

時間学公開講座 in 山口

「時間学への招待」

第3回 2022年11月26日

藤澤 健太（山口大学 時間学研究所）

各回の内容

- 第1回 11月12日【暦】

- 宇宙 宇宙の現象と我々の生活には関連があり、それを端的に表しているのが暦である。
- 社会 暦には、生活をリズムづける特別な区切り（祝祭日）がある。20世紀には、この区切りのありかたを国家や企業が大きく変える。

- 第2回 11月19日【時間を守る】

- 宇宙 精密な時計を使うことで、宇宙の観測や研究が発展してきた。特に最近のブラックホールの撮像では、原子時計が重要であった。
- 社会 時間厳守という考えは、学校や企業や鉄道など、近代的な施設・組織の登場をきっかけに末端の民衆にまで広まった。

- 第3回 11月26日【進化】

- 宇宙 宇宙は不変なものではなく、ビッグバンによって始まり、現在まで変化を続けている。これを宇宙の進化史と呼び、人間もその中に位置づけられる。
- 社会 進化論が日本社会に紹介され普及をはじめたのは明治時代である。それは当時のインテリ層の時間イメージに大きな影響をあたえた。

「進化」という言葉

- 英語evolutionの訳語
- 通常は生物の進化の意味
 - 生物の形質（姿、遺伝子）が世代を経るにしたがって次第に変化すること
- 天文学における「進化」
 - 長期間にわたる宇宙と天体の変化を進化と呼ぶ
 - 星の進化：星の明るさや構造が次第に変化していくこと
 - 化学進化：宇宙の構成元素が次第に変化すること
 - 宇宙進化：初期の宇宙から現在にいたる宇宙全体の変化
Cosmic Evolution

宇宙という言葉

古代中国の百科事典、「淮南子」に書いてある言葉

往古来今謂之宙
四方上下謂之宇

- 宙とは、昔から今にいたる時間のこと
 - 宇とは、四方と上下に広がる空間のこと
-
- 宇宙とは、私たちがすむ巨大な時間と空間

今回の講演におけるふたつの問い

1. 宇宙に始まりはあったのだろうか
2. 宇宙の中で私たちはどのように生まれてきたのだろうか

宇宙に始まりはあったのだろうか？

宇宙に始まりがあったかどうか科学的に確かめるために

- ①宇宙を扱う理論を作る
- ②宇宙の姿を観測する

一般相対性理論（1916年）

- 宇宙全体をあつかう理論
 - 宇宙を支配するのは重力
 - 一般相対性理論 = 重力の理論を使って宇宙全体の形と動きを理論的にとらえる
 - アインシュタイン方程式

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R - \Lambda g_{ij} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{ij}$$

- 宇宙全体が一様とする式

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

方程式を解いた結果、わかったこと

「宇宙の大きさは時間につれて変化する」

これは理論的な予測なので、本当に変化しているかどうかを観測して確かめる

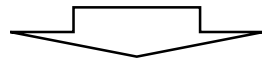
宇宙膨張の発見（1929年）

- 遠方銀河の運動を観測（ハッブル）
 - 銀河：当時知られていた最も遠い天体
 - 遠方に存在＝宇宙全体の動きを表す

観測によってわかったこと

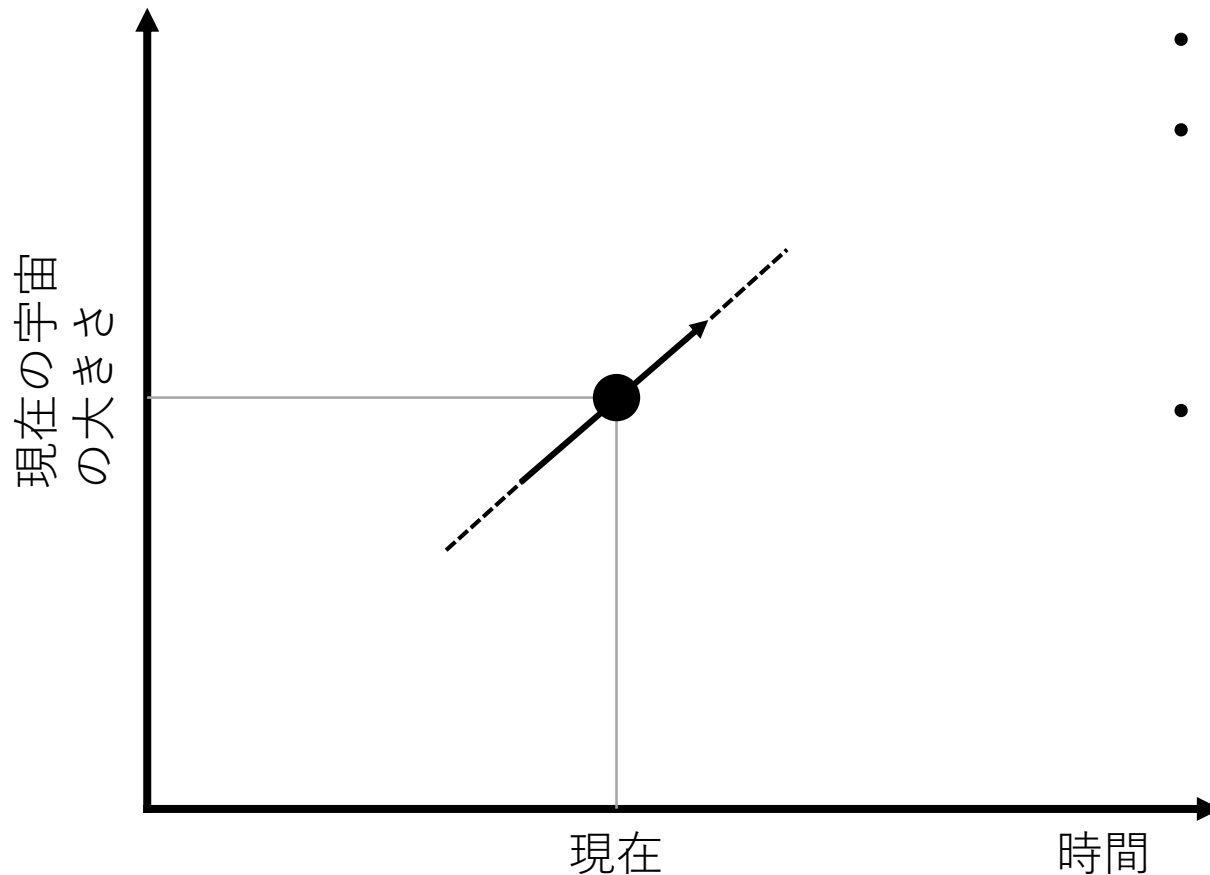
1. 銀河は我々の銀河系から遠ざかる運動をしている
2. 遠い銀河ほど速く遠ざかっている

全ての銀河の間隔が広くなる



宇宙が膨張していることの発見

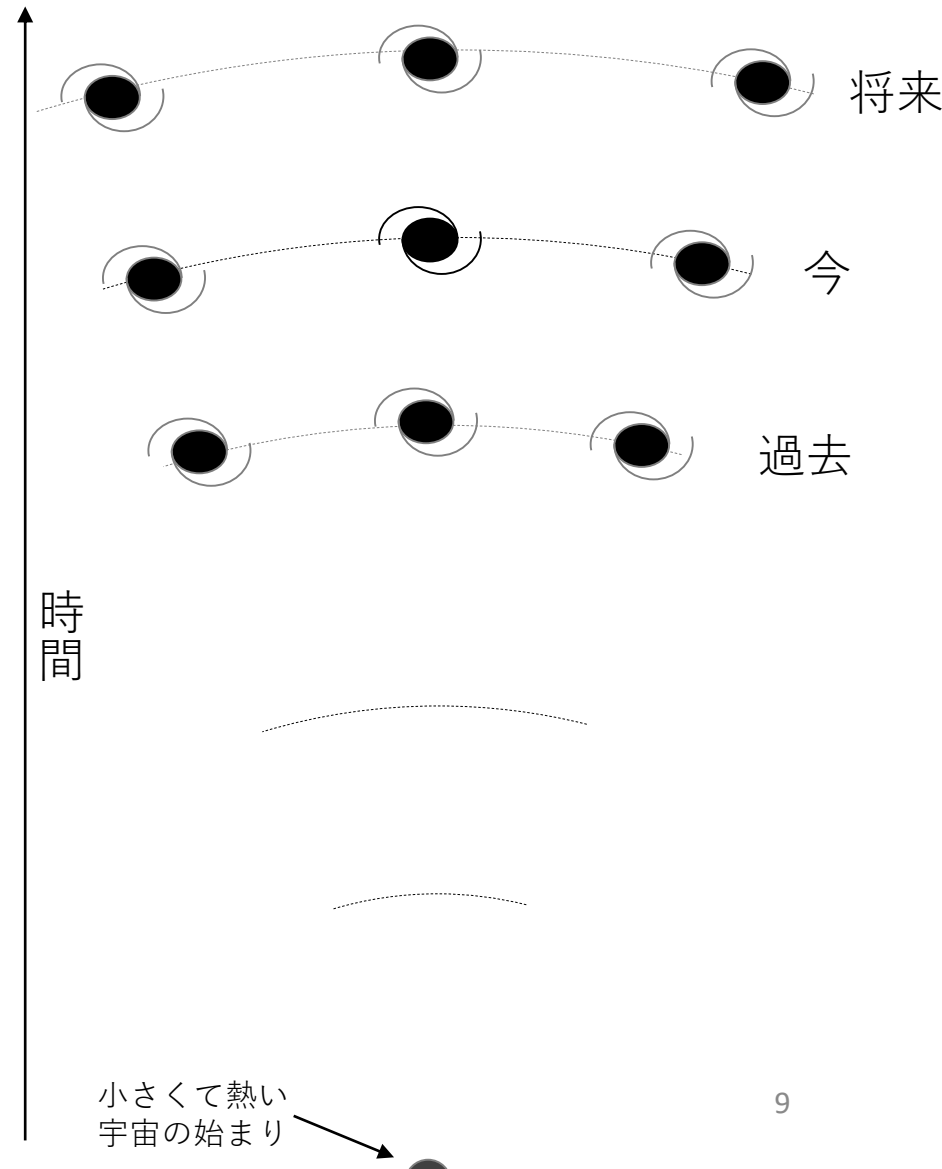
膨張する宇宙



- 現在の宇宙は膨張している
- 未来
 - 宇宙は次第に大きくなる
 - その先、どうなるだろうか？
- 過去
 - 宇宙は昔、小さかった
 - どこまでもさかのぼったらどうなるだろうか？

宇宙の始まりを積極的に考える

- 膨張宇宙を昔にさかのぼる
 - 昔、宇宙は小さかった
 - 小さい宇宙に星や銀河が詰め込まれた高密度な状態
 - 高密度なので高温だった
- ビッグバン宇宙論（ガモフ）
 - 宇宙は超高密度で超高温の爆発状態（ビッグバン）から始まった
 - 膨張するにつれて温度が下がり、今の宇宙になった
- ビッグバン宇宙論の予言
 - 高温だった宇宙始まりの「熱さ」が今も観測できるはず→観測で確かめる

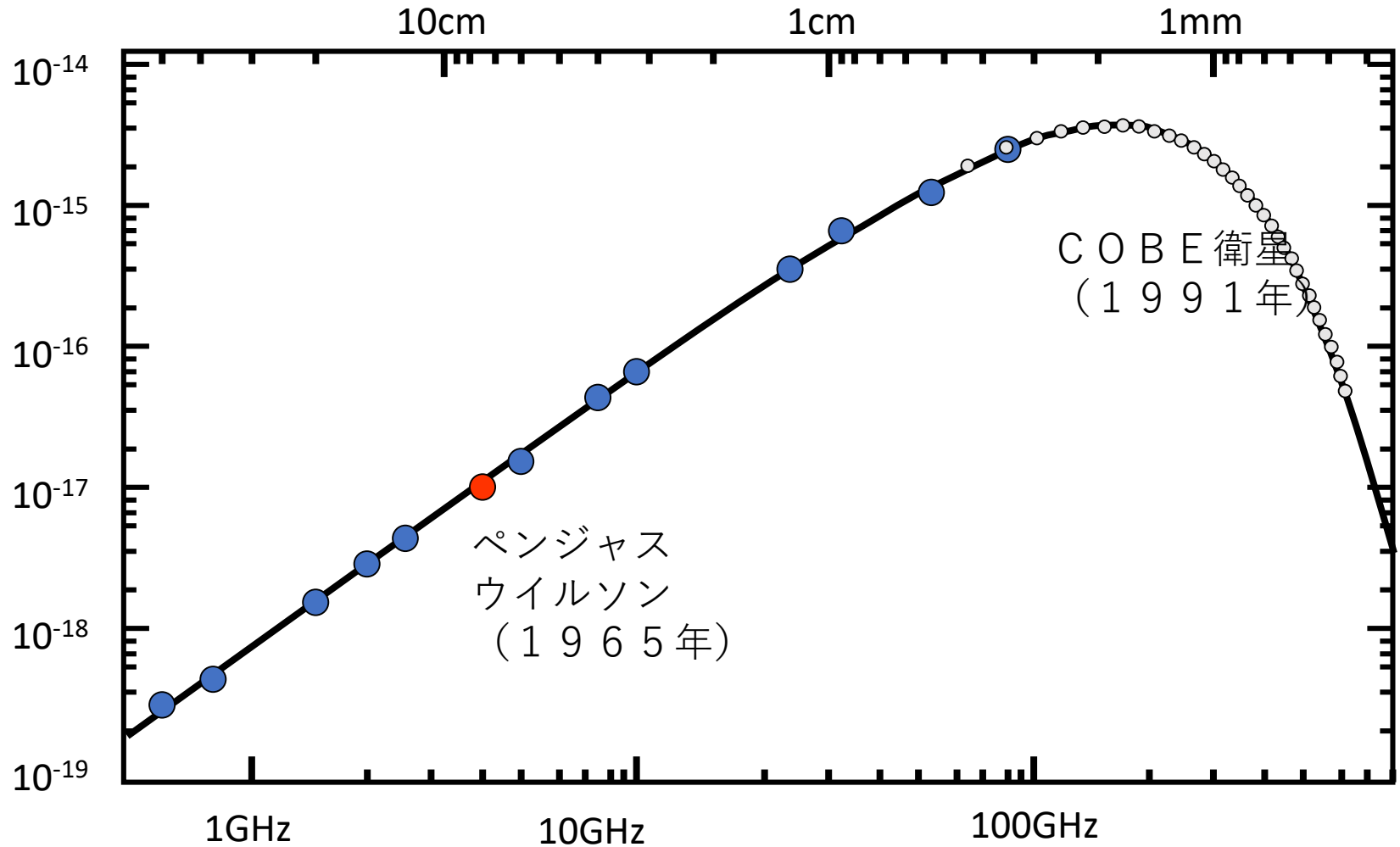


宇宙背景放射の発見（1965年）

- 発見
 - 衛星通信用アンテナの試験中
 - 宇宙のあらゆる方向から電波がくる
 - 宇宙背景放射とよばれる
- 宇宙の温度
 - 電波の強さは温度で表される
 - 絶対温度で3度（ -270°C ）
 - 極めて低温だが、完全に0ではない
 - このような電波は星や銀河は出さない
 - 宇宙が小さかった時には、この温度はきわめて高かったはず

宇宙はほのかに熱い。熱かった宇宙＝ビッグバンで宇宙が始まった証拠。宇宙には（時間には）始まりがあった

宇宙背景放射の観測データ

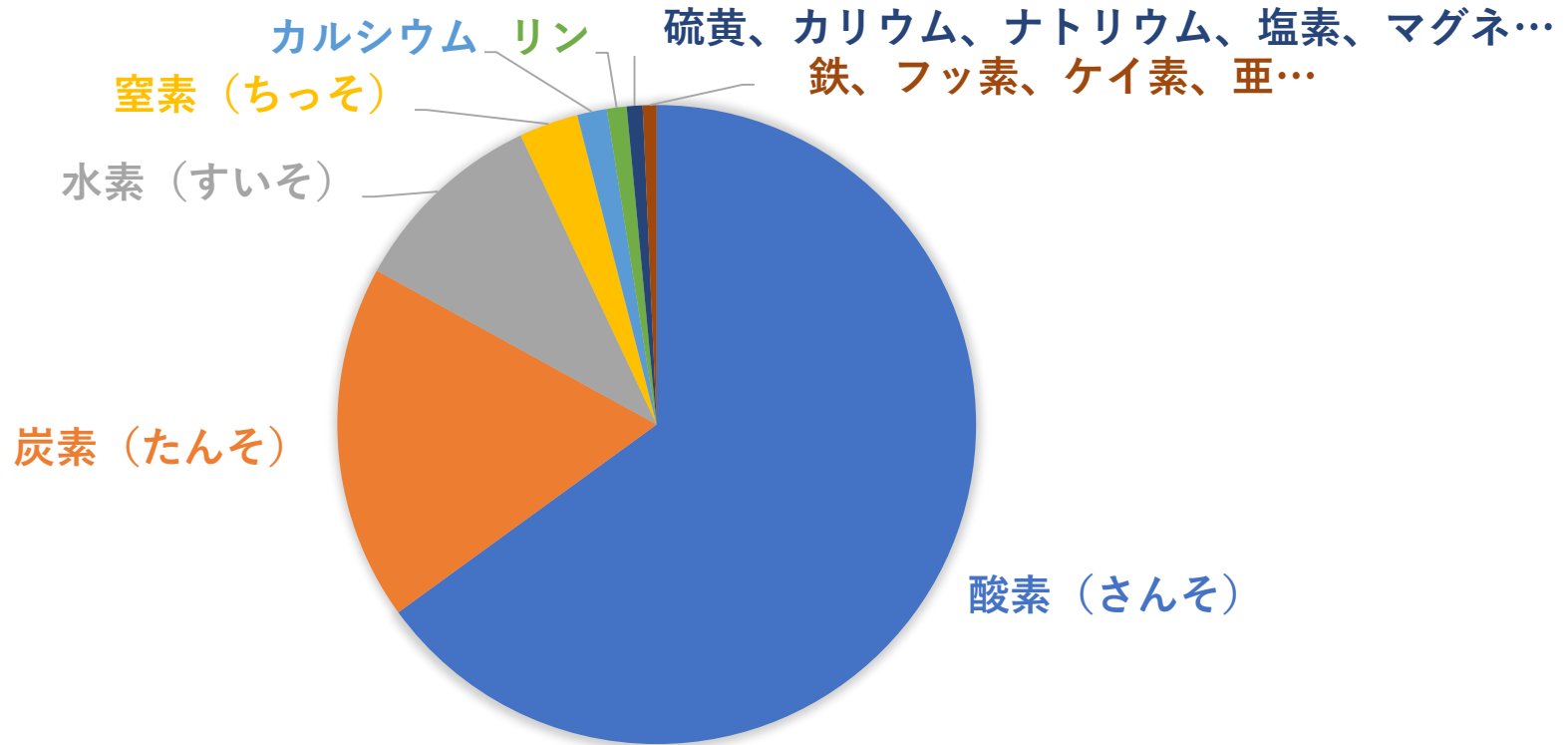


宇宙の温度は絶対温度で 3 度（正確には2.725度）

宇宙の中で私たちはどのように 生まれてきたのだろうか？

宇宙はビッグバンによって始まったが、ビッグバンの直後の宇宙には水素とヘリウムしかなかった。どちらも透明な気体なので、私たちの地球や、私たちの身体を形作ることができない。

人体を構成する物質



- 私たちの身体は様々な物質からできている。体重60 kgの人のおよそ40 kgは酸素、10 kgは炭素、6 kgは水素。
- 私たちは地球上の物質を食べて身体を作ってきた。つまり地球という星の一部分である。
- 地球や私たちを作っている物質は、ビッグバン直後の宇宙には存在していなかった。これらの物質を作り出したのは星である。

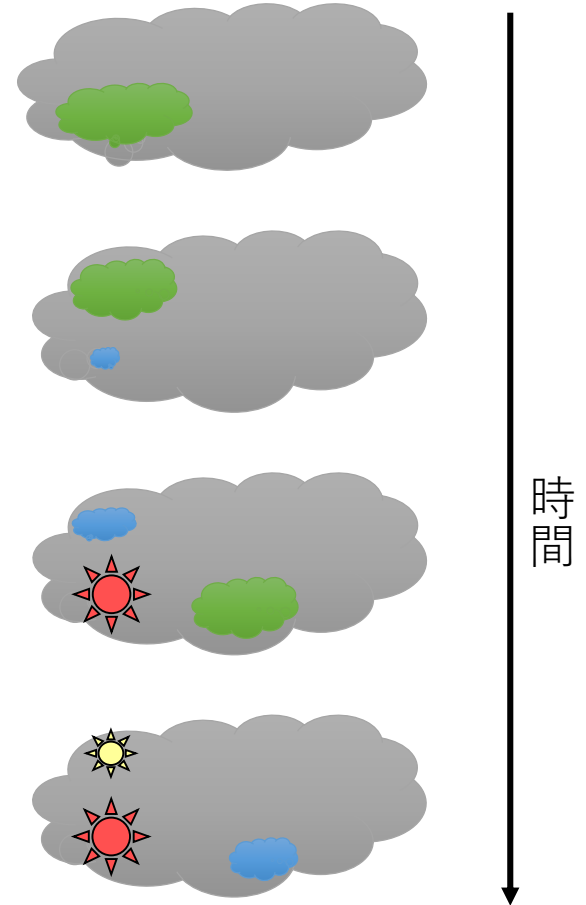
星の形成と核融合反応

- 星の形成

- 宇宙に存在するガスの雲の濃い部分が、ガス自身の重力で縮んで星となる
- ビッグバンの後、約 1 億年頃から星の形成が始まった
- 宇宙の様々な場所で、現在も星の形成が続いている

- 星内部の核融合反応

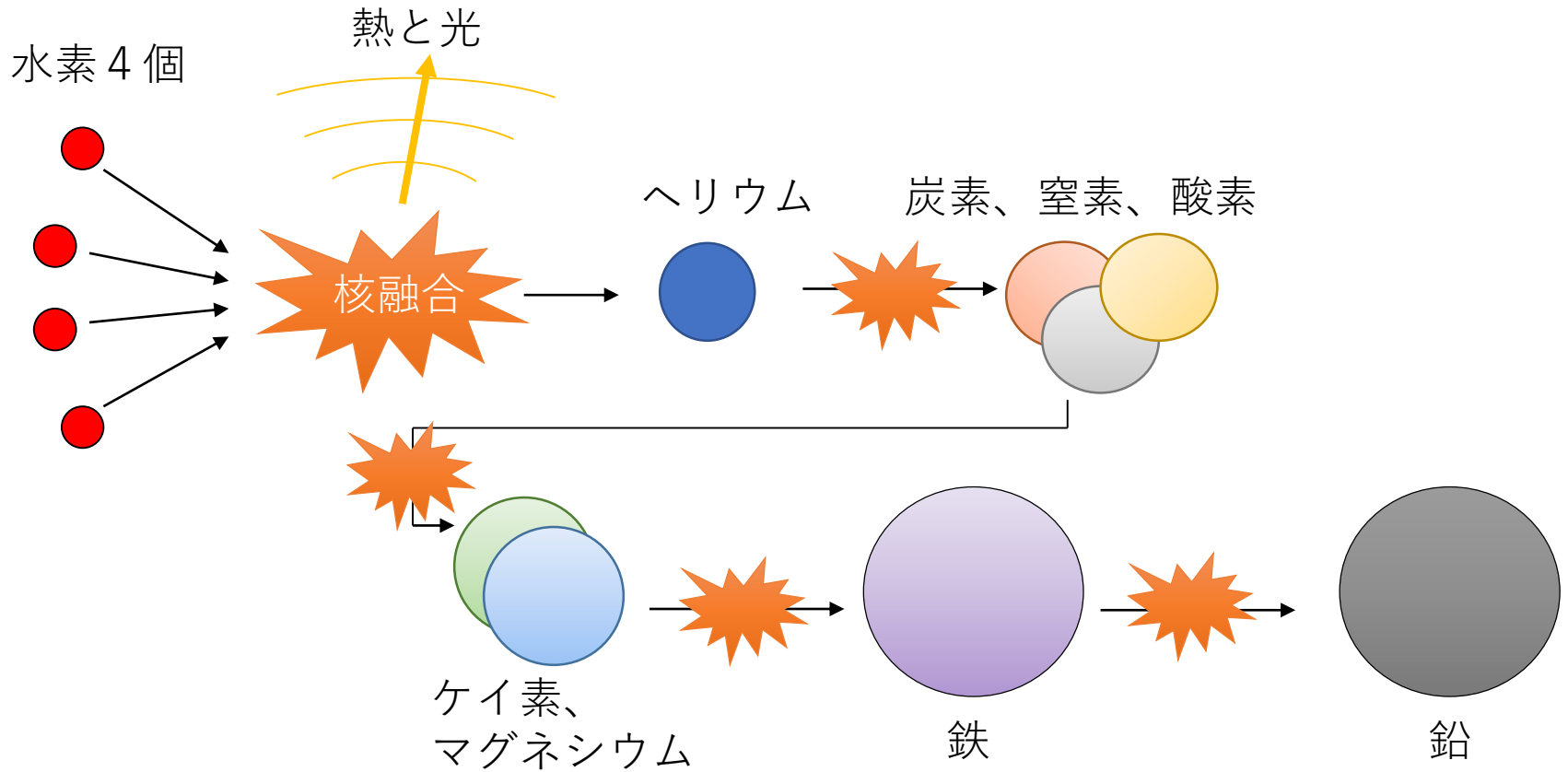
- 内部で核融合反応が生じて、水素やヘリウムから炭素、酸素、窒素などが生成される
- 同時に大量のエネルギーが発生して星の光となって宇宙に放出される



星は光りながら様々な物質を生成している



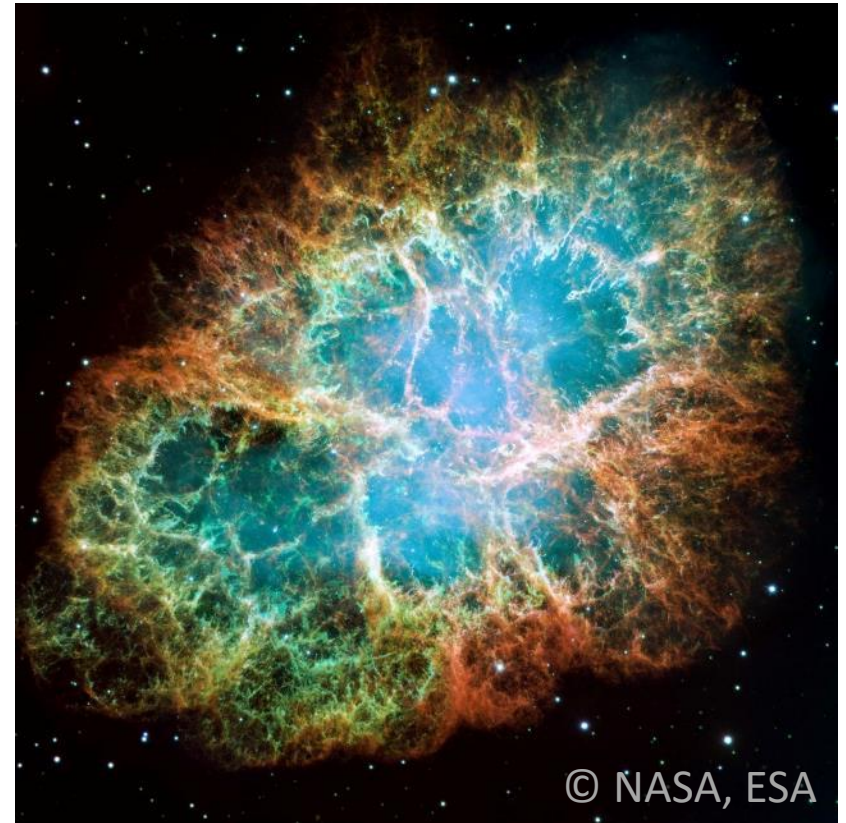
恒星内部の元素合成



太陽のような星（恒星）の中心部では、水素4個が核融合してヘリウムとなる反応が生じている。この時に膨大な光と熱（エネルギー）が発生する。中心部の水素が無くなってヘリウムがたまると、ヘリウム3個が核融合して炭素になり、さらに酸素になる。星の質量によって反応の進み方は異なり、大質量の星はより重い元素を作る。

超新星爆発

- 大質量の星の末期の爆発
 - 中心から爆発して四散
- 様々な物質の放出
 - 星内部の核融合で生じた物質を宇宙に放出
 - 爆発の瞬間にも核融合反応が生じて様々な元素ができ、それも放出
- 宇宙の物質進化
 - 星間ガスに水素とヘリウム以外の様々な物質（元素）が含まれるようになる
 - 様々な物質を含んだガスが再び密集して次世代の星を作る



かに星雲

1054年に爆発が観測された星の残骸（超新星残骸）。およそ4光年の広がりを持ち、現在も膨張を続けている。この星が爆発して光った様子は肉眼でも観察され、藤原定家の日記、明月記に記載がある。

元素は星によって作られた

宇宙に存在する様々な物質（元素）は、星の内部（オレンジ色）、超新星爆発（水色）、中性子星合体（黄色）で作られた。

Element Origins																		2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

Based on graphic created by Jennifer Johnson

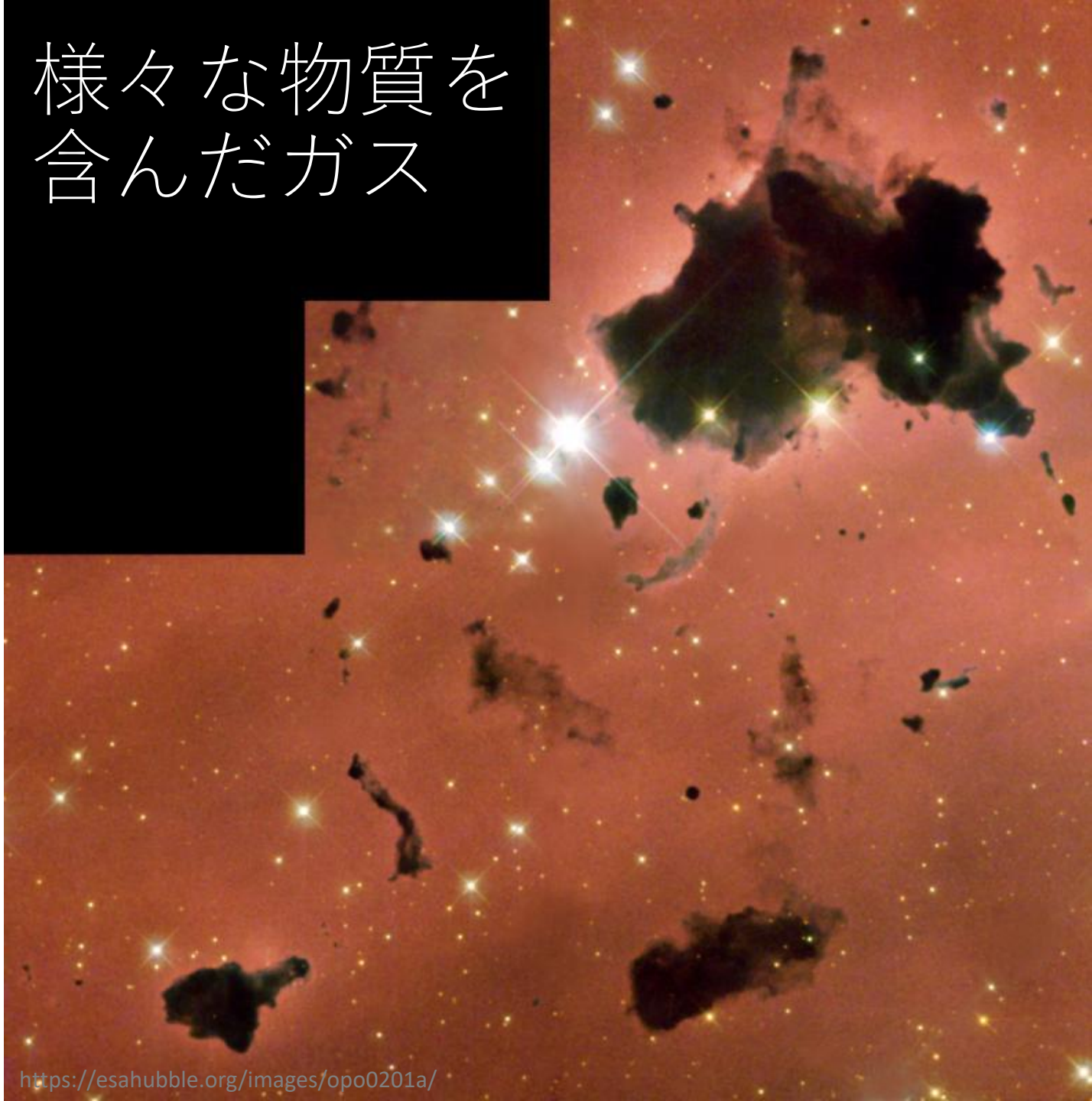
様々な物質を 含んだガス

星間ガス

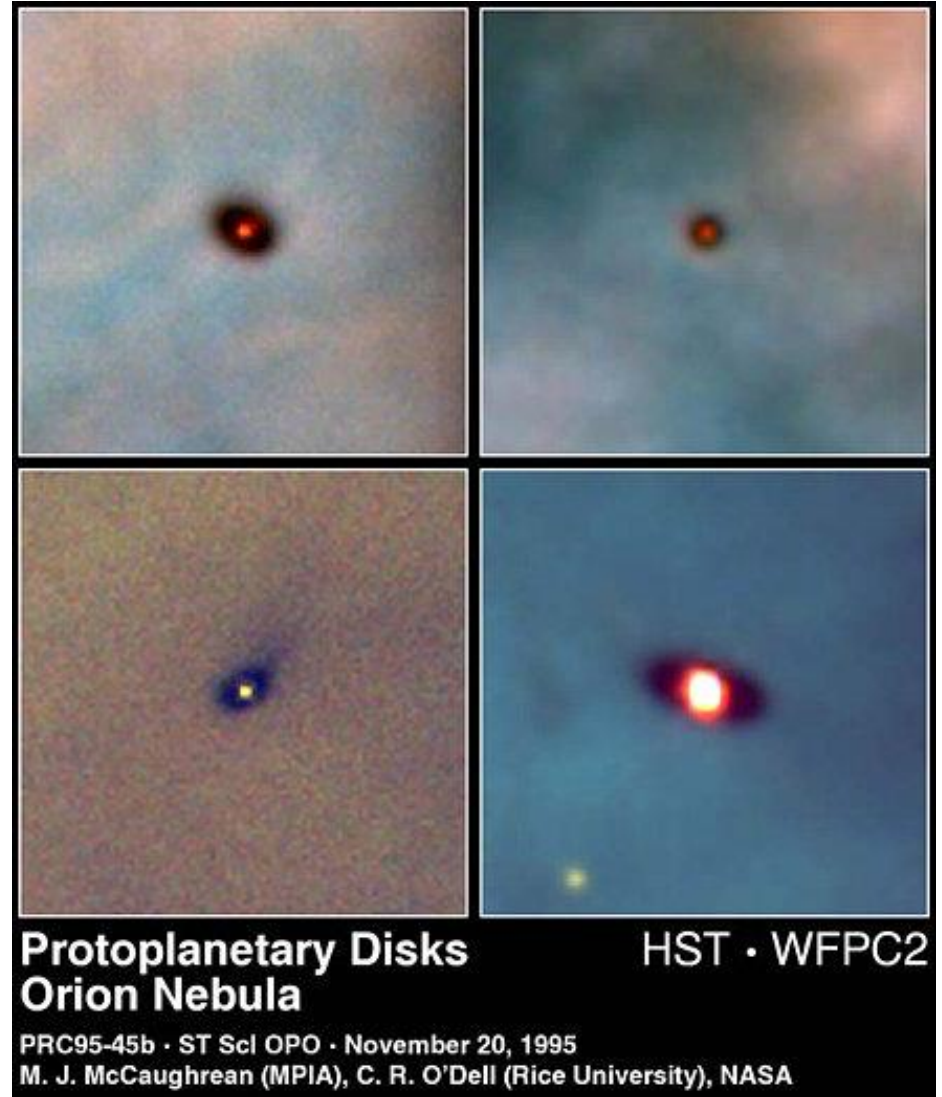
- 宇宙空間は真空ではなく、ごく希薄なガス＝星間ガスに満たされている
- 星間ガスは星が放出した物質を含んでいる
- 炭素やケイ素、マグネシウムなどを含んでいるので黒い
- ガスが濃く集まっている部分は、黒い雲として見える

星の形成

- 濃く集まった黒い星間ガス（暗黒星雲）から、次世代の星が作られる



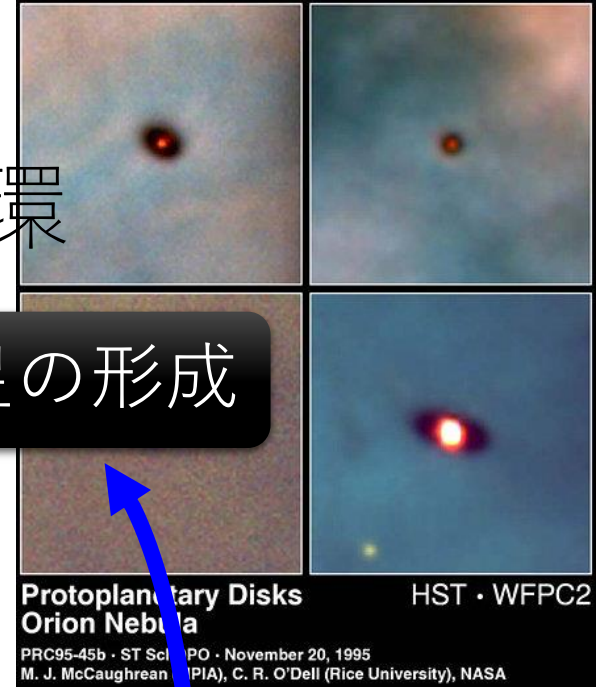
星間ガス中で形成しつつある星



- オリオン大星雲中に黒い小さなガス塊として形成中の星が見られる。中心に光り始めた星がある。
- 星周囲のガスは回転する円盤となっている。この円盤から惑星ができる

星と星間ガスの循環

星の形成



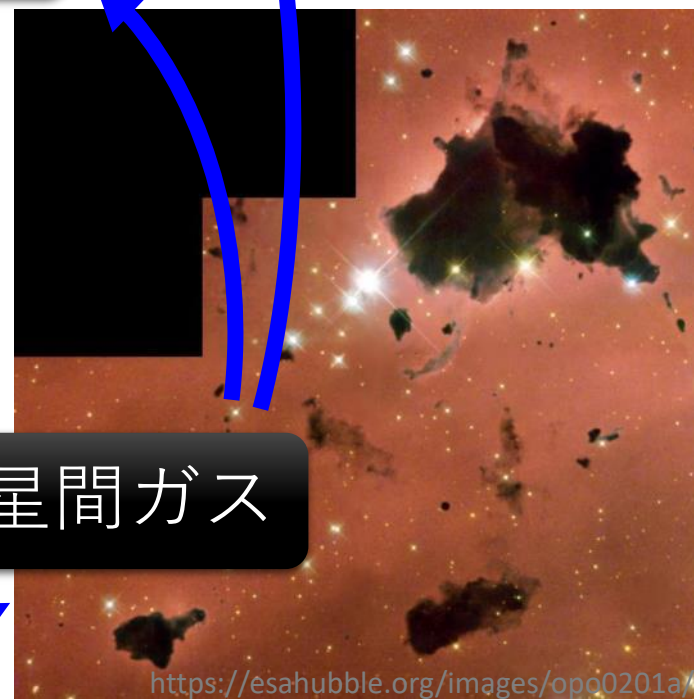
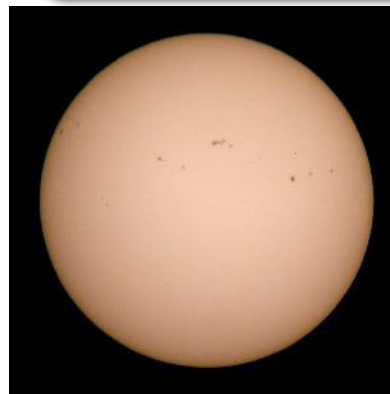
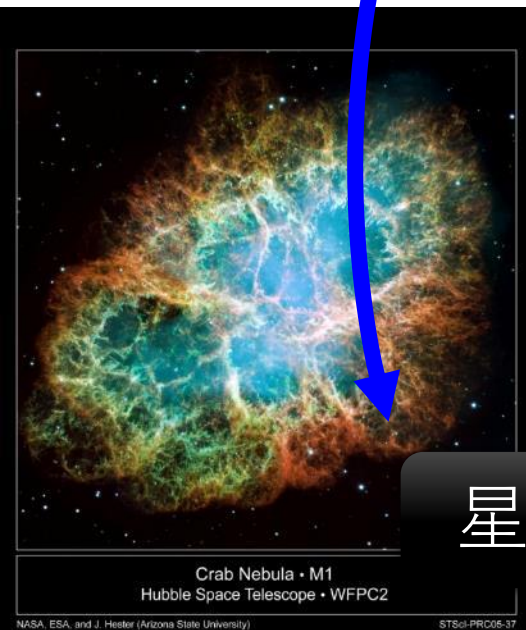
46億年前

太陽と地球の形成

星の中で
元素合成

星の爆発

星間ガス



まとめ

宇宙の最初には水素とヘリウムしかなかった。星の中で核融合によって様々な物質が作られ、超新星爆発によって宇宙空間に放出され、星間ガスとなった。様々な物質を含むようになった星間ガスから次世代の星が生まれた。星と星間ガスの循環の中で、約**46億**年前に星間ガスから太陽と地球ができた。すなわち私たちはビッグバンから続く宇宙の歴史の中で、星から生まれたのである。

