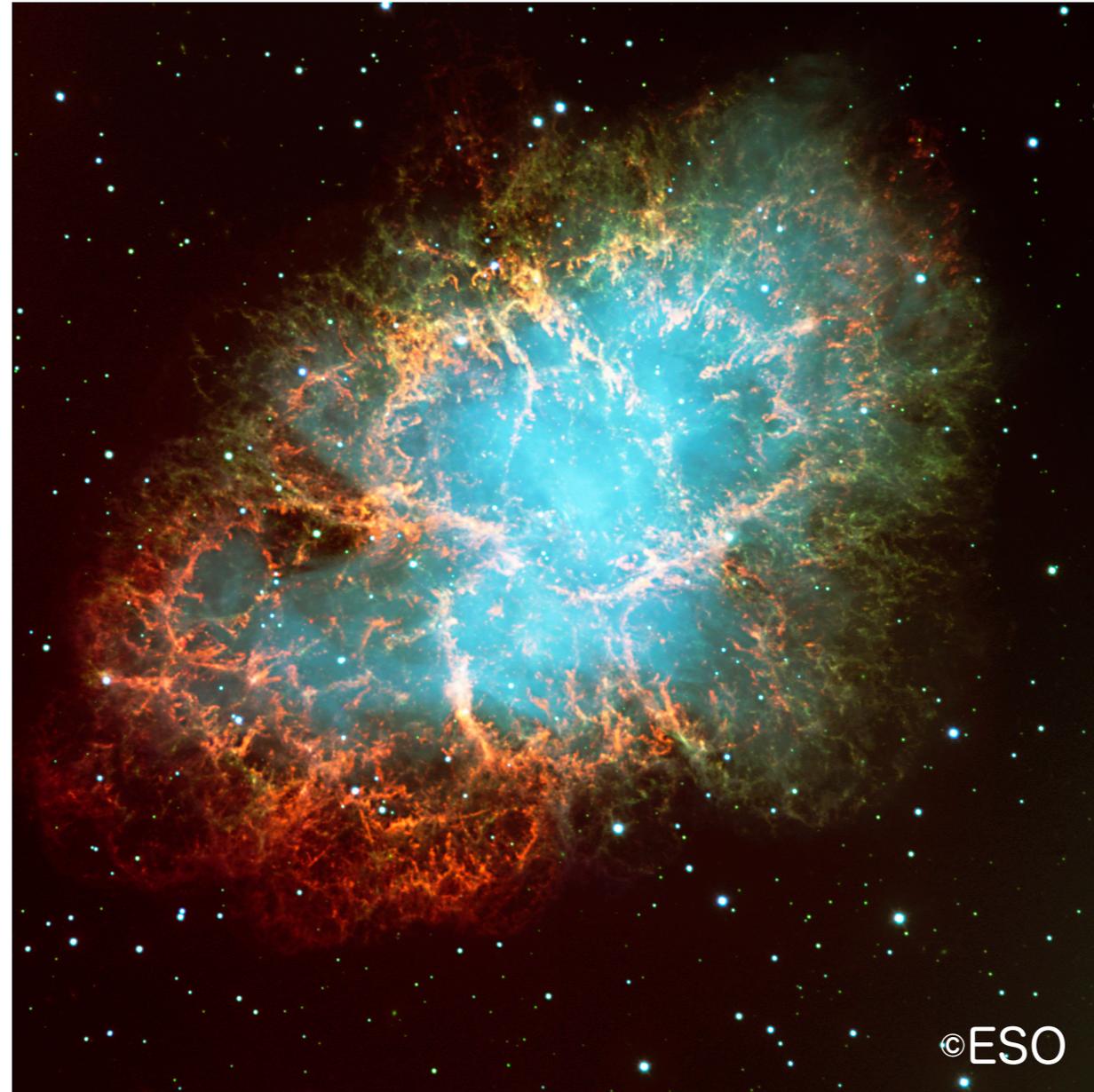
## 炭素燃焼・酸素燃焼

- ・ 太陽の約4倍以上の質量の恒星内部で進行



赤色超巨星内部の元素合成の球殻状分布

# 超新星爆発での元素合成



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory



- 中性子捕獲反応により、鉄より原子番号の大きい元素を生成

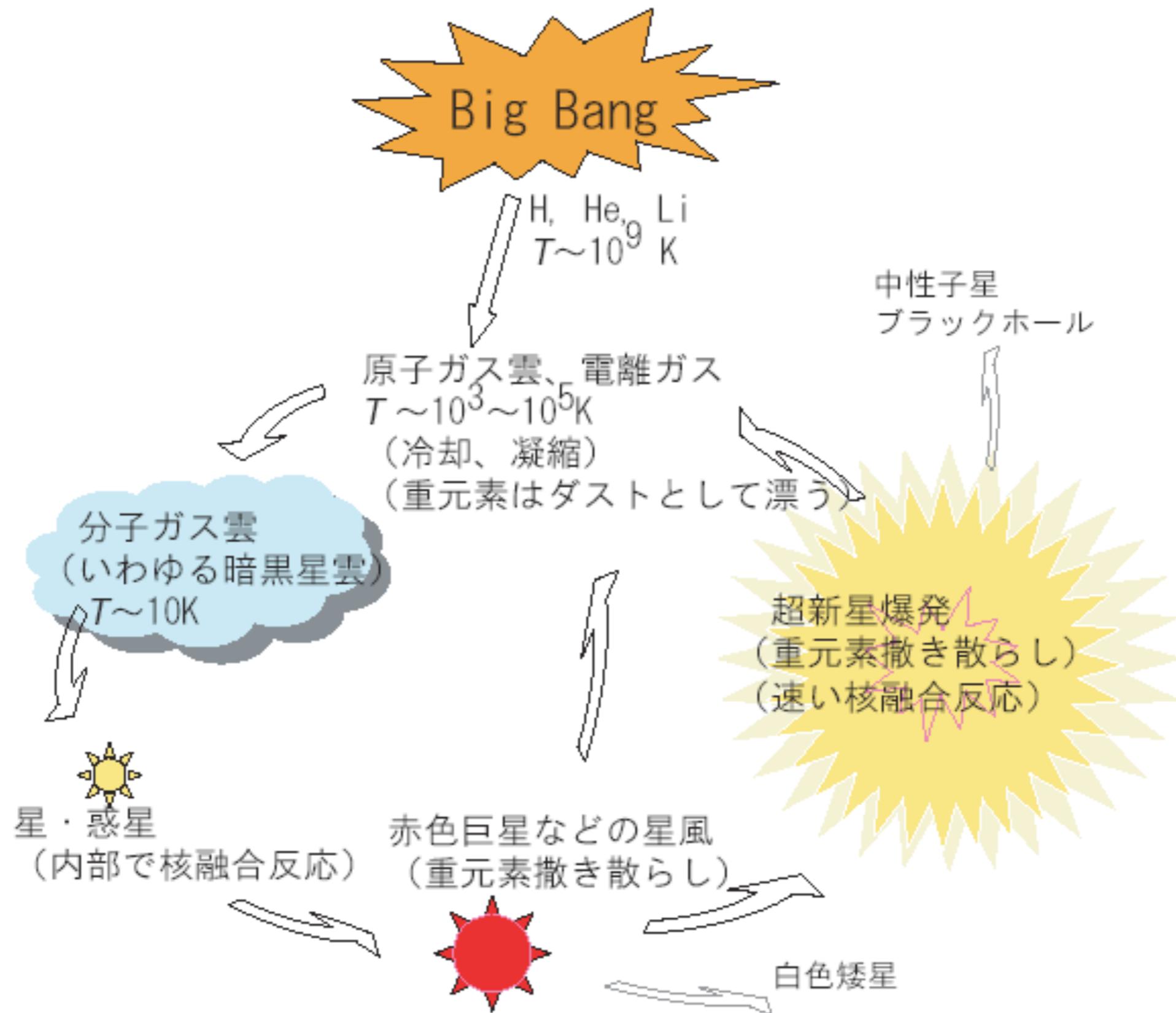


図 2-4. 宇宙での物質の循環

# 惑星の元素組成

原子番号	元素	存在度	
		太陽系 <sup>1</sup>	地球 <sup>2</sup>
1	H	$2.72 \times 10^{10}$	6100
2	He	$2.18 \times 10^9$	110
6	C	$1.21 \times 10^7$	6900
7	N	$2.48 \times 10^6$	54
8	O	$2.01 \times 10^7$	$3.5 \times 10^6$
12	Mg	$1.08 \times 10^6$	$1.1 \times 10^6$
13	Al	$8.49 \times 10^4$	$9.7 \times 10^4$
14	Si	$\equiv 1 \times 10^6$	$\equiv 1 \times 10^6$
20	Ca	$6.11 \times 10^4$	$7.1 \times 10^4$
26	Fe	$9.00 \times 10^5$	$4.6 \times 10^6$

太陽系組成 (Anders & Ebihara 1982) より  
 地球組成 (地学ニュース 361号海老原) より

地球やその他の惑星は太陽と比較して難揮発性元素に富む

# ここまでのまとめ

## 太陽系の構造

- 太陽系内の天体の運動は太陽との二体問題でほぼ近似できる
- 太陽系内の主要な天体はほぼ同じ公転面を持つ
- 太陽は太陽系の質量の99%以上を担う
- 太陽以外の恒星天体：惑星, 準惑星, 小惑星, 彗星

## 太陽系の元素組成

- ≡ 太陽の元素組成
- 太陽大気スペクトル, 隕石から推定
- H, Heはビッグバンで生成
- Feまでの元素は前の世代の恒星内部での核融合で生成
- Feより重い元素は超新星爆発を起源とすると考えられている