

# 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)

「†:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

# 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

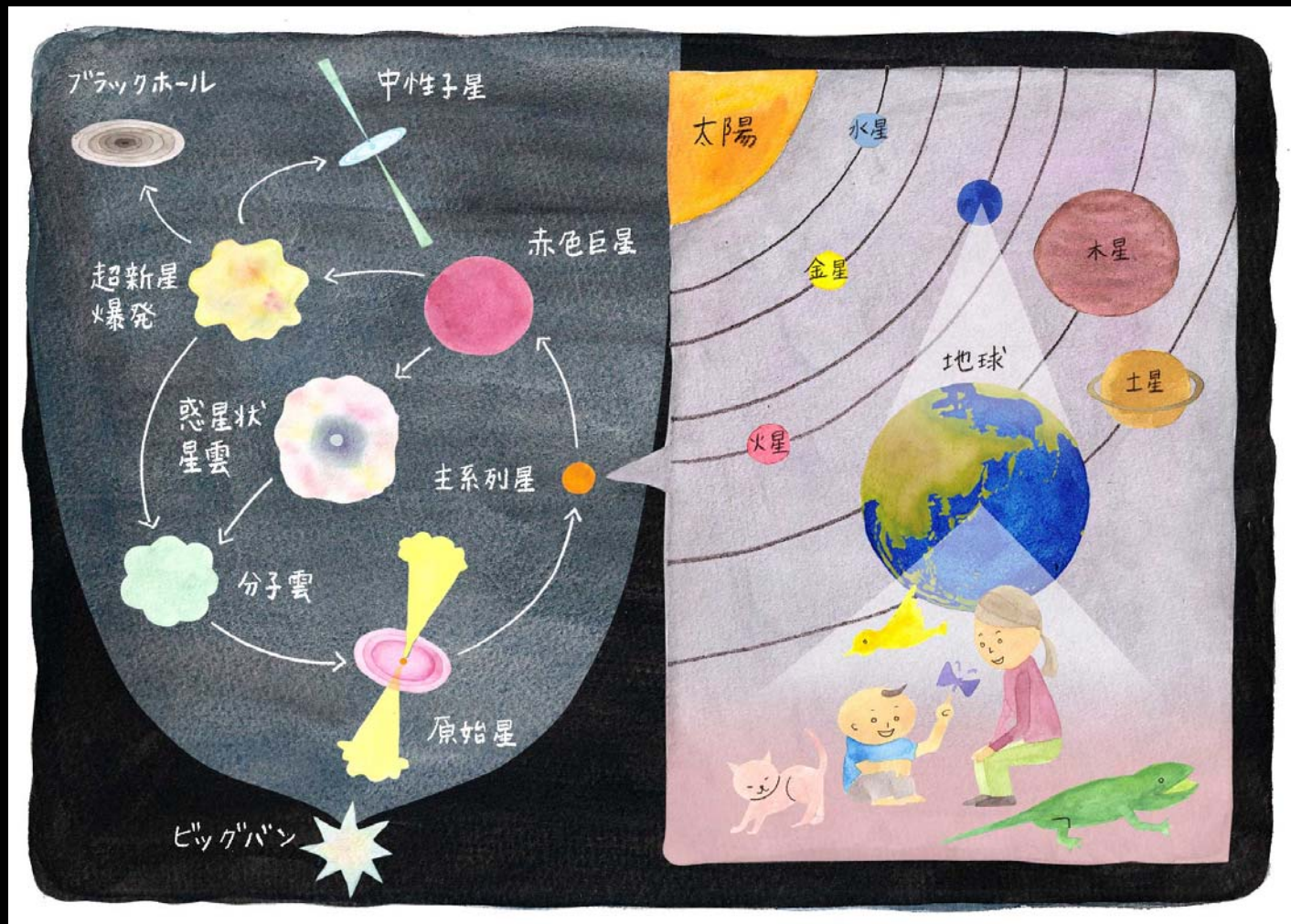
- [ものの大きさ\(須藤著:東大出版会、2006\)](#)
- [銀河進化の謎\(嶋作一大著:東大出版会、2008\)](#)
- [講義web pageにリンクしたプレゼンテーションファイル](#)

## ■ 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～



# 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。

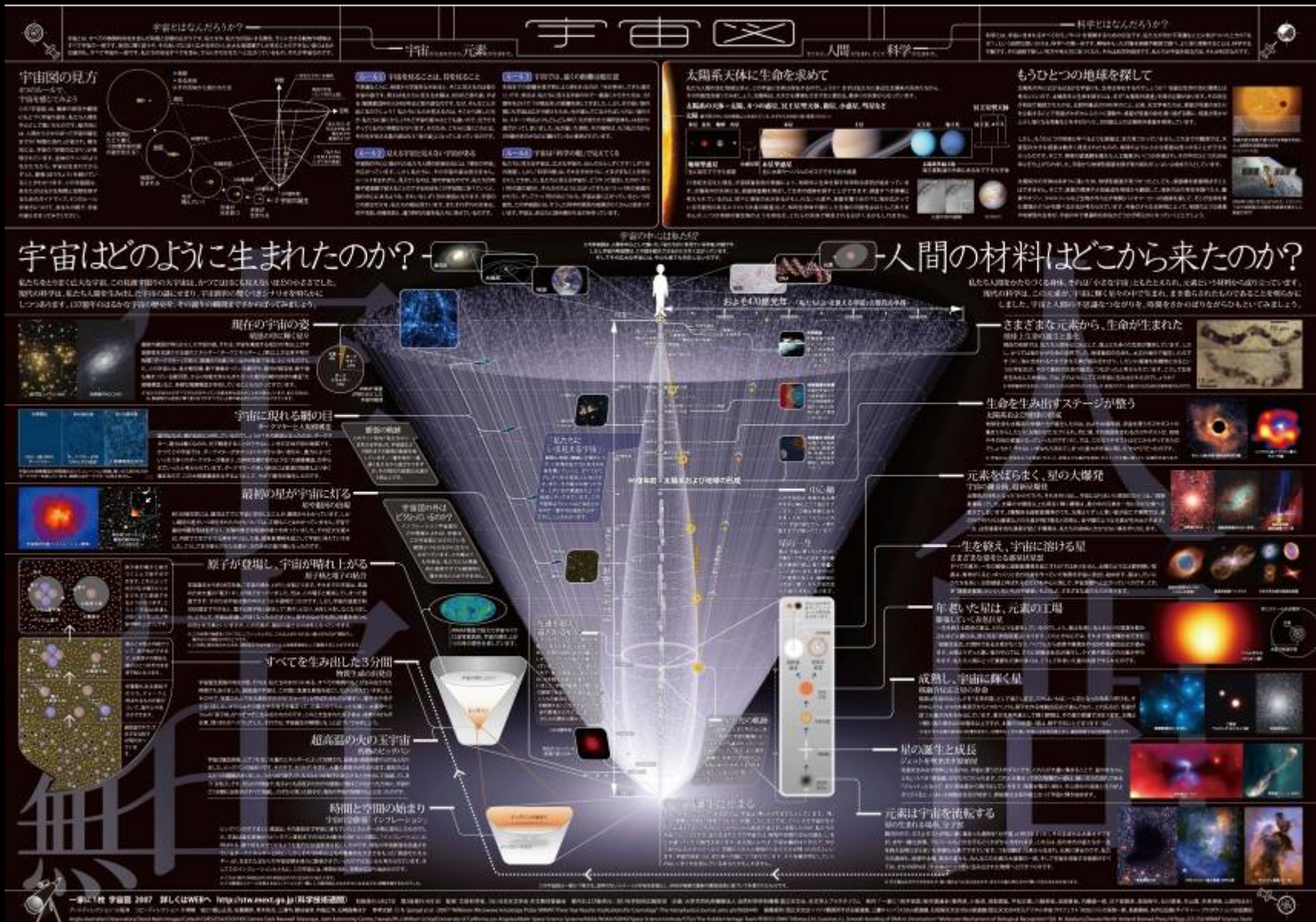
# 宇宙の進化 ≠ 生物の進化

- 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**



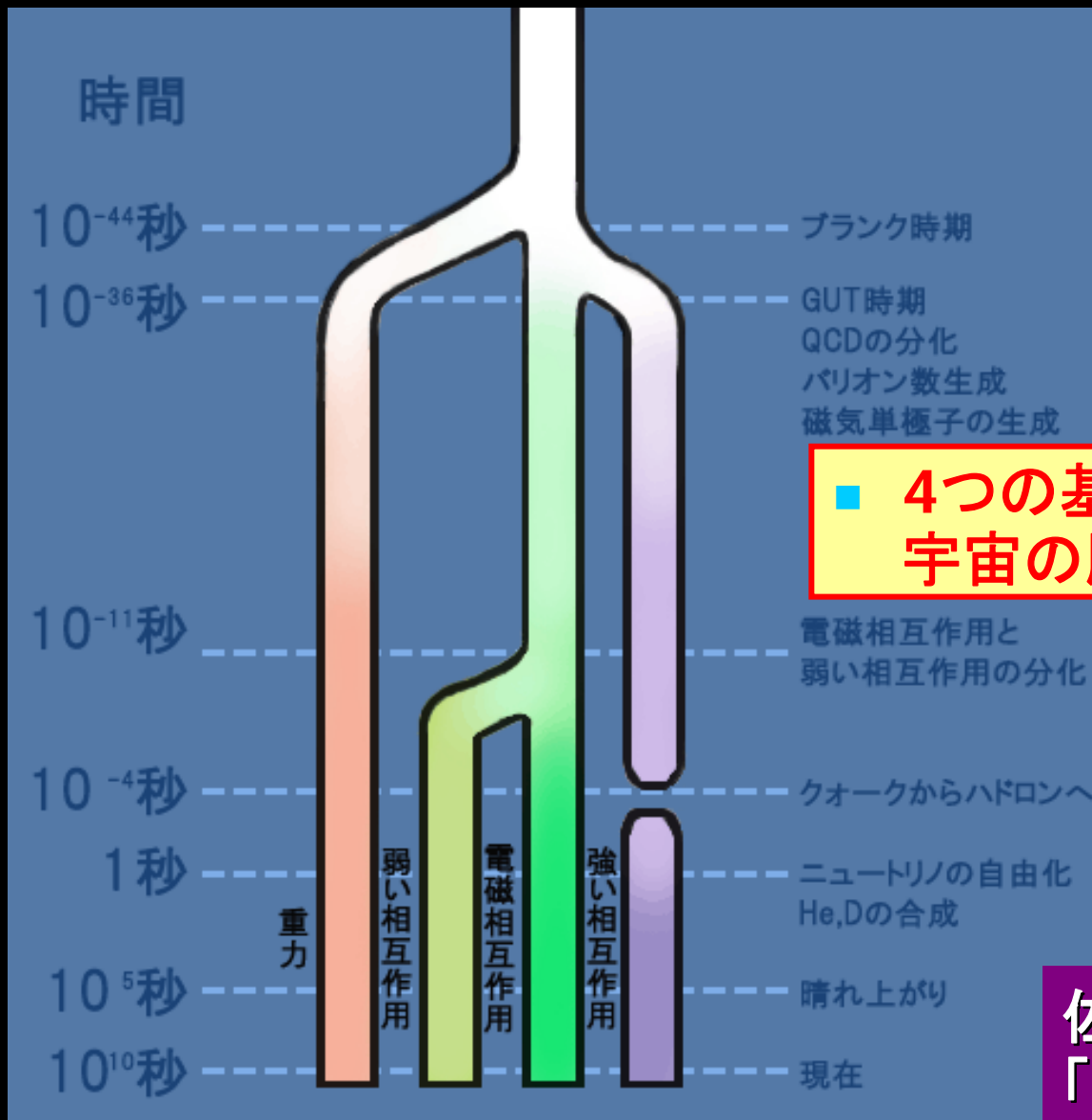
# 宇宙図

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





# 自然界の4つの相互作用と宇宙の歴史



第1の真空の相転移  
(重力の誕生)

第2の真空の相転移  
(強い力の誕生)

■ 4つの基本相互作用の分化は、  
宇宙の歴史に刻印されている

第3の真空の相転移  
(弱い力の誕生)

第4の真空の相転移  
(陽子の誕生)

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）

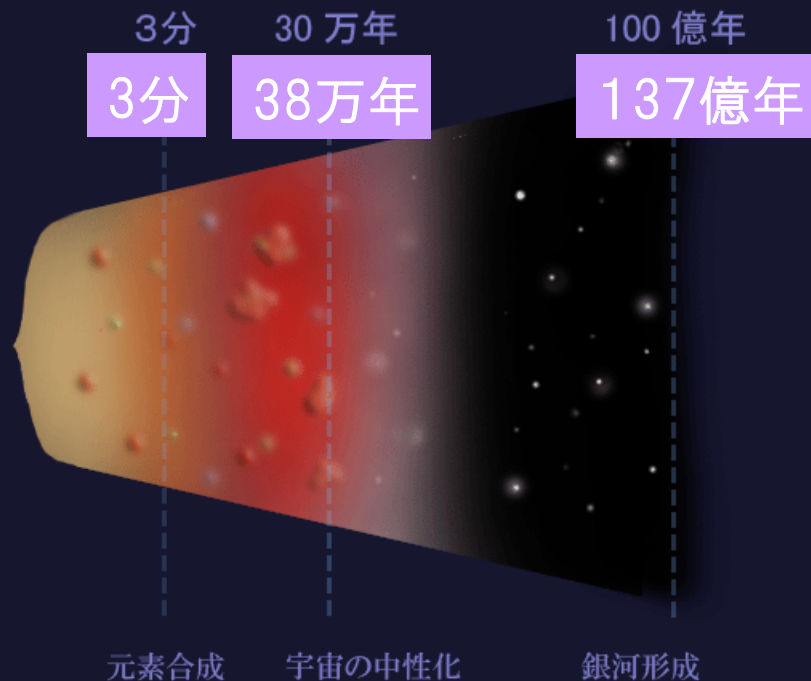
宇宙年齢	現在からの時間	出来事
81億年	46億年前	地球および月の誕生
95億年	42億年前	海の形成
97億年	40億年前	原始生命(プロゲノート)の誕生
99億年	38億年前	最古の光合成の痕跡(イスア表成岩帯)?
114億年?	23億年前?	全球凍結
116億年	21億年前	大気中酸素の急激な増加
121億年	6億年前	カンブリア紀大爆発(生物種の爆発的多様化)
135億年	2.5億年前	生物大量絶滅(P/T境界事件:ペルム紀—三畳紀)
135億年	2.3億年前	恐竜の出現
136億年	6500万年前	恐竜絶滅(K/T境界事件:白亜紀—第三紀)
137億年	20万年前	新人型ホモサピ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

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

宇宙の誕生

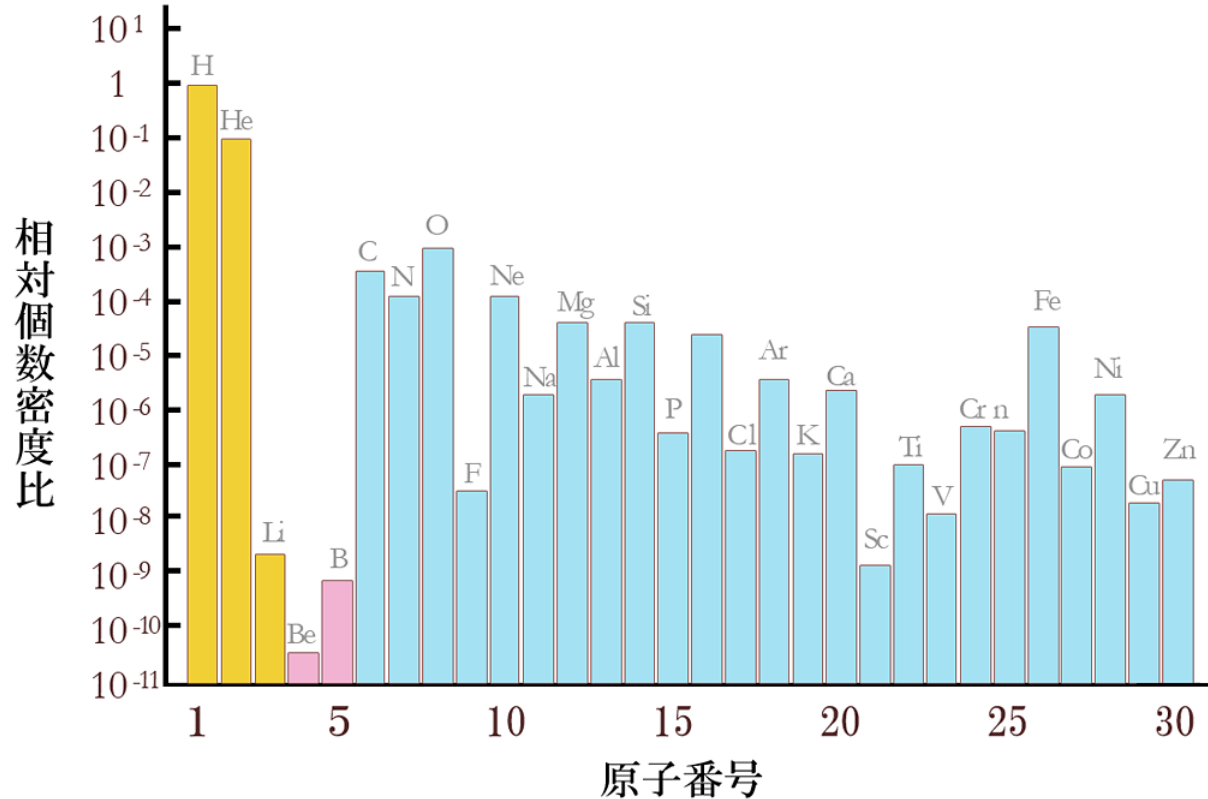


現在

# 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)

水素の個数密度に対する、元素の組成比



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



画像出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:George\\_Gamow.JPG](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:George_Gamow.JPG)

- 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： $\alpha$ $\beta$ $\gamma$ 理論(1948)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

## Letters to the Editor

**P**UBLICATION 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,<sup>2</sup> 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 abundances<sup>3</sup> it is necessary to assume the integral of  $\rho_n dt$  during the building-up period is equal to  $5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup>.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe<sup>4</sup> the density dependence on time is given by  $\rho \propto 1/t^3$ . 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:

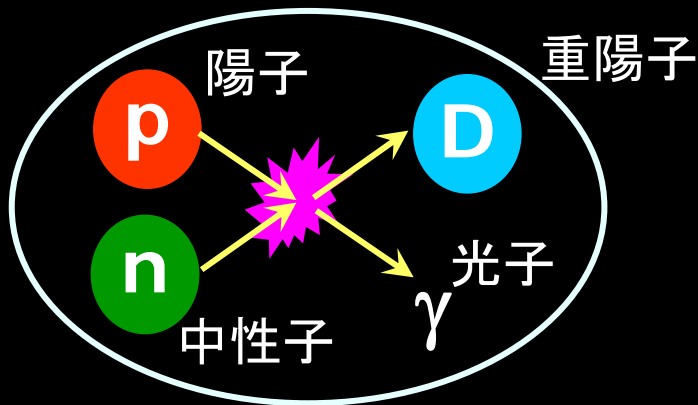
The Origin of Chemical Elements", Phys. Rev. 73, 803 - 804 (1948)

アルファー、(ベーテ)、ガモフの共著論文 1948年4月1日発表

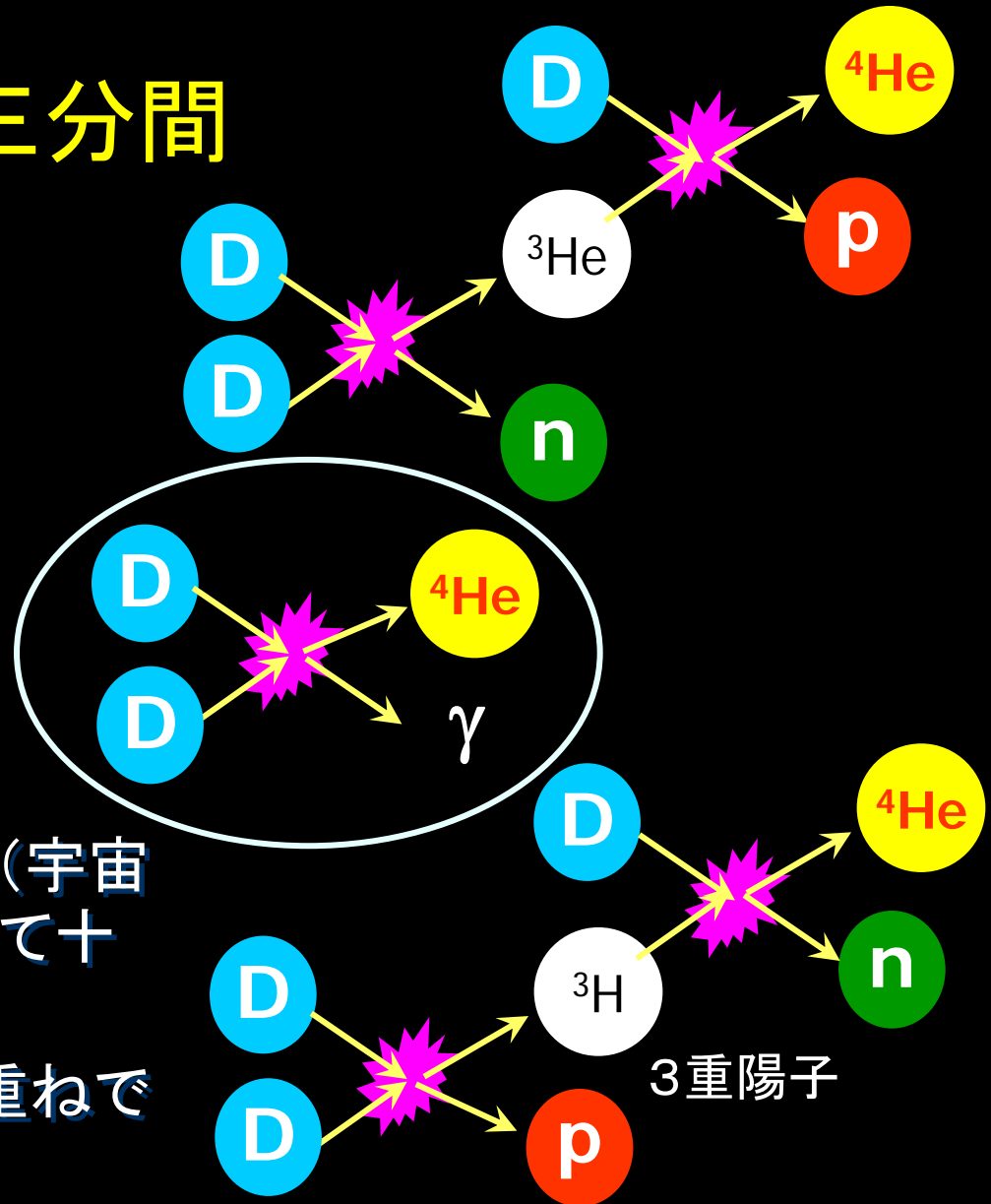
# ビッグバン元素合成反応

## ■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

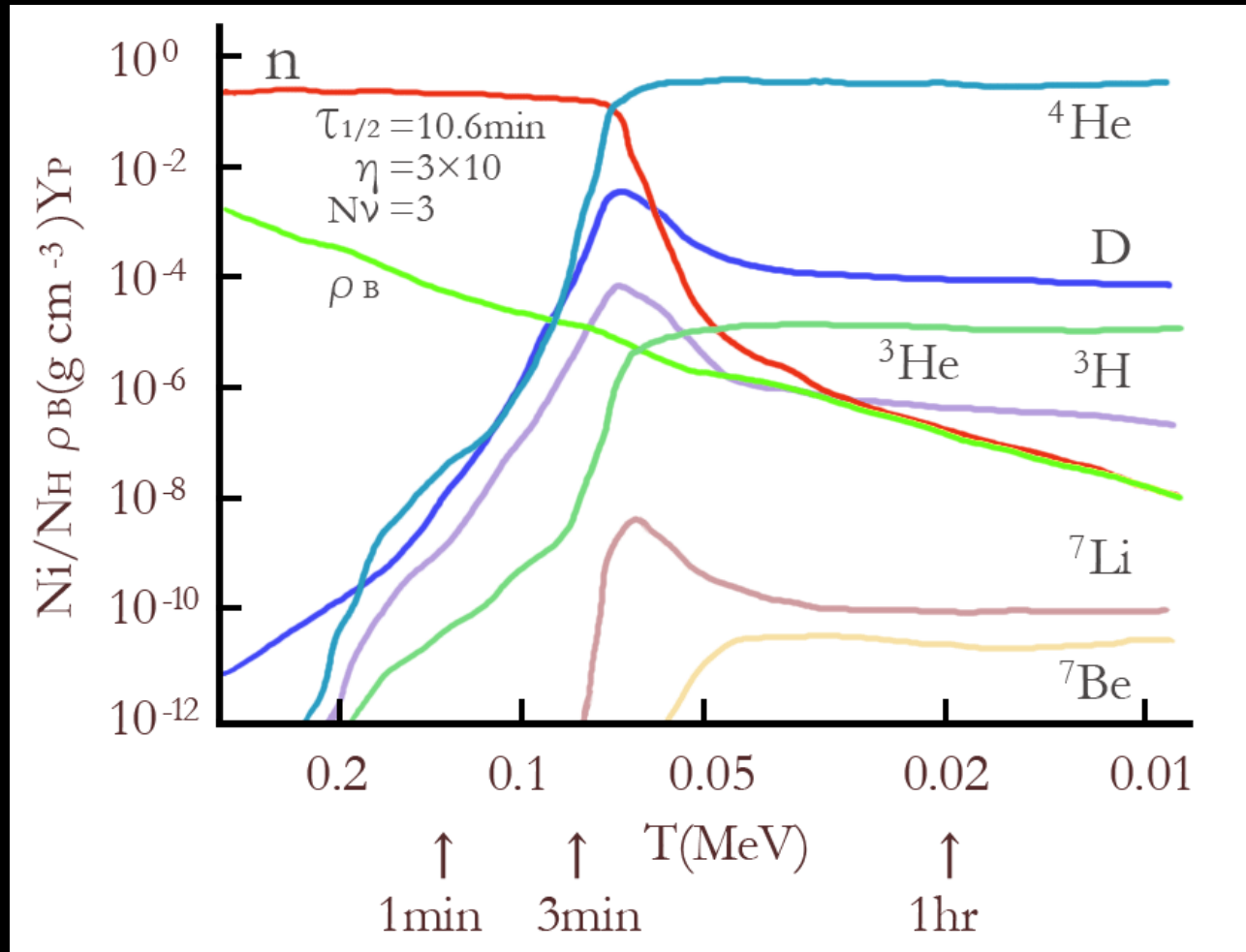


- 重陽子は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下(宇宙誕生後約3分後)となって初めて十分な重陽子が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



# 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



物理法則によって誕生後  
1分の宇宙が記述できる

# 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	$^1\text{H}$	$^2\text{He}$	Li	Be	5	6						
1	$^2\text{D}$	$^3\text{He}$	$^4\text{Li}$	$^5\text{Be}$	B	C	7					
2	$^3\text{T}$	$^4\text{He}$	$^5\text{Li}$	$^6\text{Be}$	$^7\text{B}$	$^8\text{C}$	N	8				
3	$^4\text{H}$	$^5\text{He}$	$^6\text{Li}$	$^7\text{Be}$	$^8\text{B}$	$^9\text{C}$	$^{10}\text{N}$	O	9	10		
4	$^5\text{H}$	$^6\text{He}$	$^7\text{Li}$	$^8\text{Be}$	$^9\text{B}$	$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{N}$	$^{12}\text{O}$	F	Ne		
5	$^6\text{H}$	$^7\text{He}$	$^8\text{Li}$	$^9\text{Be}$	$^{10}\text{B}$	$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{N}$	$^{13}\text{O}$	$^{14}\text{F}$	$^{15}\text{Ne}$	11	
6	$^7\text{H}$	$^8\text{He}$	$^9\text{Li}$	$^{10}\text{Be}$	$^{11}\text{B}$	$^{12}\text{C}$	$^{13}\text{N}$	$^{14}\text{O}$	$^{15}\text{F}$	$^{16}\text{Ne}$	Na	
7		$^9\text{He}$	$^{10}\text{Li}$	$^{11}\text{Be}$	$^{12}\text{B}$	$^{13}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$^{15}\text{O}$	$^{16}\text{F}$	$^{17}\text{Ne}$	$^{18}\text{Na}$	
8		$^{10}\text{He}$	$^{11}\text{Li}$	$^{12}\text{Be}$	$^{13}\text{B}$	$^{14}\text{C}$	$^{15}\text{N}$	$^{16}\text{O}$	$^{17}\text{F}$	$^{18}\text{Ne}$	$^{19}\text{Na}$	

■ 質量数5と8の安定元素がない！

■  $\text{He} + \text{p}$ ,  $\text{He} + \text{n}$ ,  $\text{He} + \text{He}$ 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?)

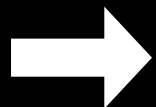
# 星での元素合成とビッグバン元素合成

## ■ 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)

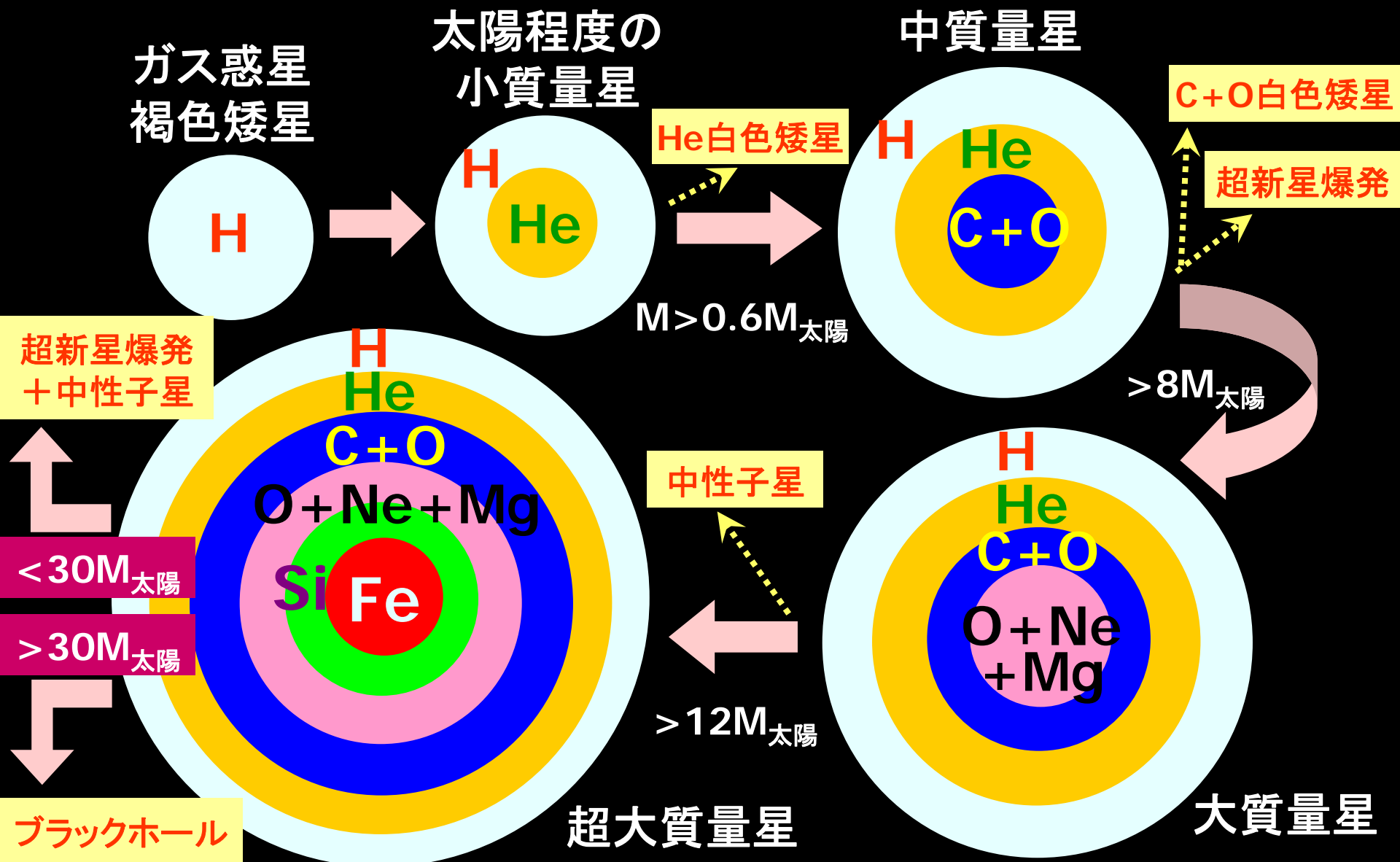


$$\frac{m_{\text{He}} n_{\text{He}}}{m_{\text{H}} n_{\text{H}} + m_{\text{He}} n_{\text{He}}} \approx \frac{4(n_n / 2)}{(n_p - n_n) + 4(n_n / 2)} \approx \frac{1}{4} (!)$$

# 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



# 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**

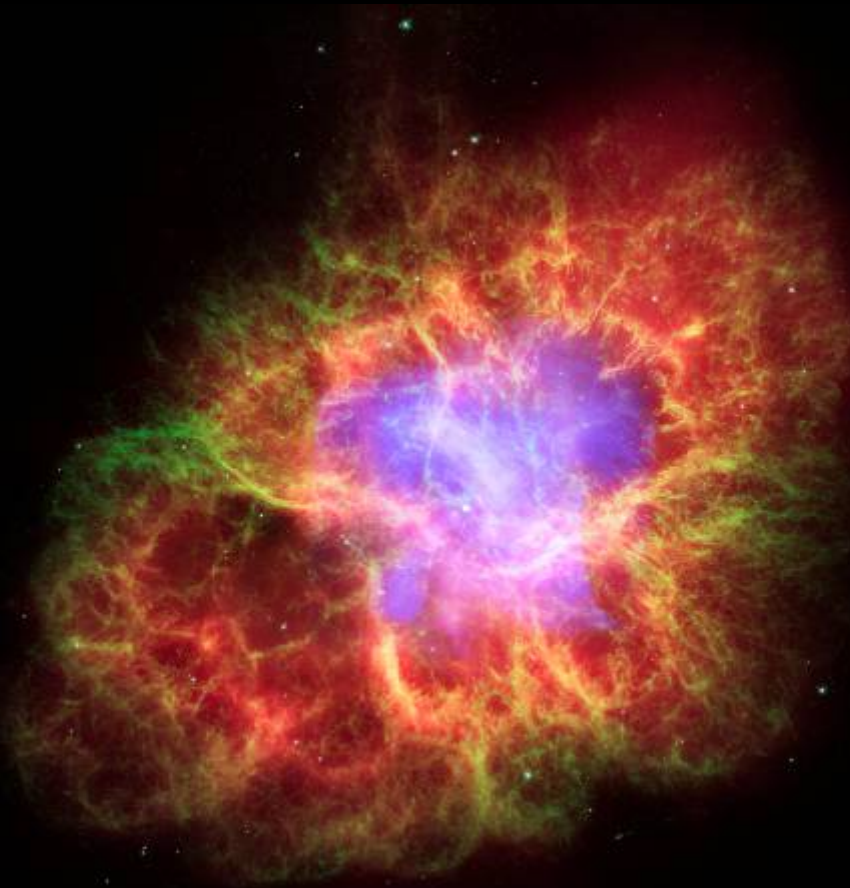
Credit: NASA, ESA, CXC, JPL-Caltech, J. Hester and A. Loll (Arizona State Univ.), R. Gehrz (Univ. Minn.), and STScI

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/planetary/2004/32/>



# 超新星爆発

- 太陽の8倍以上の質量の星の終末

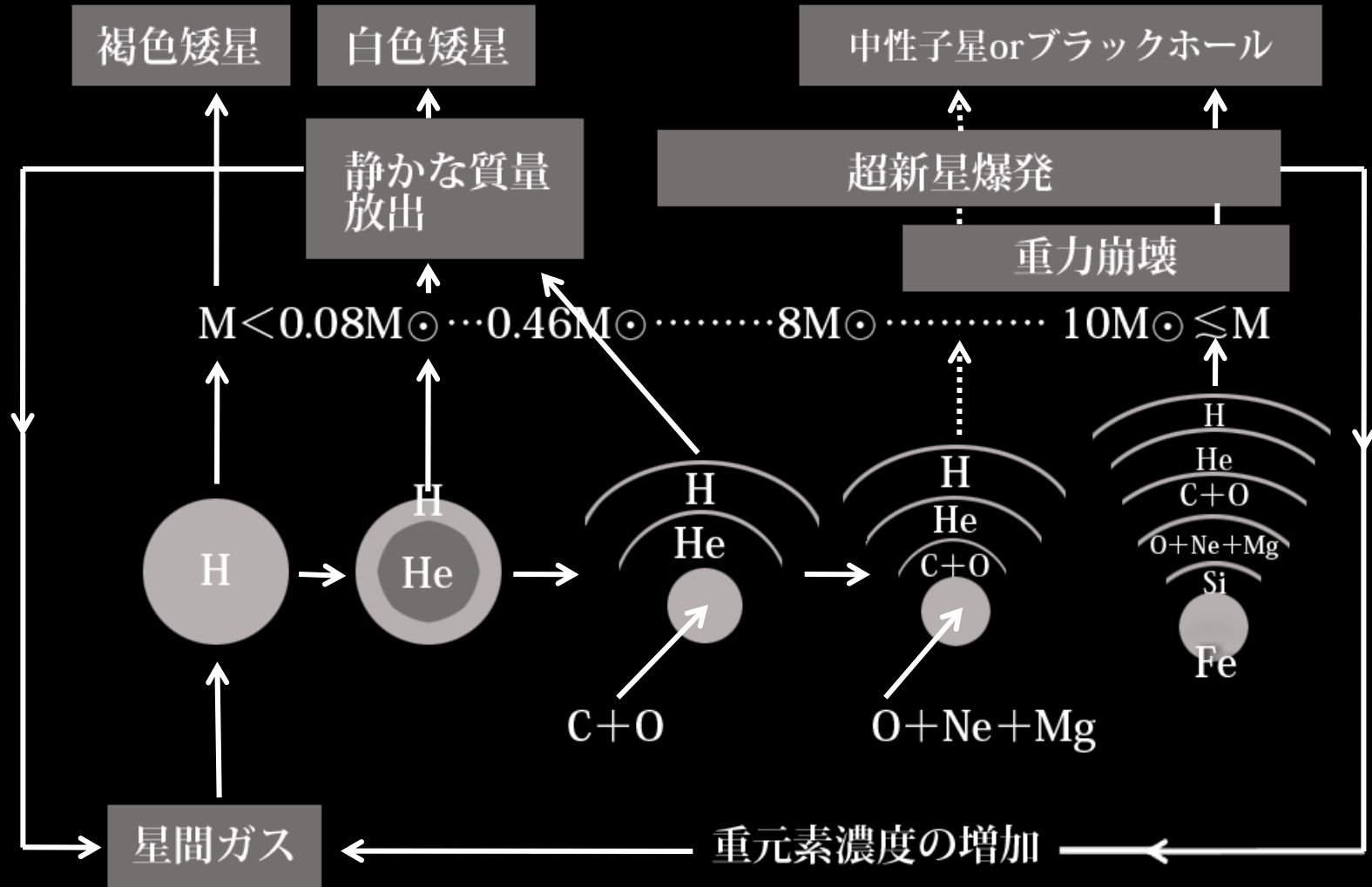


**かに星雲**  
1054年に起  
こった超新星  
爆発の残骸  
X線 Chandra  
可視光 HST  
赤外 Spitzer  
の合成画像

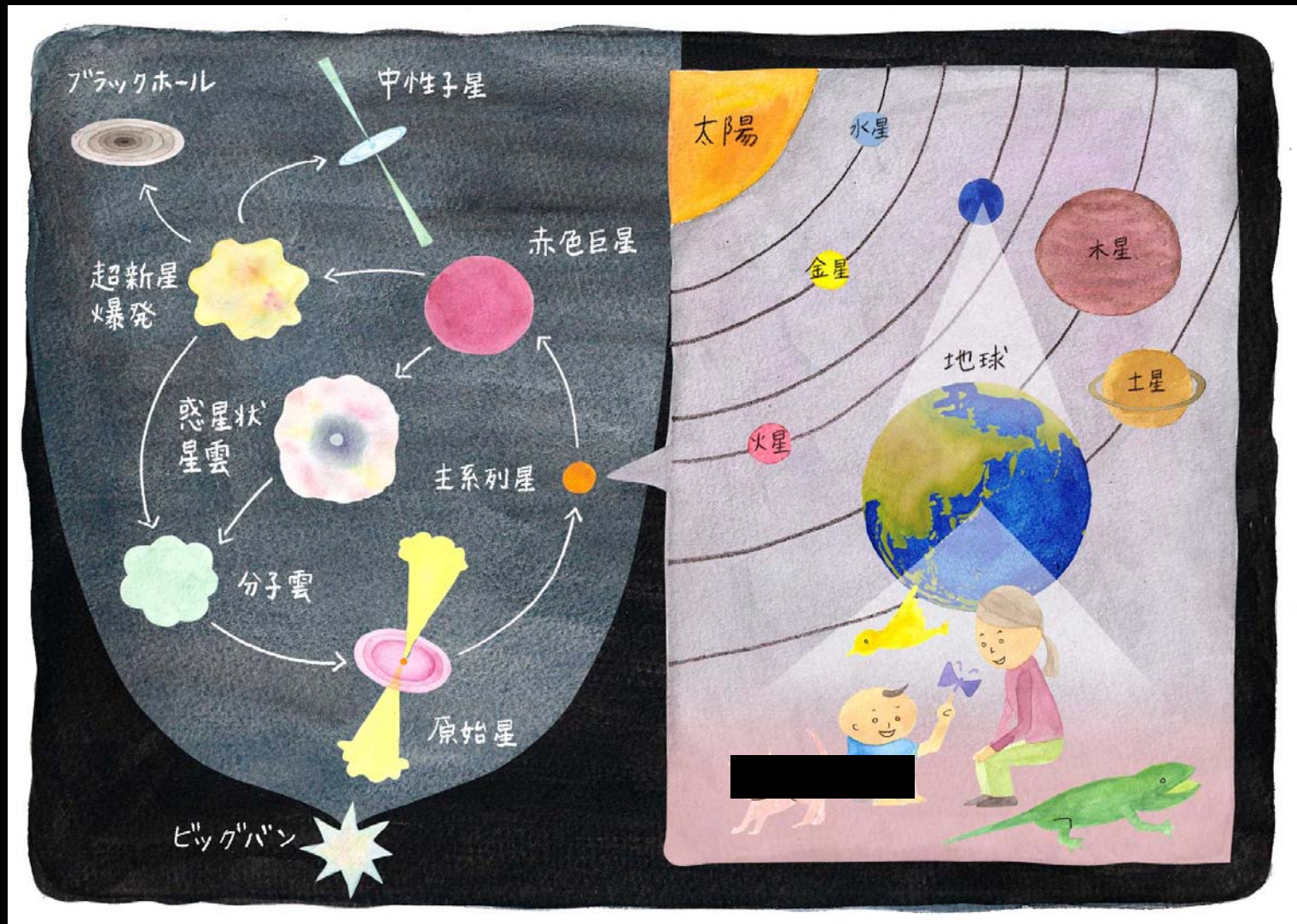
Credit: NASA, ESA, C.R. O'Dell (Vanderbilt University), and M. Meixner, P. McCullough

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/2005/37/image/b/>

# 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



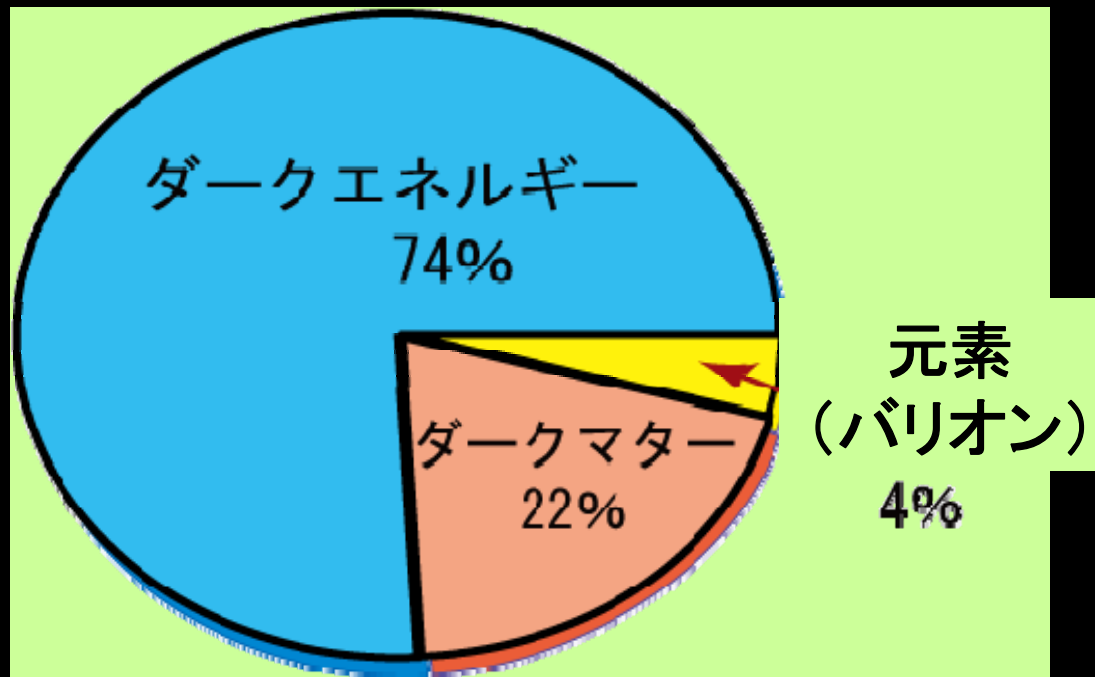
# 我々は星の子供：宇宙の元素循環

- 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！**



# IV 宇宙の組成

## ～宇宙の主成分:ダークマターとダークエネルギー～

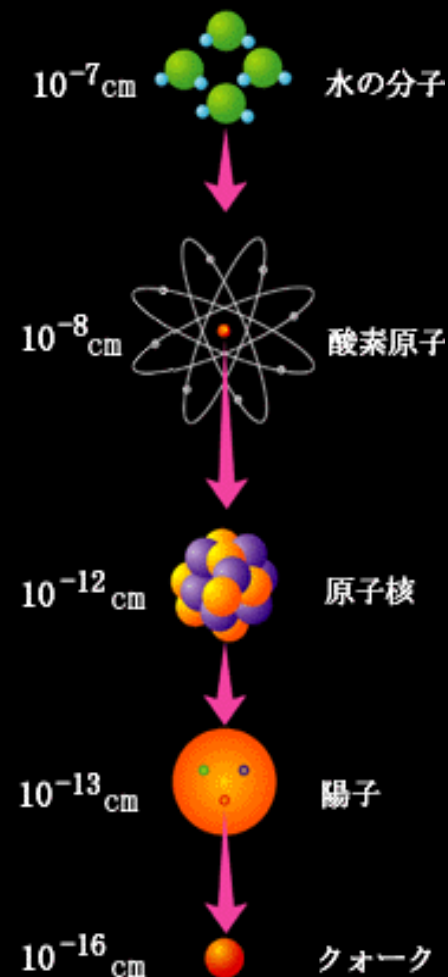


「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」



# 自然界に思いをはせる

(エーテル＝第5元素)



# ものは何からできているのだろうか？

## ■ 古代ギリシャの4元説

- 空気、土、火、水

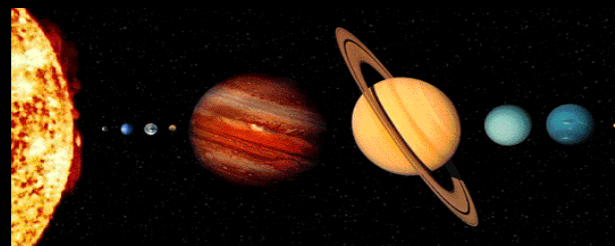
## ■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水)  
× (陽、陰)

- これが日本で用いられている惑星と曜日の名前の由来

## ■ 現代物理学

- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ; クォーク・レプトン)



日月火水木金土

	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

# 五行説：古代中国の素粒子論



水



木



金



土



火



画像出典:

プロカメラマン撮影の無料写真素材・著作権フリー画像素材 --LinkStyle--

(<http://www.linkstyle.co.jp/>)

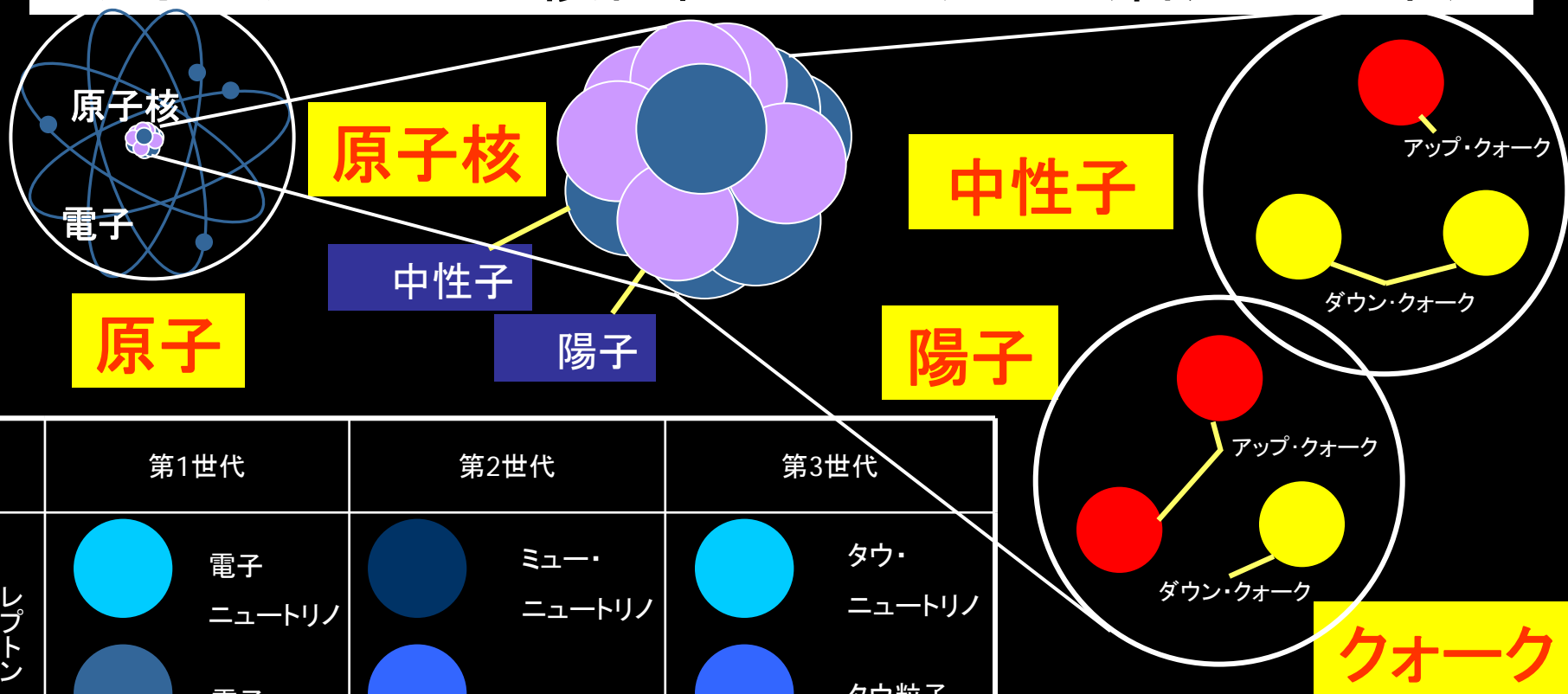








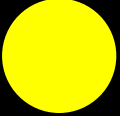
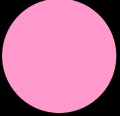
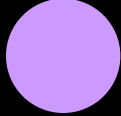
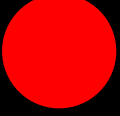
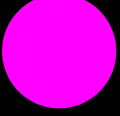
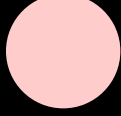
北京 天壇にて

Photo by (c)Tomo.Yun  
<http://www.yunphoto.net>

# 物質を構成しているもの

クォークからなる複合粒子＝バリオン(普通の元素)



	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	 電子 ニュートリノ	 ミュー・ ニュートリノ	 タウ・ ニュートリノ
	 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子
クォーク	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
	 アップ	 チャーム	 トップ

原子核の周囲を電子がまわって原子をつくる。原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はアップ・クォークとダウン・クォークから構成されている。

# 世界は何からできている？

## ■ 微視的世界：物質は何からできているのか？

- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

## ■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙は、我々が知っている元素だけからできているのか？

## ■ 20世紀天文学観測の予想外の大発見

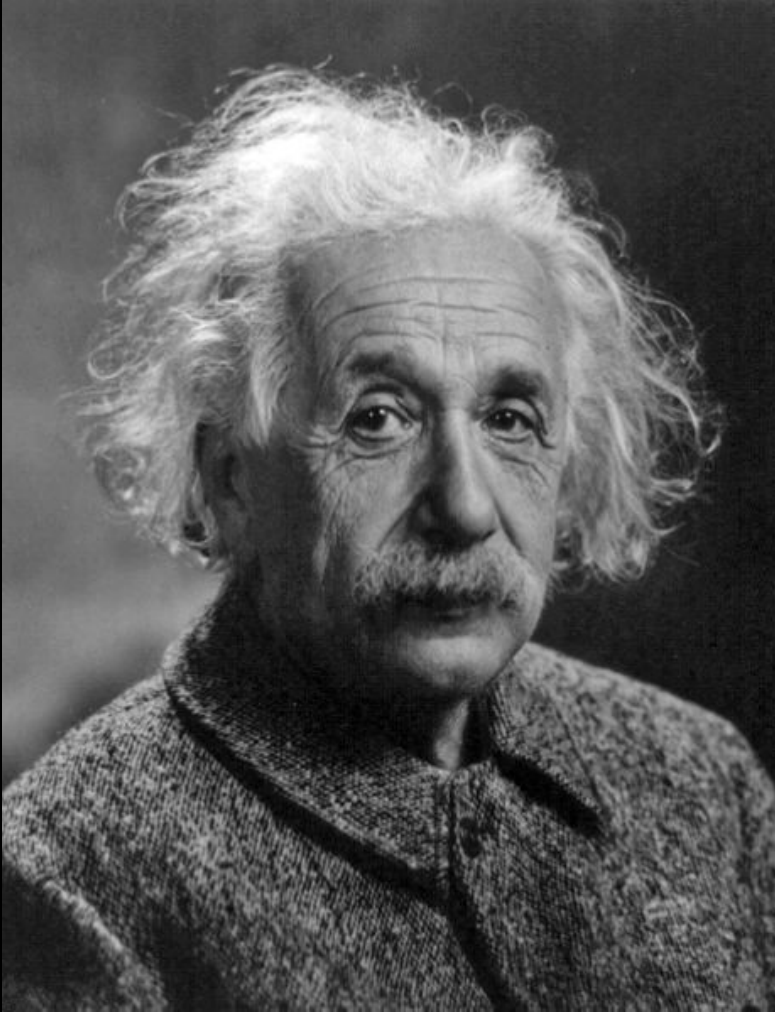
- 宇宙には大量のダークマターが存在
- 実はさらに大量のダークエネルギーが存在
- 宇宙はダーク成分に支配されている



# 宇宙のダークマター

- 光り輝く天体は、光ることのない大量のダークマターに包まれている
- ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる(重力レンズ効果)
  - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果を利用してその存在が確認済み
- ダークマターは、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

# 重力レンズ

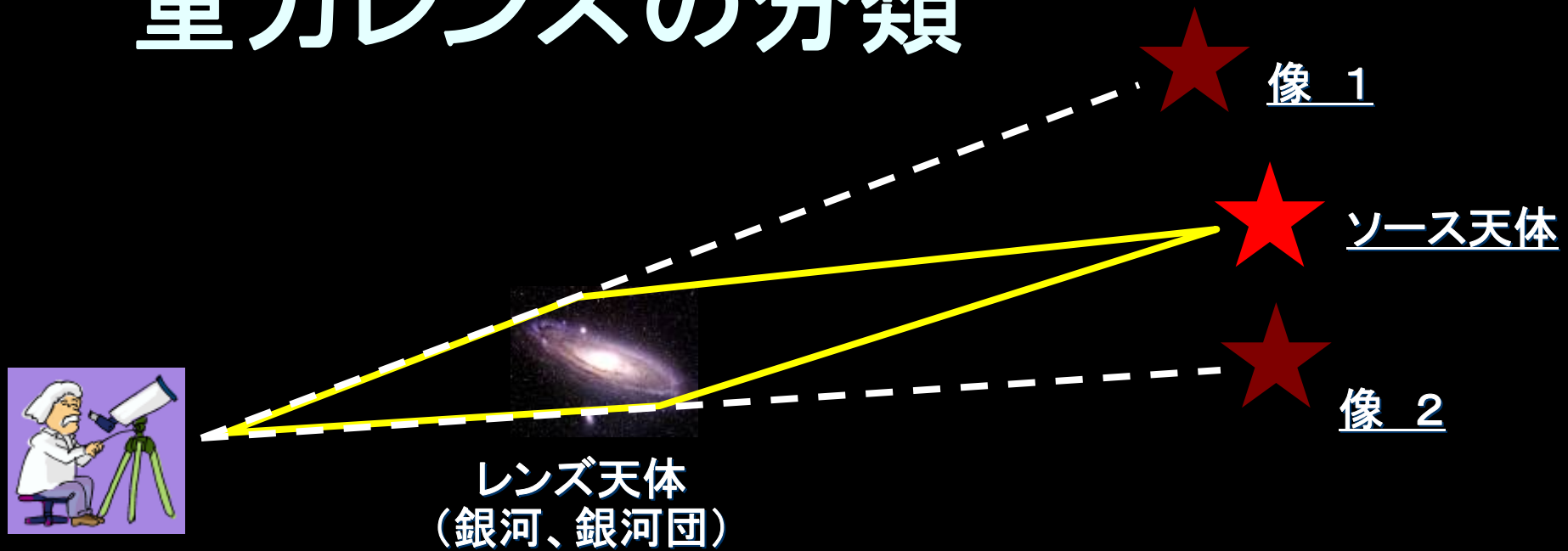


画像出典:フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』  
[http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Albert\\_Einstein\\_Head.jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Albert_Einstein_Head.jpg)

ここに挿入されていた「アインシュタインの手書きのメモの画像」は著作権処理の都合上、削除されました。



# 重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
  - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
  - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
  - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

# 初めて発見された重力レンズ多重像

QSO 0957+561 A, B ( $z=1.4$ )

A

B

Copyright(c)2009 Bill Keel



# ハッブル宇宙望遠鏡でみる重力レンズ



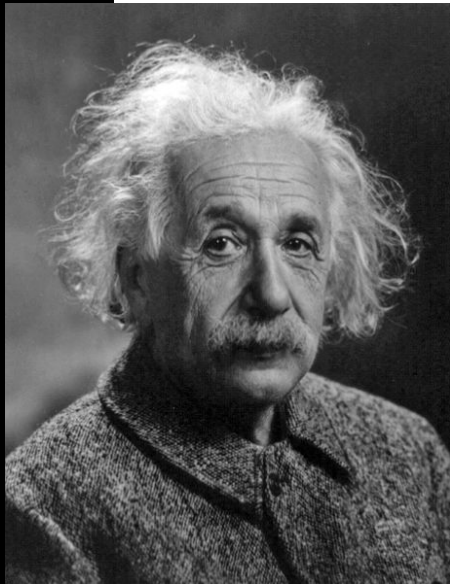
[http://hubblesite.org/gallery/album/the\\_universe\\_collection/pr2006023a/](http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe_collection/pr2006023a/)

Credit: ESA, NASA, K. Sharon (Tel Aviv University) and E. Ofek (Caltech)

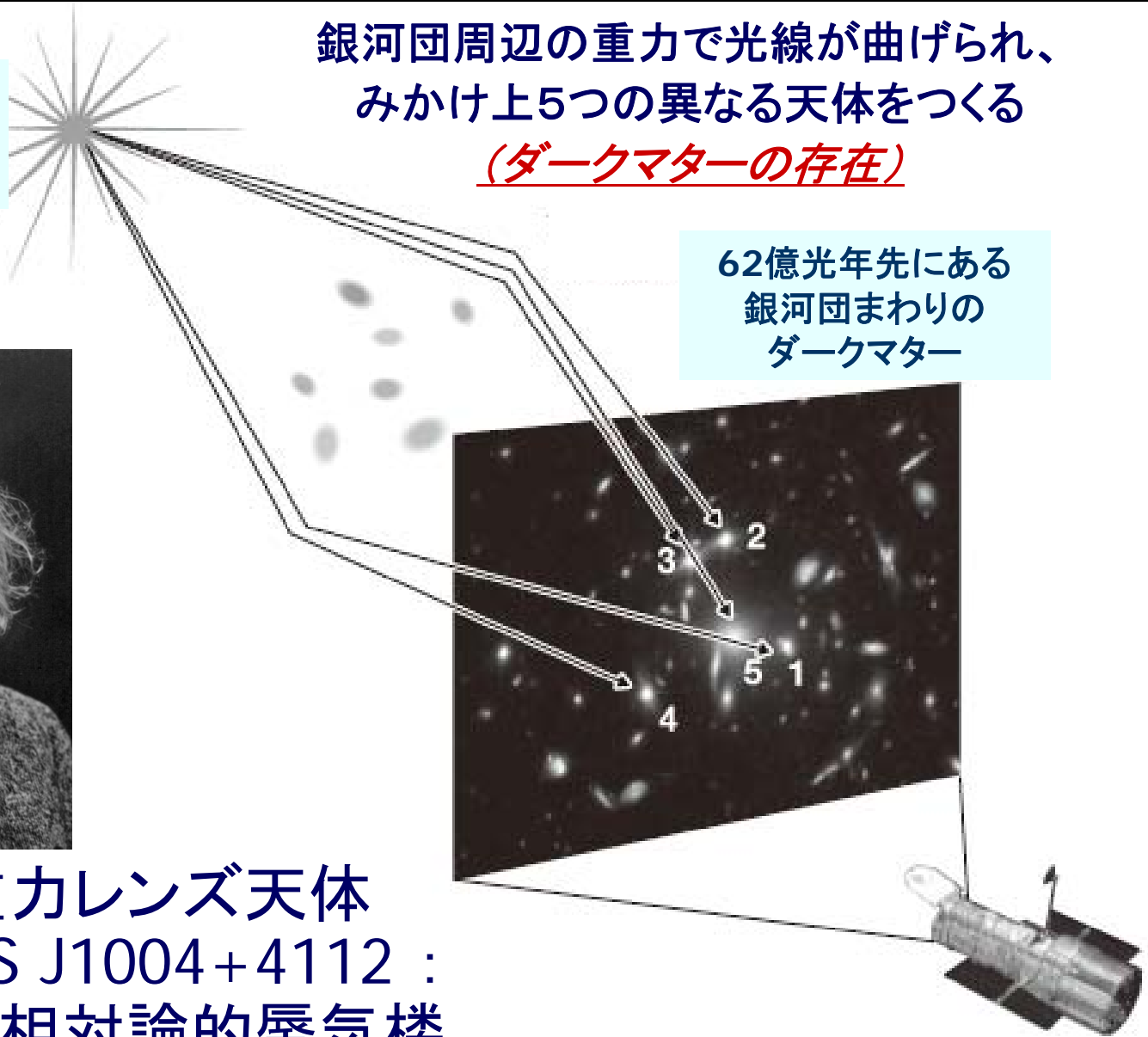
98億光年先にある  
クエーサー(中心に  
ブラックホール)

銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、  
みかけ上5つの異なる天体をつくる  
(ダークマターの存在)

62億光年先にある  
銀河団まわりの  
ダークマター

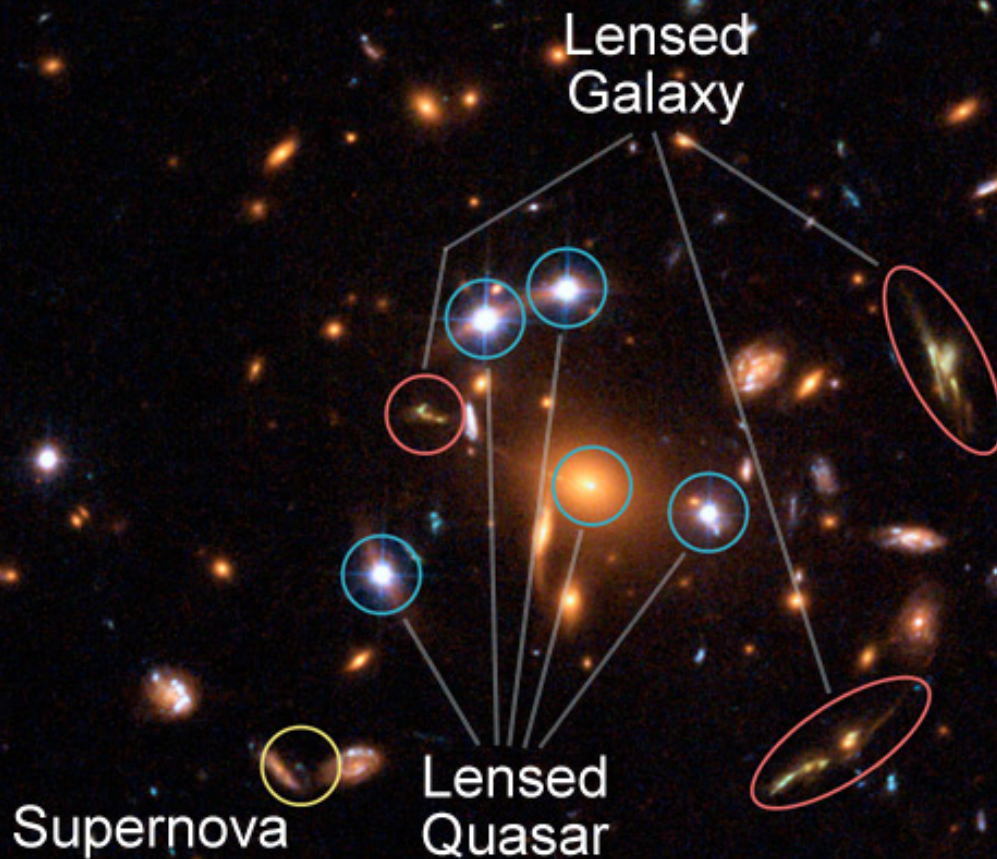


重力レンズ天体  
SDSS J1004+4112 :  
一般相対論的蜃気楼



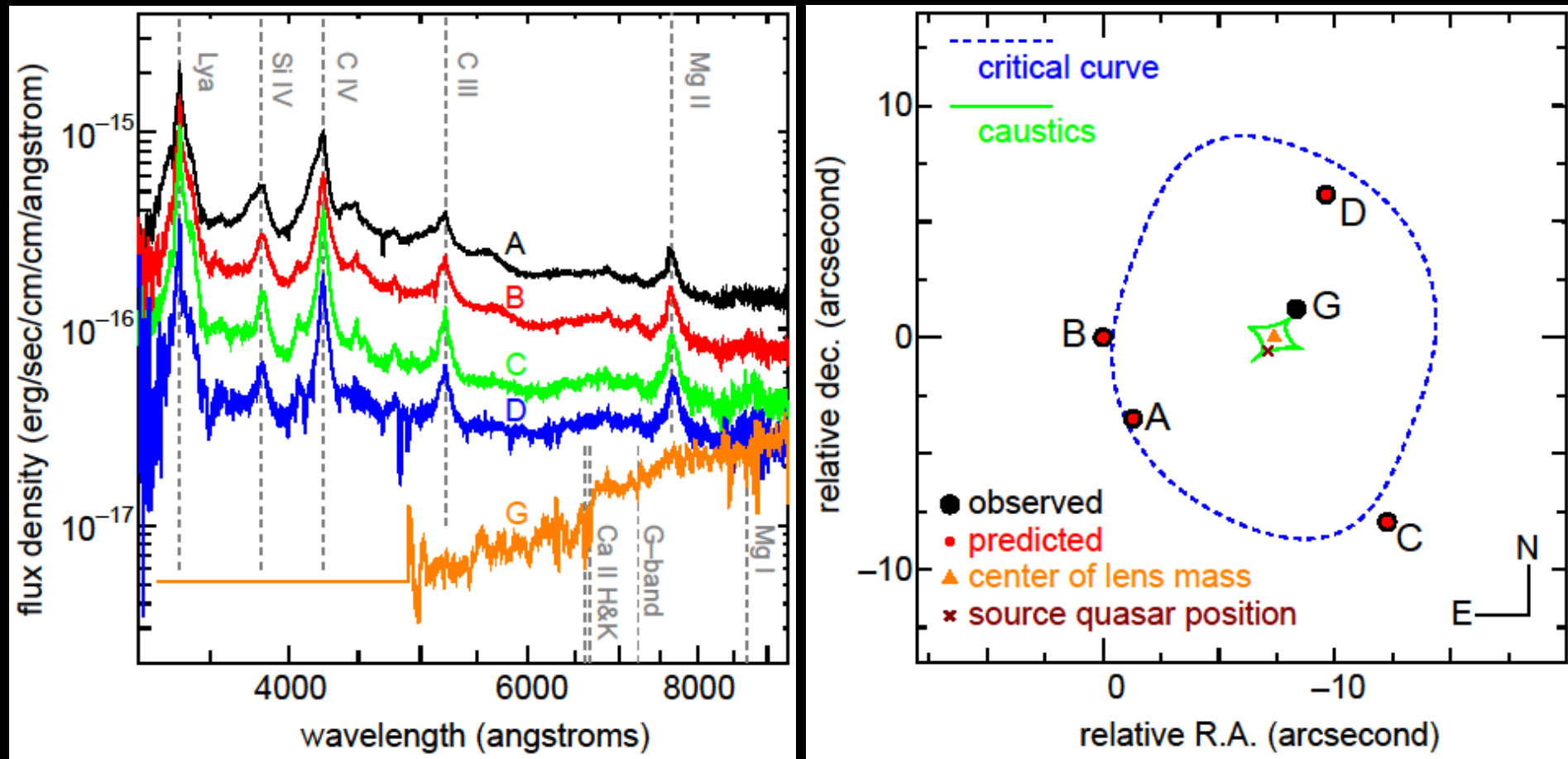


Galaxy Cluster SDSS J1004+4112  
HST ACS/WFC



10"

# SDSSJ1004: スペクトルとレンズモデル



**Inada et al. Nature 426 (2003) 810**



# 一般相對論的蟹氣樓



[http://hubblesite.org/gallery/album/the\\_universe\\_collection/pr2006023a/](http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe_collection/pr2006023a/)

Credit: ESA, NASA, K. Sharon (Tel Aviv University) and E. Ofek (Caltech)



# 宇宙を満たしているもの

- ダークマターは、光は出さないが互いに万有引力を及ぼすので空間的には凸凹分布
  - 銀河や銀河団はそのようなダークマターの塊の中心部に誕生
- ダークマターの存在は、光っているものだけが世界のすべてではないことを教えてくれる
- では、宇宙空間を完全に一様に満たすような成分(ダークエネルギー)は存在しないのか？
  - そもそもそのようなものがあっても観測できるのか？

# 一様なものをなぜ観測できる？

- 一般にものの検出は差分観測（≠絶対観測）
  - 天体：暗いところと光っているところの差
  - ダークマター：空間的な非一様性を天体をトレーサーとして力学的に検出
- もしもダークエネルギーが空間を完全に一様に満たしているとする、その検出には絶対観測が必要？
  - 時間領域での差分観測をすればよい
  - 宇宙膨張、宇宙の構造進化など観測量の時間進化を通じてダークエネルギーの存在を読み取る

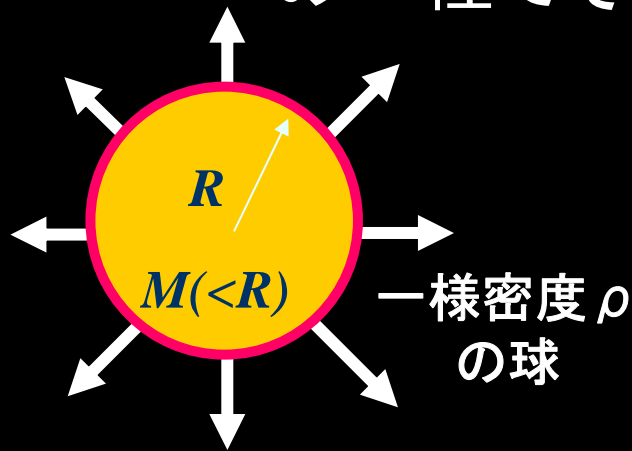
# 宇宙膨張の方程式

## ■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(< R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left( \frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

## ■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度  $\rho$  のみならず圧力  $p$  もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」( $\Lambda$  : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

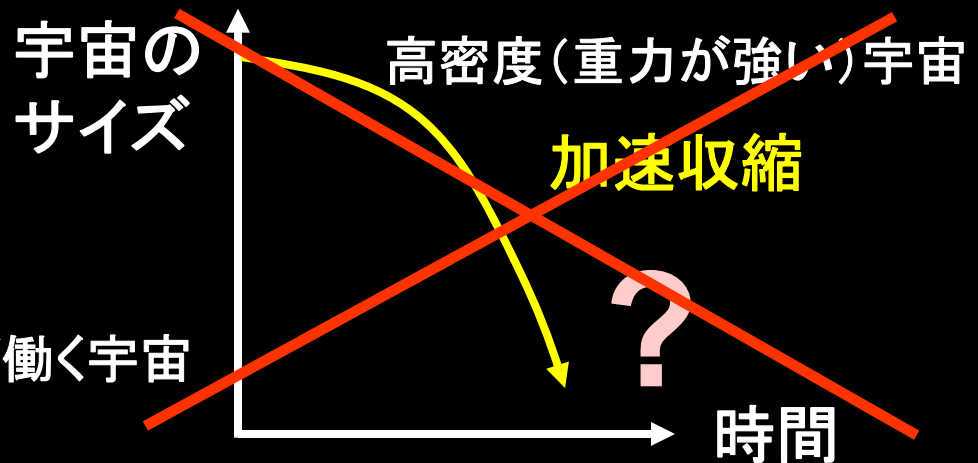
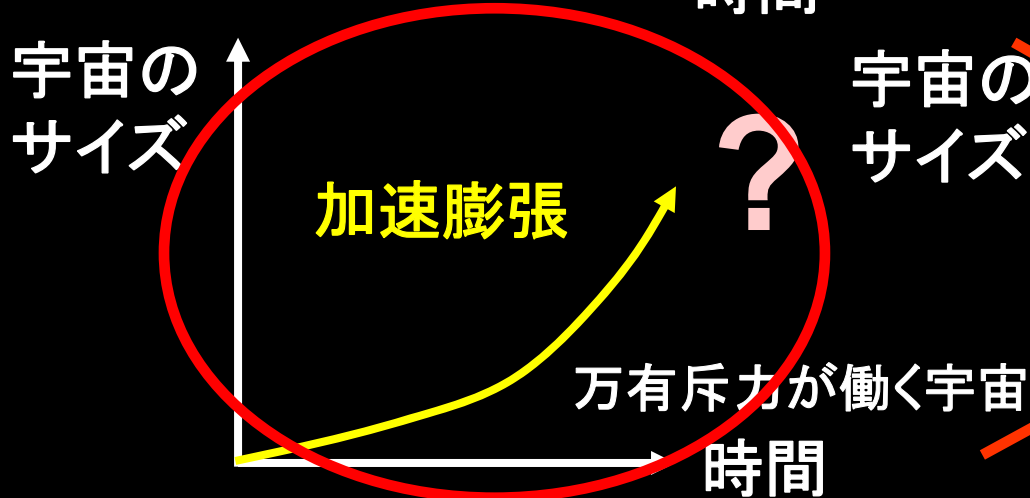
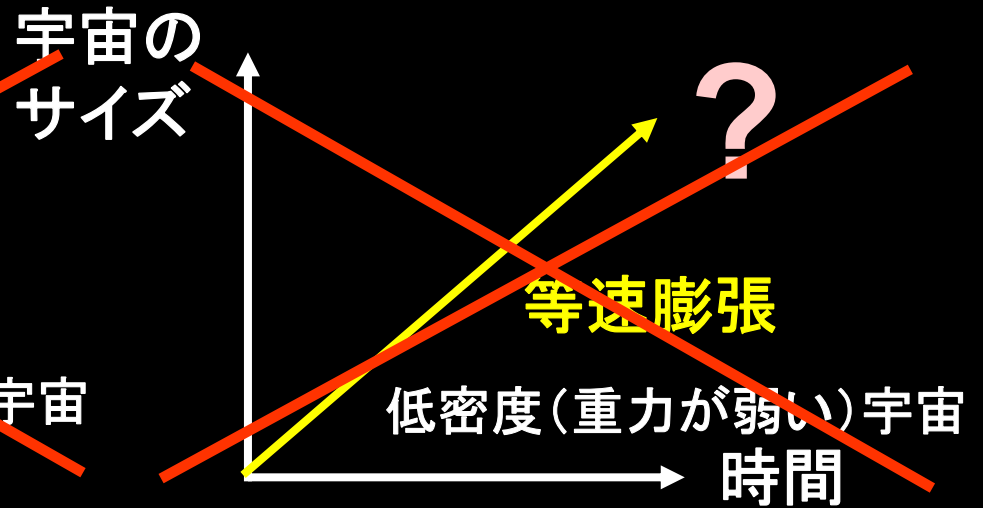
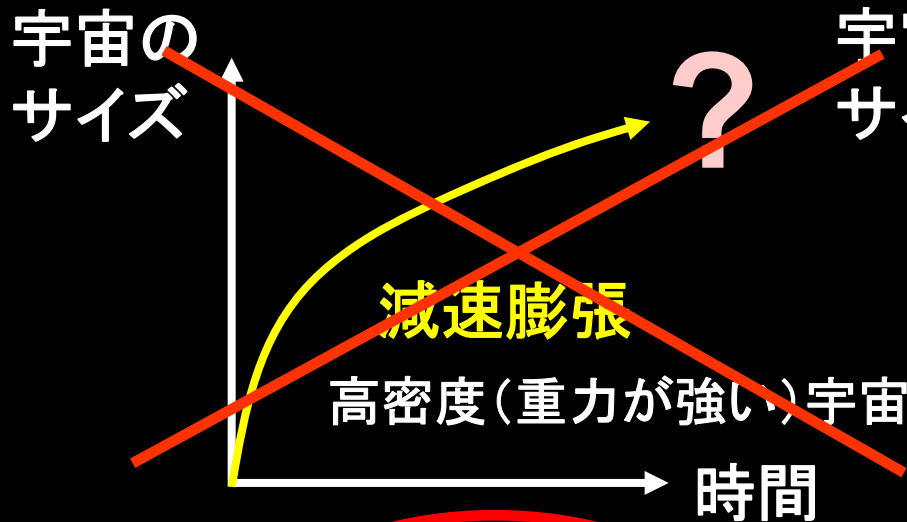


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \boxed{3p} - \frac{\boxed{\Lambda}}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

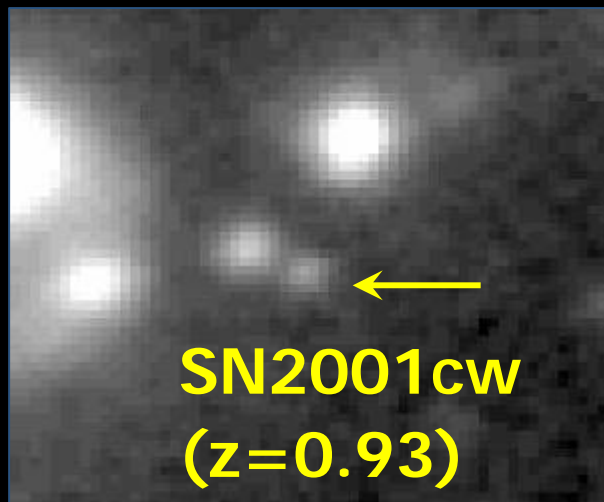
# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる



# 宇宙の標準光源(ろうそく): Ia型超新星

見かけの明るさ:  $F$



SN2001cw  
( $z=0.93$ )

真の明るさ:  $L$

Ia型超新星



距離:  $D$

超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



# 宇宙の加速膨張とダークエネルギー

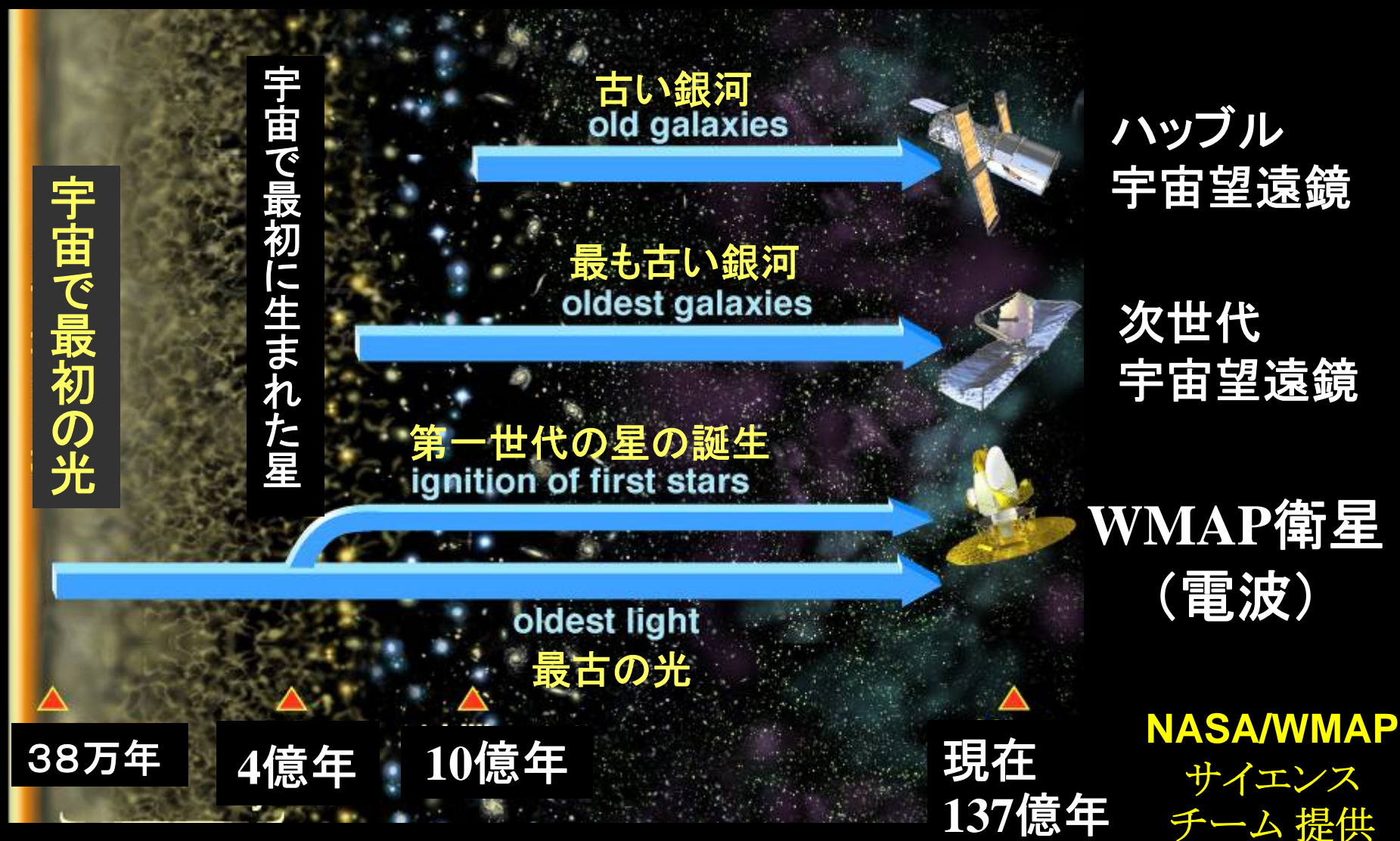
## ■ 宇宙の将来はどうなるか？

- 宇宙は膨張している（ハッブルの法則、1929年）
- さらに時間軸に沿った精密な観測をすることで膨張の加速度の符号がわかる
- 重力は常に引力なので当然減速するはず？
- しかし宇宙は「加速膨張」していた！（1998年）

## ■ 引力である重力を打ち消すことが必要

- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な結果
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（ダークエネルギー）??

# 衛星によってさらに過去の宇宙を探る

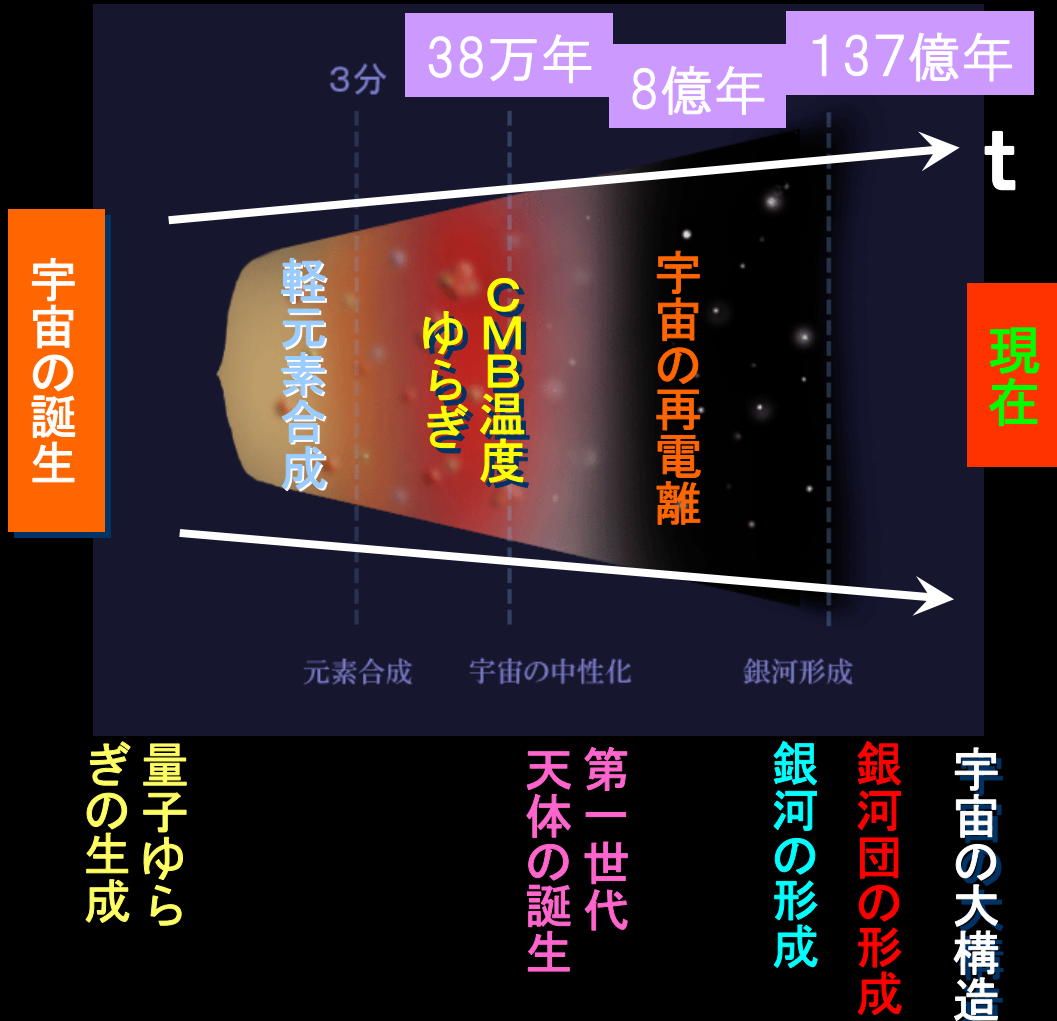


<http://lambda.gsfc.nasa.gov>



# 宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波



**CMB:**  
*Cosmic Microwave Background*

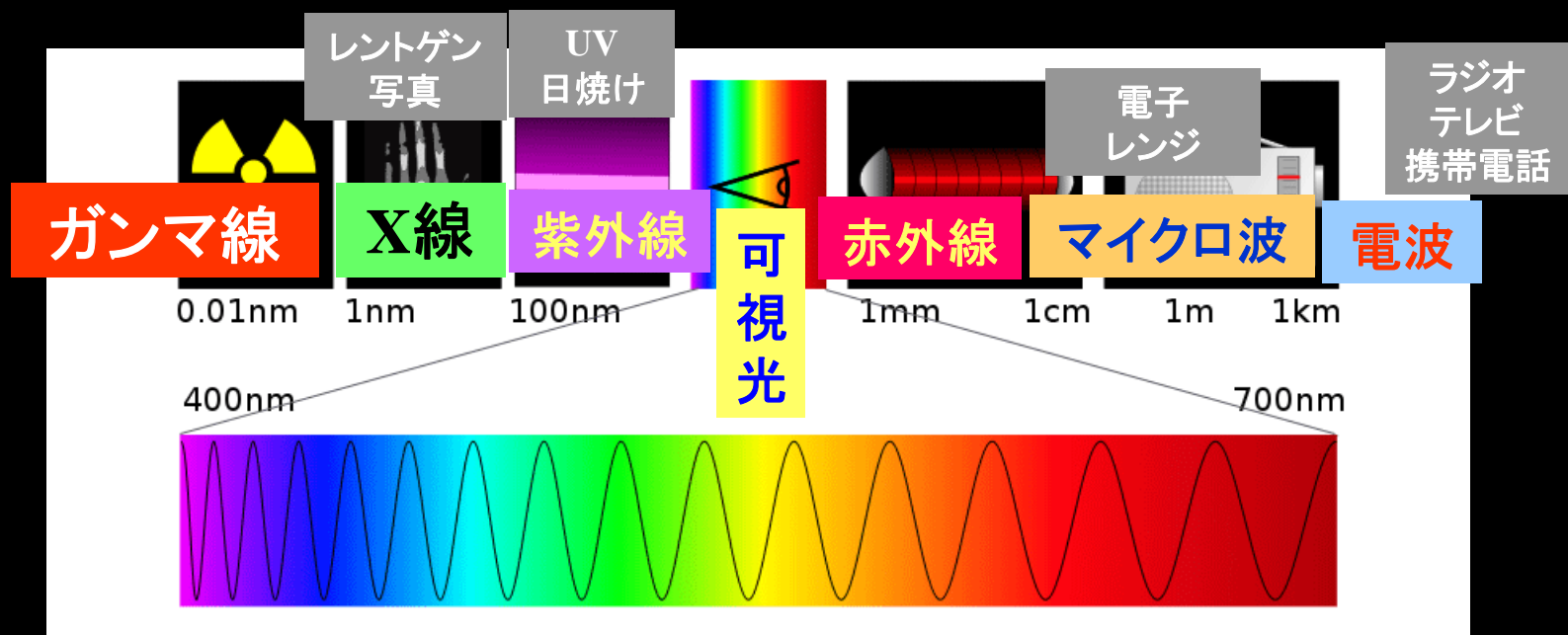
- 宇宙の晴れ上がり
  - 誕生から約38万年
  - 宇宙は電磁波に対して透明となる

# マイクロ波とは？：電磁波の名前と波長

光は波長に応じて異なる名前をもつ。

現代の天文学ではすべての波長を駆使した観測を行っている。

**マイクロ波：波長1mm(300GHz)-1m(300MHz)、極超短波とも呼ばれる**

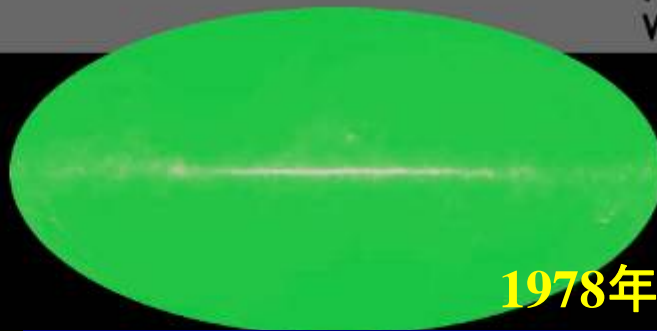
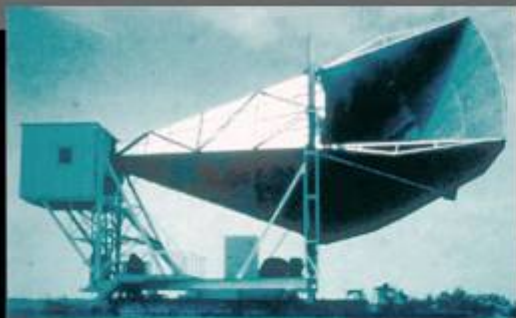


波長 [m]

# CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

1965

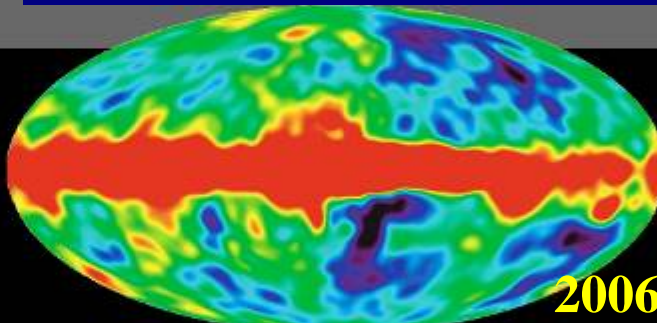
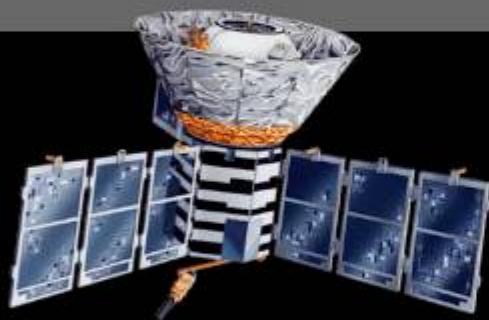
Penzias and  
Wilson



1978年ノーベル物理学賞

CMBの発見・宇宙の等方性

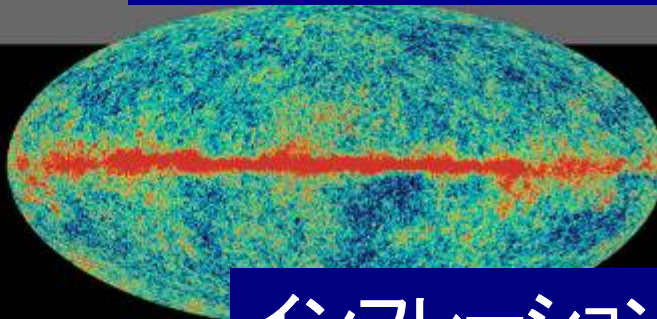
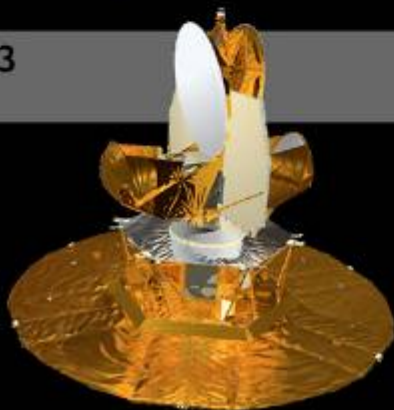
1992



2006年ノーベル物理学賞

10万分の1の非等方性発見

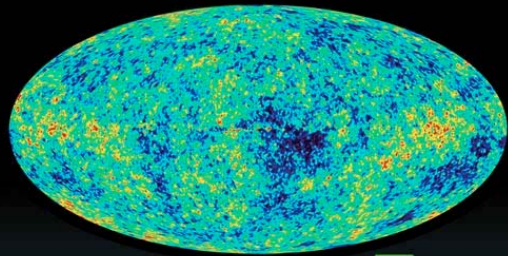
2003



インフレーション理論の検証

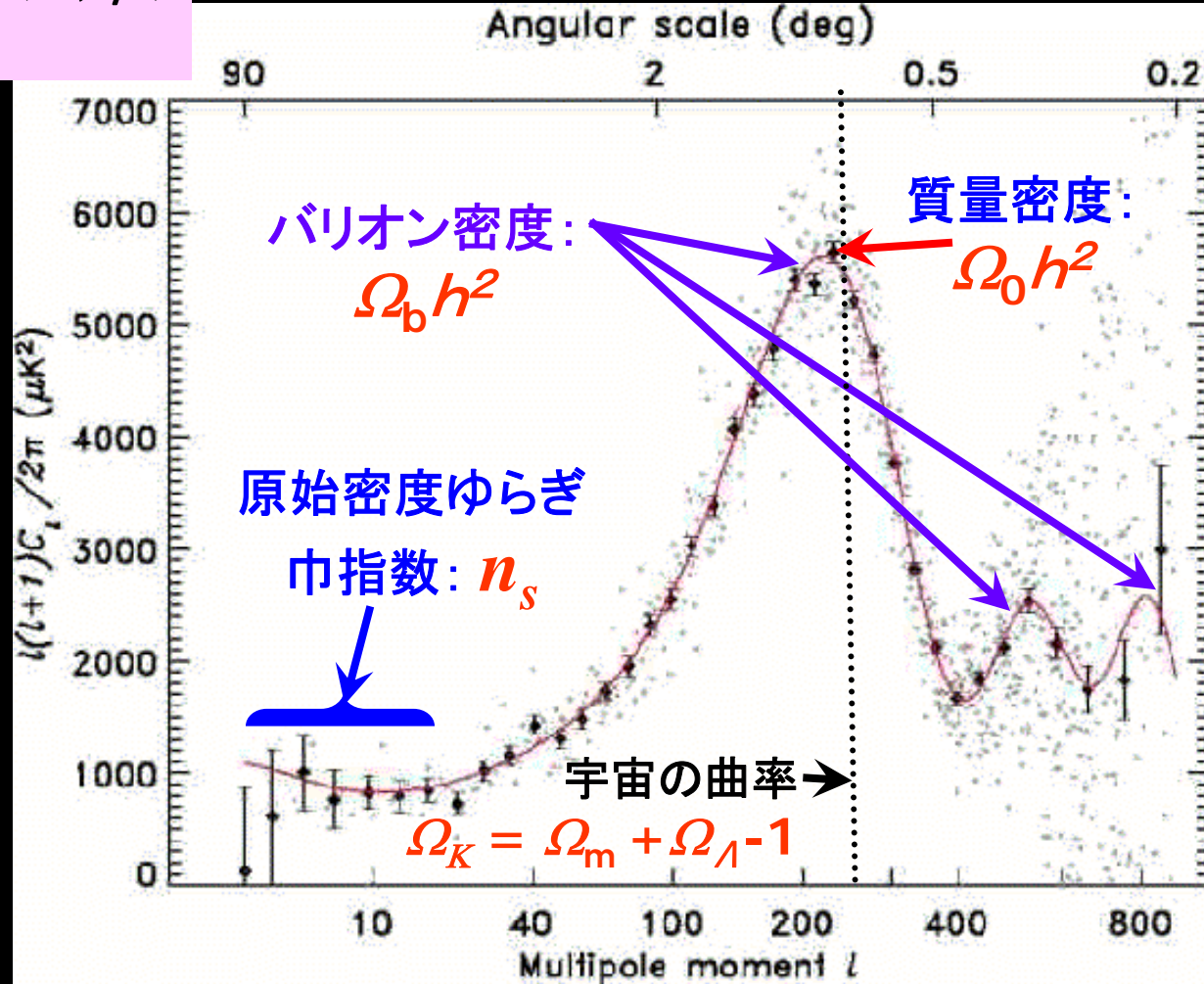
# WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.  
ApJS 148(2003)175

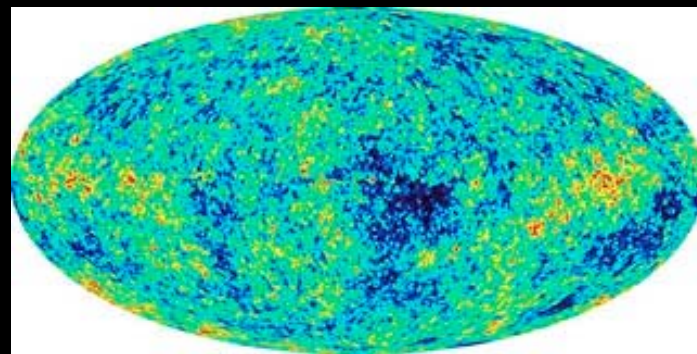




# 137億年前の古文書の解読方法

## ■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図



## ■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

## ■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

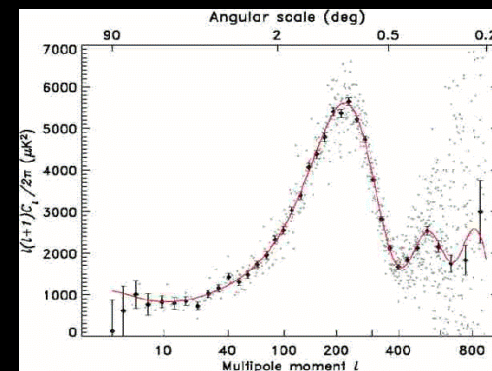
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

## ■ 古文書を理解するための文法

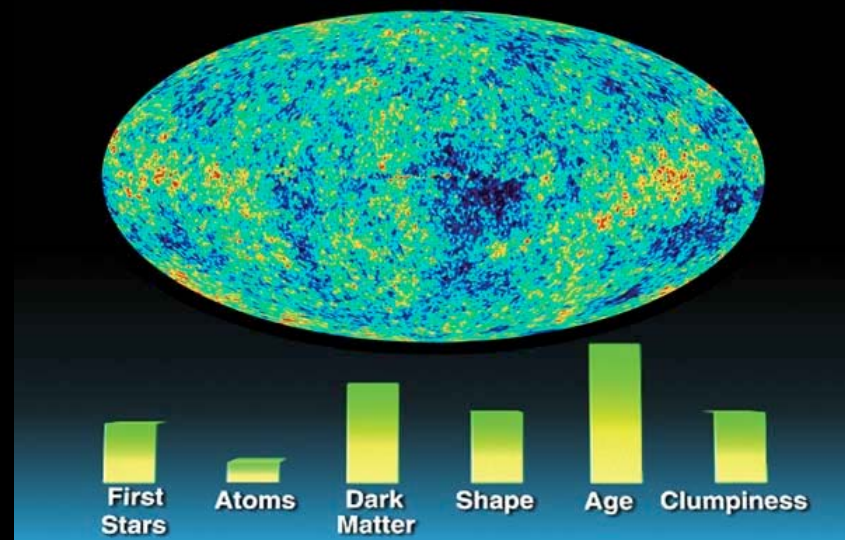
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

## ■ 夜空のムコウに隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



# 宇宙の古文書が 教えてくれたこと

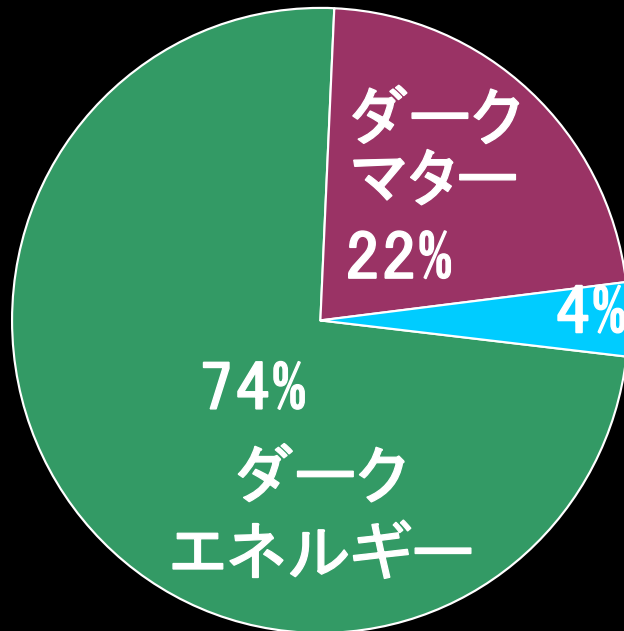


- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて4億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「ダークマター」
- 実はさらに、「ダークエネルギー」が宇宙を支配



# 宇宙は何からできている？

## 宇宙の組成



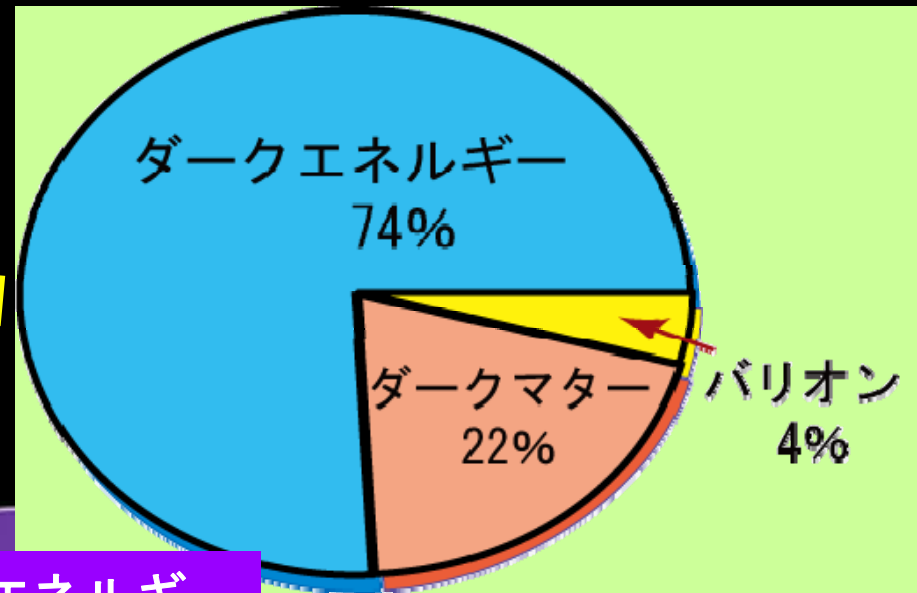
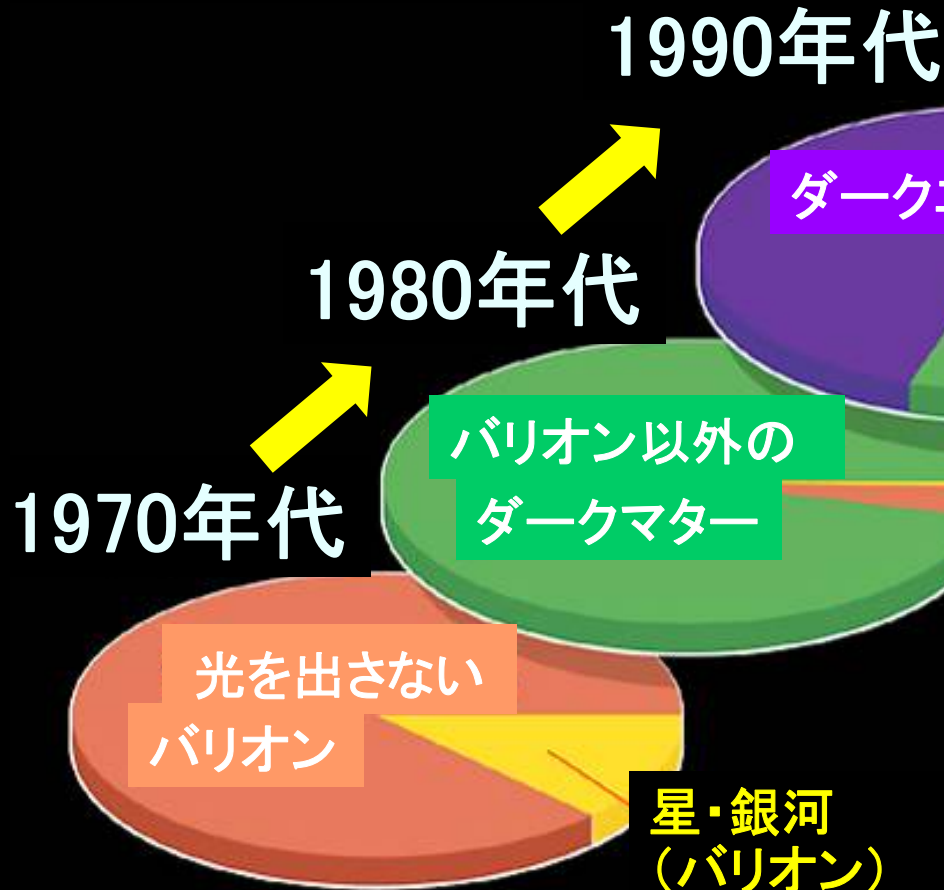
- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
- 未知の素粒子が正体？

## 通常物質(元素)

- 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素(陽子と中性子)からなる

- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？
- 宇宙空間を一様に満たしている
- ダークマターとは異なり空間的に局在しないが、宇宙の主成分

# 宇宙の組成観 の変遷

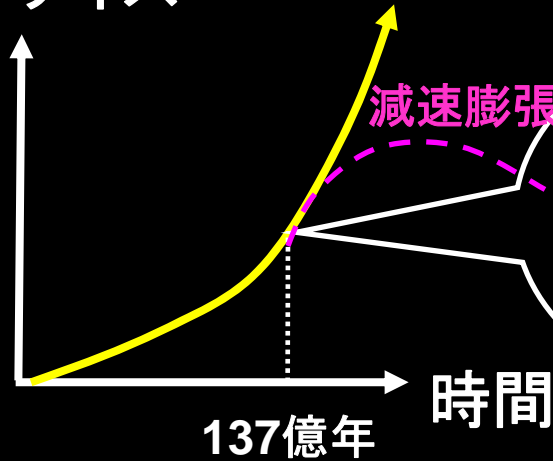


- **重力レンズ**:ダークマター
- **超新星**:ダークエネルギー
- **マイクロ波背景放射**:  
ダークマター、ダークエネルギー

# 宇宙の組成とダークエネルギー

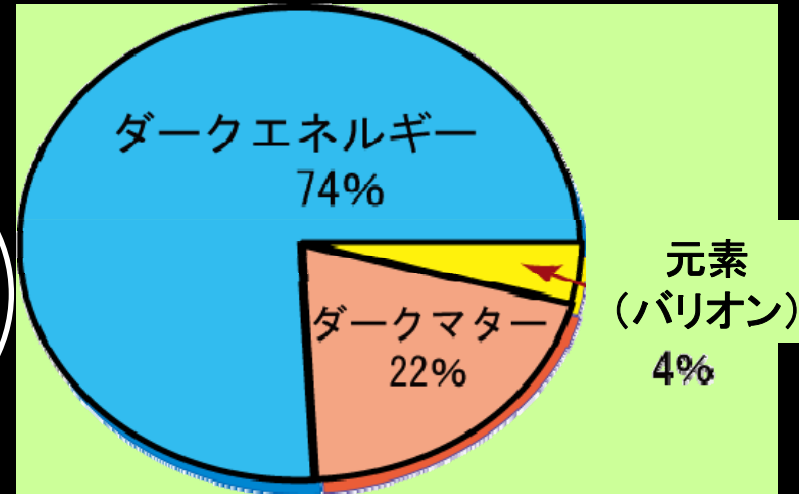
宇宙の  
サイズ

宇宙の加速膨張



減速膨張

万有斥力?  
宇宙定数?  
ダークエネルギー?  
一般相対論の破綻?



## ■ ダークエネルギーの正体は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
  - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
  - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
- 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

## ■ いずれであろうと21世紀の科学を切り拓く鍵