

物理的世界観：目次

I. 物理屋の偏見 (10/8)

II. 夜空のムコウ (10/8)

III. 物質の起源と宇宙の歴史 (10/15)

IV. 宇宙の組成 (10/15)

V. 自然法則と人間原理 (10/22)

VI. 世界を科学で俯瞰する (10/22)

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/fukan>

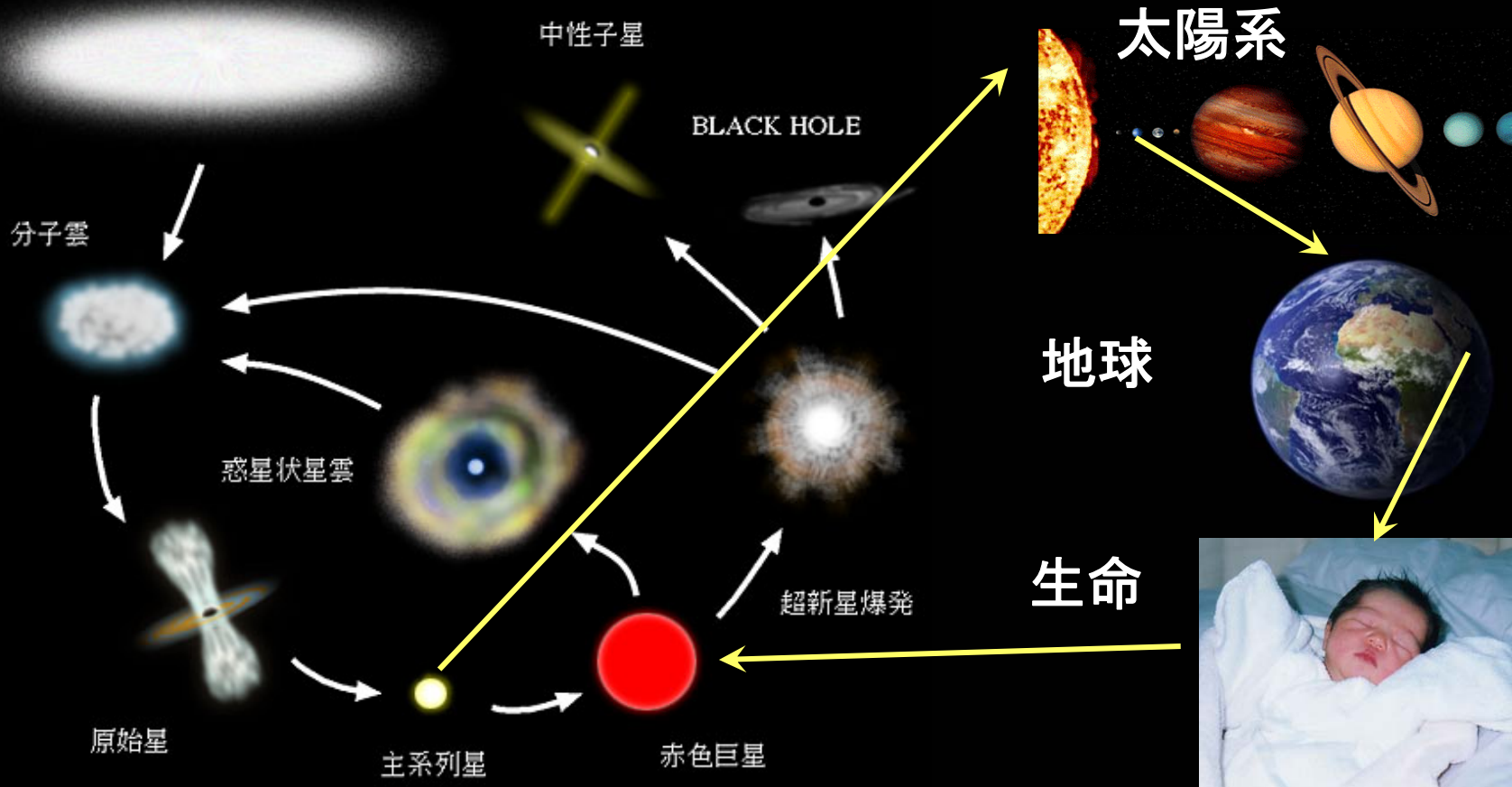
10月8日の講義の感想・質問に関する参考文献等

- **系外惑星や地球外文明について**
 - 宇宙は“地球”であふれている(井田他著:技術評論社 2008)
 - 宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-
(須藤他訳:シュプリンガー・ジャパン 2008)
- **宇宙の起源**
 - 別冊日経サイエンス156 宇宙創世記
- **宇宙と銀河の進化**
 - ものの大きさ(須藤著:東大出版会、2006)
 - 銀河進化の謎(嶋作一大著:東大出版会、2008)
 - 講義web pageにリンクしたプレゼンテーションファイル
- **2008年ノーベル物理学賞の内容に関連する素粒子論**
 - 理学部・物理学科・物理学会のHP、10月17日17:00—19:00の物理教室談話会@本郷小柴ホール、12月12日の理学部サイエンスカフェ@駒場

Ⅲ 物質の起源と宇宙の歴史

～宇宙・天体・物質・生命の共進化～

BIG BANG



森羅万象の起源

- 起源の探究はすべての学問の原動力
 - 日本語の起源：言語学
 - 生命の起源：分子生物学
 - 人類の起源：人類学
 - 地球の起源：地球惑星科学
 - 物質の起源：素粒子物理学
 - 宇宙の起源：宇宙論
- にもかかわらず理解されていないことだらけ

宇宙の起源

- 全く自明ではない基本的な問いかけ
- 宇宙に始まりがあるとすると
 - なぜ始まったのかと聞きたくなる
 - ではその前は何だったのかと聞きたくなる
- 「神様なしで」このような禅問答を避けるには、
 - 始まりも終わりもなくずっと同じ状態のまま
 - 無限に輪廻転生を繰り返す

のどちらかだと考えたほうがずっとすっきりする

- つまり、**哲学的・宗教的には「宇宙に始まりはない」あるいは「創造主がいる」ことにしないと面倒**
- しかし、**科学的には「始まりはある」とされる**

let there be light

■ 旧約聖書創世記天地創造

- 初めに、神は天地を創造された。
- 地は混沌であって、闇が深淵の面にあり、神の霊が水の面を動いていた。
- 神は言われた。「光あれ」
こうして、光があった。



カリフォルニア大学
バークレー校のロゴ

宇宙の進化 ≠ 生物の進化

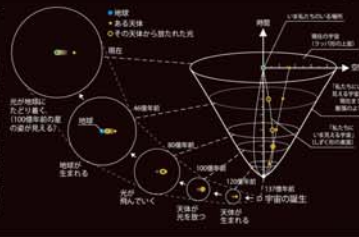
- 世代交代によってDNAが変化し、生物種が変わることが進化ならば、**一世代限りの時間発展を進化と呼ぶべきではない？**
 - 「嫌われ松子の一生」、「我が子の成長」であって「嫌われ松子の**進化**」、「我が子の**進化**」ではない
 - しかしながら、「宇宙の成長 (growth of the universe)」ではダサいので「宇宙の進化 (evolution of the universe)」と呼ぶ慣わしになっている
- さらに、**(物理法則が決まっていれば)「宇宙の進化」は必然的であり、偶然によるところの多い「生物の進化」とは意味が異なる**

宇宙図

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/>

宇宙図の見方

この宇宙図は、最新の研究や観測に基づいて作成されています。最新の研究成果は、人間からわかる宇宙の姿とは異なる場合があります。この宇宙図は、最新の研究成果に基づいて作成されています。最新の研究成果は、人間からわかる宇宙の姿とは異なる場合があります。この宇宙図は、最新の研究成果に基づいて作成されています。最新の研究成果は、人間からわかる宇宙の姿とは異なる場合があります。



宇宙を見ることは、昔をみること

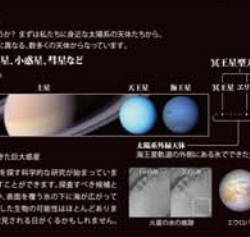
天文学は、昔から重要な学問であり、天の星の動きを観測し、その軌道を追跡してきました。現代では、宇宙望遠鏡や衛星観測によって、より詳細な観測が可能になりました。

宇宙図は「科学の魂」で見えてくる

宇宙図は、最新の研究成果に基づいて作成されています。最新の研究成果は、人間からわかる宇宙の姿とは異なる場合があります。この宇宙図は、最新の研究成果に基づいて作成されています。最新の研究成果は、人間からわかる宇宙の姿とは異なる場合があります。

太陽系天体に生命を求めて

地球以外の天体に生命が存在する可能性を探るために、太陽系内のさまざまな天体を調査しています。火星、木星の衛星イオ、土星の衛星エンセラドスなどが注目されています。



もうひとつの地球を探して

地球以外の天体に生命が存在する可能性を探るために、太陽系以外のさまざまな天体を調査しています。近隣の恒星系や、遠く離れた宇宙空間を探査しています。

宇宙はどのように生まれたのか？

現代の科学は、私たちの人間を生み出した宇宙の姿を、宇宙図の奥深くまで追いかけてきました。宇宙の始まりから現在までの歴史を、この宇宙図で詳しく解説します。

宇宙の中心は私なのか？

宇宙の中心は地球なのか、それとも太陽なのか、それとも宇宙の中心はどこにあるのか。現代の科学は、宇宙の中心を突き止めることができませんでした。宇宙の中心は、私たちに近いところにあるのかもしれません。

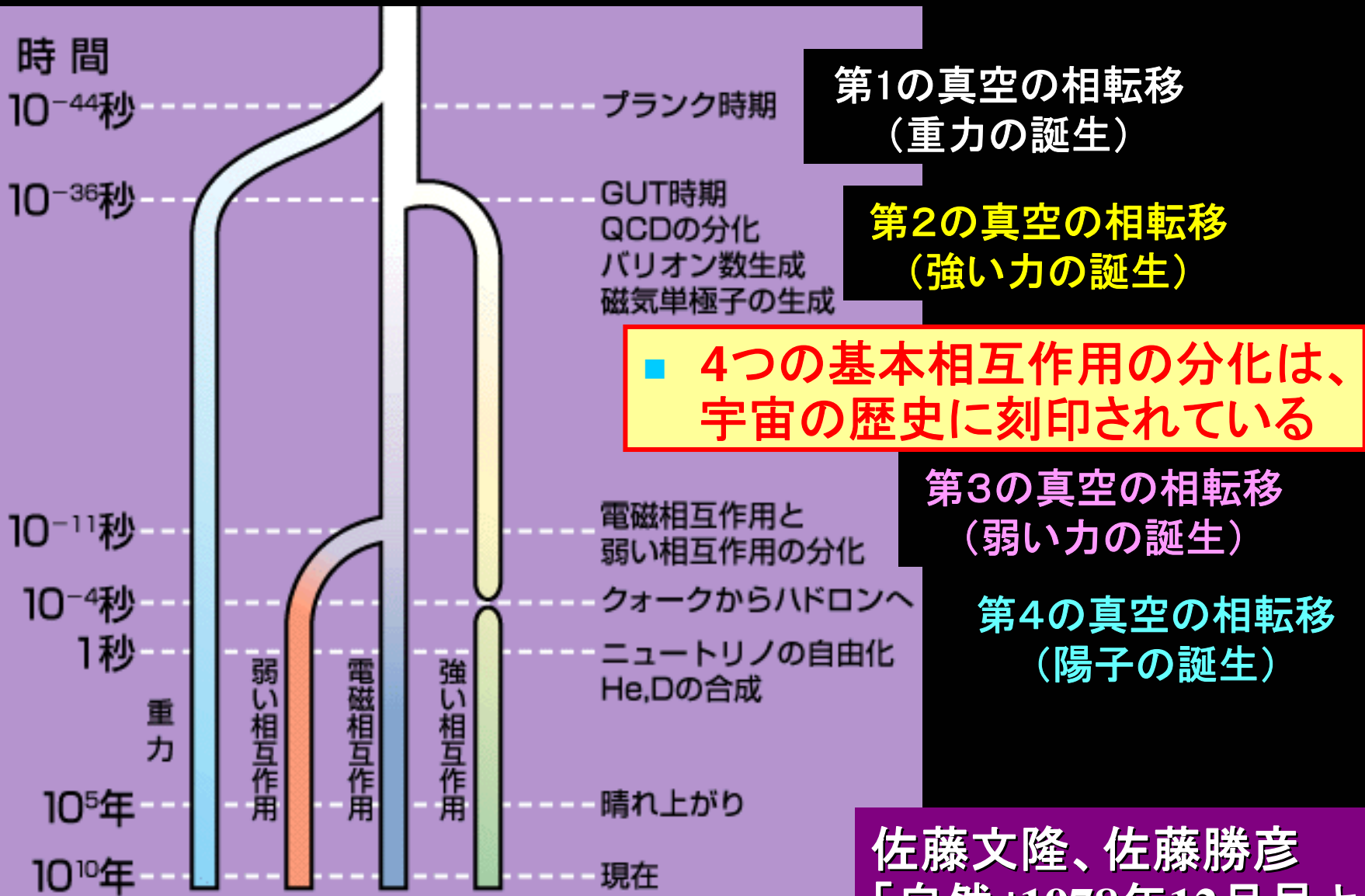
人間の材料はどこから来たのか？

私たちの体は、宇宙の材料からできています。現代の科学は、この材料がどこから来たのかを突き止めることができませんでした。人間の材料は、宇宙のどこかから来たのかもしれません。

宇宙の歴史のタイムライン。ビッグバンから現在までの主要な出来事と科学的発見を詳しく解説しています。

- ビッグバン**：宇宙の始まり。約138億年前に起こった。宇宙は高温高密度の状態から膨張し、冷却されていく。
- 最初の星が宇宙に灯る**：約100万年後、最初の星が誕生する。星の形成は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 原子が登場し、宇宙が晴れ上がる**：約38万年後、宇宙が透明になる。電子と原子が結合し、光子が自由に移動できるようになる。
- 超高温の火の玉宇宙**：宇宙の膨張に伴って、温度が低下していく。星の形成の準備が整っていく。
- すべてを生み出した3分間**：物質生成の出発点。宇宙の膨張に伴って、物質が生成されていく。
- 時間と空間の始まり**：宇宙の膨張に伴って、時間と空間が生まれていく。
- 宇宙の誕生にせまる**：宇宙の膨張に伴って、物質が生成されていく。
- 星の誕生と成長**：星の形成は、重力によってガスが集まることで起こる。星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 成熟し、宇宙に輝く星**：星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。星の成熟は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 星の誕生と成長**：星の形成は、重力によってガスが集まることで起こる。星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 元素は宇宙を流転する**：星の成長に伴って、元素が生成されていく。元素は宇宙を流転して、新しい星の形成に役立つ。
- 46億年前、太陽系および地球の形成**：太陽系は、雲の崩壊によって形成された。地球は、太陽系内の塵埃が集まることで形成された。
- 私たちの見える宇宙**：私たちの見える宇宙は、重力によってガスが集まることで形成された。私たちの見える宇宙は、重力によってガスが集まることで形成された。
- 宇宙に現れる網の目**：宇宙の膨張に伴って、網の目構造が形成されていく。網の目は、重力によってガスが集まることで形成された。
- 現在の宇宙の姿**：現在の宇宙の姿は、重力によってガスが集まることで形成された。現在の宇宙の姿は、重力によってガスが集まることで形成された。
- さまざまな元素から、生命が生まれた**：生命の誕生は、さまざまな元素が集まることで起こる。生命の誕生は、さまざまな元素が集まることで起こる。
- 生命を生み出すステージが整う**：生命の誕生は、さまざまな元素が集まることで起こる。生命の誕生は、さまざまな元素が集まることで起こる。
- 元素をばらまく、星の大爆発**：星の大爆発は、元素をばらまくことで起こる。星の大爆発は、元素をばらまくことで起こる。
- 生を終え、宇宙に溶ける星**：星の寿命は、重力によってガスが集まることで起こる。星の寿命は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 年を越した星は、元素の工場**：星の寿命は、重力によってガスが集まることで起こる。星の寿命は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 成熟し、宇宙に輝く星**：星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 星の誕生と成長**：星の形成は、重力によってガスが集まることで起こる。星の成長は、重力によってガスが集まることで起こる。
- 元素は宇宙を流転する**：星の成長に伴って、元素が生成されていく。元素は宇宙を流転して、新しい星の形成に役立つ。

自然界の4つの相互作用と宇宙の歴史



佐藤文隆、佐藤勝彦
「自然」1978年12月号より

宇宙・物質史 (主に物理法則から予想・推定)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	137億年前	宇宙の誕生
10^{-43} 秒 ~ 10^{-30} 秒	137億年前	宇宙の指数関数的膨張(インフレーション)と、それ にともなう宇宙の熱化(ビッグバン宇宙)
10^{-6} 秒	137億年前	陽子と反陽子の対消滅
1秒	137億年前	電子と陽電子の対消滅
3分	137億年前	ヘリウムの合成(ビッグバン軽元素合成)
38万年	137億年前	宇宙の中性化(陽子と電子が結合して荷電中性の 水素原子になる)
~4億年?	~133億年前?	最初の星の誕生、それ以降現在まで星の中心で 炭素、酸素、、、鉄などの重元素が合成され、星の 最期に星間空間にばら撒かれる(元素循環)
8億年	129億年前	現在知られている最古の銀河、 中性化した宇宙が再び電離
71億年	66億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇 宙膨張が減速から加速に転ずる

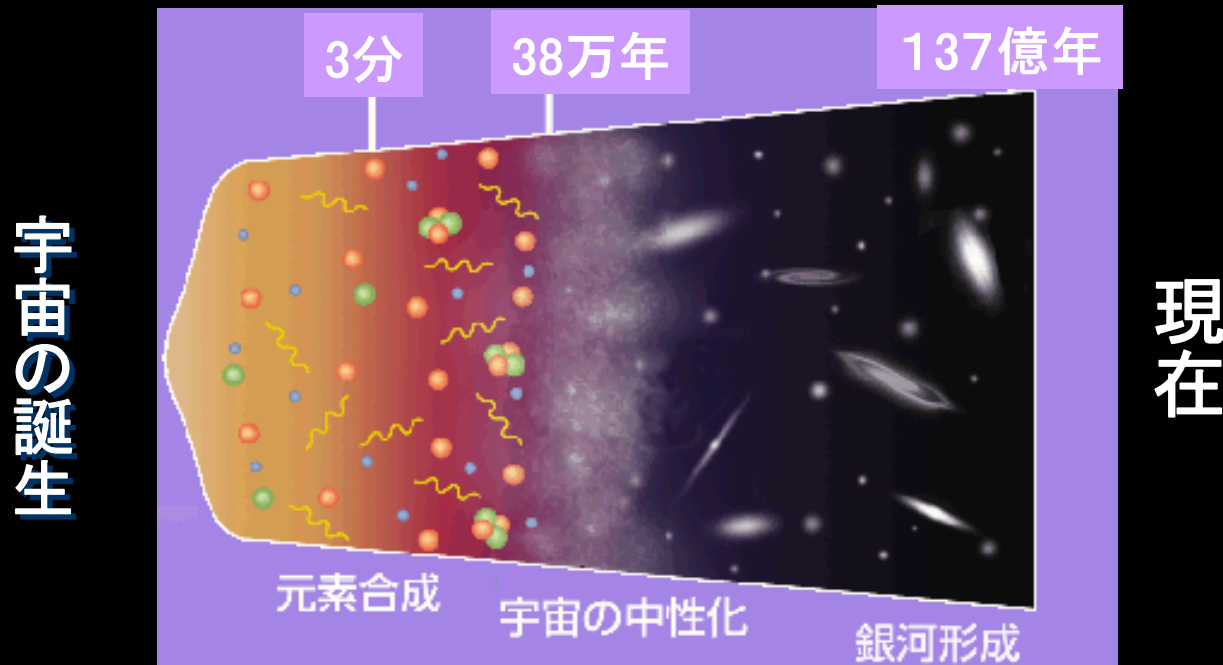
地球・生命史 (主に地質学的証拠から推定)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
81億年	46億年前	地球および月の誕生
95億年	42億年前	海の形成
97億年	40億年前	原始生命(プロゲノート)の誕生
99億年	38億年前	最古の光合成の痕跡(イスア表成岩帯)?
114億年?	23億年前?	全球凍結
116億年	21億年前	大気中酸素の急激な増加
121億年	6億年前	カンブリア紀大爆発(生物種の爆発的多様化)
135億年	2.5億年前	生物大量絶滅(P/T境界事件:ペルム紀—三畳紀)
135億年	2.3億年前	恐竜の出現
136億年	6500万年前	恐竜絶滅(K/T境界事件:白亜紀—第三紀)
137億年	20万年前	新人型ホモサピエンスの出現

宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-(2008)より

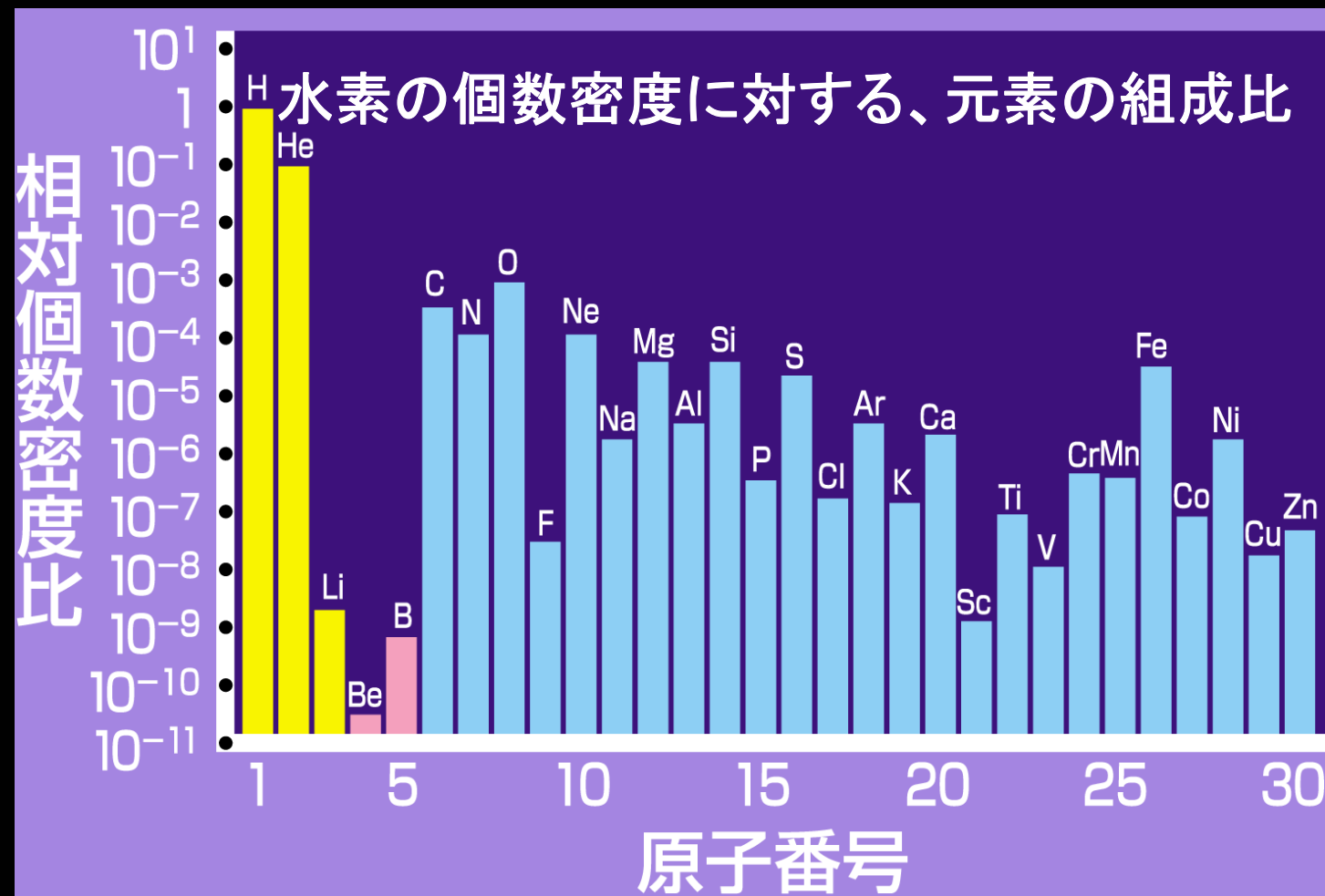
宇宙膨張と物質世界の進化

- 宇宙膨張によって密度と温度が下がる
 - 光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へ
- $t \doteq 3$ 分: 軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年: 電離した宇宙が中性化 (陽子+電子 から 水素原子)
- $t \doteq 4$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \doteq 10$ 億年 ~ 137億年: 星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成



宇宙における元素の存在量

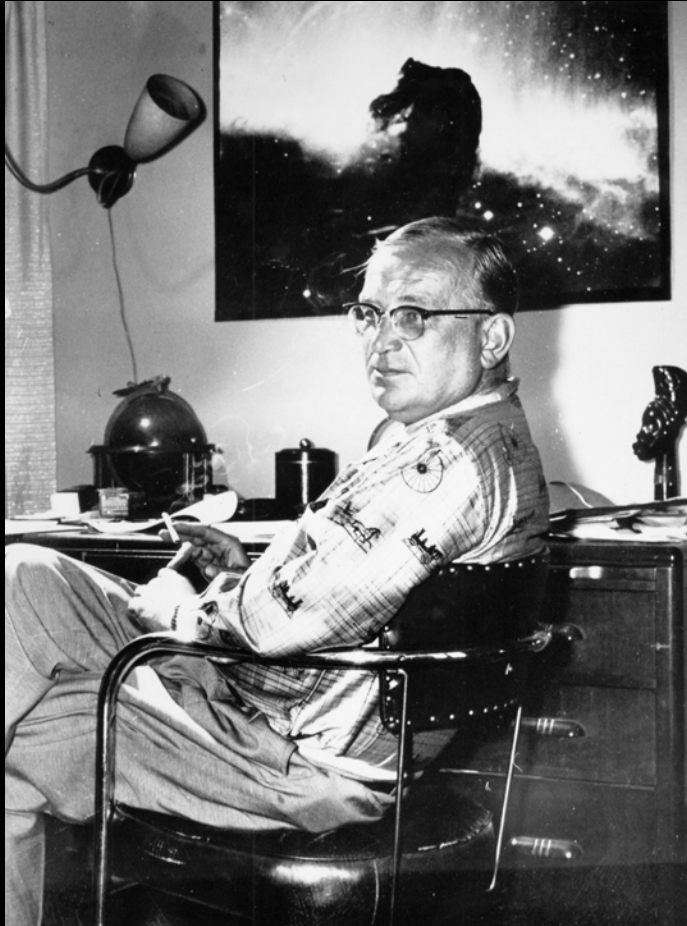
- 宇宙には大量のヘリウムが存在(実は自明ではない)



ヘリウムが全元素に占める割合は個数にして10%、質量にして25%

起源は
宇宙初期？
それとも
星の内部？

ジョージ・ガモフ



- ビッグバン理論の提唱者
- その帰結として、宇宙マイクロ波背景輻射の存在を予言
- 原子核物理、宇宙論、分子生物学等の多岐の分野にわたり、極めて独創的なアイデアを発表するとともに、優れた啓蒙書を著した

元素の起源： α β γ 理論(1948)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_0 dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm³.

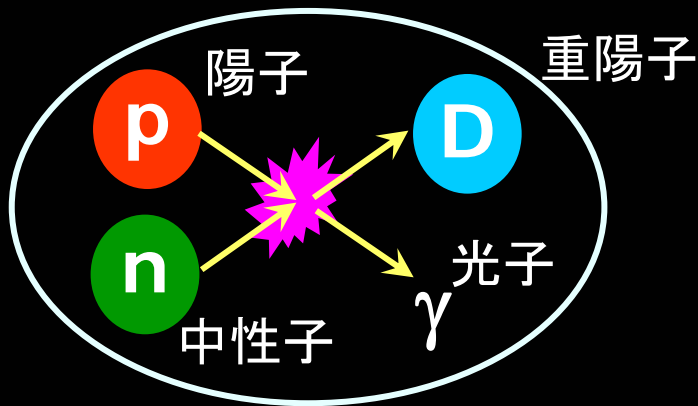
On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \cong 10^6/t^3$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

アルファー、(ベータ)、ガモフの共著論文 1948年4月1日発表

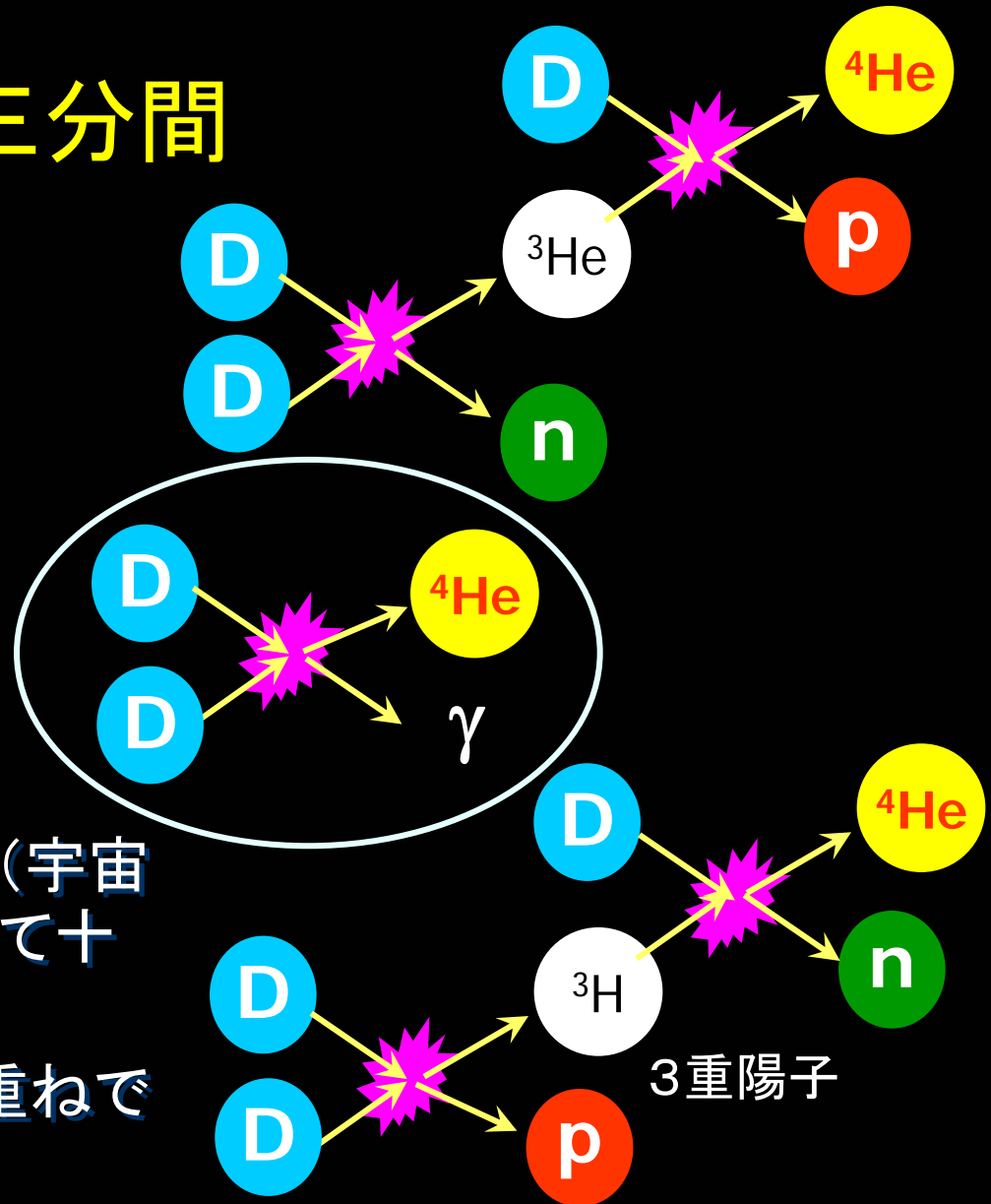
ビッグバン元素合成反応

■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

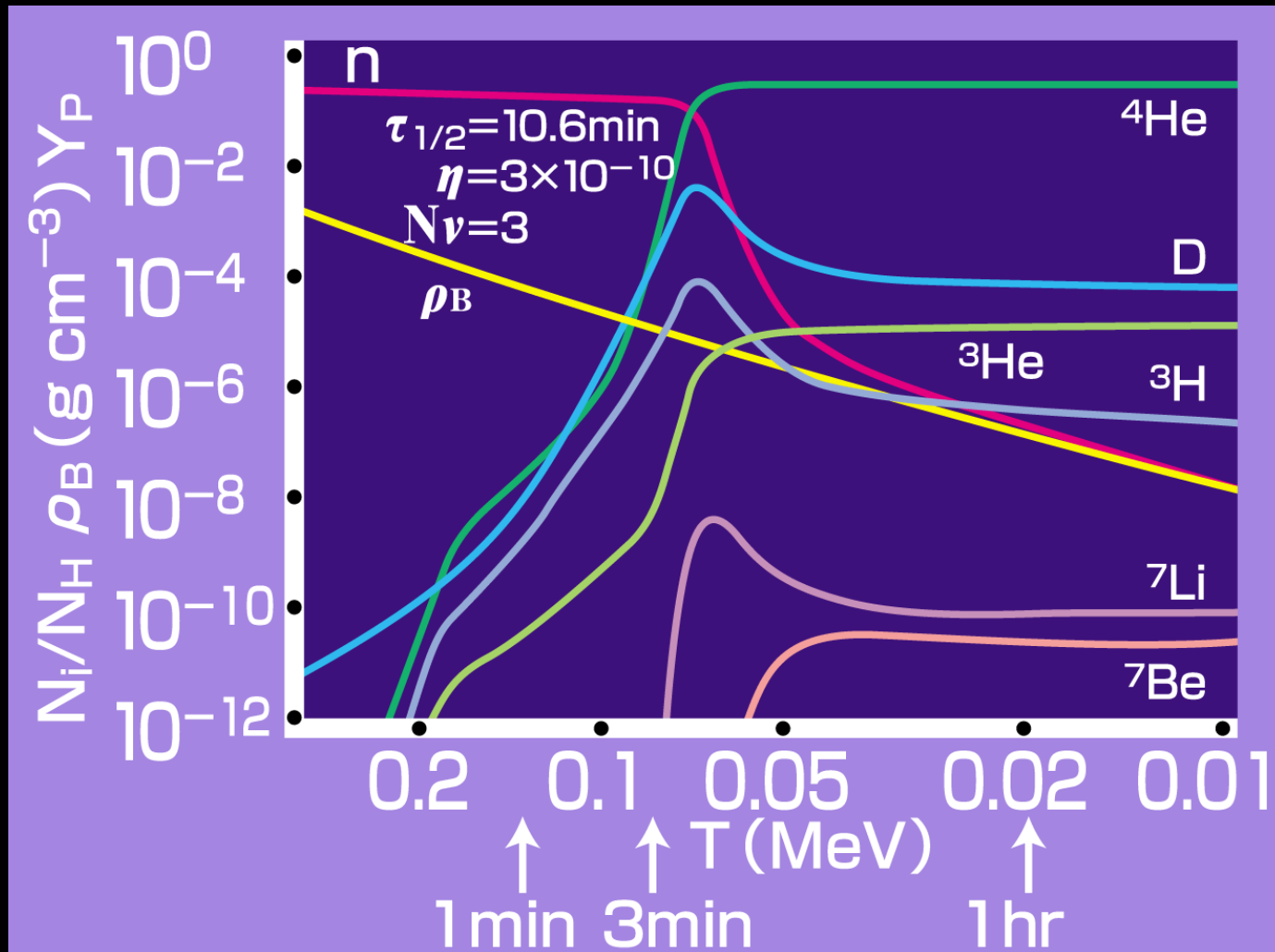


- 重陽子は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下(宇宙誕生後約3分後)となって初めて十分な重陽子が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



初期宇宙の軽元素量進化

- ヘリウムの質量存在比 25%が自然に説明される



ヘリウムより重い元素の合成は難しい

p	1	2										
n	H	He	3	4								
0	¹ H	² He	Li	Be	5	6						
1	² D	³ He	⁴ Li	⁵He	B	C	7					
2	³ T	⁴ He	⁵Li	⁶ Be	⁷B	⁸C	N	8				
3	⁴ H	⁵He	⁶ Li	⁷ Be	⁸B	⁹ C	¹⁰ N	9	10			
4	⁵H	⁶ He	⁷ Li	⁸Be	⁹ B	¹⁰ C	¹¹ N	¹² O	F	Ne		
5	⁶ H	⁷ He	⁸Li	⁹ Be	¹⁰ B	¹¹ C	¹² N	¹³ O	¹⁴ F	¹⁵ Ne	11	
6	⁷ H	⁸He	⁹ Li	¹⁰ Be	¹¹ B	¹² C	¹³ N	¹⁴ O	¹⁵ F	¹⁶ Ne	Na	
	7	⁹ He	¹⁰ Li	¹¹ Be	¹² B	¹³ C	¹⁴ N	¹⁵ O	¹⁶ F	¹⁷ Ne	¹⁸ Na	
	8	¹⁰ He	¹¹ Li	¹² Be	¹³ B	¹⁴ C	¹⁵ N	¹⁶ O	¹⁷ F	¹⁸ Ne	¹⁹ Na	

■ 質量数5と8の安定元素がない！

■ He+p, He+n, He+Heなどの反応は起こらない

不安定
半減期 10~ 100日
天然 放射性
安定

ヒトを構成する元素

■ ヒト

- 酸素 63%
- 炭素 20%
- 水素 9%
- 窒素 5%
- カルシウム 1%
- その他 2%

■ 地殻

- 酸素 47%
- ケイ素 28%
- アルミニウム 8%
- 鉄 5%
- カルシウム 4%
- ナトリウム 3%
- カリウム 3%
- その他 2%

- ヒトは少数の元素からなる
- 炭素の割合が異常に多い
- 炭素の多様な結合性が生命にとって重要
- 実は炭素の形成は難しい(自然界の偶然?)

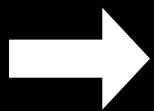
星での元素合成とビッグバン元素合成

■ 星の内部での元素合成

- トリプルアルファ反応と呼ばれる過程を通じて、ヘリウム以上の重元素(炭素、窒素、酸素など)を合成することが可能
- ヘリウムと重元素がほぼ同じ量だけつくられる(質量比にして、水素75%、ヘリウム13%、それ以上の重元素12%)

■ ビッグバン元素合成

- ヘリウム以上の重元素は合成されず、元素合成開始直前に存在した中性子がほとんどすべてヘリウムになる
- 宇宙誕生1分後の陽子と中性子の個数密度比($n_p:n_n$)はおよそ7:1(弱い相互作用の理論からの予言: 林忠四郎 1952)

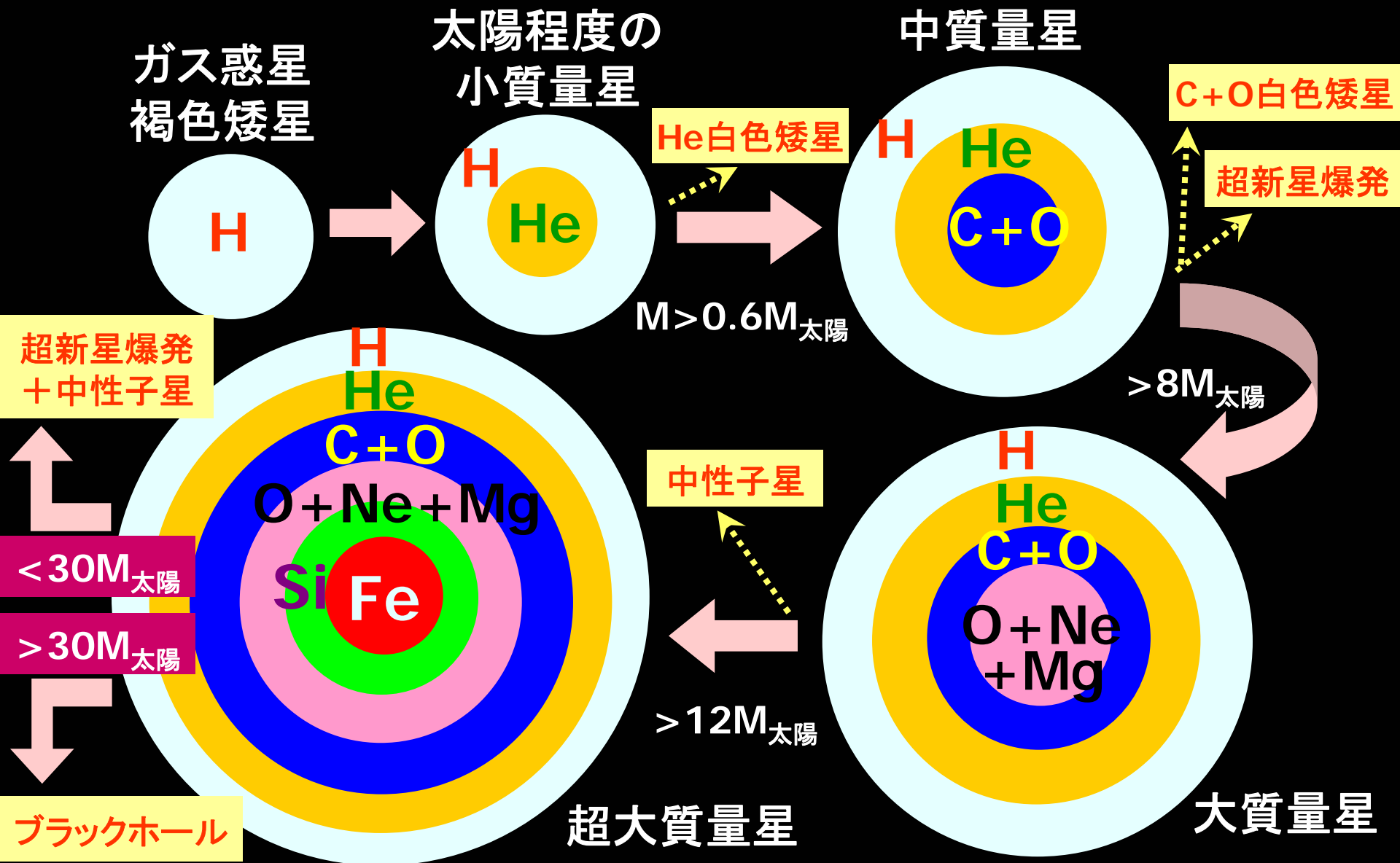


$$\frac{m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_{\text{H}} n_{\text{H}} + m_{\text{He}} n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n / 2)}{(n_p - n_n) + 4(n_n / 2)} \approx \frac{1}{4} (!)$$

2つの元素合成理論の比較

	ビッグバン元素合成	星元素合成
場所	初期宇宙	星の内部
時間スケール	分	億年
温度	10億度 時間とともに 急速に下がる	1000万度 時間とともに ゆっくりと上昇
物質密度	0.00001 g/cc	100 g/cc
光子バリオン比	10^9	1以下
生成元素	軽元素 (ヘリウム、重水素、 リチウム)	重元素 (炭素、窒素、酸素、 など)

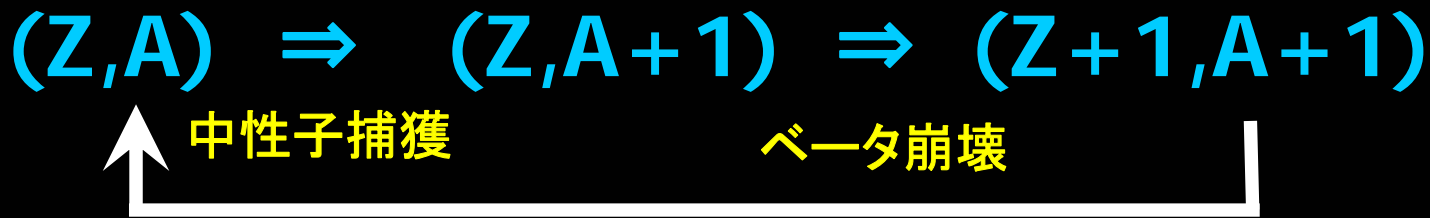
星の内部のたまねぎ構造



鉄より重い元素の起源

■ s過程 (slow process)

- 星の内部でのゆっくりとした中性子捕獲の繰り返しでより重い元素を合成
- 陽子 Z 個、中性子 $(A-Z)$ 個からなる原子核、すなわち、原子番号 Z 、質量数 A の原子核を (Z,A) と記す



■ r過程 (rapid process)

- 超新星爆発の際に中性子を捕獲した原子核が、ベータ崩壊する前に次々と中性子を捕獲することで中性子過剰核を経て合成

惑星状星雲

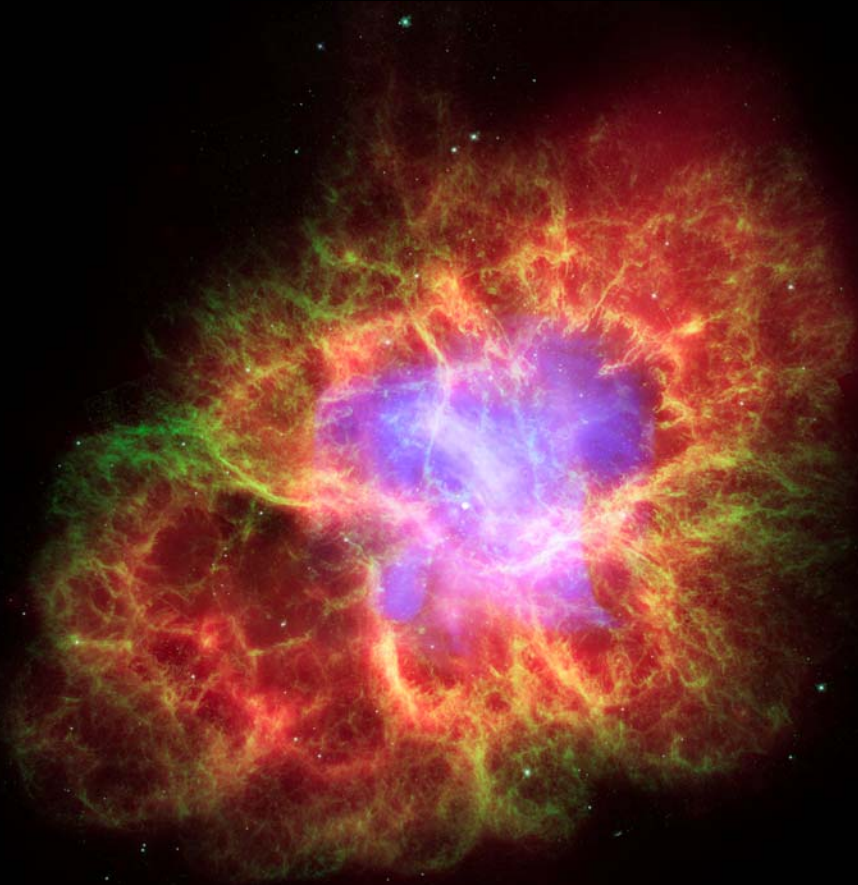
- 赤色巨星の最期に放出されたガスが中心の白色矮星からの紫外線をうけて輝く



Helix Nebula
HST画像

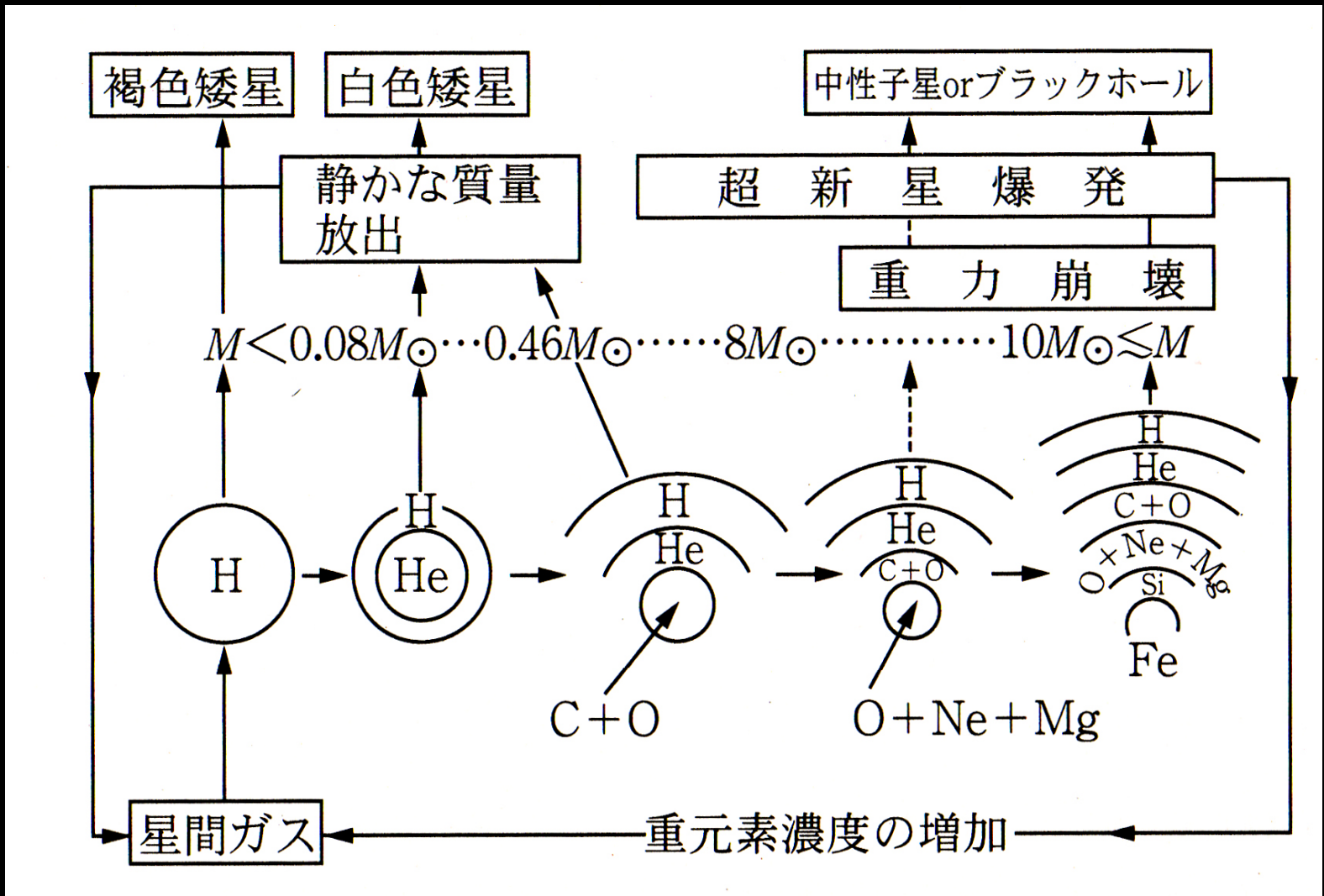
超新星爆発

- 太陽の8倍以上の質量の星の終末

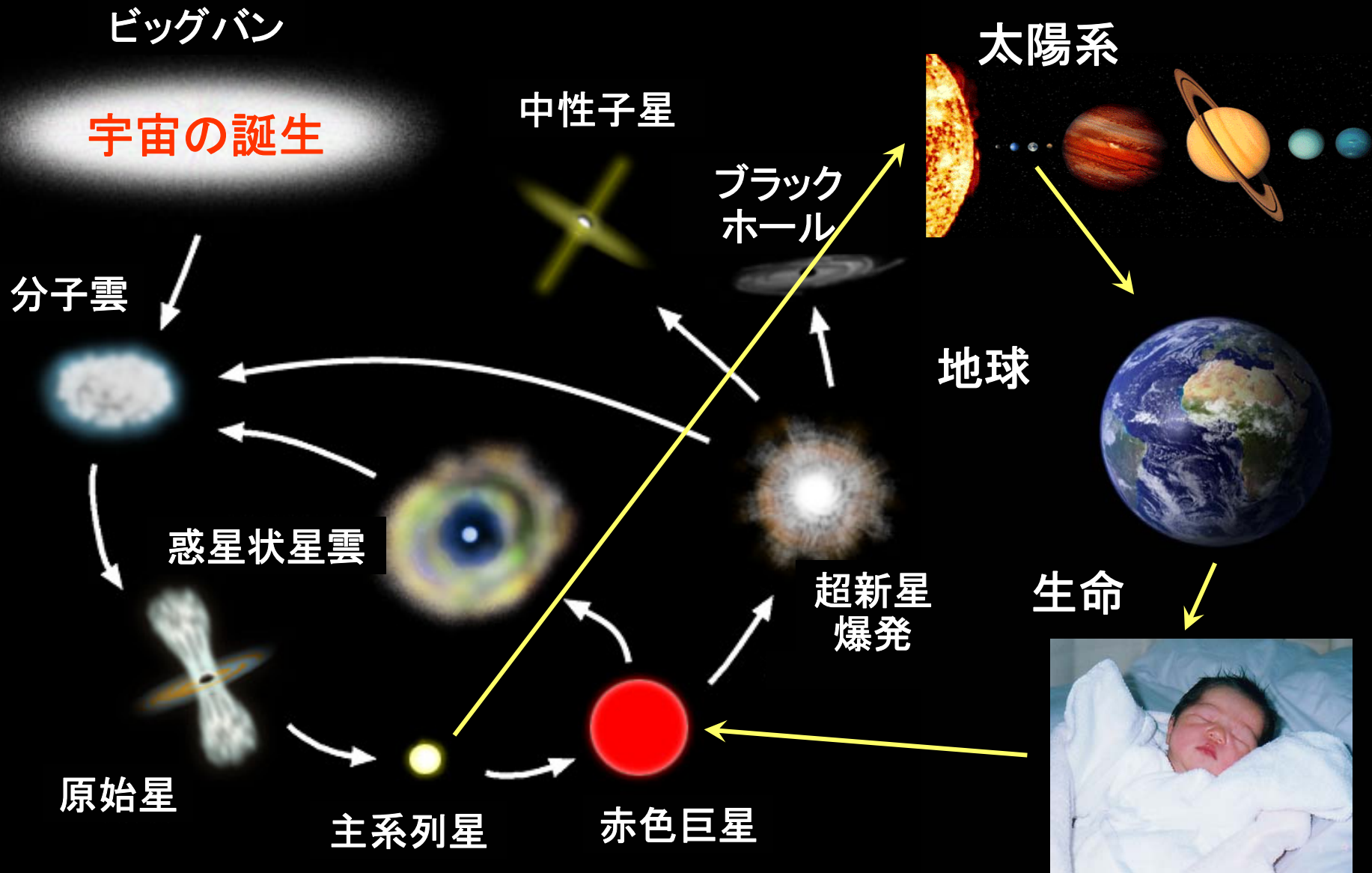


かに星雲
1054年に起
こった超新星
爆発の残骸
X線 Chandra
可視光 HST
赤外 Spitzer
の合成画像

星の進化＝元素合成＋元素の循環



宇宙・天体・物質・生命の共進化



我々は星の子供：宇宙の元素循環

- ビッグバン後、最初の3分間で合成された軽元素から、数億年後に**第一世代の星**が誕生
- **星の内部で重元素が合成**され、それが星の進化の最終段階で宇宙にばらまかれる
- それを材料として**次の世代の天体**が誕生
- この過程の繰り返しが宇宙での元素循環
- **我々は、かつて宇宙のどこかで生まれた星の内部で合成された重元素、さらには宇宙最初の3分間で合成されたヘリウムを材料としている！**