

# アインシュタインから 100年後の宇宙像

佐賀大学工学部物理科学科  
船久保 公一



## 内容

1. 膨張する宇宙
2. 宇宙を満たす電磁波
3. ビッグバン宇宙論
4. 宇宙の膨張則
5. 最新の観測と宇宙の年齢
6. おわりに



# 1. 膨張する宇宙



- どの方向を見ても同じような星空
- 毎年、同じ位置に同じ星（星座）

3

夜空をよく見ると



星が一様に分布

4

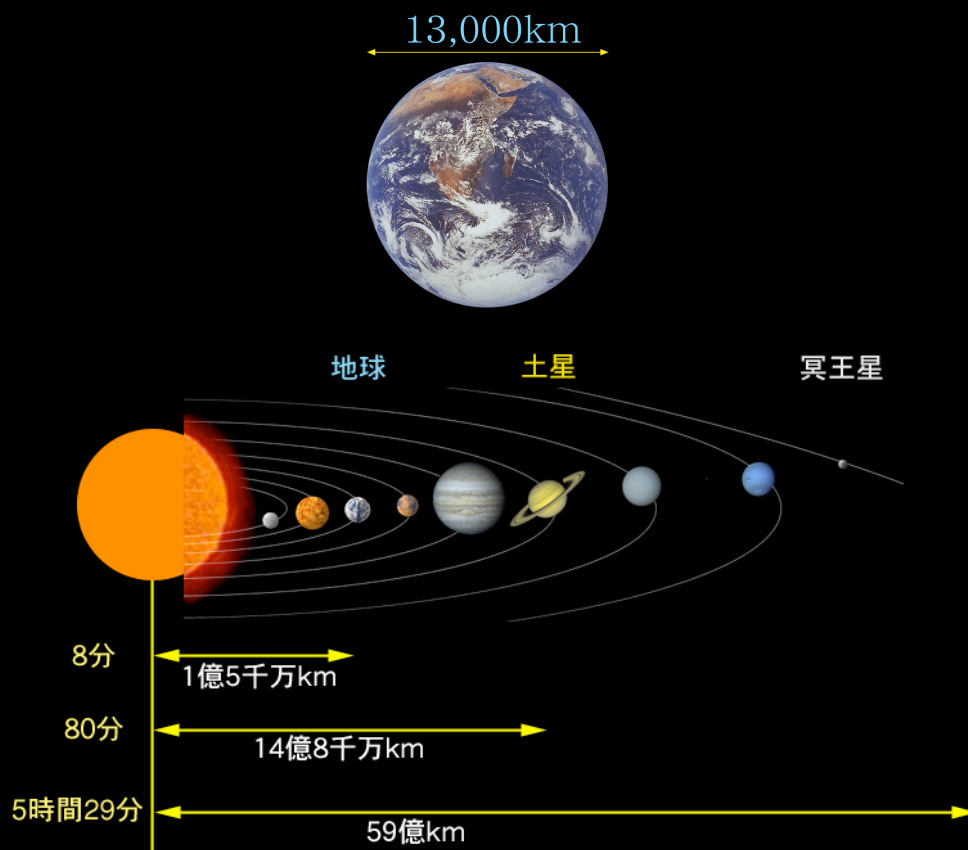


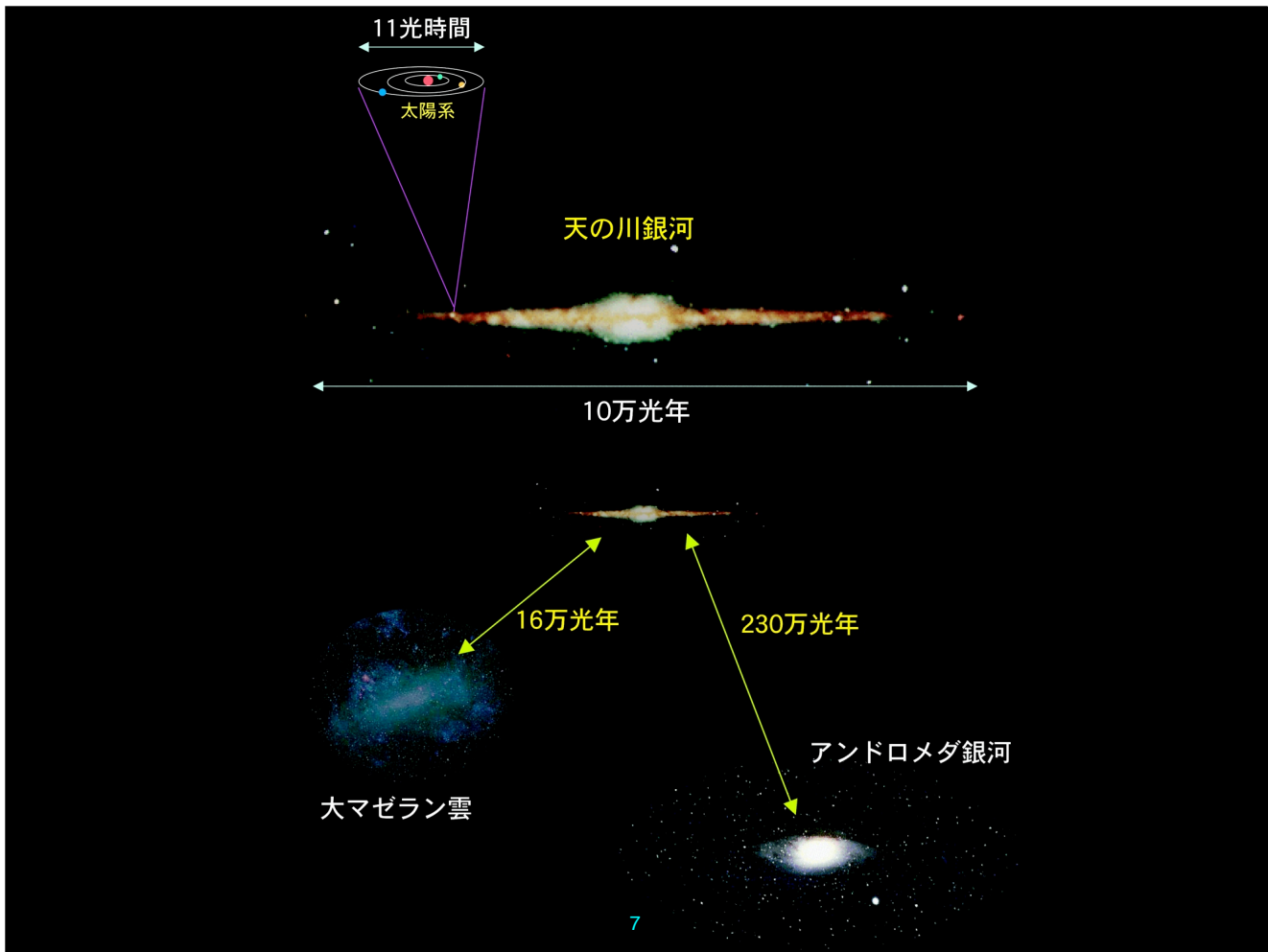
# 宇宙のすがた

- 地球から見ていて知っていること  
惑星、恒星、銀河、銀河団  
遠くを見るとどの方向も同じ  
**等方性**
- 恐らく正しいこと  
地球は特別な場所ではない  
宇宙の他の場所から空を見ても同じ  
**一様性**

5

## 一様・等方性が成り立つスケール





## 様々なスケールと密度

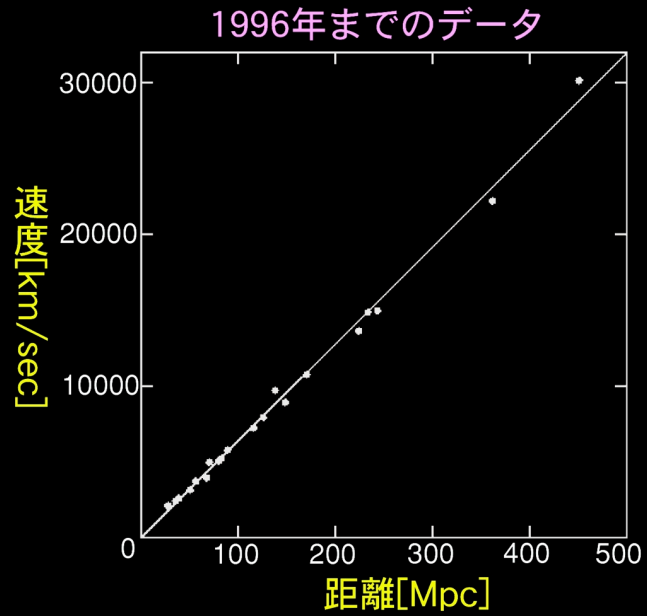
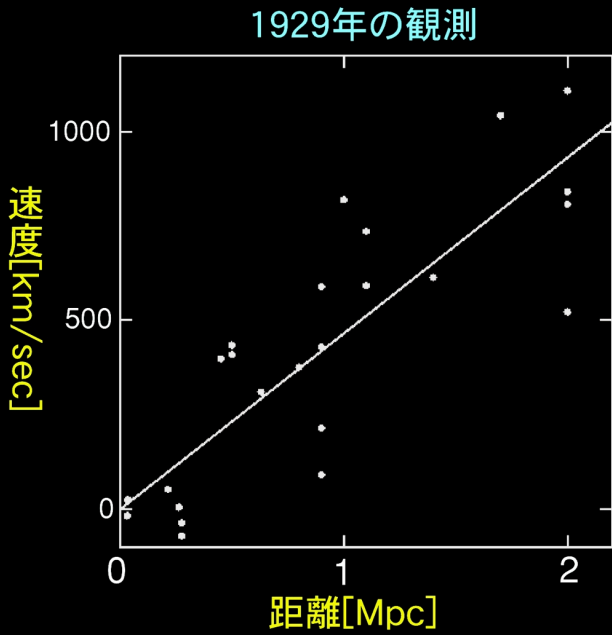
	大きさ	密度
星	100万km	1g/cm <sup>3</sup>
銀河	数万光年	10 <sup>-25</sup> g/cm <sup>3</sup>
銀河団	数100万光年	10 <sup>-28</sup> g/cm <sup>3</sup>
超銀河団	数億光年	10 <sup>-30</sup> g/cm <sup>3</sup>
宇宙	100億光年	10 <sup>-30</sup> g/cm <sup>3</sup>

**1億光年以上のスケールでは一様**



# ハッブルの法則

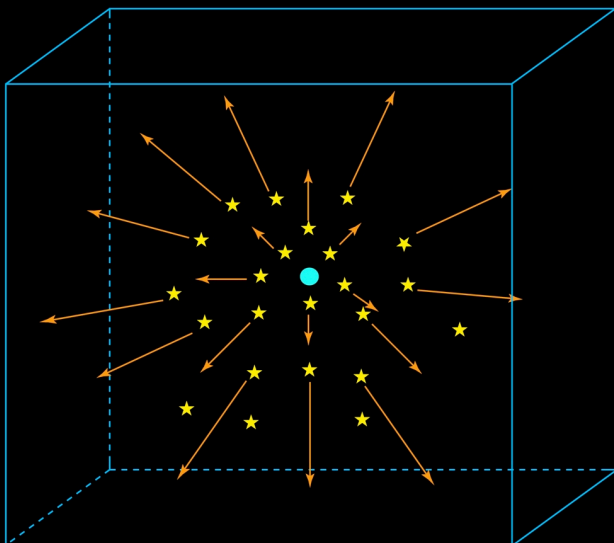
遠くの天体は地球からの距離に比例した速度で遠ざかっている



1Mpc (メガパーセク) = 326万光年

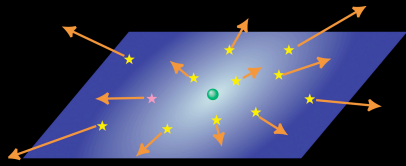
9

## ハッブルの法則が意味すること

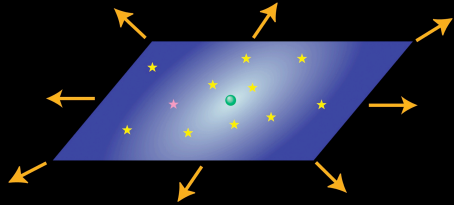


- 地球の周りの星の運動？
- **地球を特別扱い**している
- 宇宙の**一様性**と矛盾！

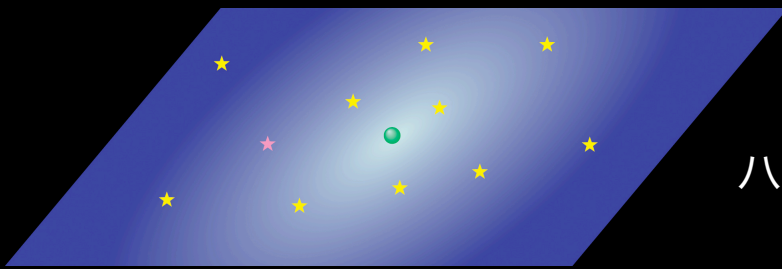
## 2次元（面）で考えてみましょう



星が運動するのではなく



星が乗っている面が  
**一様に**広がる

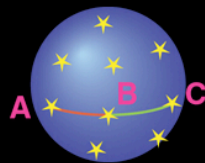
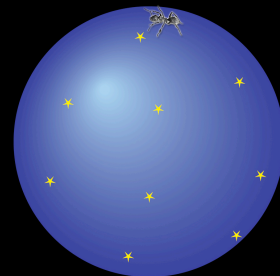


どの星から見ても  
ハッブルの法則が成り立つ

11

## 私たちの宇宙が球面の上だとすると

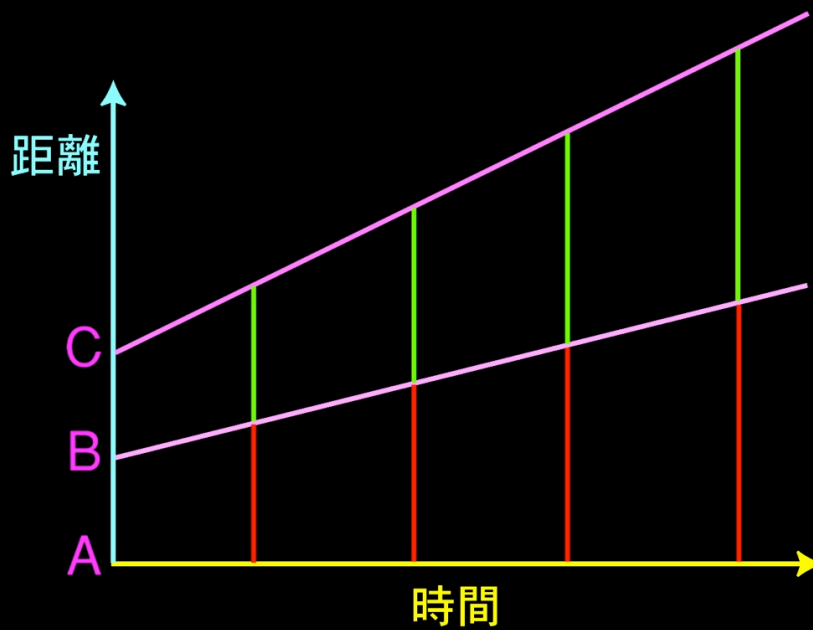
蟻のように球面の上の世界しか  
感じることができません



12



## ハッブルの法則も成り立つ



傾きが速度

13

**ハッブルの法則と一様性**  
を同時に成り立たせるためには

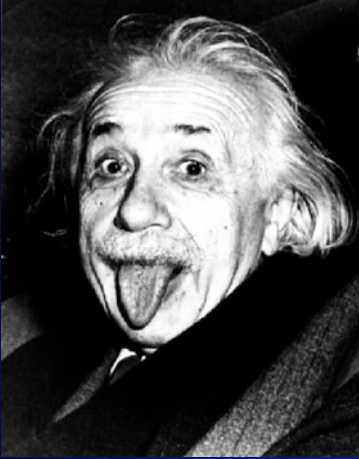


**空間そのものが膨張**

時間をさかのぼると、スケールは小さかった  
宇宙の昔の様子は？  
そして、宇宙の未来は？

14

# 宇宙のスケールの時間発展



特殊相対性理論 (1905)

$$E = mc^2$$

一般相対性理論 (1916)

空間の時間発展と

宇宙のエネルギー密度



宇宙を満たすエネルギーの  
種類と量が分かれば  
スケールの変化が分かる

15

## 宇宙を満たしているもの

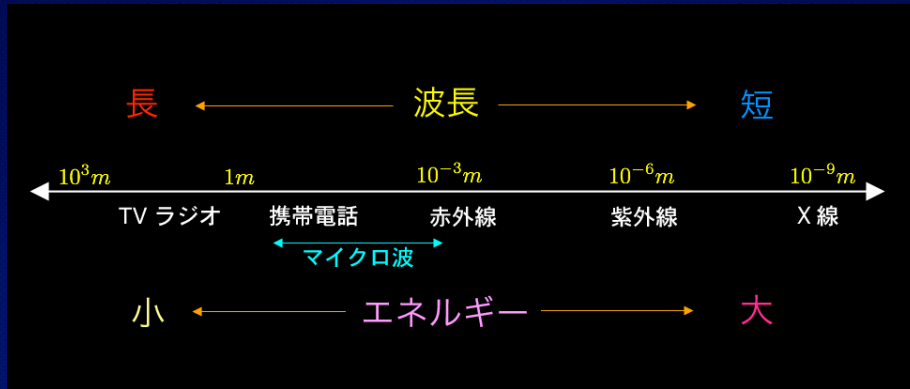
- 星や私たちを作っている分子・原子  
陽子、中性子、電子
- ● 電磁波 (光子)
- 未知の物質 (ダークマター)
- 未知のエネルギー (ダークエネルギー)

下の2つについては後で

16



## 2. 宇宙を満たす電磁波



- 電磁波は光子の集合
- 強い電磁波は光子が多い
- 1つの光子のエネルギーは波長に反比例
- 通信用電波は特定の波長だけが強い
- 宇宙を満たす電磁波は....

17

## 宇宙背景放射

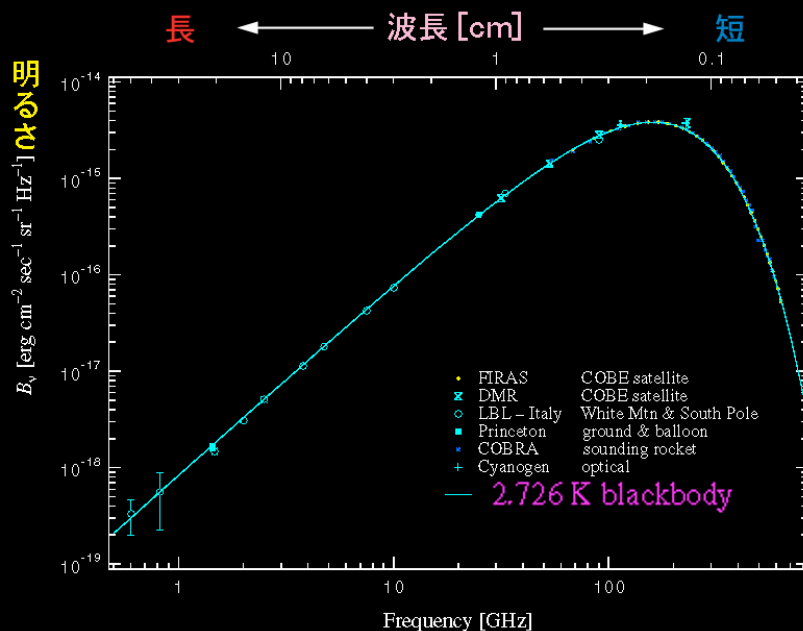
あらゆる方向から一定のスペクトルの電磁波

波長と強度の関係



絶対2.7度の  
プランク分布

光子の熱平衡  
の名残



18

# 熱平衡とは

多数( $10^{23}$ 程度)の粒子の集団が一様な性質を持つ  
粒子同士が衝突して系全体を均一化

熱いお湯 水分子の平均速度大 ▶ めるま湯  
冷たい水 水分子の平均速度小 中間の平均速度

「背景放射が光子の熱平衡分布」という意味は？

現在の宇宙は殆ど真空で、  
光子同士や光子と原子は散乱しない

なぜ光子は平衡分布をしているのか？

19

## 3. ビッグバン宇宙論

現在の宇宙について、これまでに分かったこと

- 宇宙空間は膨張している
- 宇宙は物質（陽子、電子）と光子を含む
- 物質は非常に少ない（ $1\text{m}^3$ に原子1個程度）

観測と理論から

- 光子のエネルギー密度は物質の1万分の1  
背景放射の温度と分布関数から

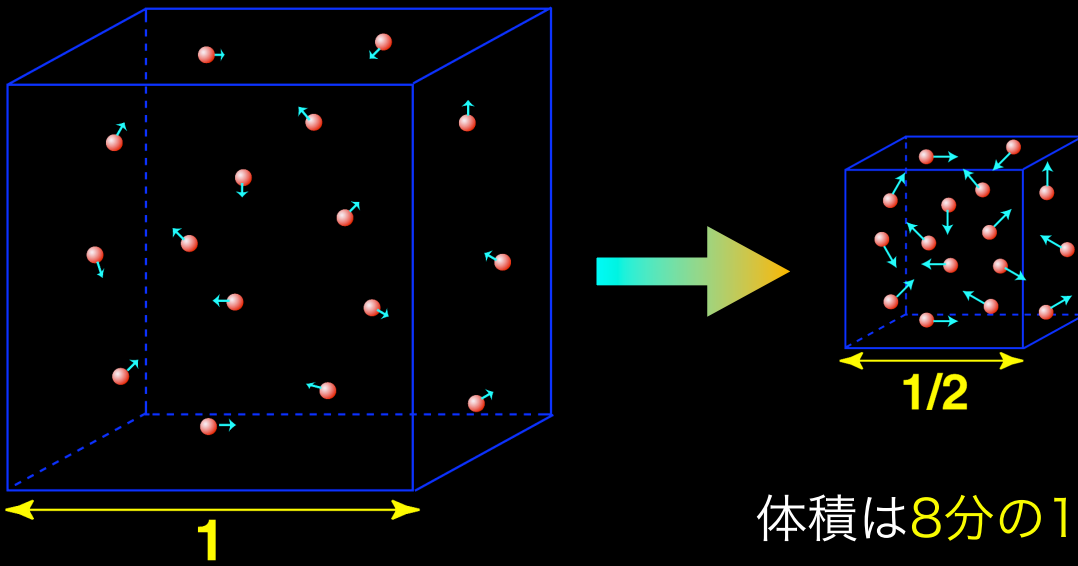
時間をさかのぼったら？

20



宇宙のスケールが**半分**になると

物質のエネルギー密度は？

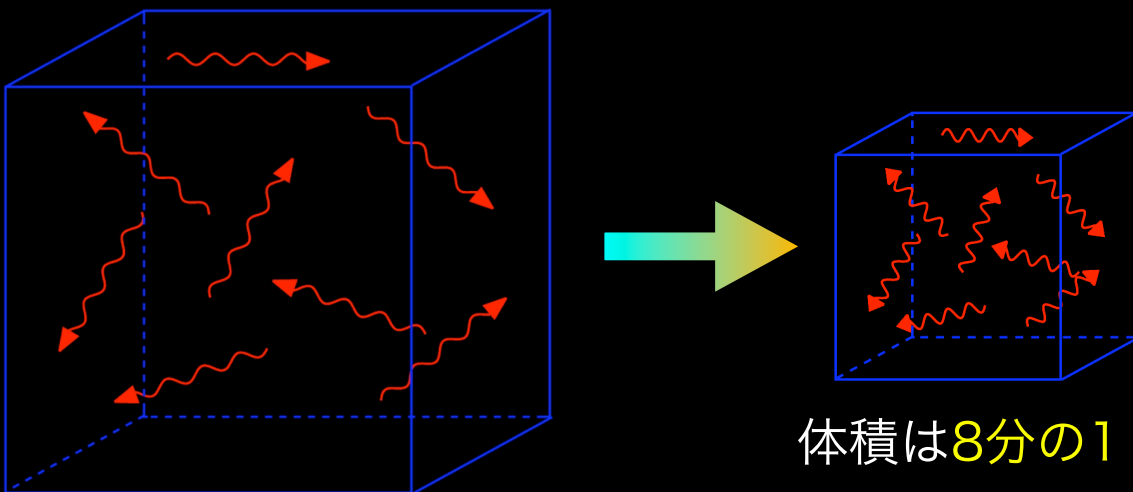


体積は**8分の1**

**エネルギー密度は8倍**

21

電磁波(光子)のエネルギー密度は？



体積は**8分の1**

波長も**2分の1**

**エネルギー密度は16倍**

時間をさかのぼると光子の方が物質より  
速くエネルギー密度が増加

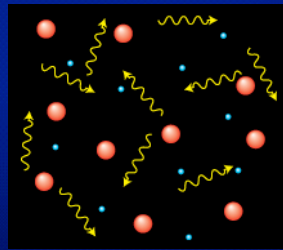
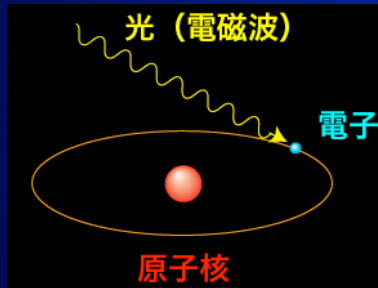
22

## 時間をさかのぼると

温度が6万4千度（宇宙が始まって2,000年）  
で**光子が優勢**



## 高温・高密度の宇宙



光子は  
平衡状態

プラズマ

23

## さらに、時間をさかのぼると

- 原子核さえもバラバラに
- さらに陽子・中性子もバラバラに
- **素粒子物理学**が必要

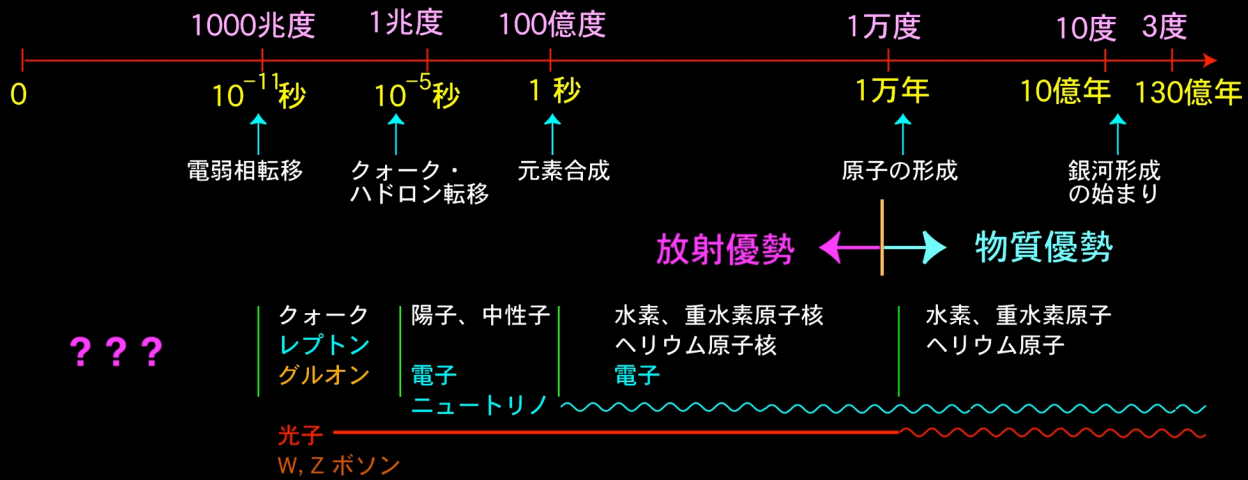
## ビッグバン宇宙論

膨張する宇宙  
宇宙背景放射  
軽元素の存在比

24



# 宇宙の年表



ここで前半終了

ここまでの話で何か質問があればどうぞ

## 4. 宇宙の膨張則

- ★ 膨張の仕方は**エネルギー密度**で決まる  
一般相対性理論
- ★ エネルギー密度とスケールの関係  
**エネルギーの形態**で決まる

### エネルギー密度

質量のある物質	(スケール) <sup>3</sup> に反比例
電磁波 (光子)	(スケール) <sup>4</sup> に反比例
ダークエネルギー	スケールに依存しない

27

## エネルギー密度と宇宙の形

エネルギー密度の総量がある値と比べて

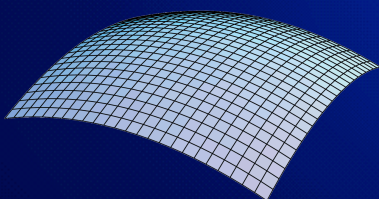
臨界密度  $0.9 \times 10^{-26} \text{kg/m}^3$

陽子 :  $1.7 \times 10^{-27} \text{kg}$

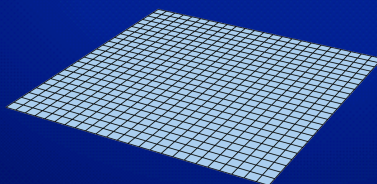
大

同じ

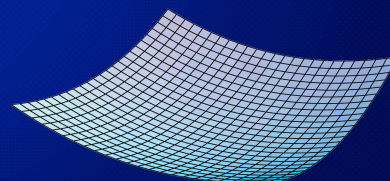
小



閉じた



平坦



開いた

28



## 話を簡単にするために**単成分**を考える

- 物質            スケールは(時間)<sup>2/3</sup>に比例
- 放射            スケールは(時間)<sup>1/2</sup>に比例
- **ダークエネルギー**    スケールは(時間)の指数関数



## 現実にはこれらの成分の混合

### エネルギー密度

- 物質            (スケール)<sup>3</sup>に反比例
- 光子            (スケール)<sup>4</sup>に反比例
- **ダークエネルギー**    スケールに依らない

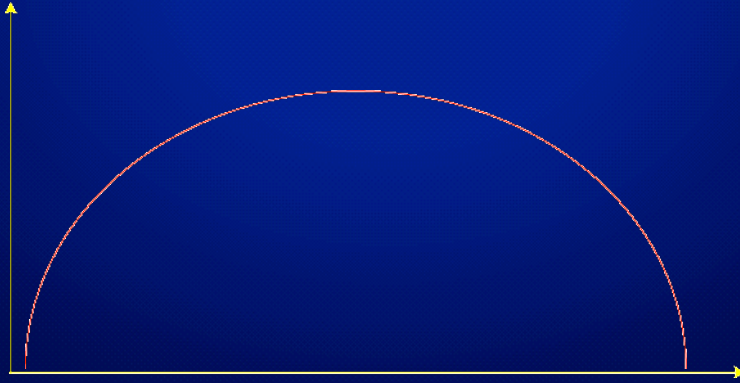
### 宇宙初期には**放射 (光子)** が優勢

宇宙のスケールの時間変化は  
これらの**エネルギーの量と割合**で決まる



## ダークエネルギーが無いとすると

- エネルギー密度 < 臨界密度  
永遠に膨張
- エネルギー密度 > 臨界密度  
いつかは収縮



31

## 宇宙の密度パラメータ

スケールの時間変化を決める量

$$\Omega_m = \frac{\text{物質のエネルギー密度}}{\text{臨界密度}}$$

$$\Omega_r = \frac{\text{放射のエネルギー密度}}{\text{臨界密度}}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\text{ダークエネルギー密度}}{\text{臨界密度}}$$

$$\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda = 1 \rightarrow \text{空間は平坦}$$

32



## 現在の各密度パラメータが分かれば

- 宇宙の「形」が分かる
- スケールの変化の歴史が分かる
- 遠方 (=過去) からの光の伝わり方

密度パラメータを直接測定できるか？

$\Omega_r \simeq 5 \times 10^{-5}$  ← 背景放射の温度

$\Omega_m$  見えない物質、天体の運動から

$\Omega_\Lambda$  直接測定はできない

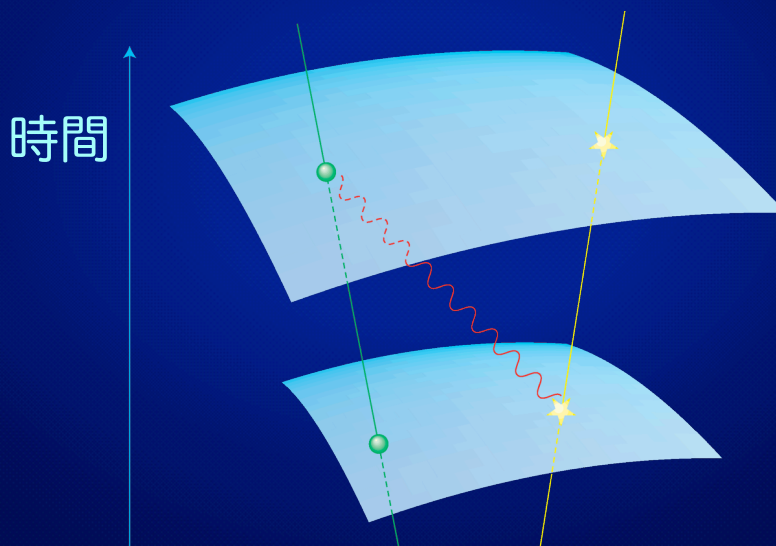
→ 遠方の星の明るさと波長の変化の関係から

33

## 5. 最新の観測と宇宙の年齢

再び、ハッブルの法則

空間が膨張しているなら、  
速度・距離はどう定義するのか？



34



## 実際に測定しているのは

- 後退速度ではなく赤方偏移
- 距離ではなく星の明るさ

$$\text{赤方偏移} = \frac{\text{観測する波長} - \text{元の波長}}{\text{元の波長}}$$

近い天体については近似的に  $\frac{\text{後退速度}}{\text{光速}}$

元素のスペクトルのシフト → 高精度

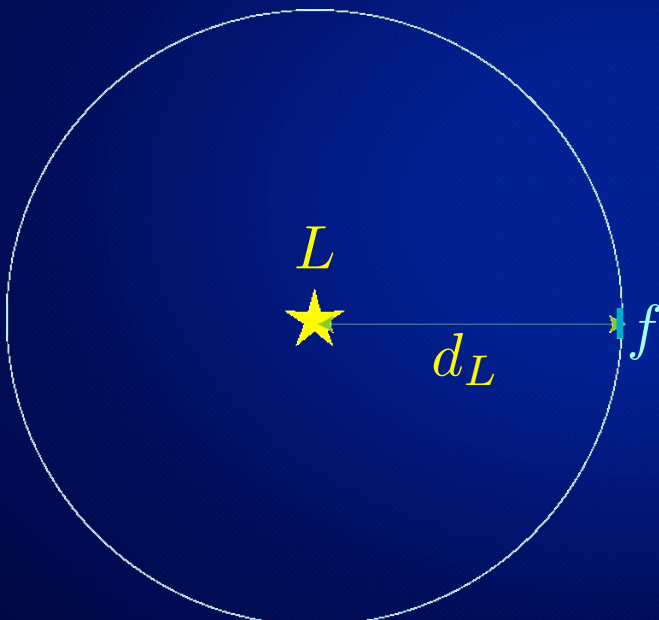
$$\frac{\text{観測する波長}}{\text{元の波長}} = \frac{\text{観測するときの宇宙のスケール}}{\text{光が放たれたときのスケール}}$$

35

## 遠い星までの距離の定義

幾つかの定義があるが、観測と直接関係が付くのは

**光度距離**  $d_L$



$L$  : 星の明るさ

$f$  : 単位面積当りのエネルギー

$$L = 4\pi d_L^2 f$$

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}$$

36



## 空間が膨張したり、平坦でないとき

星の明るさ $L$ と観測する明るさ $f$ の関係が

**膨張の歴史**や**宇宙の形**の影響を受ける

例えば宇宙が閉じているとき、

凸レンズのように光が集まる。

平坦のときより観測する明るさはより明るくなる。

**光度距離と赤方偏移の関係** 現代版 **ハッブルの法則**  
は**密度パラメータ**に依存する

→ 様々な星について**光度距離**と**赤方偏移**の  
関係がわかれば、**密度パラメータ**が決まる

37

## 赤方偏移と光度距離の観測

- **赤方偏移**：既知の元素のスペクトルのシフト
- **光度距離**：観測するときの明るさ $f$ は測定可能  
星の明るさ $L$ をどうやって測るか？  
！億光年も離れている星まで行けません！

ある種の**超新星** 星の大爆発

増光時間・減光時間と**最大光度**に一定の関係

非常に明るいので離れていても見える

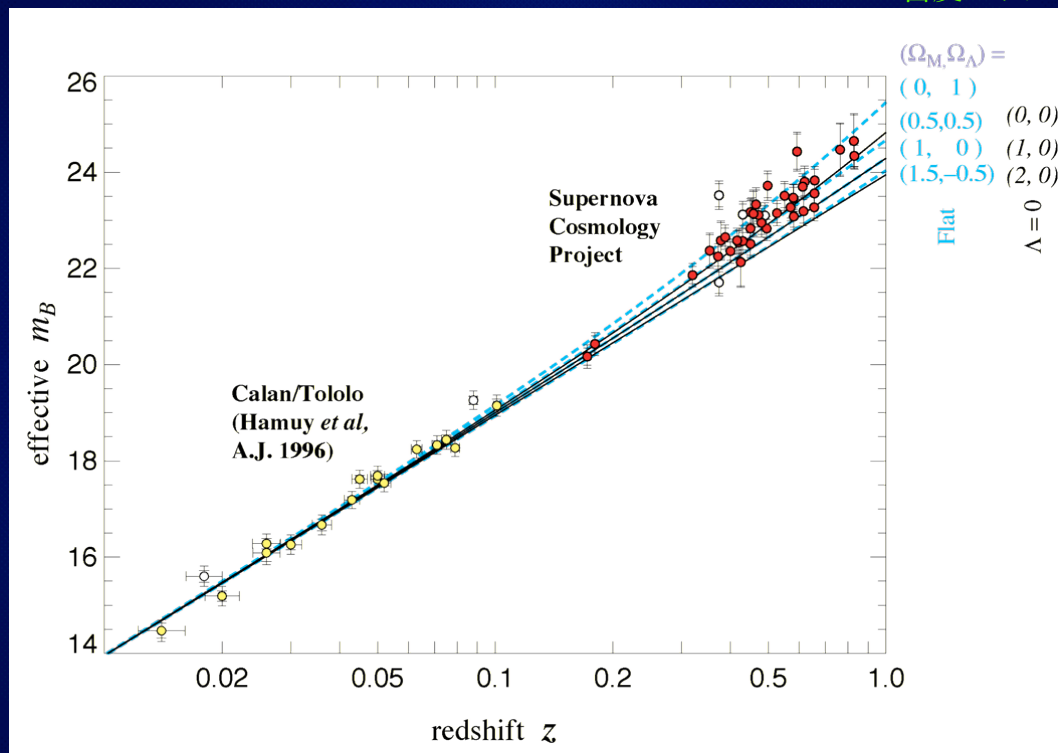
すばる望遠鏡も活躍中

38

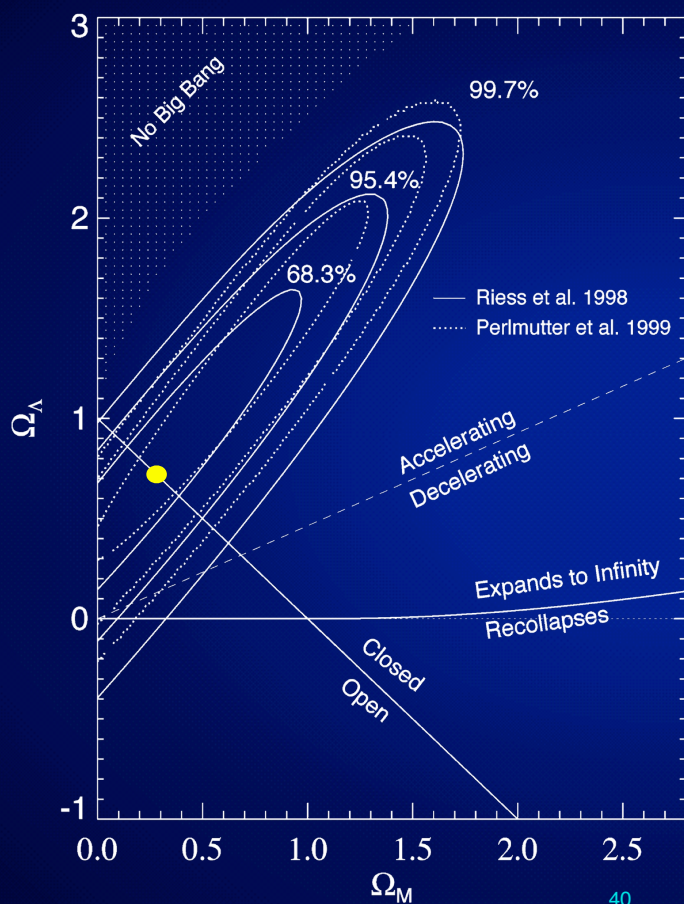
# 最新の観測データ

密度パラメータ

光度距離



39



最も確からしい  
密度パラメータ

95%以上の確率で  
 $\Omega_\Lambda \neq 0$

宇宙が平坦なら

$\Omega_\Lambda \simeq 0.7$

$\Omega_m \simeq 0.3$

7割が未知のエネルギー

40



# 密度パラメータの値

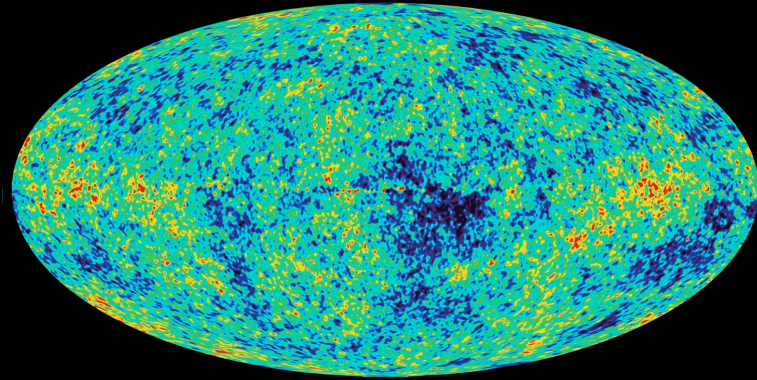
別の観測事実からも

絶対2.7度の**宇宙背景放射**に  
10万分の1の揺らぎ

衛星による観測  
(NASA)

COBE(1993)

WMAP(2003)



41

# 現在の宇宙を満たすエネルギー

ダークエネルギー 73%

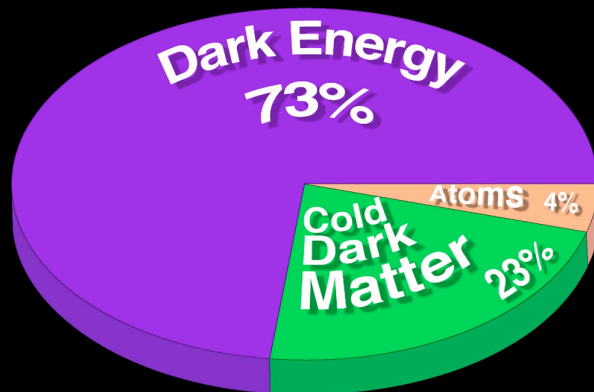
質量のある物質 27%

陽子・中性子 4%

ダークマター 23%

質量のある陽子、中性子、  
電子などの既知の粒子ではない物質

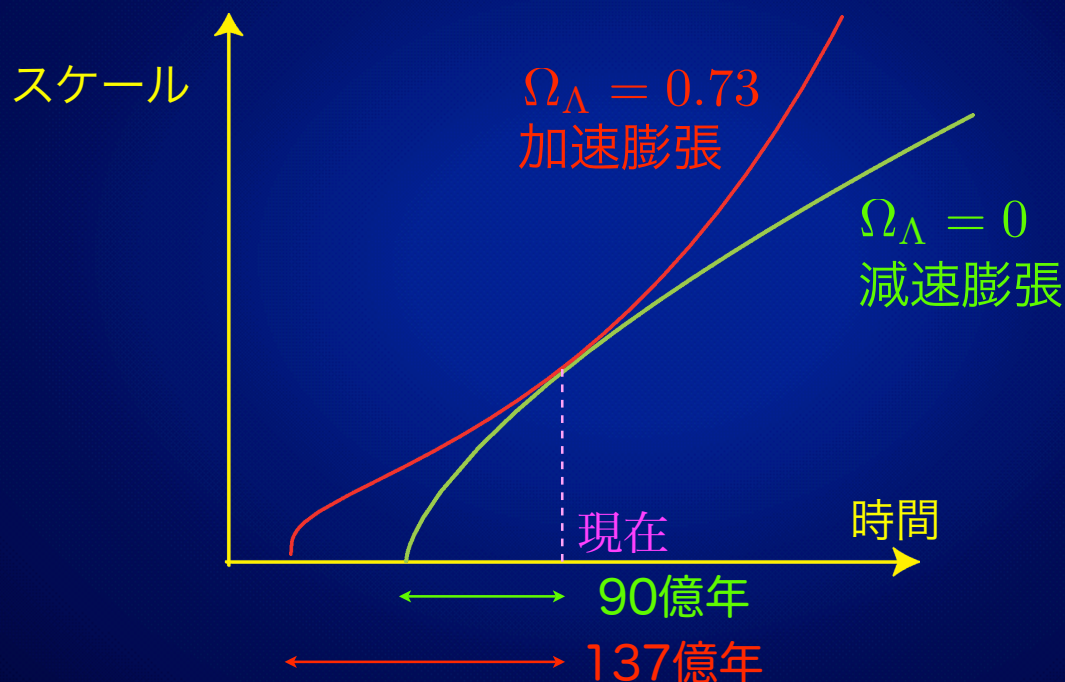
陽子・中性子の量は**元素合成の理論**の値と一致



42

# 宇宙の年齢

密度パラメータが分かったので時間をさかのぼる  
現在のハッブルパラメータ（傾き）が合うように



## 6. おわりに

- 空間が膨張している  
ハッブルの法則と一様性
- 宇宙は昔、高温高密度だった  
宇宙背景放射

膨張の仕方は一般相対性理論で決まっている

さらに、最新の観測から 超新星の光度距離と赤方偏移  
宇宙背景放射のゆらぎ

宇宙のエネルギーの  
73%はダークエネルギー  
23%はダークマター  
4%が既知の物質



# 残された問題

- ダークエネルギーの正体
- ダークマターの正体 質量、中性、弱い相互作用
- なぜ、空間が平坦なのか？
- なぜ、空間が一様なのか？
- 背景放射のゆらぎの起源は？
- 物質の起源は？
- 宇宙に果てはあるのか？
- なぜ、空間は3次元なのか？
- 宇宙の始まりは？
- 宇宙の終わりは？

インフレーション

45

## より詳しい話は...

<http://dirac.phys.saga-u.ac.jp/~funakubo/bau/>

宇宙の物質の起源

あなたは今世紀 宇宙の謎を、人目の聴講生です。

我々の体や地球、太陽などの天体は物質で出来ています。現代の物理学では物質に対して必ず反物質があることが知られています。しかし、我々の周りを見回しても反物質は見当たりません。反物質が物質と出会ると非常に高エネルギーのガンマ線になってしまいます。では長い長い宇宙の歴史の中で物質はどこから来たのでしょうか？

ここでは宇宙の歴史を振り返りながら、物理学がその謎を解き明かそうと挑んできた物質の起源について紹介したいと思います。

- ★第1章 現在の宇宙の姿  
これまでの観測から分かっていることを紹介します。宇宙の大きさ、宇宙の密度は？宇宙はじっとしているのでしょうか？
- ★第2章 宇宙は昔、熱かった  
観測事実を組み合わせると何が言えるのでしょうか？時間をさかのぼると宇宙の姿はどうなるのでしょうか？
- ★第3章 物質を作っているもの  
物質を作っているおおもとは何なのでしょう？それは「素粒子」と呼ばれるものですが、素粒子について私たちはどこまで知っているのでしょうか？
- ★第4章 ビッグバン宇宙論  
初めは熱い素粒子の集まりで出来ていた宇宙はどのような過程を経て冷えてきたのでしょうか？
- ★第5章 物質の起源  
宇宙の最初は非常に高温で、物質は光子の雲の中に集まっています。何かを切り分けると光子と電子に等しいものが