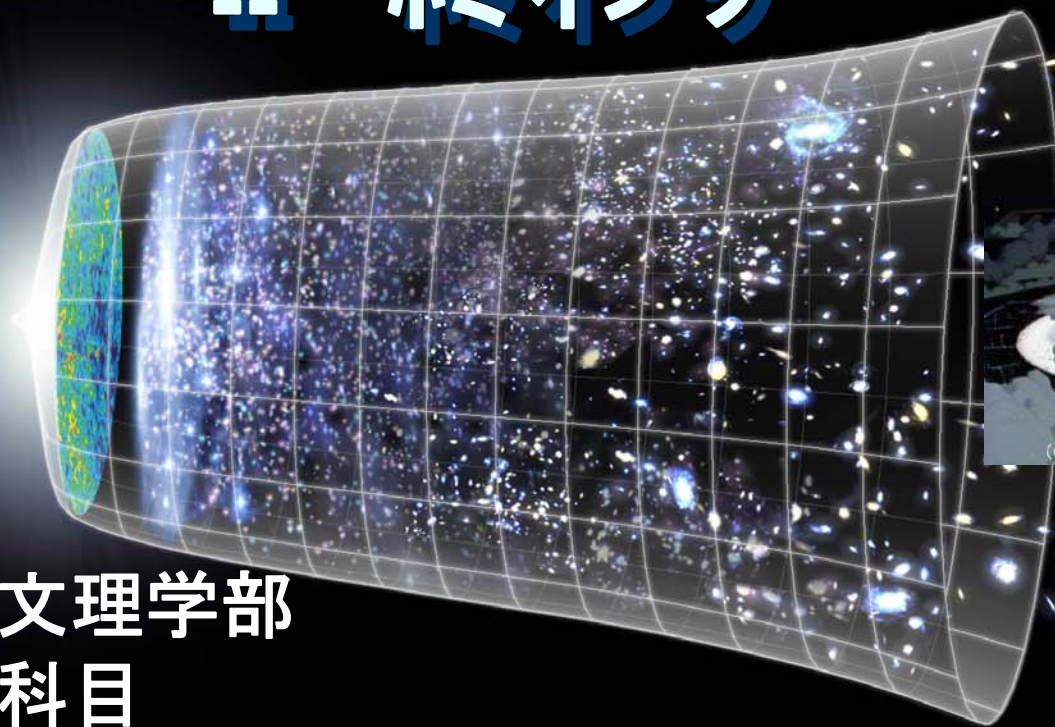


# 宇宙の始まりと終わり: II 終わり



日本大学文理学部  
総合科目

「始まりと終わり」

2006年4月17日 14:40-16:10



東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

# 前回の講義で学んだこと

1. 宇宙には始まりがある
  - ハッブルの法則と特異点定理
2. インフレーションが宇宙を大きく滑らかにした
  - 地平線問題と平坦性問題の解決、多重宇宙の存在？
3. 宇宙最初の3分間で合成された軽元素、およびその後約100億年にわたって星の内部で合成された重元素が我々の体の材料
  - 我々は星の子供、祖先はビッグバン宇宙とお星様
4. 初めの「光」の時代の後、物質間の重力によって宇宙の階層構造が形成され、137億年の今に至る
  - 宇宙マイクロ波背景輻射

# 今回の講義の目的

1. 宇宙の「終わり」を考える
2. 「宇宙の未来」が、現在の宇宙から(ある程度)予想できる理由を理解する
3. 宇宙の加速膨張と宇宙の組成を結びつけて理解する
4. どのような「宇宙の未来」が予想されているのかを概観する

# 1. 「宇宙の終わり」を考える



(C)1988マッシュルーム/アキラ製作委員会

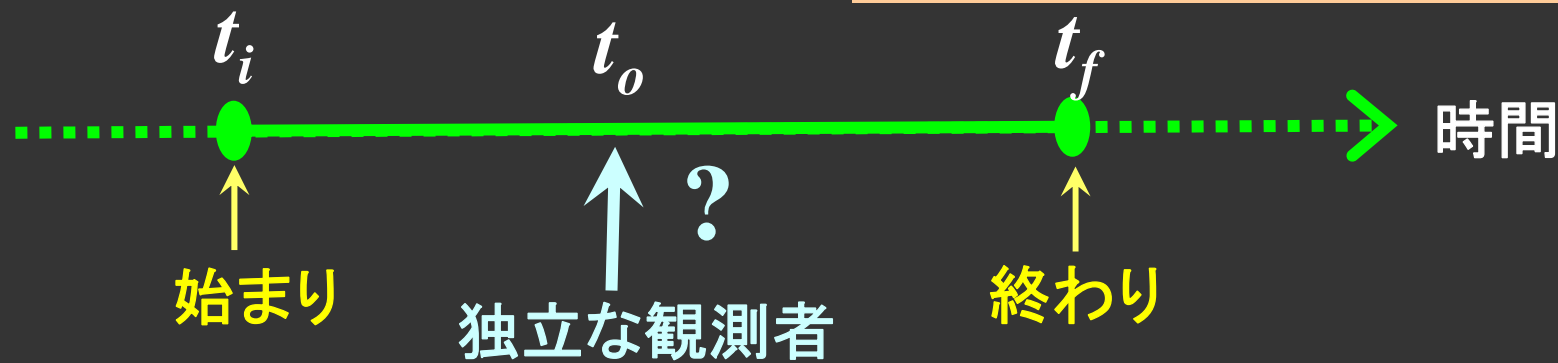
# 宇宙に終わりはあるか？

- 「始まり」があるのならば、「終わり」もあるはず
- 「終わり」という言葉の意味
  - **地球の終わり**： 太陽の寿命は約100億年。つまり、後50億年ほどすると、太陽は地球の公転軌道ほどのサイズの赤色巨星になる。当然、地球は飲み込まれてしまう。
  - **文明の終わり**： 人類(文明)はそれよりはるか以前に、疫病、核戦争、資源の枯渇などによって実質的に消滅しているであろう。
  - **宇宙の終わり**：
    - 宇宙膨張の力学がすべてを決める
    - 無限に膨張を続ける ⇔ 宇宙の密度が0に漸近する空虚な宇宙？
    - やがて収縮に転じる ⇔ 初期特異点のように密度が発散し、それ以後の時間発展が記述できない宇宙？

# 物事の寿命を予言できるか？

- 物事に明確な始まりと終わりがある場合、その終わりの時期を予想できるか？
- 我々が特別な存在でない限り、我々自身の経験を平均値とみなせる
- つまり、始まりから今までの時間と、これから終わりまでの時間はほぼ等しいはず
  - 95パーセントの確率で

$$\frac{\Delta t_{\text{過去}}}{39} < \Delta t_{\text{未来}} < 39\Delta t_{\text{過去}}$$



“Implications of the Copernican principle for our future prospects”  
J.R.Gott Nature 363(1993)315

# 我々の文明の余命を予測する

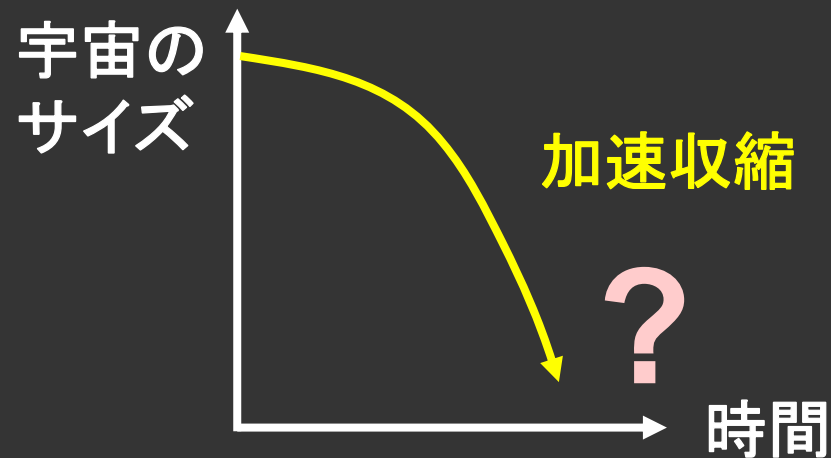
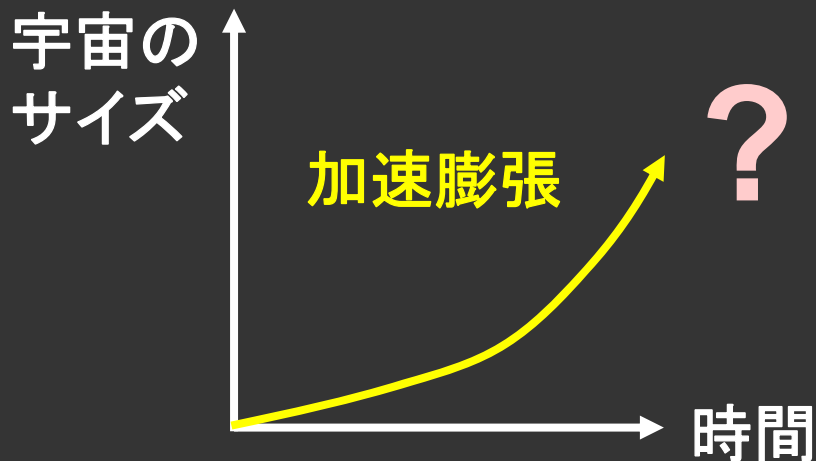
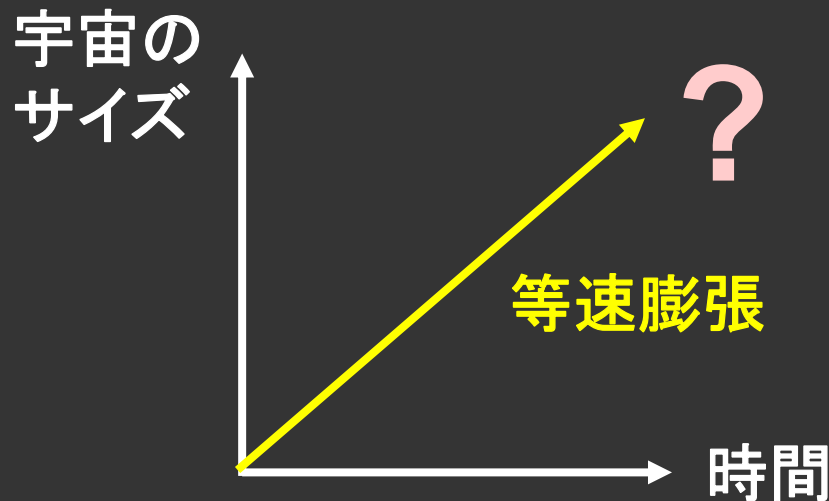
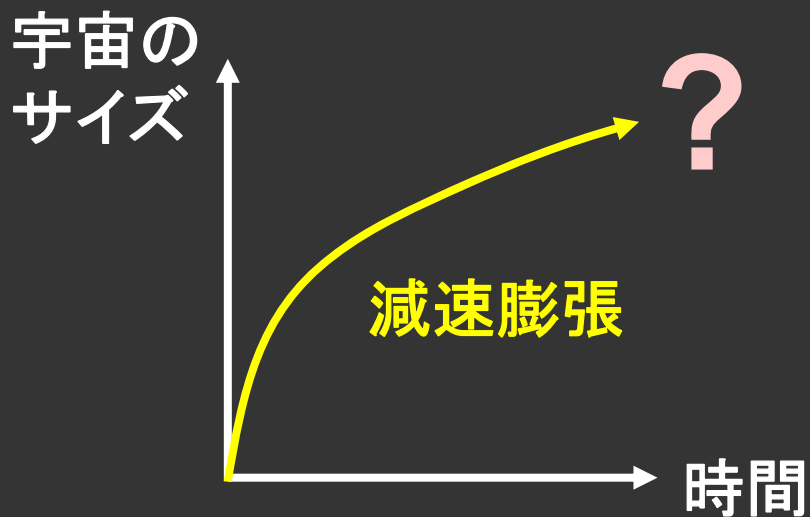
- 地球が誕生して約46億年。約50億年以内に、膨張した太陽に飲み込まれることがわかっている
- 去年できたベンチャー企業が翌年つぶれても驚くには値しないが、江戸時代から続いた老舗が来年つぶれる可能性は低い
- 毎年無数のインスタントラーメンが発売されてはきえていくが、チキンラーメンやチャルメラのような昔ながらの銘柄はずっと生き残っている
- 私は昭和33年生まれであるが、昭和は64年間で終わった
- 例えば文明が誕生してから  $\Delta t^{\text{過去}} \doteq 2000$  年とすれば、我々の文明が終わるまでの時間は95パーセントの確率で

$$\frac{\Delta t^{\text{過去}}}{39} < \Delta t^{\text{未来}} < 39 \Delta t^{\text{過去}}$$



$$50 \text{年} < \Delta t^{\text{未来}} < 8 \text{万年}$$

## 2. 宇宙の未来が予想できる理由





# 古典力学的世界観

- 古典力学で記述される物理系はニュートンの運動方程式に従うので、原理的には未来は予測可能

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(t)$$

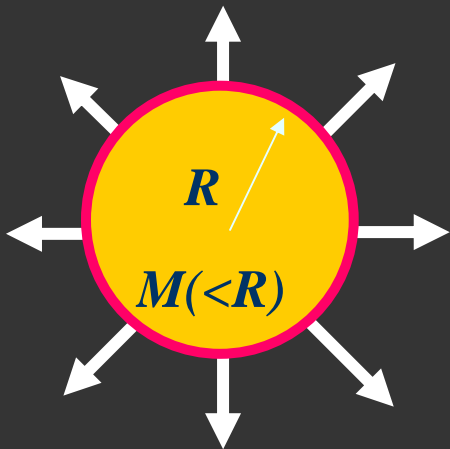
- 時間に関する2階の微分方程式なので、初期の位置と速度が与えられればその後の運動は一意的に決まる
- ただし、量子論的な系の時間発展は決定論的ではなく、本質的に確率的性質を持つ
- また古典力学系であっても初期条件のごくわずかな違いが大きく増幅される系(複雑系、カオス系)もあり、その場合、未来は実質的には予測不可能
- そもそも宇宙はニュートンの運動方程式にしたがうような力学系とみなせるのか？

# 膨張宇宙の運動方程式

- ニュートン力学による球殻の運動方程式

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

- 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ
  - 質量密度のみならず圧力もまた重力源となる
  - 万有斥力に対応する「宇宙項」( $\Lambda$ )が存在し得る



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

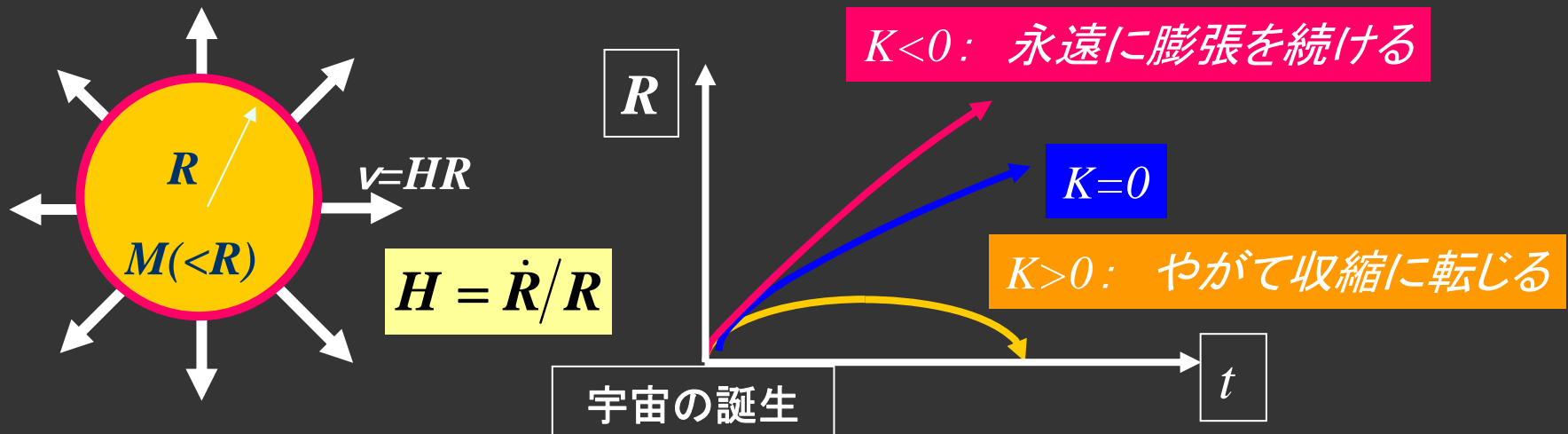
フリードマン方程式

# ニュートン力学的宇宙モデル

- 一様密度球の“半径”の時間変化
- 解釈は別として一般相対論的一様等方宇宙モデルのフリードマン方程式と厳密に一致

$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} \equiv -\frac{K}{2}, \quad M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$
$$\Rightarrow \dot{R}^2 + K = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2$$

$G$ : ニュートンの重力定数  
 $M$ : 半径 $R$ 内の球の質量  
 $K$ : 系の全エネルギー(定数)  
 $\rho$ : 半径 $R$ 内の平均質量密度



# 相対論的一様等方宇宙モデルの 運動方程式: フリードマン方程式

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



フリードマン方程式

$$\underline{H^2(t)} = \left( \frac{\dot{a}(t)}{\underline{a(t)}} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \underline{\rho(t)} - \frac{\overbrace{K}^{\text{宇宙の曲率}}}{a^2(t)} + \frac{\overbrace{\Lambda}^{\text{宇宙定数}}}{3}$$

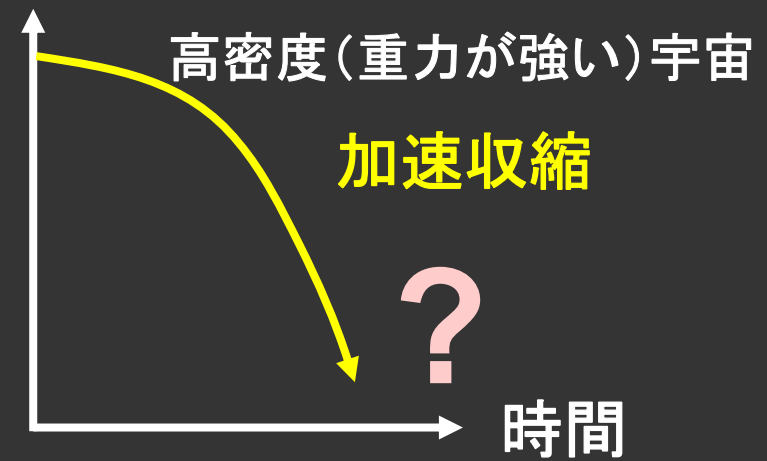
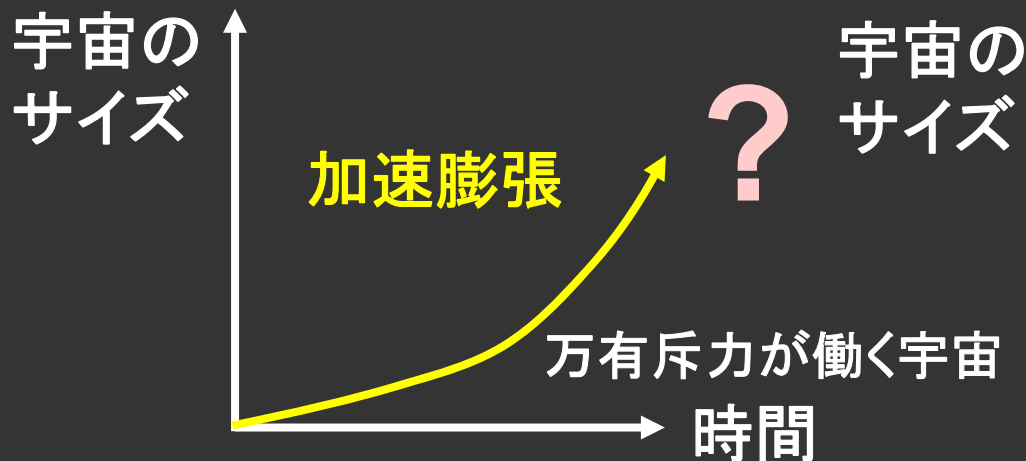
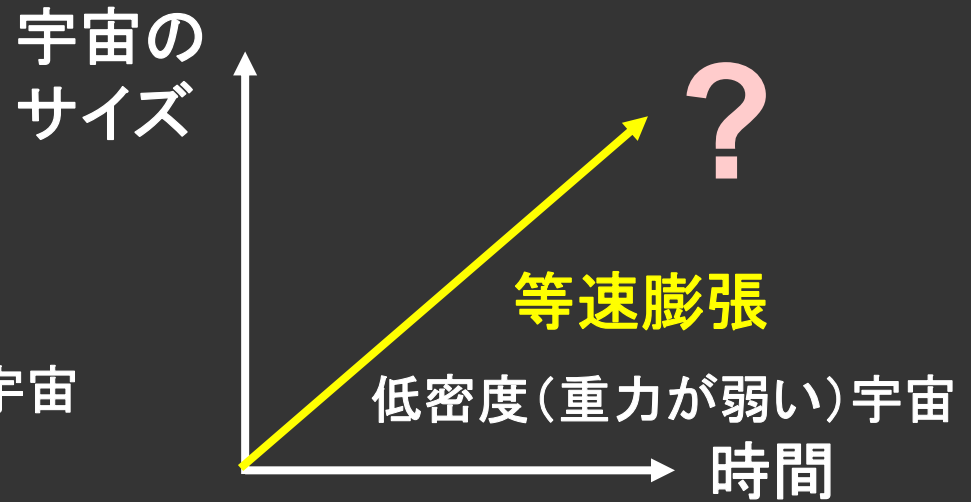
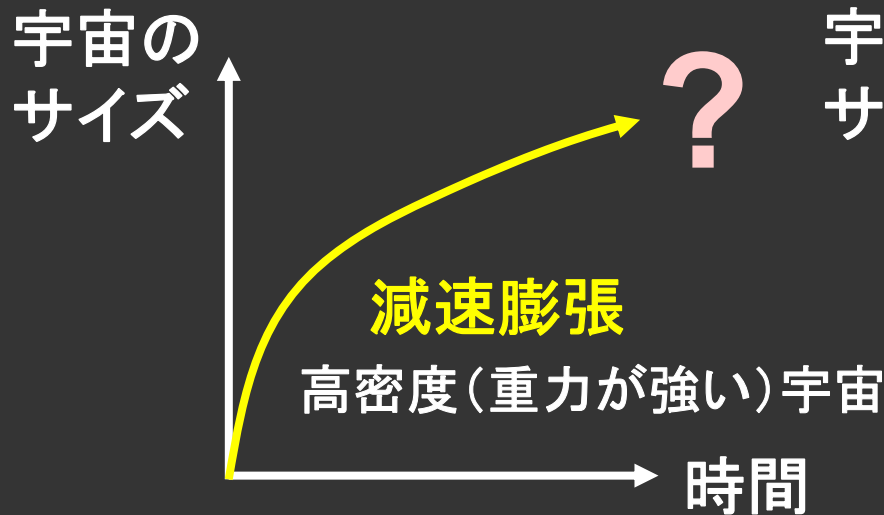
ハッブルパラメータ

スケールファクター

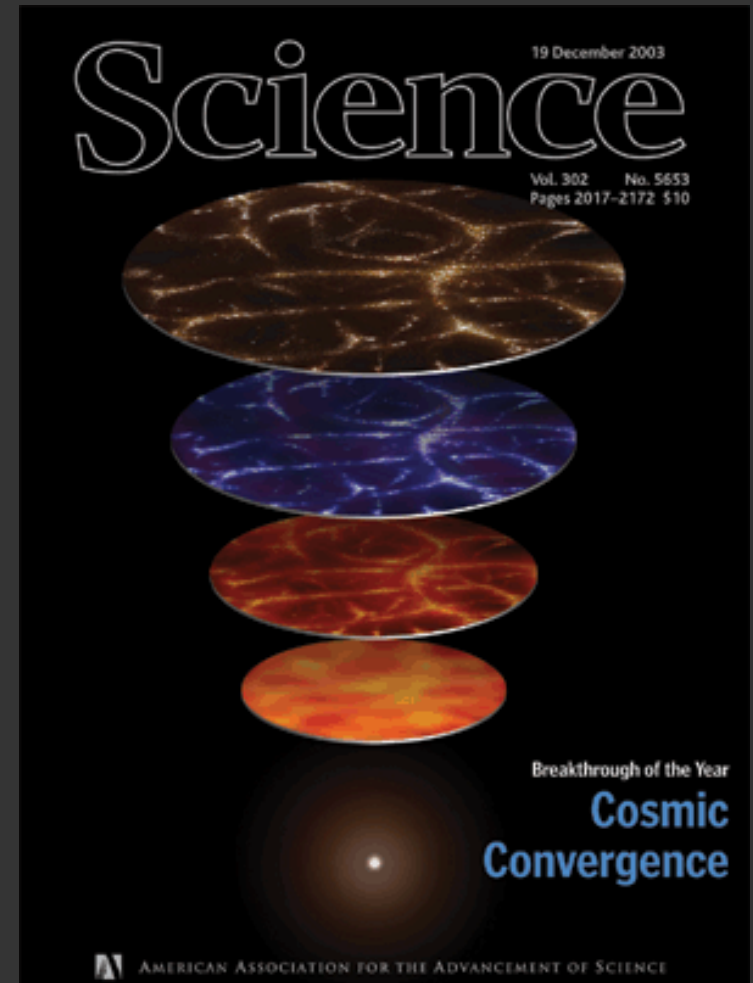
平均質量密度

# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙の構造とその進化の観測を通じて、宇宙の組成が決定できれば未来が予測できる



# 3. 宇宙の加速膨張と宇宙の組成



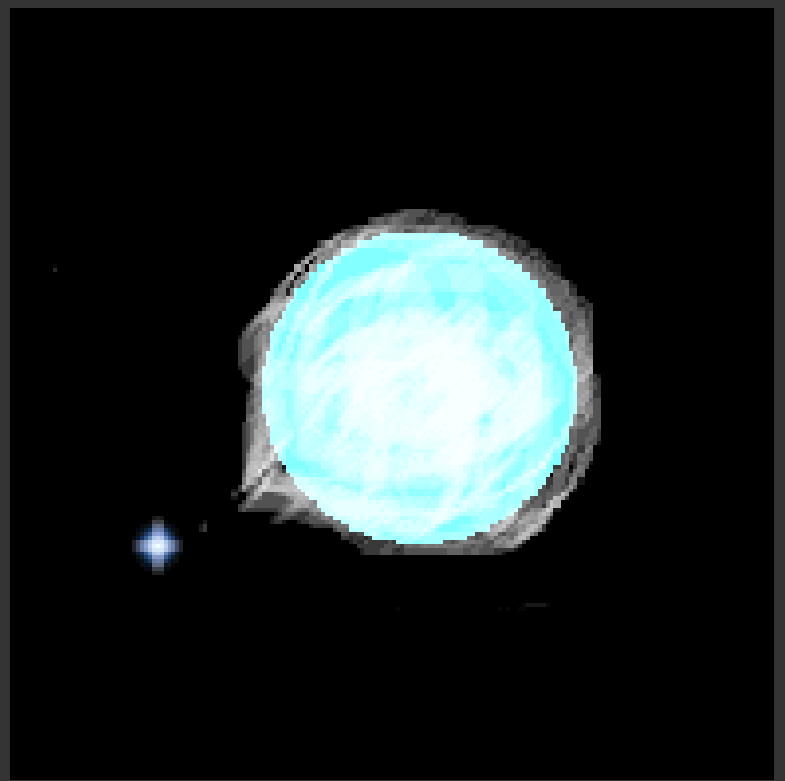
米国の科学雑誌Scienceが選んだ「その年の大発見」(breakthrough of the year)  
1998年 宇宙の加速膨張、2003年 宇宙の暗黒エネルギー

# 宇宙膨張の未来と暗黒エネルギー

- 宇宙は膨張している(ハッブルの法則、1929年)
- 将来はどうなるか?
  - 宇宙膨張の加速度の符号を観測する
- 負の加速度、つまり減速する?
  - 重力は常に引力なのであたりまえ
    - やがて密度が十分小さくなり、加速度が0の等速膨張
    - 膨張が遅くなりやがて収縮に転ずる
- 正の加速度、つまり膨張がさらに加速する?
  - 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
  - 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な可能性
  - にもかかわらず観測的に証明されている
  - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(暗黒エネルギー)の存在

# Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる連星系の進化の最終段階

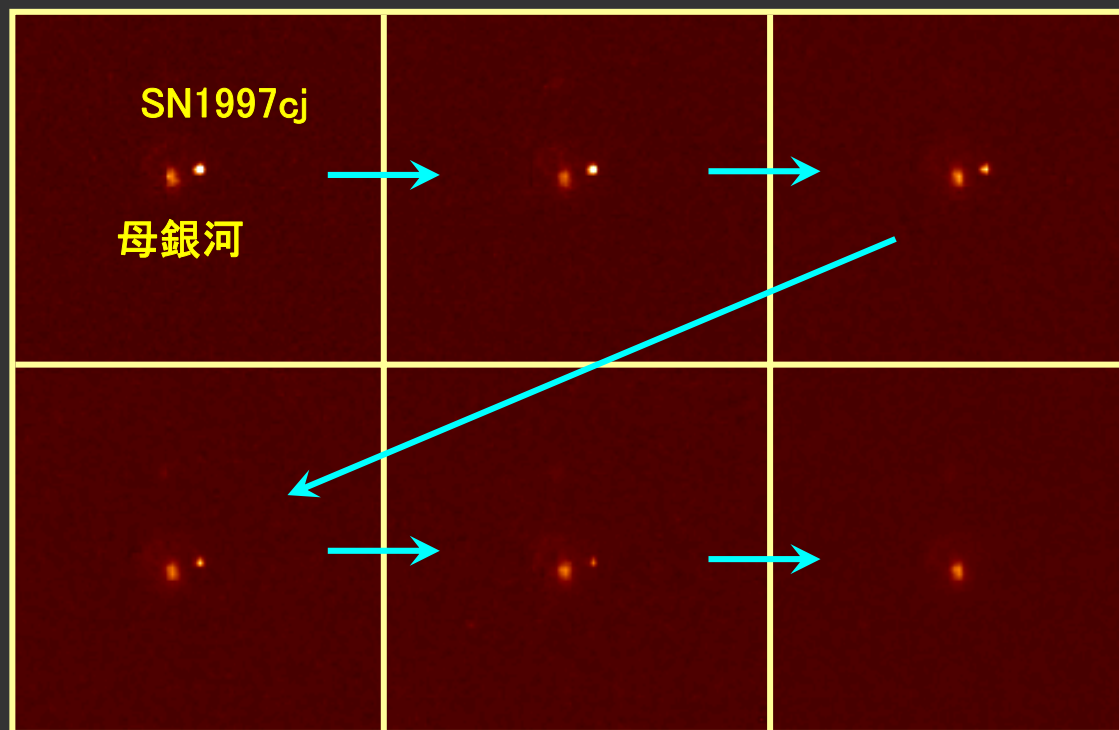


- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ場合
  - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力支える)には、安定に存在できる最大質量がある
  - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
  - これを越えると不安定となり爆発を起こす

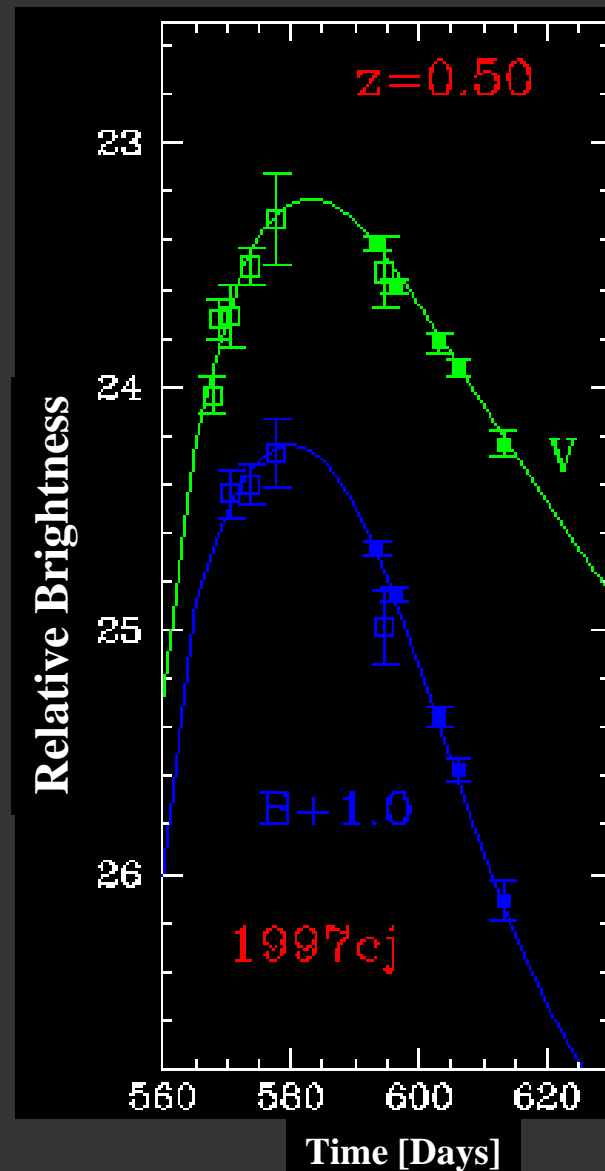


# Ia型超新星の光度曲線の測定

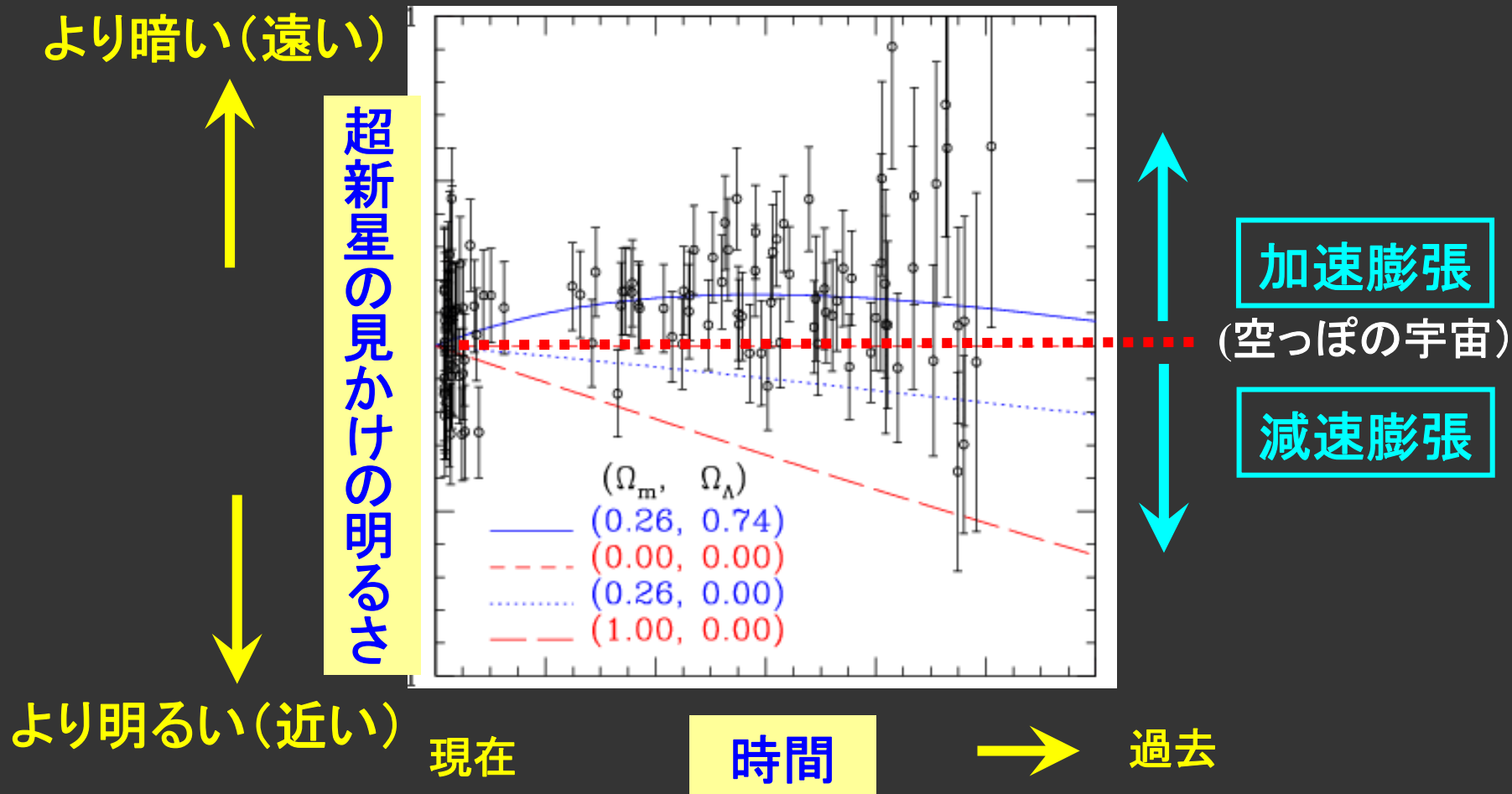
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



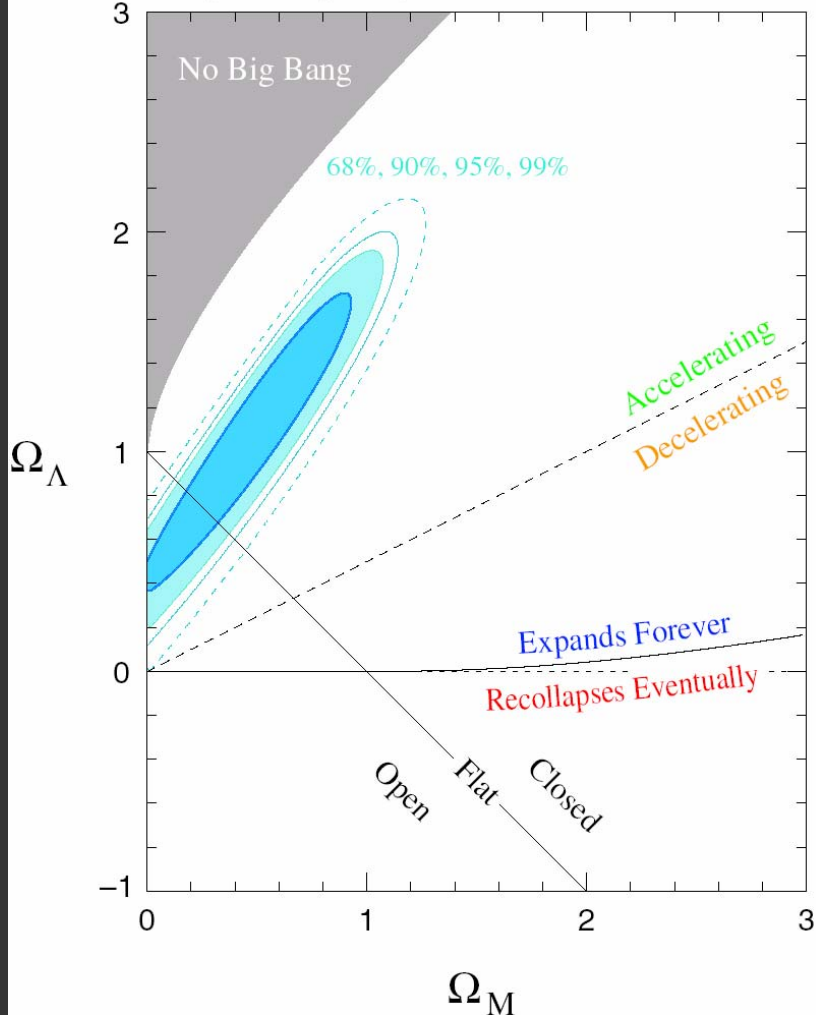
# 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！ (1998年)

# 超新星と宇宙定数/暗黒エネルギー

Supernova Cosmology Project  
Knop et al. (2003)

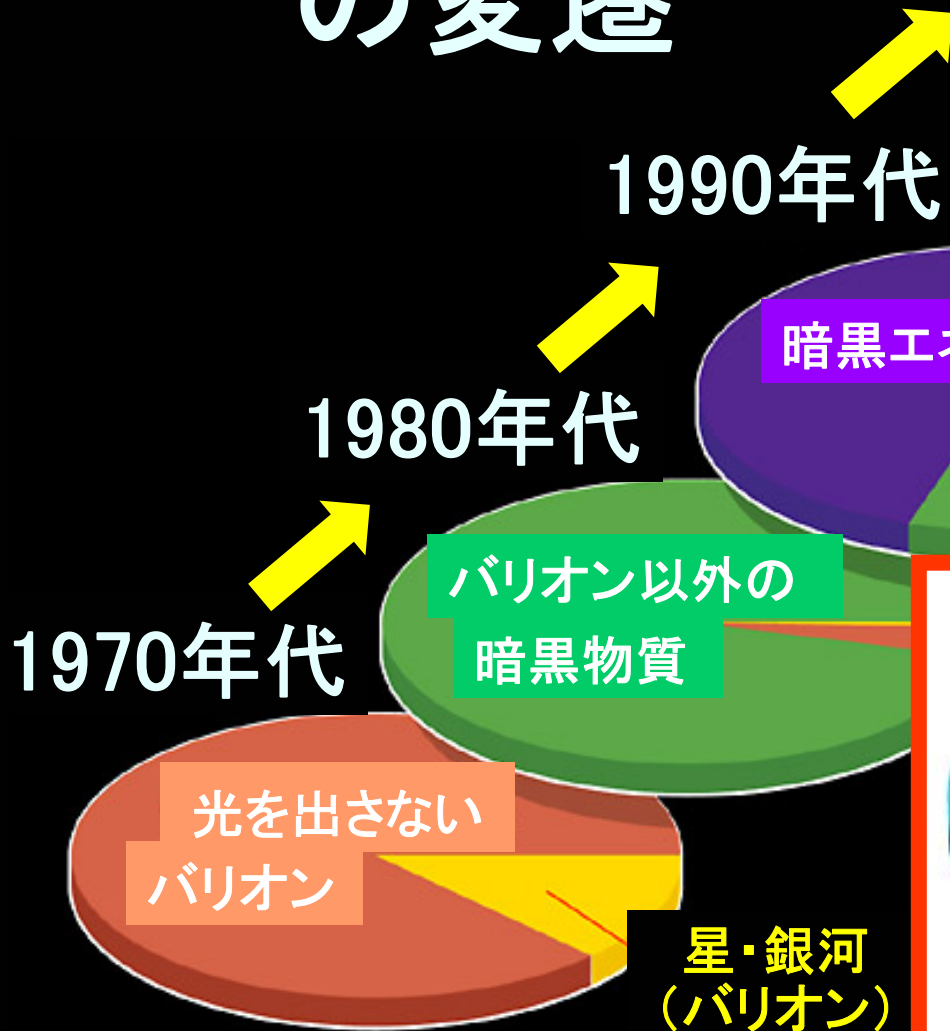


- 超新星の観測から得られた宇宙の物質と暗黒エネルギーの存在量
- 全エネルギーを1として
  - $\Omega_m$  : 通常の重力を及ぼし宇宙を減速膨張させる物質の存在量
  - $\Omega_\Lambda$  : 万有斥力を及ぼし宇宙を加速膨張させる物質(アインシュタインの宇宙定数、暗黒エネルギー)の存在量
- $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$ であれば現在の宇宙は加速膨張

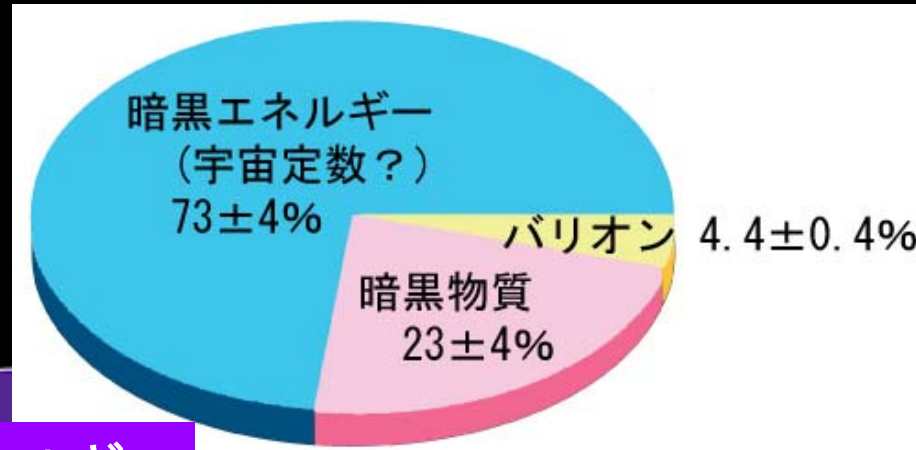
# 宇宙の暗黒エネルギー

- 暗黒物質とは異なり、空間的に局在しない
  - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみたしている
- その重力は、実効的に「万有斥力」
  - 1917年にアインシュタインが導入した宇宙定数はその一例
  - 暗黒物質以上にその正体は不明
- 現代版エーテルとも言える
- 暗黒エネルギーは、いまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべ

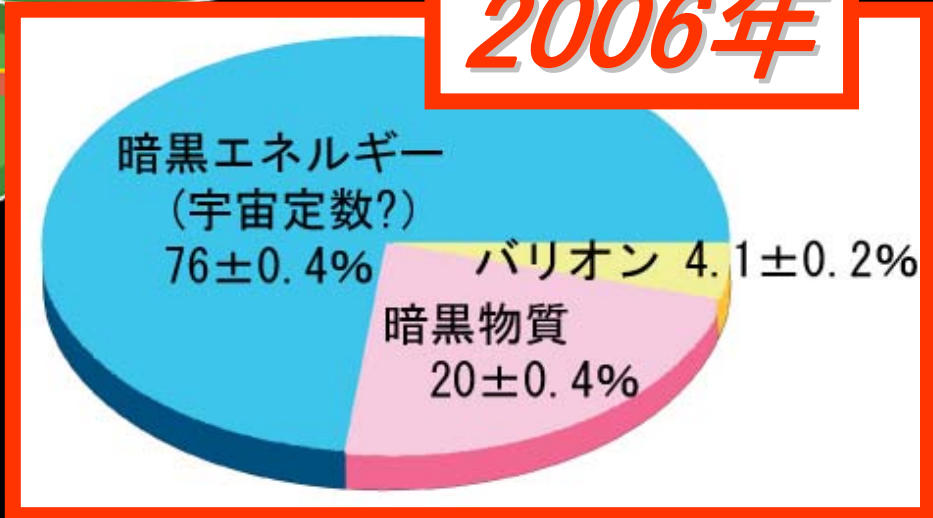
# 宇宙の組成観 の変遷



2003年



**2006年**



# 宇宙観は本当に進歩したか？

古代エジプト



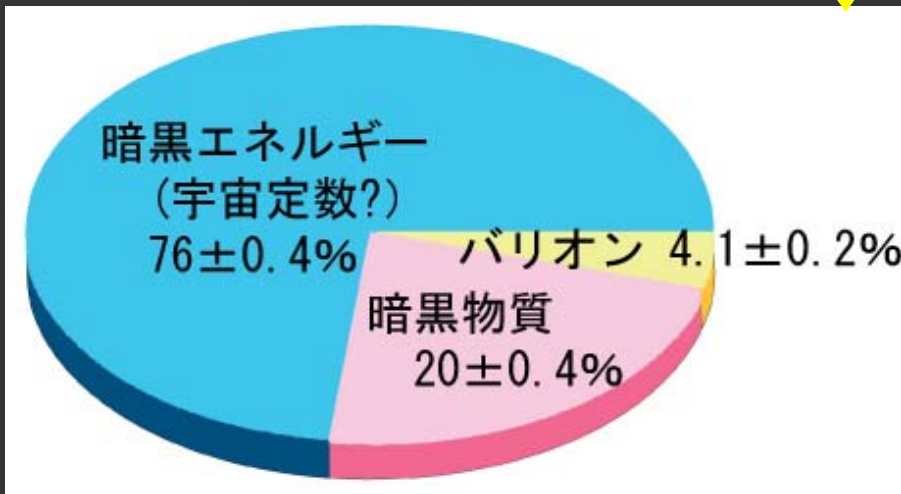
古代中国



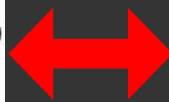
古代インド



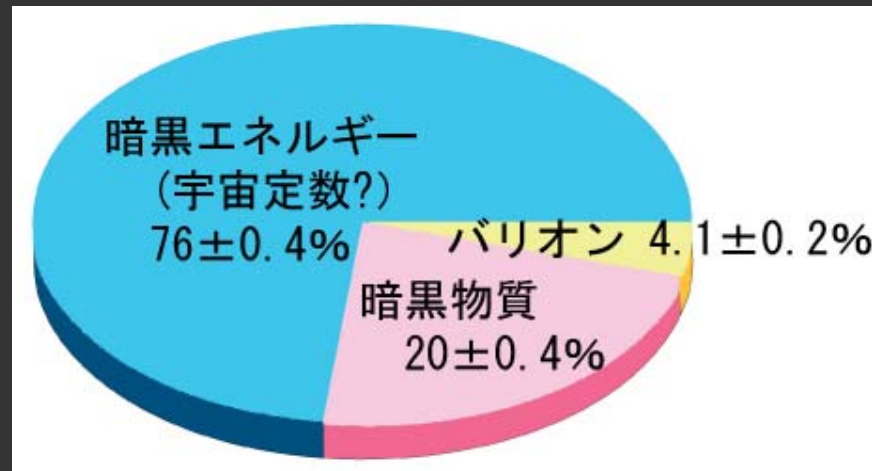
2006年



進歩？



# 研究の進展によつて ますます謎が深まった

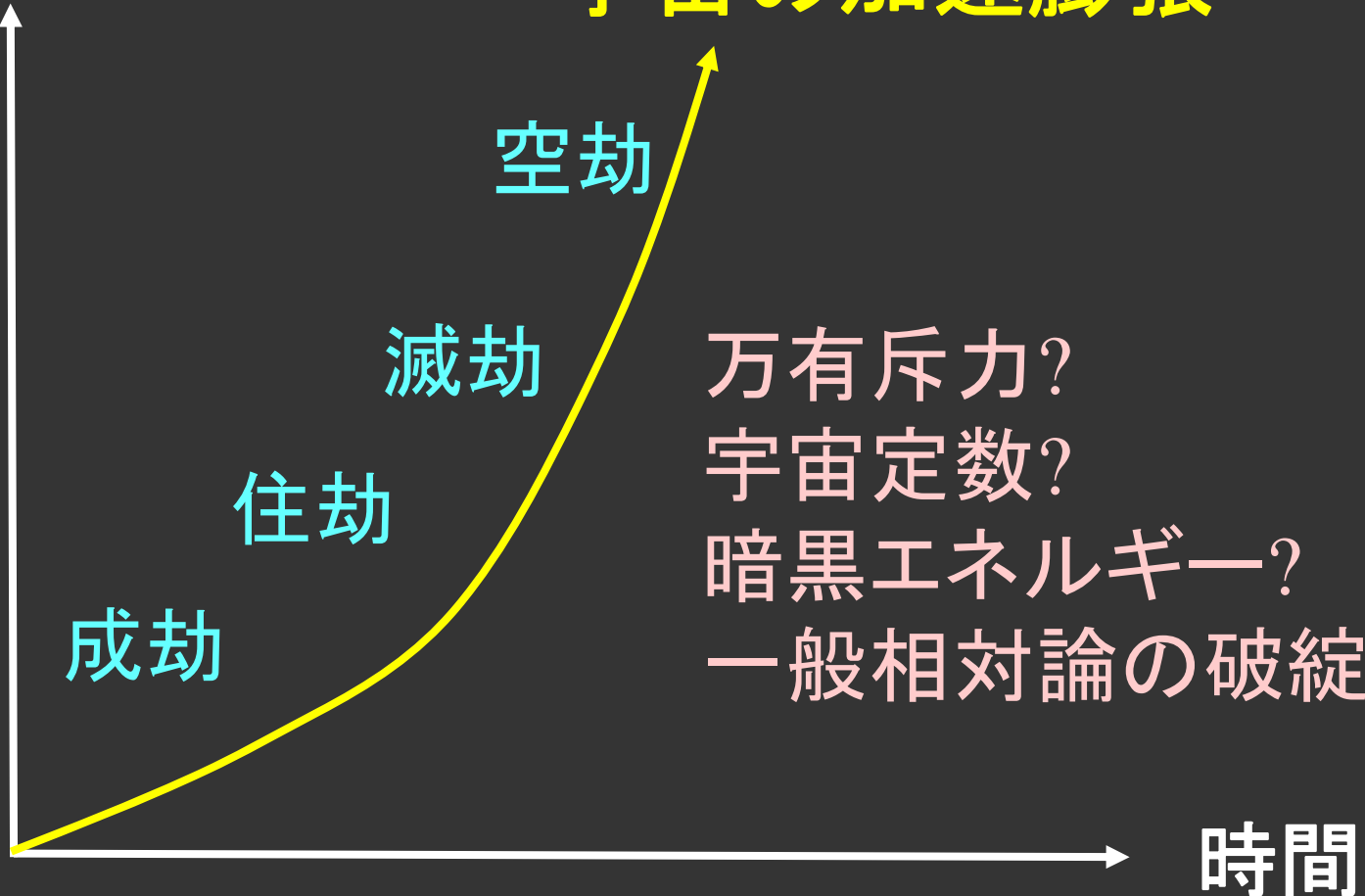


- 20世紀の微視的物理学の飛躍的進展により、「通常の物質」に対する深い理解が得られた
- しかしこの「通常の物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかない
  - **宇宙の果ての観測が微視的世界の未知の階層を発見した**
  - 宇宙の約20%は暗黒物質、約76%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96%を全く理解していない**
- 暗黒物質の直接検出、および暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

# 4. 宇宙の未来

宇宙のサイズ

宇宙の加速膨張





# 加速膨張の果て

- 宇宙は現在加速膨張している
- これからさらに加速的な膨張を続ける可能性が高い
- 再び収縮することはない
- 密度と温度は下がる一方であり、活動性は低下するだけ
- 静かな老後を迎える

# 天体の最終状態

## ■ 恒星

- 低密度では新たに星が形成されることはない。既存の星は、核燃料を消費し尽くした後、大部分の質量を失って、雲散霧消、あるいは白色矮星・中性子星・ブラックホールとなる。

## ■ 惑星系

- 惑星自身の寿命はないが、地球は太陽の進化の影響で飲み込まれてしまう。木星以遠の惑星は直接飲み込まれることはないが、太陽系の近くを通る他の星の重力で弾き飛ばされてしまう可能性がある。

## ■ 物質

- 通常物質を構成する陽子は実は安定ではなく、陽電子、光子、ニュートリノなどに崩壊する(寿命は $10^{33}$ 年以上)。したがって、これ以上の時間が経過すると、白色矮星や中性子星のなかの陽子が崩壊し、出てきた陽電子が電子と対消滅することでかろうじてエネルギーを生み出す。

# 宇宙の未来の年表

- 50億年後
  - 太陽が一生を終え、地球を飲み込む
- 10兆年後
  - ほとんどの星が燃料を使い果たして死ぬ
- $10^{30}$ 年後
  - 銀河がすべて中心ブラックホールに飲み込まれる
- $10^{33}$ 年後
  - 銀河団がすべて中心ブラックホールに飲み込まれる
- $10^{37}$ 年後
  - 物質を構成している陽子が崩壊
- $10^{98}$ 年後
  - 銀河サイズのブラックホールが蒸発
- $10^{131}$ 年後
  - 現在観測されている宇宙全体を含むブラックホールが蒸発

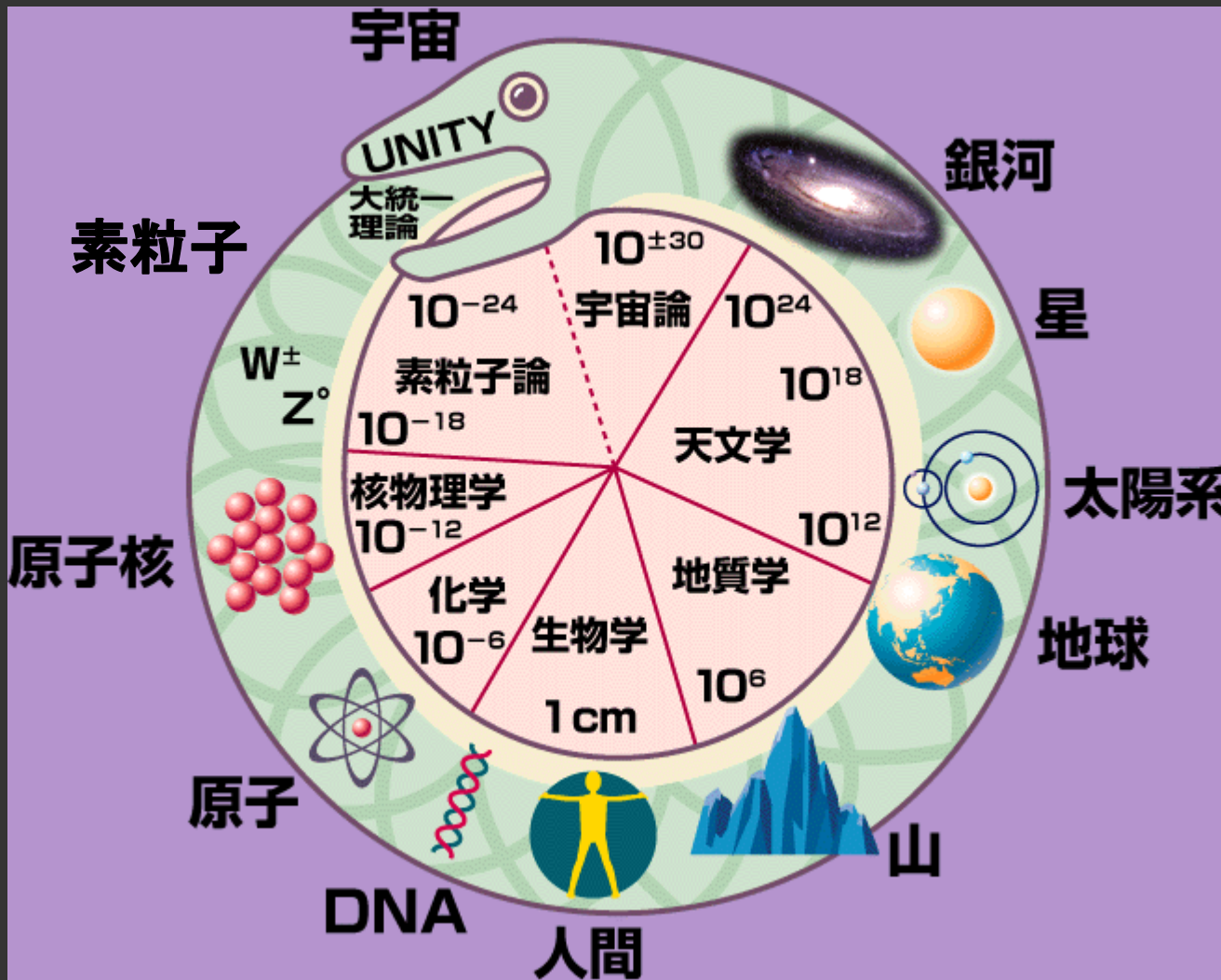
# 仏教的宇宙史観：四劫と億劫

- **四劫：世界の成立から破滅に至るサイクル**
  - **成劫**：世界の成立から、人間が住み、地獄から色界天までが成立する期間
  - **住劫**：人類が世界に安穩に存在する期間
  - **壊劫**：世界の破滅に至る期間
  - **空劫**：次の世界が成立するまでの何もない期間
- **一劫は43億2000万年に対応する**
  - **宇宙の年齢137億年**から考えると、現在は壊劫の終わりから空劫の初めに対応！
  - 勉強が「**億劫**」だ、とは、43垓年( $4.3 \times 10^{21}$ 年)かかるほど大変という途方もない意味なので注意！

# 今回の講義で学んだこと

1. 宇宙の終わりは(ある程度)予測できる
  - 現在の宇宙を正確に理解することが本質的
2. 現在の宇宙は加速膨張している
  - 第2のインフレーション期と呼ばれることもある
  - 万有斥力をおよぼすような暗黒エネルギーが宇宙を満たしている?
  - 宇宙論スケールでは一般相対論が厳密には適用できず、重力法則がずれている?
3. 過去10年間で宇宙の組成観は急速に進歩した
  - 76パーセントが暗黒エネルギー、20パーセントが暗黒物質、我々をつくっている普通の物質は残りわずか4パーセント
  - それらの根本的解明は21世紀科学の重要課題

# 自然界の階層：マイクロとマクロをつなぐ



- 宇宙の大きさは約 $10^{27}$ cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは $10^{-24}$ cm以下
- 約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とが宇宙の研究を通じてより深く理解されつつある

シeldon グラシヨー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成

# 今回の講義のまとめ

この講義ファイルは

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2006j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2006j.html)

からダウンロード可能

- **宇宙の始まりと終わりが、宗教や哲学とは関係なく科学的に議論できる時代になった**
  - 宇宙初期のインフレーションを起こしたのは、ある種の真空のエネルギーであると考えられている
  - 宇宙加速膨張、さらにその将来の鍵を握る暗黒エネルギーもまたある種の真空のエネルギーかもしれない
- **我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった**
- **宇宙は始まりも終わりも暗黒エネルギーに支配されている： ミクロとマクロの世界の接点、新たな物理学の鍵**