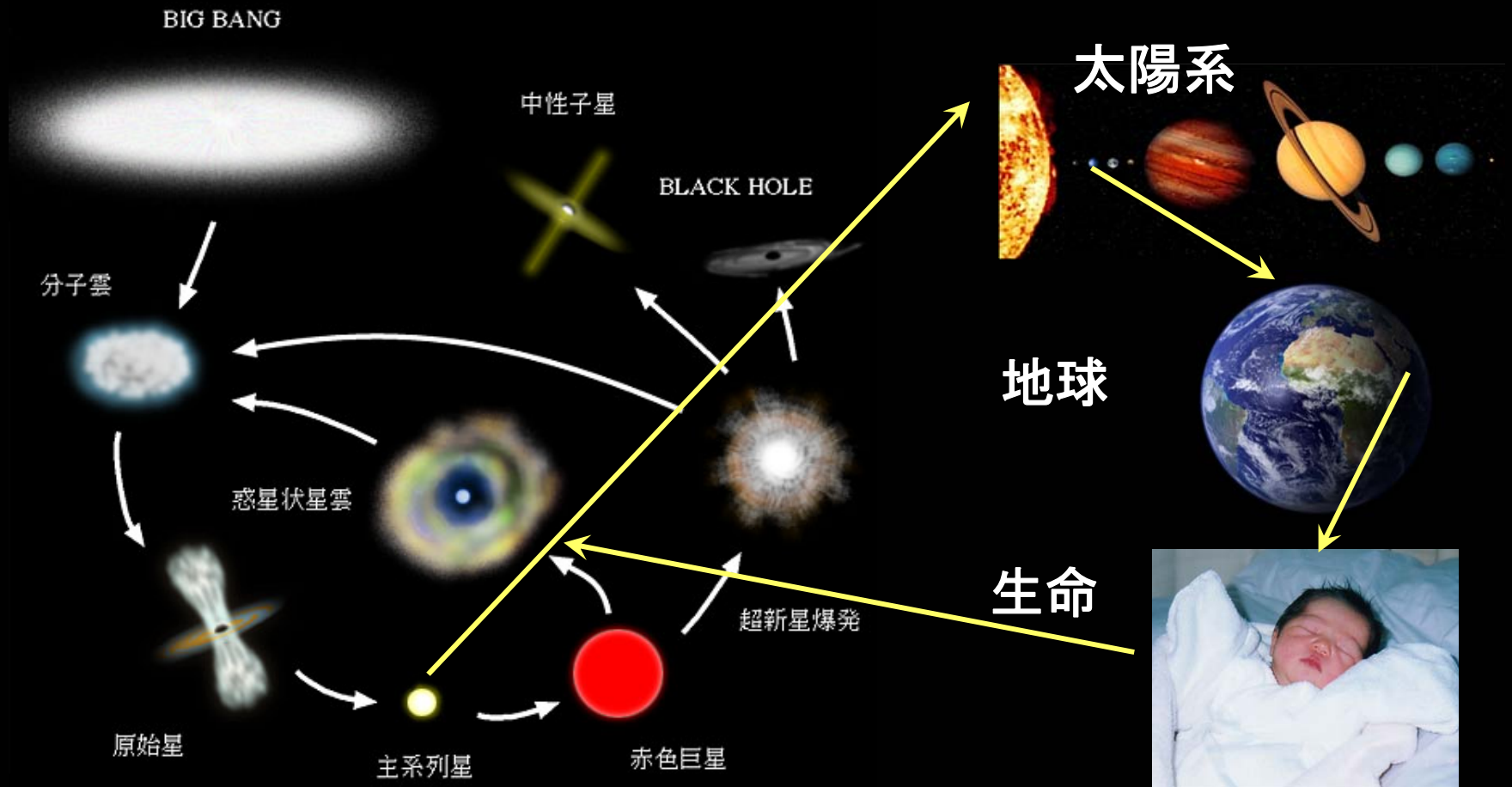


元素の起源と宇宙の歴史



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2006年11月11日 物理学会公開講座@東工大

森羅万象の起源

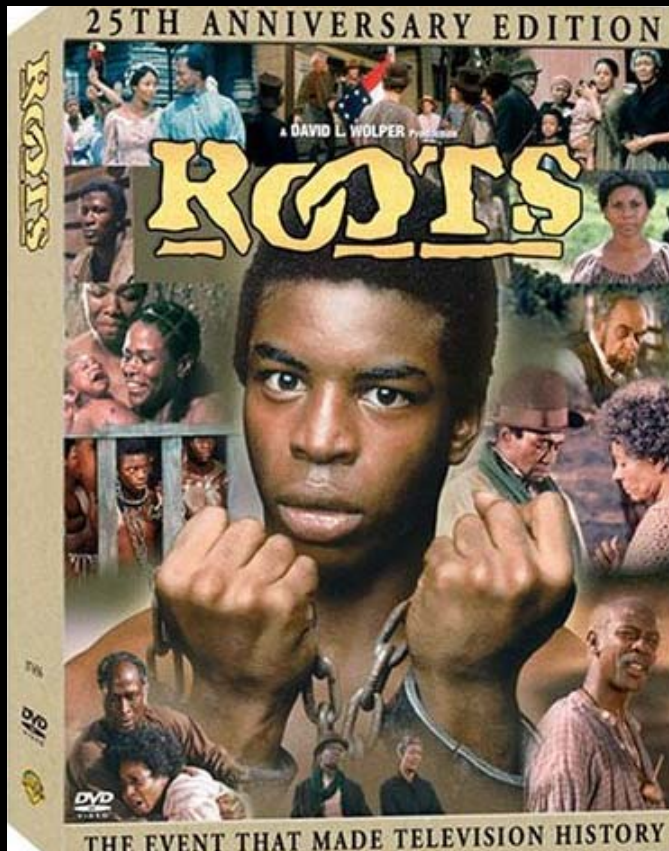
■ 起源の探究はすべての学問の原動力

- 日本語の起源： 言語学
- 日本人の起源： 文化人類学
- 生物の起源： 分子生物学
- 人類の起源： 人類学
- 地球の起源： 惑星地球科学
- 物質の起源： 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

Roots (ルーツ)

- アレックス・ヘイリーが、18世紀のクンタ・キンテから20世紀の自分のルーツを探る
- 1977年にTV放映され、爆発的な人気を呼ぶ



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
 - 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**

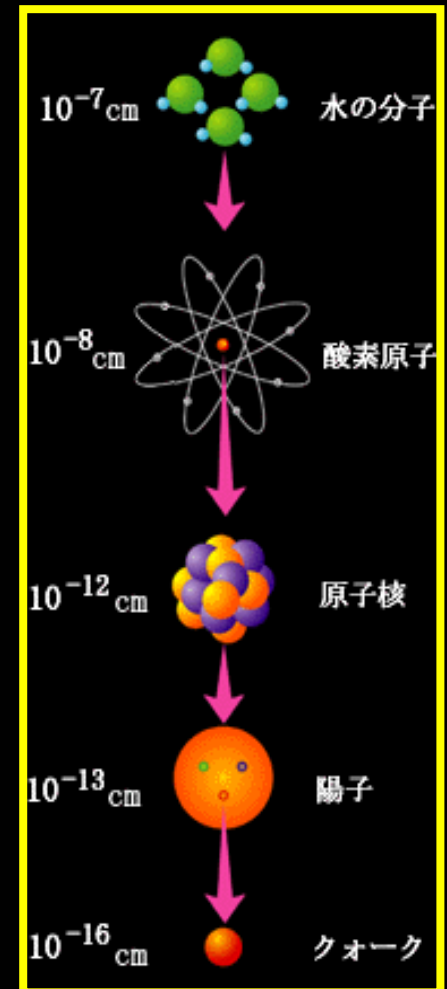
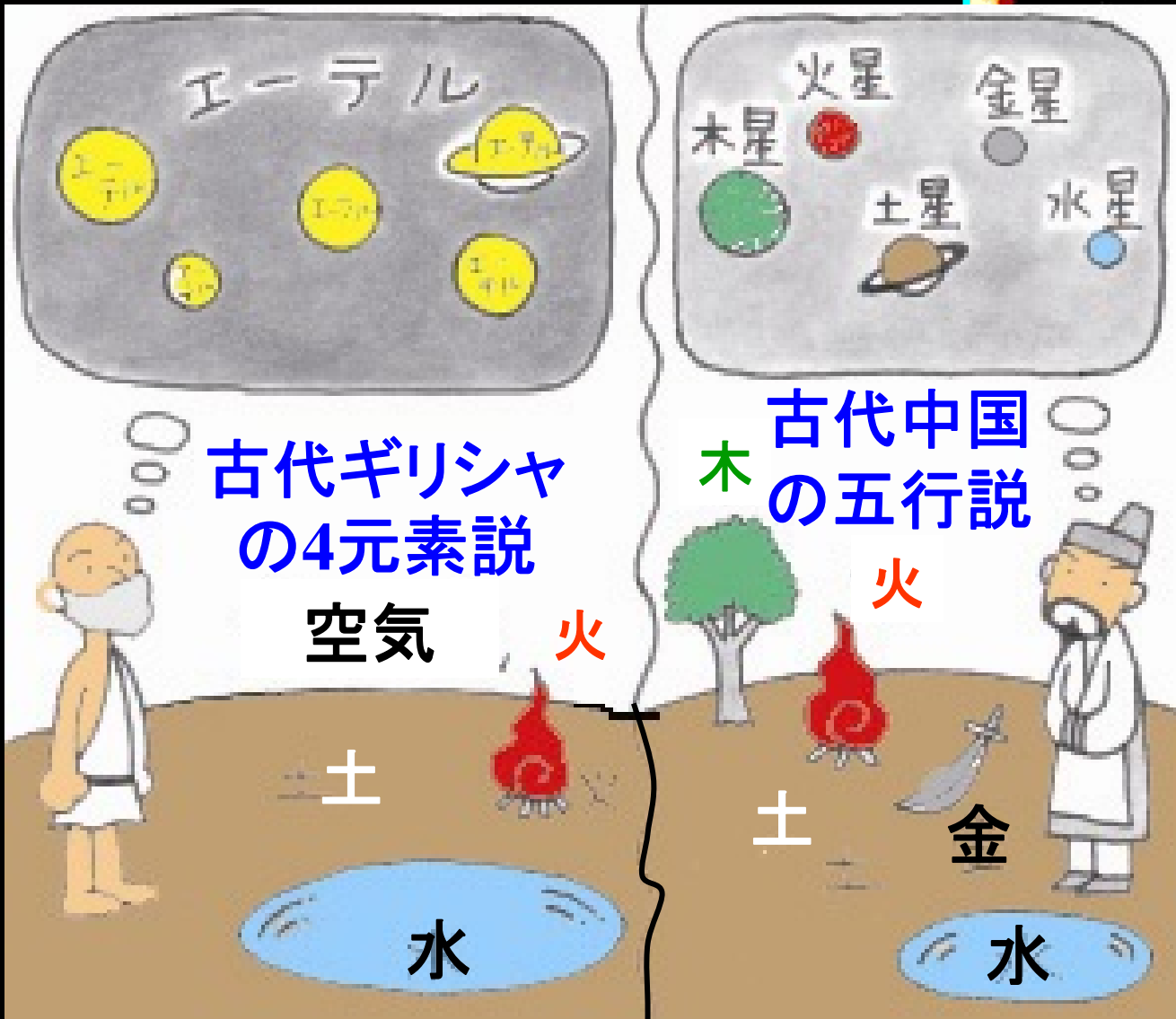
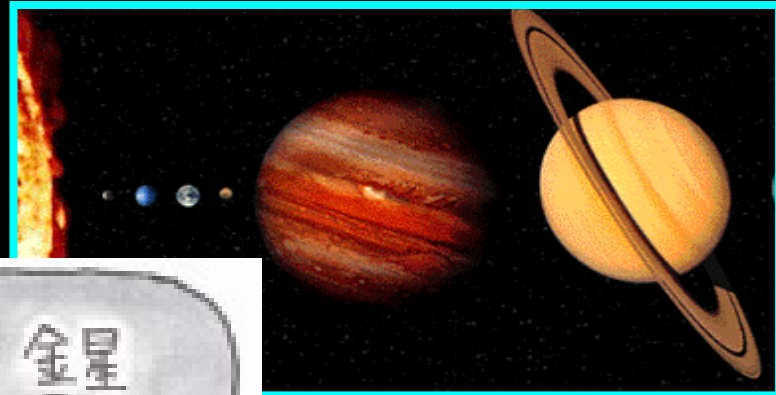
旧約聖書 創世記 天地創造

- 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。」 (*let there be light*)
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

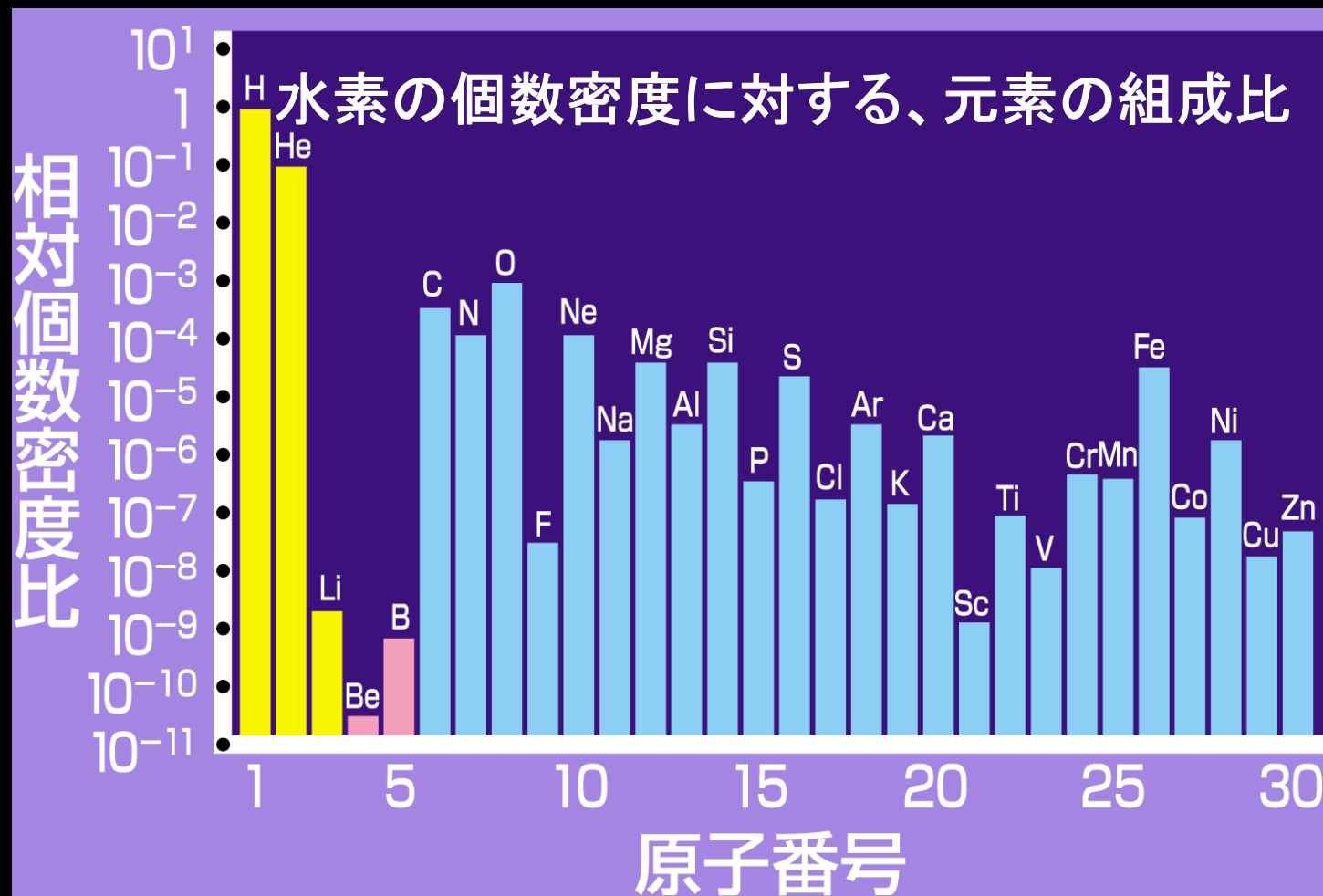


物質の起源



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



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 abundances¹ 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.

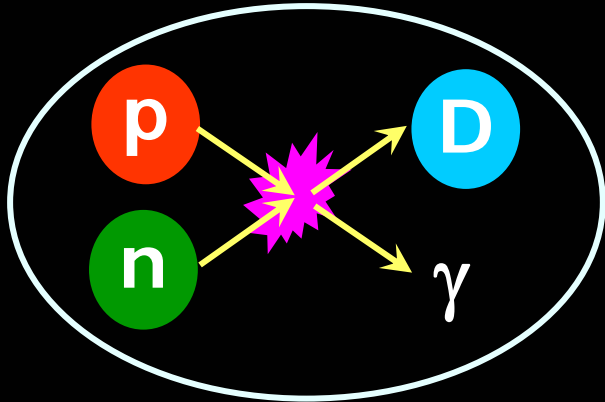
On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \propto 1/t^2$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

アルファー、(ベーテ)、ガモフの共著論文 1948年4月1日発表

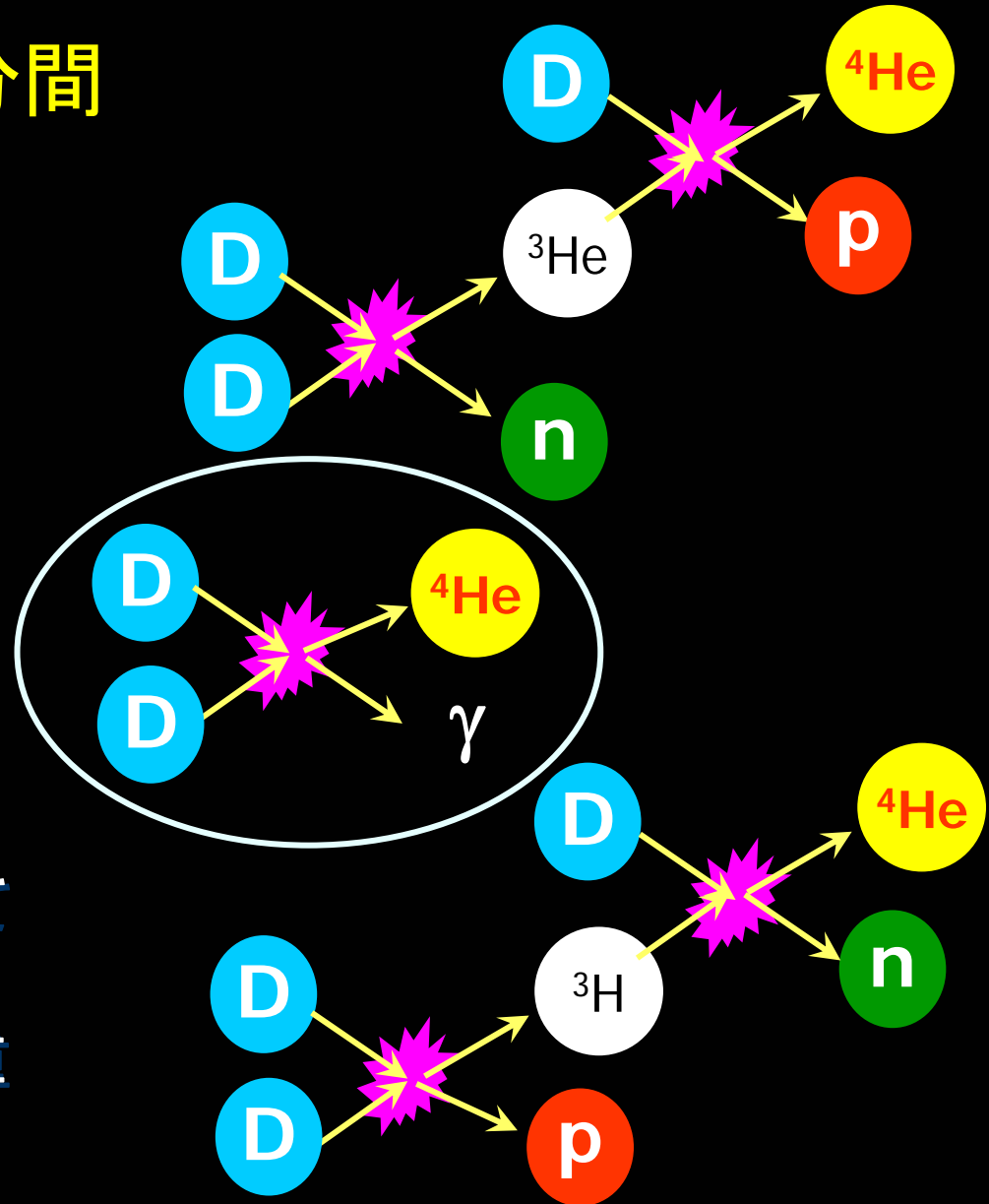
ビッグバン元素合成反応

■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

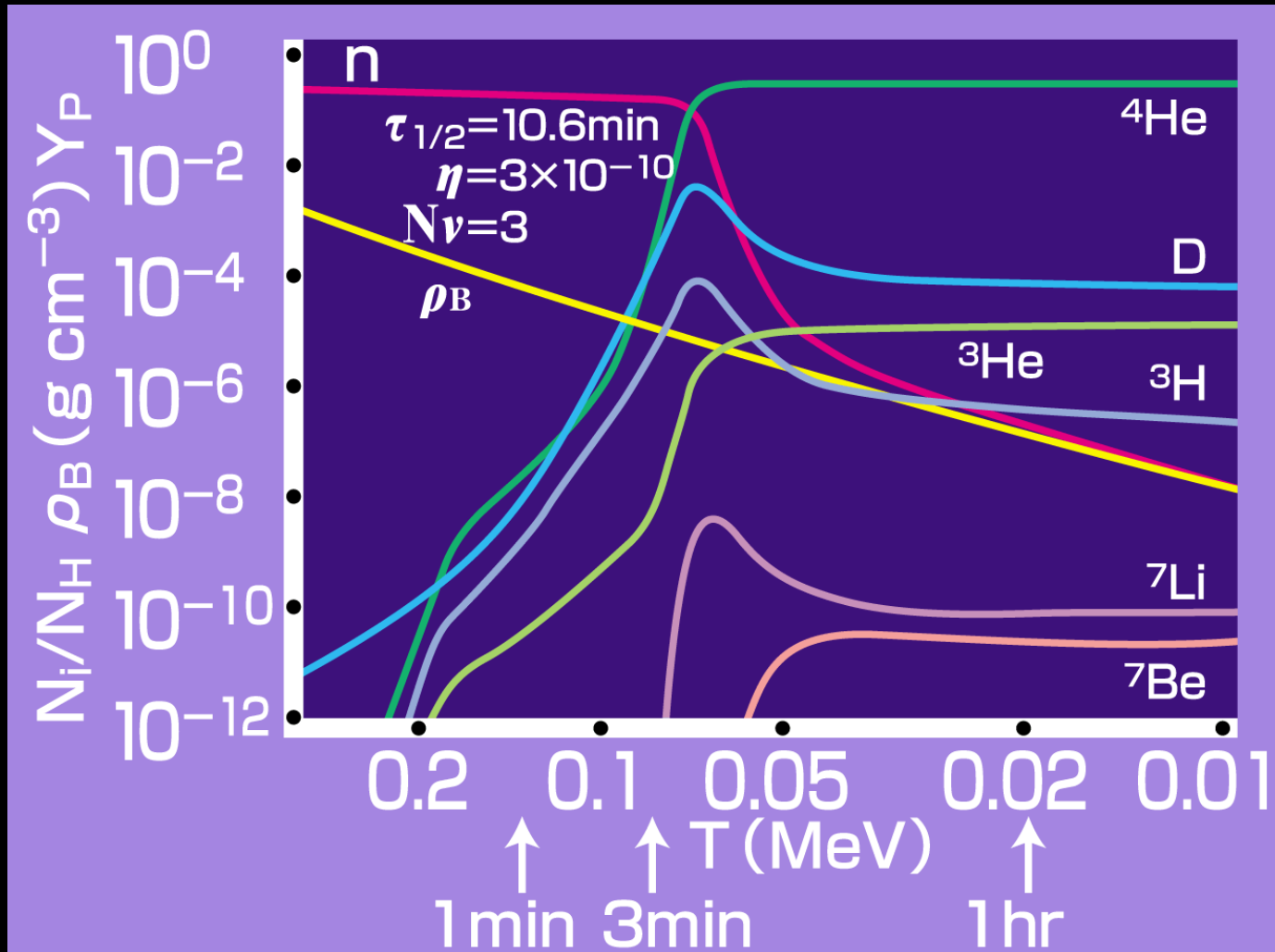


- 重水素は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下 (宇宙誕生後約3分後) となって初めて十分な重水素が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



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%

「新しい高校生物の教科書」(2006)より

- 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

炭素の起源：トリプルアルファ反応

■ 炭素の多様な結合性が生物の存在の基盤

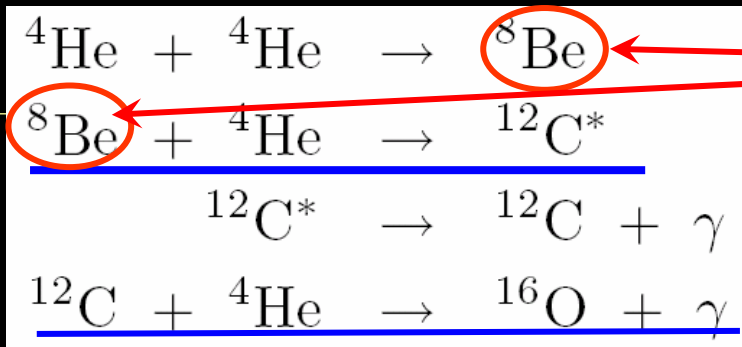
- Hoyle(1952)は、星のなかで炭素が合成されることを要請して、 ^{12}C の共鳴状態の存在を予言。その後実験的に確認された。この反応の準位はまさに絶妙で奇跡的な値に微調整されている！（人間原理のはしり）

■ $^8\text{Be}-^4\text{He}$ 系の準位： $^{12}\text{C}^*$ を介して ^{12}C を生成

- $7.3667\text{MeV} \leq ^{12}\text{C}^*$ の準位： 7.6549MeV

■ $^{12}\text{C}-^4\text{He}$ 系の準位：すべてが ^{16}O になることはない

- $7.1616\text{MeV} \geq ^{16}\text{O}$ の準位： 7.1187MeV



不安定
(半減期 2×10^{-16} 秒)

1	1	1.008	水素
3	Li	6.941	リチウム
4	Be	9.012	ベリリウム

5	B	10.81	ホウ素
6	C	12.01	炭素
7	N	14.01	窒素
8	O	16.00	酸素
9	F	19.00	フッ素
10	Ne	20.18	ネオン

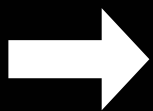
星での元素合成とビッグバン元素合成

■ 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)

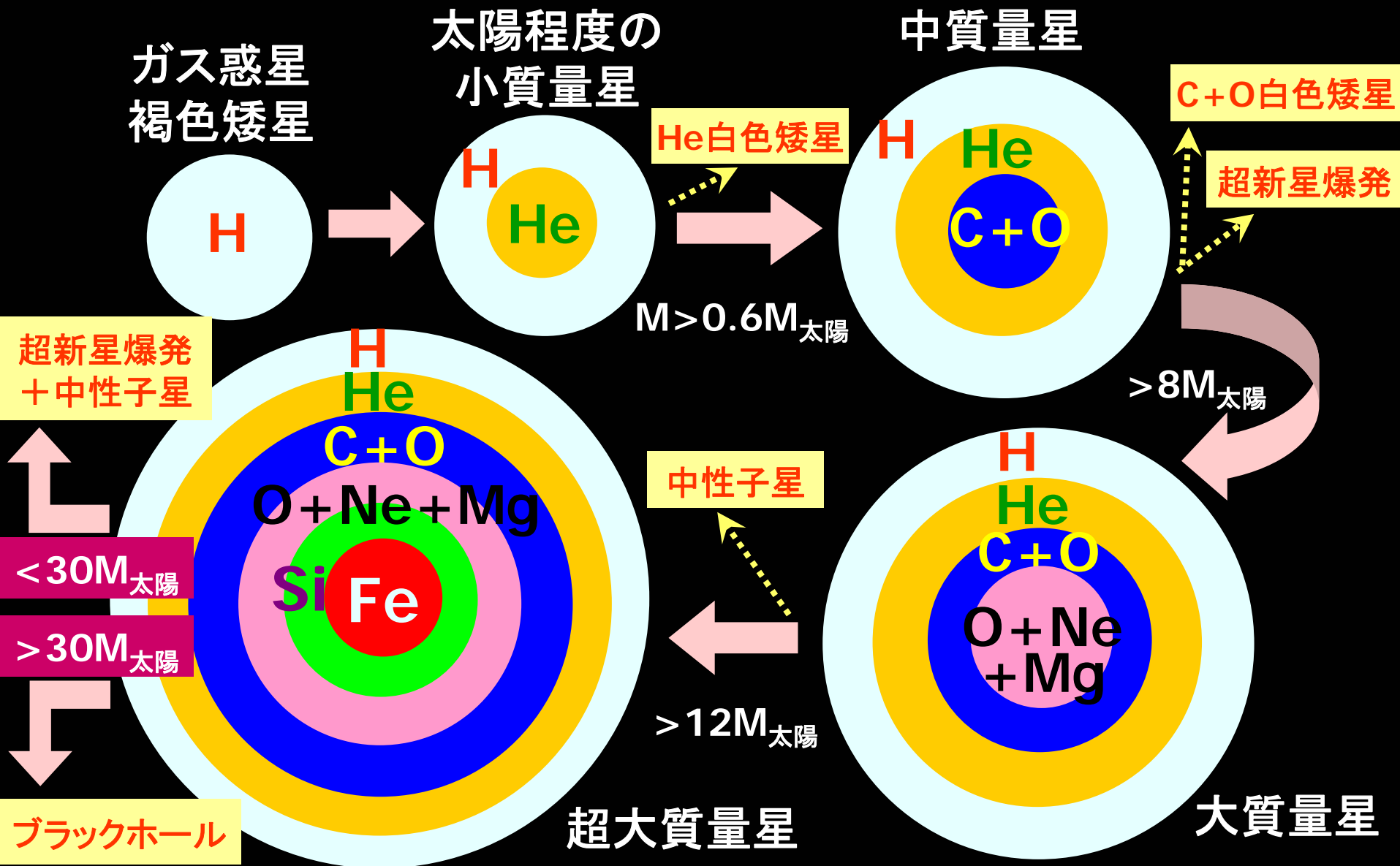


$$\frac{m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_{\text{H}} n_{\text{H}} + m_{\text{He}} n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n / 2)}{(n_p - n_n) + 4(n_n / 2)} \approx \frac{1}{4} (!)$$

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
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

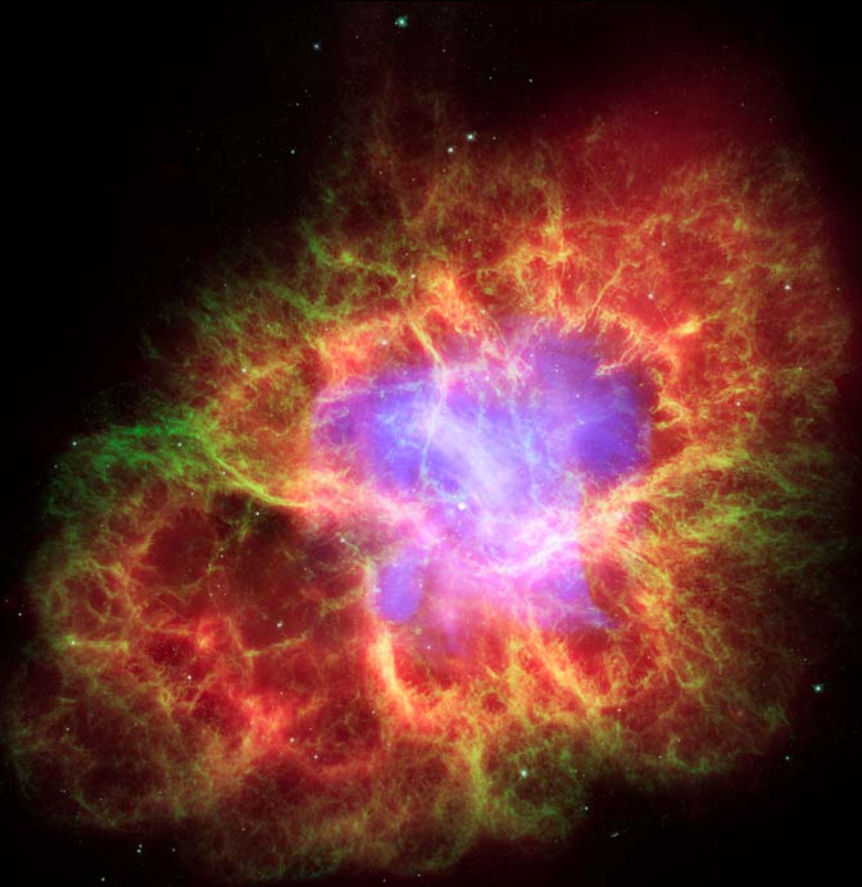
- 赤色巨星の最期に放出されたガスが中心の白色矮星からの紫外線をうけて輝く



Helix Nebula
HST画像

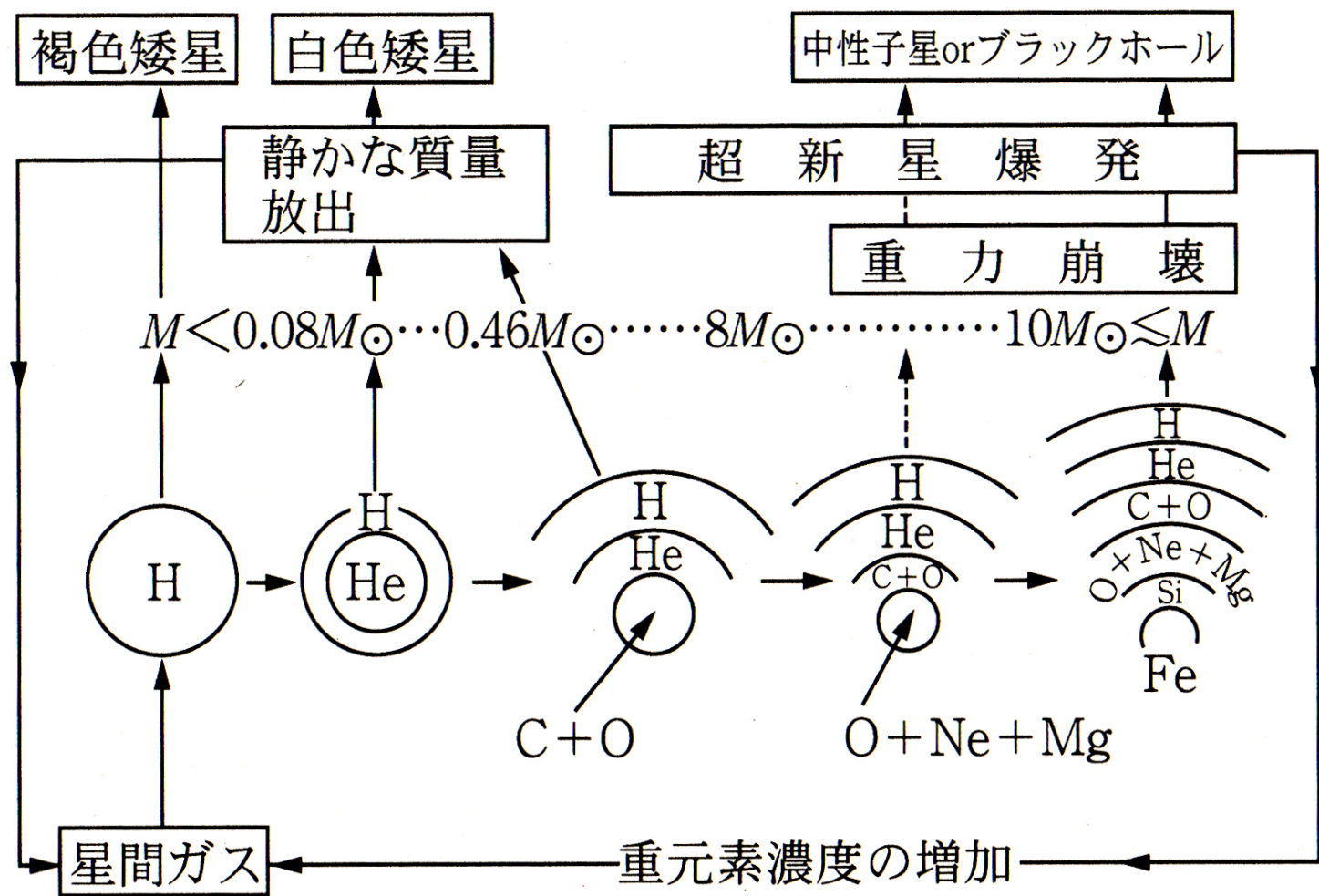
超新星爆発

- 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



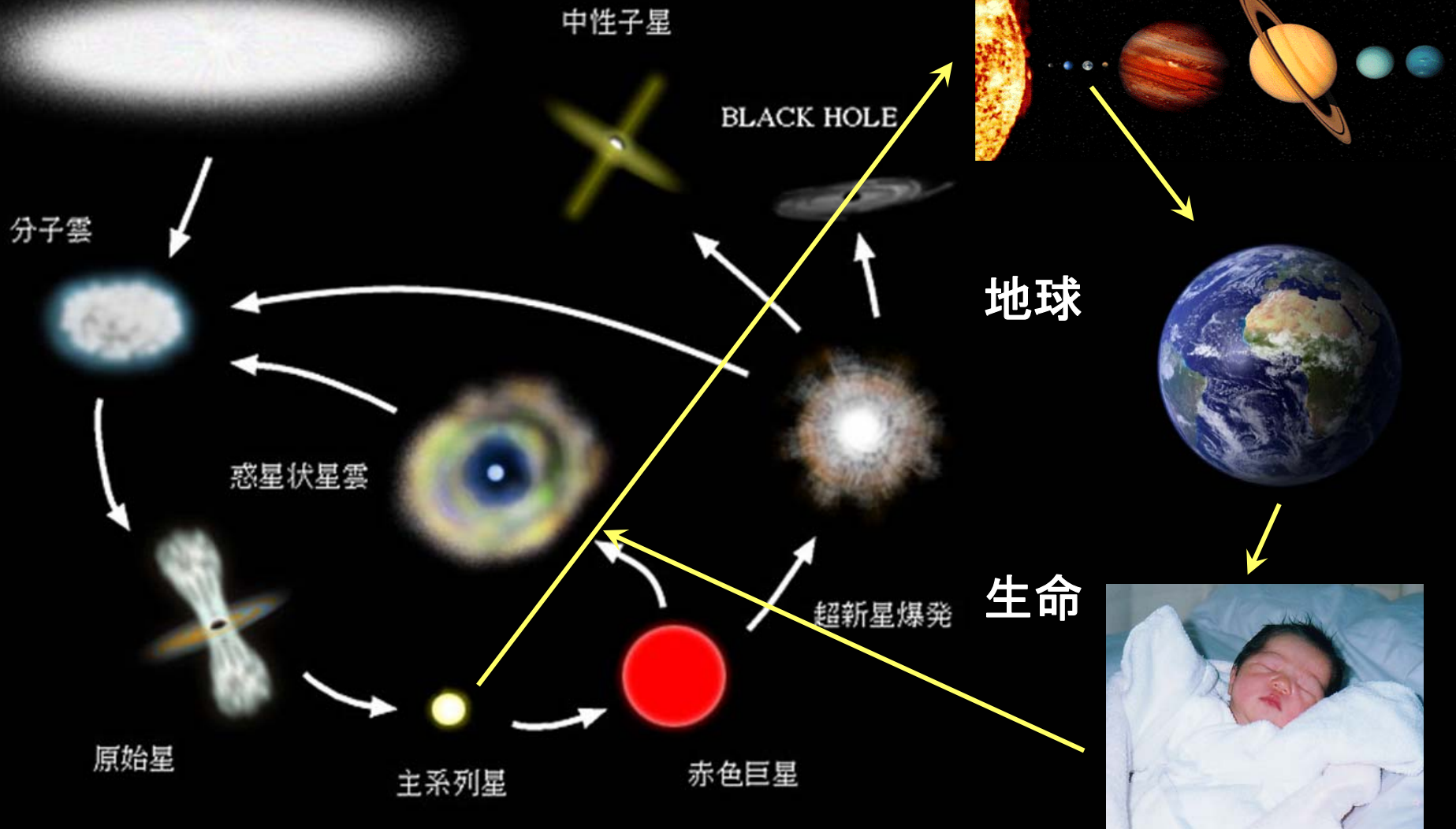
我々は星の子供：宇宙の元素循環

- 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！

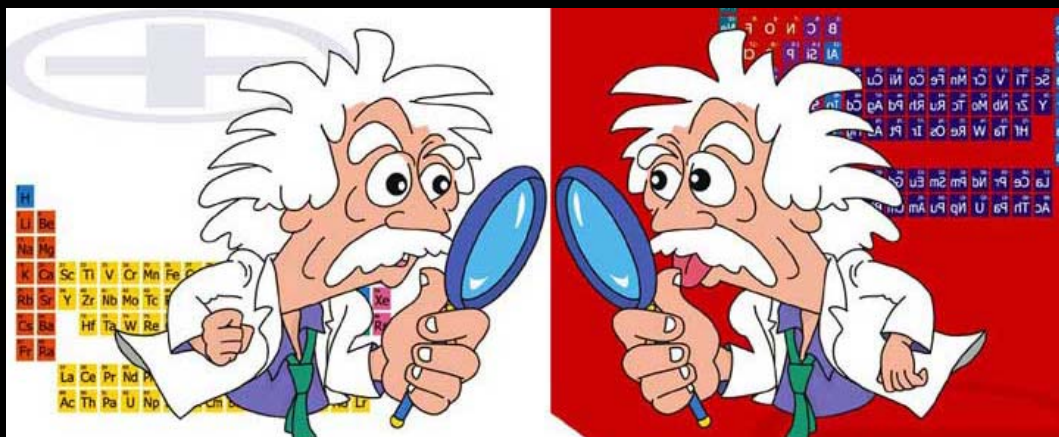
ビッグバン、天体形成史、元素循環

BIG BANG

太陽系



宇宙は元素だけでできているか？



- 宇宙論における最も基本的質問の一つ
- 21世紀天文学観測の予想外の大発見
 - 宇宙には大量の暗黒物質が存在
 - 実はさらに大量の暗黒エネルギーが存在
 - 宇宙はダーク成分に支配されている

ビッグバン宇宙論の観測的基礎

ハッブルの法則

遠方銀河はすべて
我々に対して遠ざ
かっている

軽元素の起源

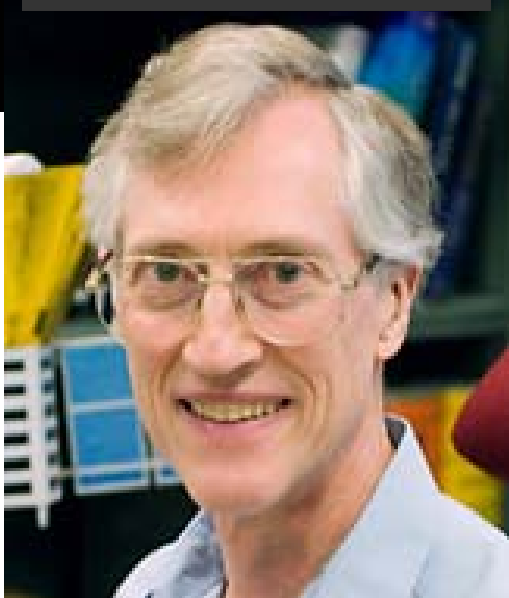
現在の宇宙には大量の
ヘリウムが存在する
(質量密度にして約1/4)

宇宙マイクロ波背景輻射

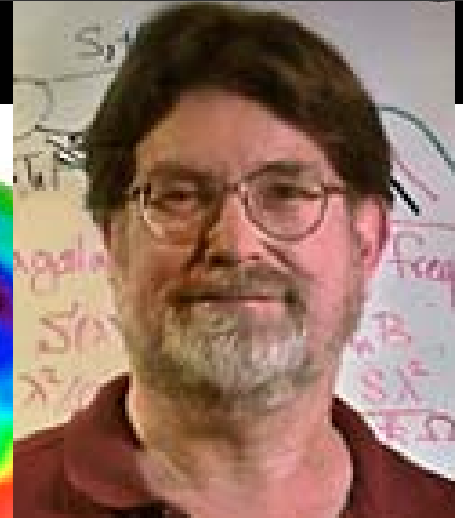
現在の宇宙は、等方的な強度分布を示す電磁波
(約2.7Kに対応する熱放射)に満たされている

宇宙マイクロ背景輻射とCOBE ～2006年度ノーベル物理学賞～

ジョン・マザー

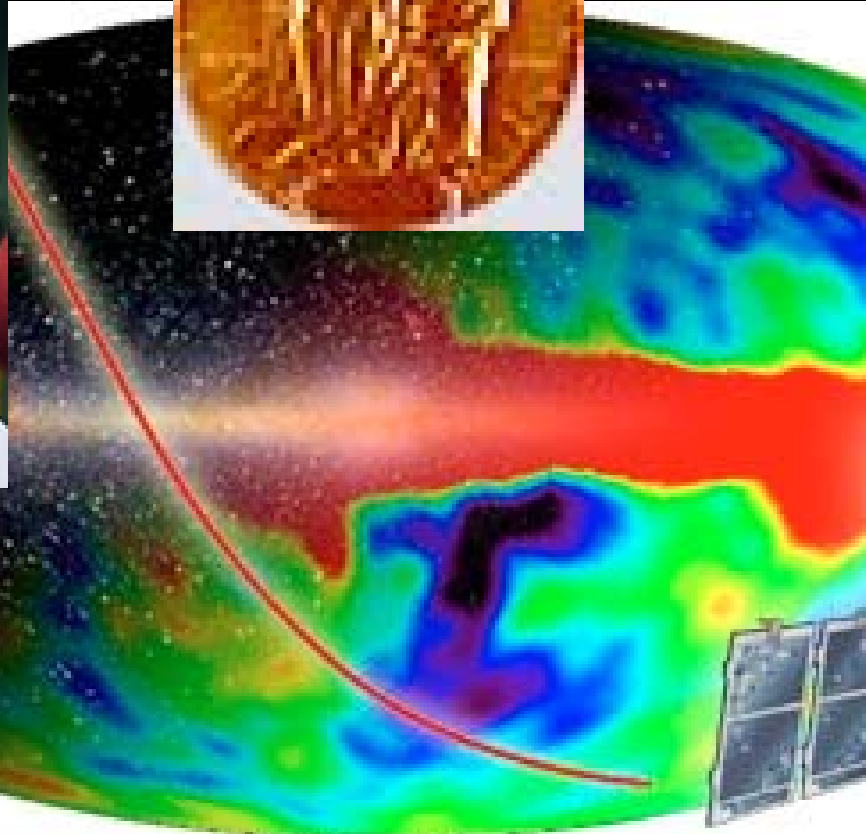


ジョージ・スムート



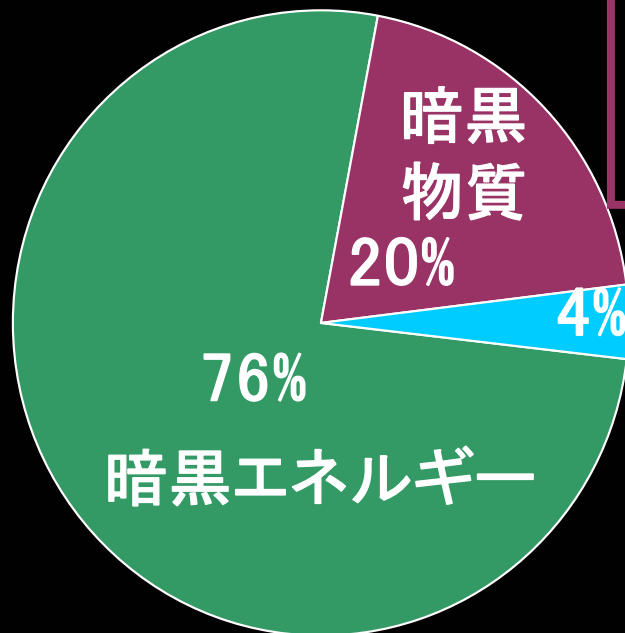
COBE

Cosmic Background Explorer



宇宙は何からできている？

宇宙の組成



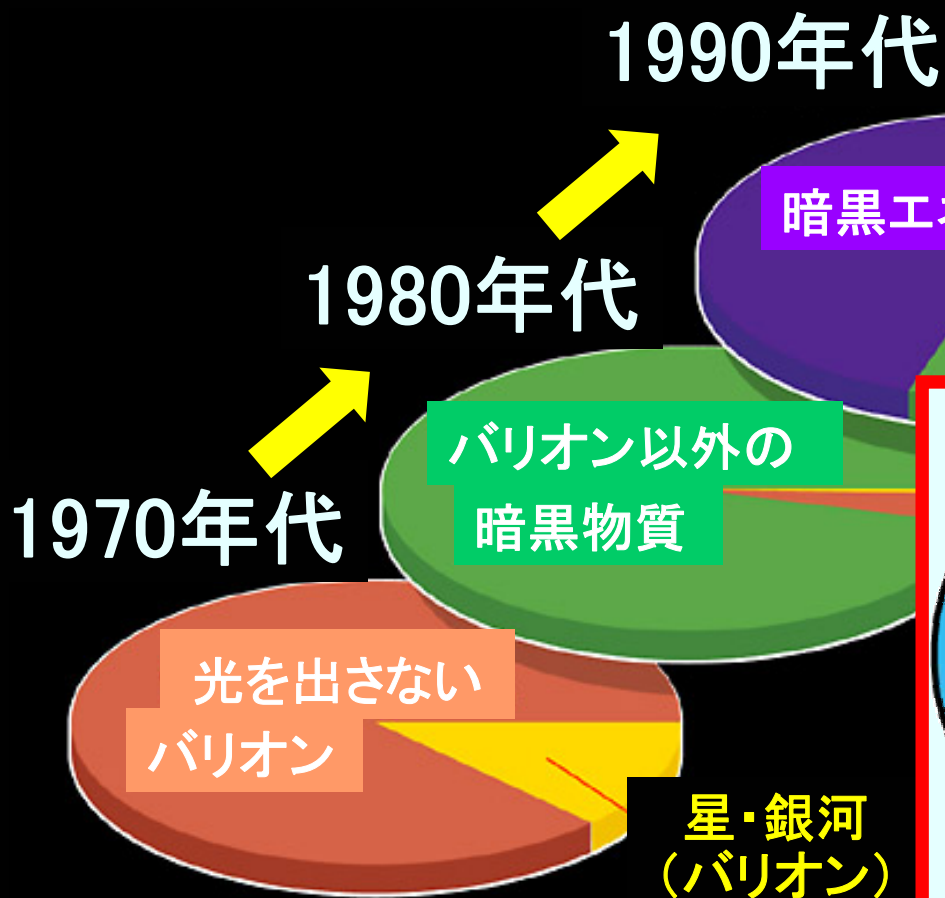
- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質 (バリオン＝通常元素)

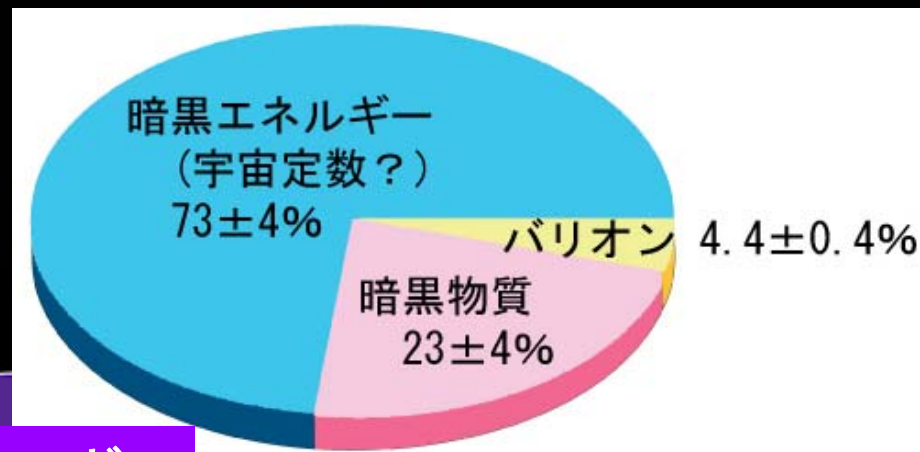
- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

- 元素をつくっているもの(主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

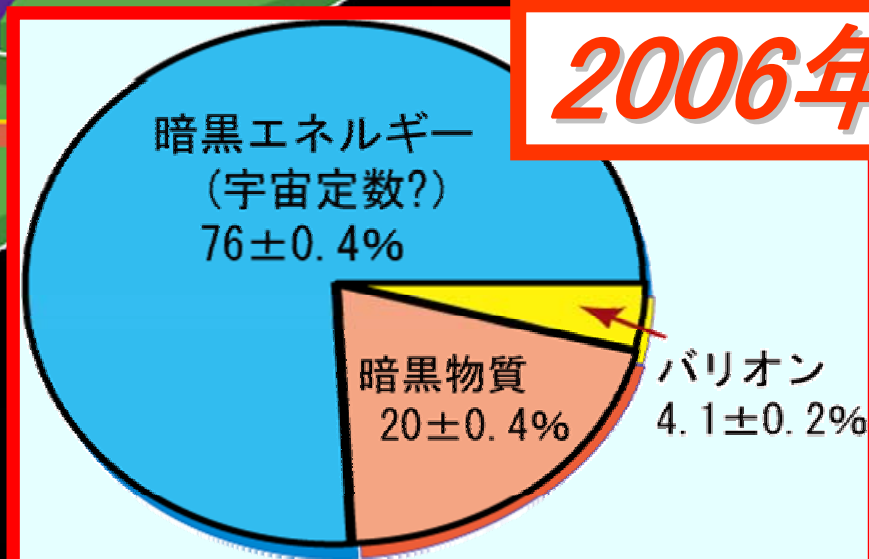
宇宙の組成観 の変遷



2003年



2006年



宇宙観は本当に進歩したか？

古代エジプト



古代中国



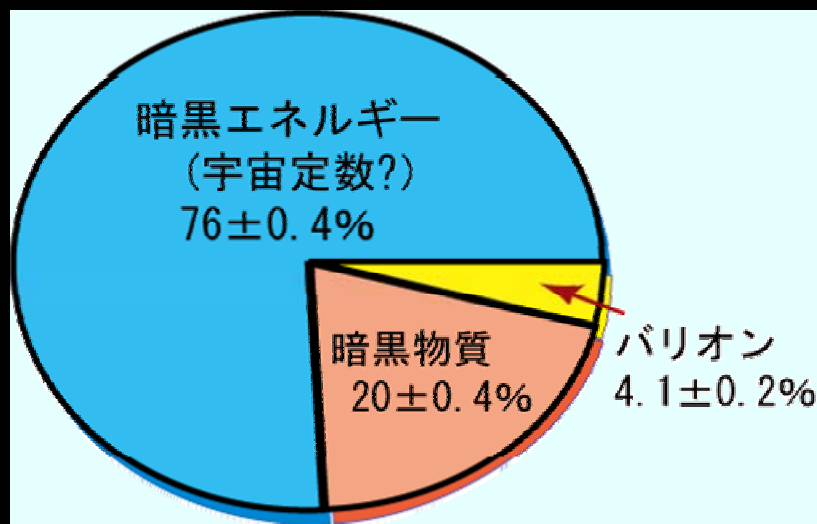
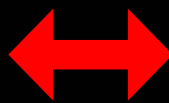
古代インド



2006年



進歩？



コマーシャル！ UT Physics1

ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層

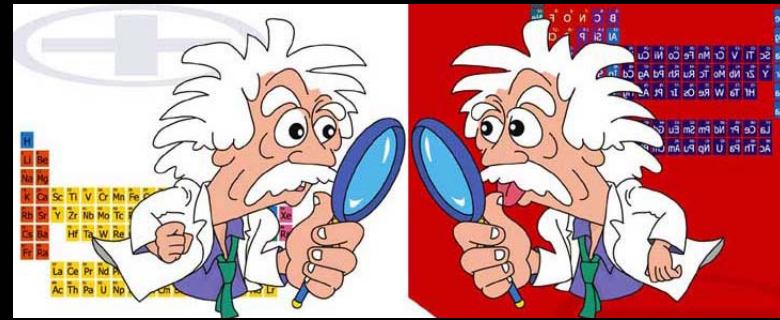


- 2006年10月13日発売
(東京大学出版会)
- 目次
 - 1 科学をする心
 - 2 微視的世界の階層
 - 3 宇宙の階層
 - 4 微視的世界と巨視的世界をつなぐ
 - 5 宇宙の組成
 - 6 人間原理
 - 7 宇宙論の進化
- 付録 大きな数と小さな数

新原子 反原子創造

社団法人
日本物理学会
2006年度
公開講座

まとめ



- すべての元素は、宇宙の爆発(ビッグバン)と超新星爆発を通じて形成された
- 我々の体自身が宇宙の進化の生き証人
- しかし宇宙の主成分は、陽子と中性子からなる元素ではない
- 宇宙の主成分とされる暗黒物質と暗黒エネルギーの正体はまだ謎のまま
- 21世紀科学が解明すべき最重要課題