



### 話しの流れとまとめ

宇宙のかたち: 時間と空間

- 1 膨張する宇宙
- 2 ビッグバン
- 3 インフレーションと加速膨張
  - <宇宙年齢は137億歳で、空間構造は平坦で、永遠に膨張し続ける>

宇宙のなかみ: 物質とエネルギー

- 4 原子と分子からレプトンとクォークへ
- 5 ダークマターとダークエネルギー
- 6 超ひも理論と高次元時空
  - <人類はまだ宇宙の全内容物のたった4%ほどしか知らない>

2012/8/13 宇宙論入門

### 宇宙

往古来今謂之宙  
四方上下謂之宇

紀元前2世紀(前漢時代)  
『淮南子(えなんじ)』(齊俗篇)に曰く:  
往古来今謂之宙、天地四方上下謂之宇  
“天地四方上下これを宇といい、往古来今これを宙という。”

宇宙 = (宇 = 空間) + (宙 = 時間)  
世界 = (世 = 時間) + (界 = 空間)

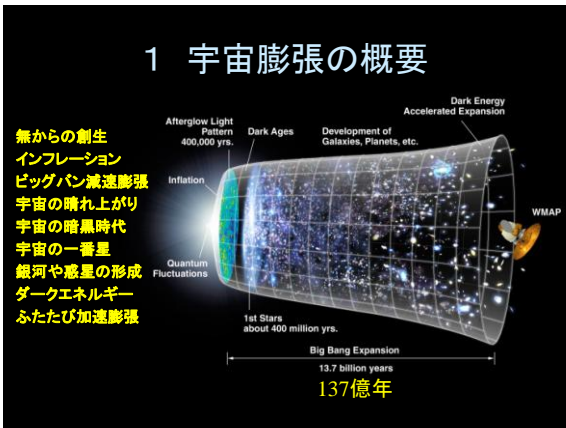
宇宙 = 世界 = 時空

### 古代の宇宙論

天蓋  
入口 出口

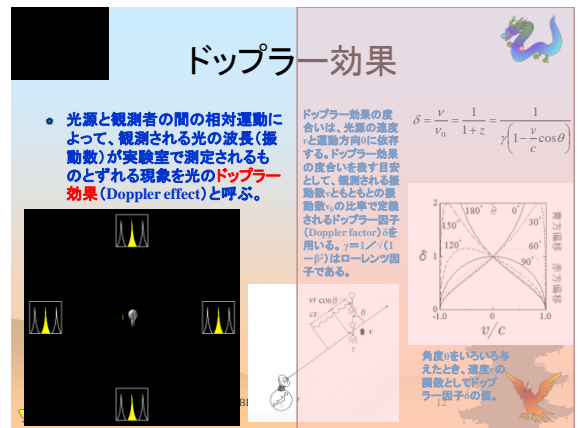
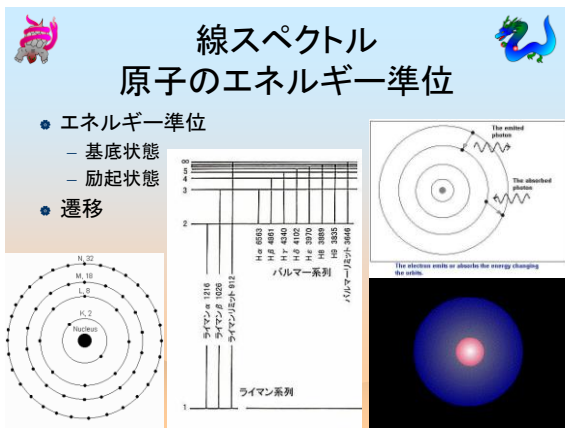
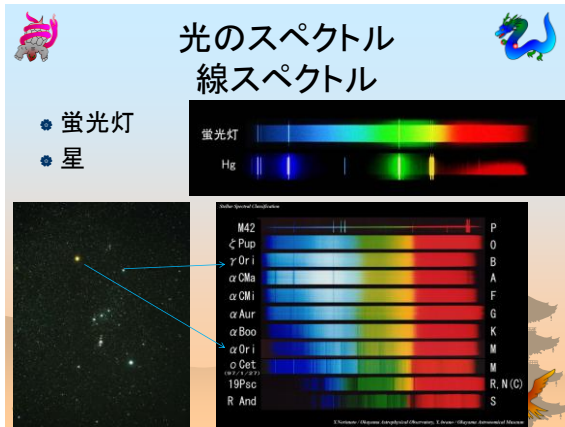
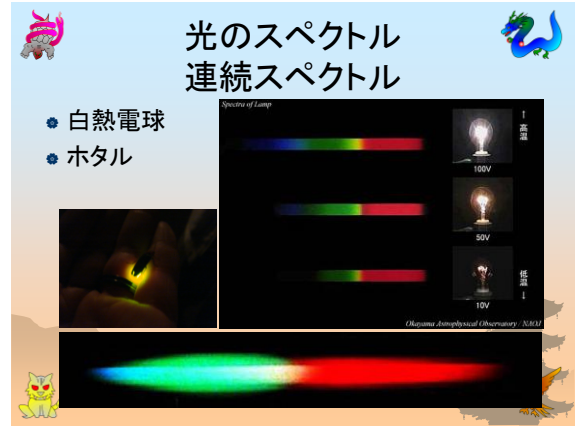
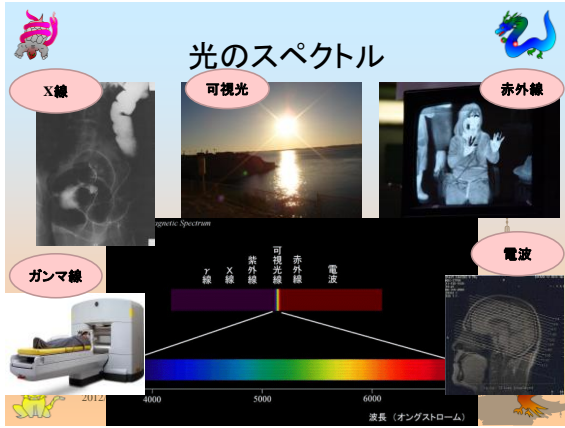
世界の樹  
イグドラシル  
神の国 アース作らぬ  
人の国 ミスサ作らぬ  
巨人国 ヨトゥンヘイム  
世界の根  
ヨルムンハンデル  
世界の頂  
ニグルヘイム  
世界の底  
ヘススヘルム

2012/8/13 宇宙論入門



### ビッグバン 宇宙の膨張

2012/8/13 宇宙論入門





## 2 ビッグバン膨張宇宙

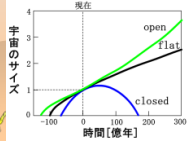


● 「ビッグバン」: 火の玉宇宙

理論モデル

観測的実証

- 1922年 フリードマン解
- 1927年 ルメートル解
- 1948年 ガモフの火の玉宇宙
- 1929年 ハッブルの法則
- 1965年 3K宇宙背景放射
- ヘリウム元素組成比



## ハッブルの法則



ハッブルの法則:

1929年 エドウィン・ハッブル

1. 遠方の銀河は後退運動している
2. 遠いほど後退速度が大きい
3. これらの性質は方向によらない

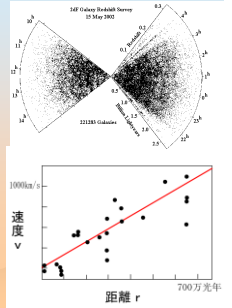
$$v = H_0 r$$

$$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$$

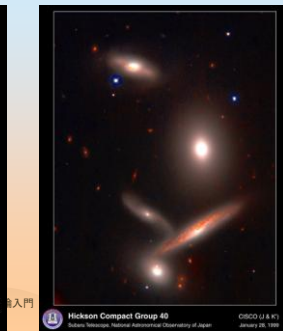


2012/8/13

宇宙論入門



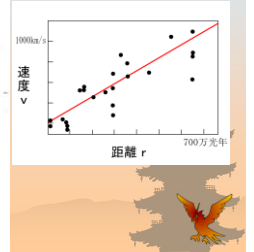
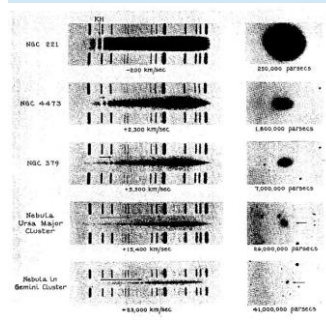
## ハッブルの法則 銀河



入門



## 銀河のスペクトル



## ハッブルの法則 まとめ



ハッブルの法則:

1929年 ハッブル

1. 遠方の銀河は後退運動している
2. 遠いほど後退速度が大きい
3. これらの性質は方向によらない

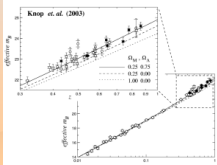
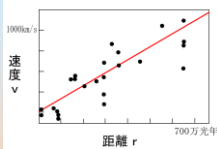
$$v = H_0 r$$

$$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$$



2012/8/13

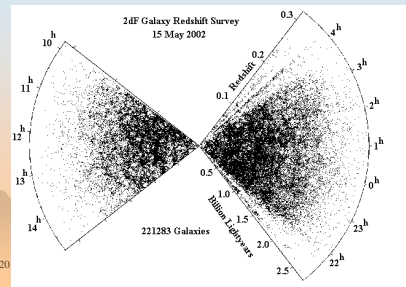
宇宙論入門



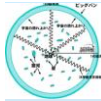
## ハッブルの法則 宇宙の地図



約25億光年以内の約22万個の銀河の分布



20



# 3K宇宙背景放射

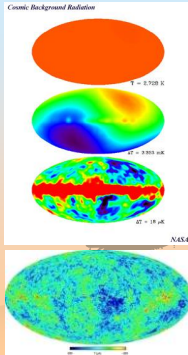


## 3K宇宙背景放射:

- 1965年 ペンジアスとウィルソン
- 1. 宇宙全体からくるマイクロ波放射
- 2. 絶対温度で3Kの熱放射
- 3. 方向によらない

COBE (1989)

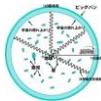
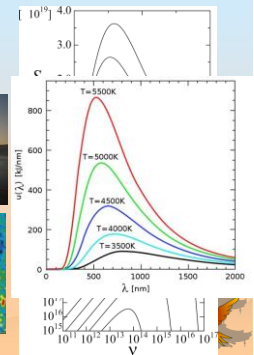
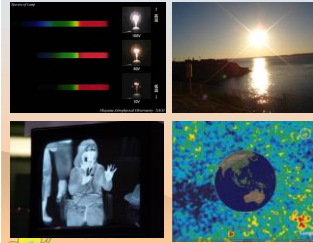
WMAP (2001)



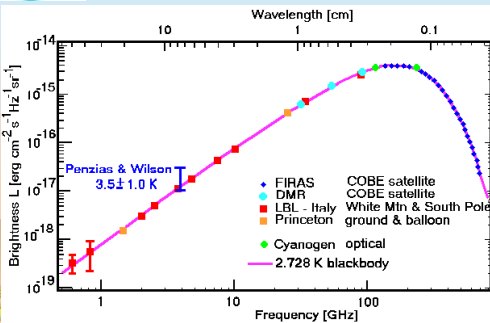
# 黒体放射(熱放射)



- 暖められた物質から放射される光(電磁波)



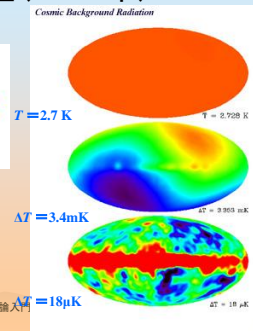
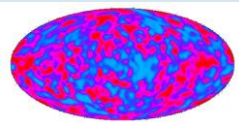
# 3K宇宙背景放射 - 3Kの黒体放射スペクトル



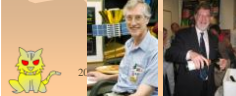
# 3K宇宙背景放射 COBE衛星(1989年)



10万分の1程度のゆらぎ



ジョン・マザー  
ジョージ・スムート



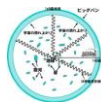
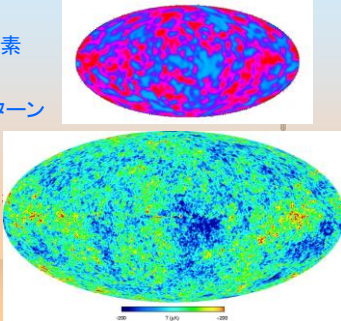
# 3K宇宙背景放射 WMAP衛星(2001年)



ゆらぎの微細構造  
6000画素→300万画素

初期宇宙の音響パターン  
がみえた

- 宇宙年齢=137億
- ハッブル定数=72km/s/Mpc



# 3K宇宙背景放射 まとめ



## 3K宇宙背景放射:

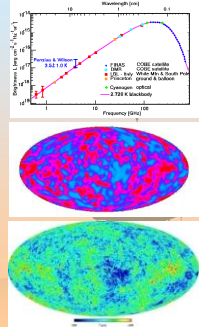
- 1965年 ペンジアスとウィルソン
- 1. 宇宙全体にマイクロ波放射
- 2. 絶対温度で3Kの熱放射
- 3. 方向によらない

ペンジアスとウィルソン COBE (1989)

1978年のノーベル物理学賞

マザーとスムート WMAP (2001)

2006年のノーベル物理学賞



2012/8/13



2012/8/13

宇宙論入門



## アインシュタイン方程式

- 一般相対論は、物質やエネルギーが存在する曲がった時空の幾何学で、物質やエネルギーに満ちた宇宙そのものを表現できる理論。
- 左辺:【時空の形状】= 右辺:【定数】×【物質エネルギー分布】**
- 物質・エネルギーは時空の曲がりに沿って運動し、時空の曲がり方は物質・エネルギーの分布で決まる。

**ポワソン方程式**

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho \quad (1)$$

$\Delta$ : 空間偏微分演算子  
 $\phi$ : 重力ポテンシャル  
 $\rho$ : 密度分布

**アインシュタイン方程式**

$$R_{ik} - \frac{1}{2}Rg_{ik} + \Lambda g_{ik} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{ik} \quad (2)$$

$g_{ik}$ : 時空の計量テンソル  
 $R_{ik}$ : リッチテンソル  
 $R$ : スカラー曲率  
 $\Lambda$ : 宇宙定数 (宇宙項)

**エネルギー運動量テンソル**

$$T_{ik} = (\epsilon + p)u_i u_k - pg_{ik} \quad (3)$$

$\epsilon$ : 4元速度  
 $u_i$ : 物質のエネルギー密度  
 $p$ : 物質の圧力

2012/8/13

宇宙論入門

## 宇宙方程式

- 運動方程式**  $\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{GM}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} a$
- 積分**
- 解の例**

$$\frac{1}{2} \left( \frac{da}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{a} - \frac{\Lambda c^2}{6} a^2 = -\frac{c^2}{2} k$$

$$a = \left( \frac{2\sqrt{2GM}}{3} t \right)^{2/3}$$

$$a = A \exp \left( \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}} t \right)$$

2012/8/13

宇宙論入門

2012/8/13

宇宙論入門

## 3 インフレーション宇宙

- 「インフレーション」:** 宇宙開闢(かいびやく)直後の急激な膨張
- 「地平線問題」**
- 「平坦性問題」**

**観測的実証**

- WMAP衛星
- 宇宙年齢=137億年
- ハッブル定数=72km/s/Mpc

2012/8/13

宇宙論入門

## 宇宙の加速膨張

- 「加速膨張」:** 46億年ぐらい前に、宇宙は減速膨張から加速膨張に転じた
- 宇宙の行く末**

**観測的実証**

- 超新星探査プロジェクト
- ソール・パールミュッター
- ブライアン・シュミット
- アダム・リース
- 2011年のノーベル物理学賞

2012/8/13

宇宙論入門

## 超新星宇宙論プロジェクト

- パールミュッター、シュミット、リース
- 2011年のノーベル物理学賞

2012/8/13

宇宙論入門

2012/8/13

宇宙論入門

## 宇宙のかたち: 時間と空間

宇宙年齢は137億歳で  
空間構造は平坦で  
永遠に膨張し続ける

2012/8/13

宇宙論入門

2012/8/13

宇宙論入門

## 話しの流れとまとめ

宇宙のかたち: 時間と空間

- 1 膨張する宇宙
- 2 ビッグバン
- 3 インフレーションと加速膨張
  - <宇宙年齢は137億歳で、空間構造は平坦で、永遠に膨張し続ける>

宇宙のなかみ: 物質とエネルギー

- 4 原子と分子からレプトンとクォークへ
- 5 ダークマターとダークエネルギー
- 6 超ひも理論と高次元時空

<人類はまだ宇宙の全内容物のたった4%ほどしか知らない>

2012/8/13 宇宙論入門

## 4 物質と素粒子

原子と分子  
陽子・中性子・電子・光子

素粒子:  
バリオン・メソン・レプトン  
基本粒子:  
クォークとレプトン

ダークマター  
ダークエネルギー  
ひも粒子  
超対称性粒子  
高次元時空  
ブレーン

2012/8/13 宇宙論入門

## 物質を分割していく

- 分子
  - 水分子
  - アルコール分子
- 原子
  - 水素
  - 鉄
- 原子核 + 電子
  - 陽子
  - 中性子
- クォーク

2012/8/13 宇宙論入門

## 物質を砕く巨大加速器

- スプリング8 (はりま)
- Bファクトリー (KEK)
- 大型ハドロン加速器 LHC (CERN)
  - ヒッグス粒子の発見
- 国際線形加速器 ILC
  - ビッグバンの再現

2012/8/13 宇宙論入門

## 素粒子から基本粒子へ

素粒子: 多く收拾がつかない

- ハドロン (強粒子)
  - バリオン (重粒子)
    - ・ 核子 = 陽子・中性子
    - ・ Δ粒子, Λ粒子
    - ・ Σ粒子, Ξ粒子
  - メソン (中間子)
    - ・ パイ中間子, K中間子
    - ・ Ω中間子, η中間子
- レプトン (軽粒子)
  - ・ 電子, ミュー粒子, タウ粒子
  - ・ 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

基本粒子: 有限個で済む

- クォーク (3世代6種類)
  - ・ アップ (u)
  - ・ ダウン (d)
  - ・ チャーム (c)
  - ・ ストレンジ (s)
  - ・ トップ (t)
  - ・ ボトム (b)
- レプトン (3世代6種類)
  - ・ 電子 (e)
  - ・ 電子ニュートリノ (ν<sub>e</sub>)
  - ・ ミュー粒子 (μ)
  - ・ ミューニュートリノ (ν<sub>μ</sub>)
  - ・ タウ粒子 (τ)
  - ・ タウニュートリノ (ν<sub>τ</sub>)

2012/8/13 宇宙論入門

## ニュートリノの検出

- カミオカンデ
- 光電子増倍管
- 超新星1987A
- 11個のニュートリノ

小柴昌俊  
2002年ノーベル物理学賞

2012/8/13 宇宙論入門

## クォークモデル

- 3世代6種類
- 3色
- クォークと反クォーク

	quark	anti-quark
I up	$u_R, u_L, u_B$	$\bar{u}_R, \bar{u}_L, \bar{u}_B$
I down	$d_R, d_L, d_B$	$\bar{d}_R, \bar{d}_L, \bar{d}_B$
II strange	$s_R, s_L, s_B$	$\bar{s}_R, \bar{s}_L, \bar{s}_B$
II charm	$c_R, c_L, c_B$	$\bar{c}_R, \bar{c}_L, \bar{c}_B$
III bottom	$b_R, b_L, b_B$	$\bar{b}_R, \bar{b}_L, \bar{b}_B$
III top	$t_R, t_L, t_B$	$\bar{t}_R, \bar{t}_L, \bar{t}_B$

● 陽子 (uud)  
● 中性子 (udd)

●  $\pi^+$  中間子 (ud)  
●  $\pi^-$  中間子 (ud)

## 2008年度ノーベル物理学賞

**南部陽一郎**

- "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics" (素粒子物理学における自発的対称性の破れの機構の発見に対して)

**小林誠・益川敏英**

- "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature" (自然界において3世代のクォークの存在を予言する対称性の破れの起源の発見に対して)

## 温度を上げていくと物質はどうなるか？

- 273K (0°C): **相転移**  
固体(氷)→液体(水)
- 373K (100°C): **相転移**  
液体(水)→気体(水蒸気)
- 分子の**解離**  
水分子→水素+酸素
- 3000K: 水素の**電離**  
水素原子→陽子+電子  
酸素原子→原子核+電子
- 原子核の**分解**  
原子核→陽子+中性子
- 素粒子の**分解**  
陽子や中性子→クォーク

宇宙論入門

## 温度を上げていくと物質と宇宙はどうなるか？

- 10億K: 元素が**分解**する
- 40億K: 光子や粒子の衝突から電子と陽電子が**対生成**する
- 1兆K: ハドロンがクォークに**分解**する
- 10兆K: 光子や粒子の衝突から陽子と反陽子が**対生成**する
- 100数十秒 (10億K): **ヘリウム元素などが合成**
- 100秒 (40億K): 電子と陽電子が**対消滅**して光子になる
- 10<sup>-4</sup>秒 (1兆K): クォークから**ハドロンが合成**
- 10<sup>-6</sup>秒 (10兆K): 陽子と反陽子が**対消滅**してエネルギーになる

宇宙論入門

## 温度を上げていくと物質と宇宙はどうなるか？

- 10<sup>15</sup>K: 電子とニュートリノの区別がなくなり、**電磁力と弱い力が電弱力として統一**される
- 10<sup>28</sup>K: レプトンとクォークの区別がなくなり、**電弱力と強い力が大統一力に統一**される
- 10<sup>32</sup>K: あらゆる粒子が**同一**になり、あらゆる力は**万有力**になる
- 10<sup>-11</sup>秒 (10<sup>15</sup>K): **電弱力が電磁力と弱い力に分離**し、電子とニュートリノが誕生する
- 10<sup>-36</sup>秒 (10<sup>28</sup>K): **大統一力が電弱力と強い力に分離**し、レプトンとクォークが誕生する
- 10<sup>-44</sup>秒 (10<sup>32</sup>K): **万有力から重力が分離**し、重力子が誕生する

宇宙論入門

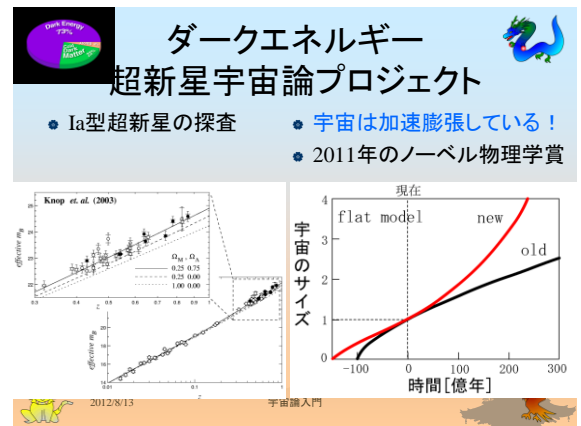
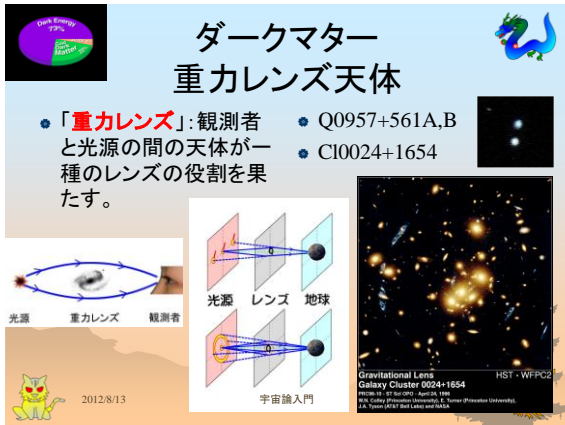
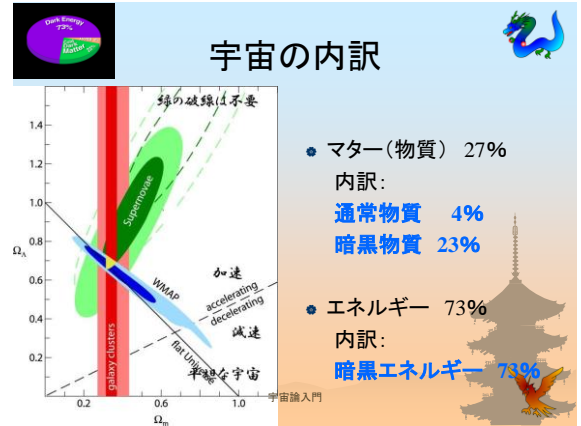
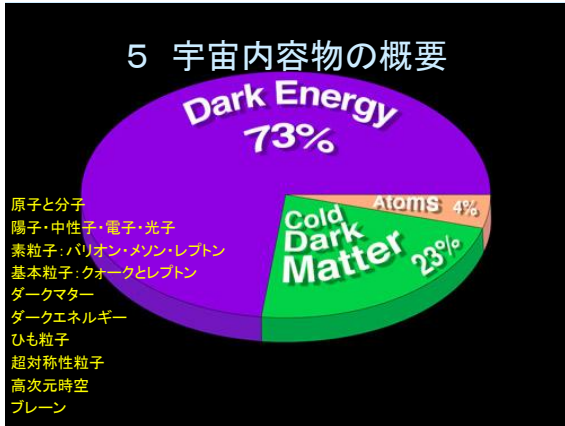
## 反物質がない理由

- 宇宙開闢時
  - 物質と反物質は等量
  - 粒子と反粒子と光子も同数
- 現在の宇宙
  - 粒子1個: 光子10億個
- どこかの時点で
  - 粒子(10億+1)個と反粒子10億個が**対消滅**し、粒子1個と光子10億個に
- 本来は素粒子反応は**対称的**に起こる(バリオン数は保存される)
- わずかに**非対称**な反応が起こった(バリオン数が保存されなかった)
- 陽子崩壊(10<sup>37</sup>年後)

$$n_b : n_{\bar{b}} : n_\gamma \sim 1 : 0 : 10^9 \quad (35)$$

$$n_b : n_{\bar{b}} : n_\gamma \sim (10^9 + 1) : 10^9 : 10^{36}$$

陽子崩壊のダイアグラム





## ダークエネルギー まとめ

**ダークエネルギー**

- 物質ではないある種のエネルギーで、しかも**負の圧力**をもつ奇妙なエネルギー
- 数学的には宇宙項と同じで、エネルギーとして再解釈したもの
- 宇宙の全内容物の**73%ほど**

ダークエネルギーの候補

- 真空エネルギー
- クインテッセンス(第5元素)
- 余剰次元からの流れ込み
- ファントム物質(超斥力物質)

2012/8/13 宇宙論入門

## ダークエネルギー 量子真空

● プランクスケール

2012/8/13 宇宙論入門

## 宇宙のなかに 物質とエネルギー

人類はまだ宇宙の全内容物の  
たった4%ほどしか知らない

2012/8/13 宇宙論入門

2012/8/13 宇宙論入門

2012/8/13 宇宙論入門

2012/8/13 宇宙論入門

## 6 自然界の4つの力

力の場	力を感ずる粒子	力を伝える粒子
電磁力	荷電粒子	光子
弱い力	クォーク、レプトン	弱ボース粒子
強い力	クォーク	膠着子/グルーオン
重力	すべての粒子	重力子

中性子 (u, d, d) → 陽子 (u, u, d) + ニュートリノ (e, ν<sub>e</sub>)  
 陽子 (u, u, d) → 陽子 (u, u, d) + 電子 (e)  
 陽子 (u, u, d) → 陽子 (u, u, d) + 陽子 (u, u, d) + ニュートリノ (ν<sub>u</sub>)

2012/8/13 宇宙論入門

## 基本粒子と基本力

### 基本粒子

- クォーク
  - アップ (u)
  - ダウン (d)
  - チャーム (c)
  - ストレンジ (s)
  - トップ (t)
  - ボトム (b)
- レプトン
  - 電子 (e)
  - 電子ニュートリノ (ν<sub>e</sub>)
  - ミュー粒子 (μ)
  - ミューニュートリノ (ν<sub>μ</sub>)
  - タウ粒子 (τ)
  - タウニュートリノ (ν<sub>τ</sub>)

### 基本力

- 光子 (電磁力)
- グルーオン (強い力)
- Z/Wボソン (弱い力)
- 重力子 (重力)

2012/8/13 宇宙論入門

## 力の統一: 統一場理論

- 特殊相対性理論 + 量子論 = 「量子電気力学」
- 電磁力 + 弱い力 = 「量子電弱力学」
- 強い力 = 「量子色力学」
- 量子力学 + 重力場 = 量子重力理論?

● 電弱力  
 ● GUT力  
 ● 万物力

2012/8/13 宇宙論入門

## 基本粒子と基本力の統一 すべては光子だった!?

- 基本粒子
  - クォーク
  - レプトン
- 基本力
  - 光子
  - グルーオン
  - Z/Wボソン
  - 重力子
- ヒッグス粒子

2012/8/13 宇宙論入門

## ヒッグス粒子

LHC/CERN

### 質量の起源

● ヒッグス粒子の働き

宇宙誕生初期  
ヒッグス粒子がないと...  
光速(質量ゼロ)

現在の宇宙  
ヒッグス粒子があると...  
動きにくい  
ヒッグス粒子の海

あらゆる粒子は光速で動く  
ヒッグス粒子は動きにくさ(=質量)の源

現実の世界  
光速よりも速い  
振動  
クォーク  
レプトン  
W  
Z  
ヒッグス場の海

2012/8/13

## ヒッグス粒子

物質粒子	第1世代			第2世代			第3世代		
	クォーク	アップ (u)	ダウン (d)	チャーム (c)	ストレンジ (s)	トップ (t)	ボトム (b)	ニュートリノ (ν <sub>e</sub> )	ニュートリノ (ν <sub>μ</sub> )
レプトン	電子 (e)	ミューオン (μ)	タウ (τ)	ニュートリノ (ν <sub>e</sub> )	ニュートリノ (ν <sub>μ</sub> )	ニュートリノ (ν <sub>τ</sub> )	光子 (γ)	Wボソン (W)	Zボソン (Z)

質量を与える粒子 (未発見)  
 ヒッグス粒子 ヒッグス粒子 ヒッグス粒子

図1: 現在の素粒子像「標準模型」の世界

2012/8/13 宇宙論入門

## 超弦理論

### ひも理論 + (超対称性粒子)

- ひも理論 (弦理論)
  - 点粒子
  - ～ 開いた弦
  - 閉じた弦

**THE SIZE OF STRINGS**

Glass of water	Water molecule	Hydrogen atom	Proton	String
$\sim 10^{-1} \text{ m}$	$\sim 10^{-10} \text{ m}$	$\sim 10^{-10} \text{ m}$	$\sim 10^{-16} \text{ m}$	$\sim 10^{-35} \text{ m}$

Strings are the smallest, most accessible objects known to physics. Here, a progression zooms into a glass of water reveals the relative scales of a water molecule, a hydrogen atom, a proton, an electron, a quark, and a string. The sizes of these objects begin approximating their orders of magnitude the moment you get to strings. If all other were the size of our solar system, a string would be somewhat larger than an atomic nucleus.

## 超弦理論

### (ひも理論) + 超対称性粒子

超対称性

Bosons    Fermions

## 高次元時空: コンパクト化

2次元  $\rightarrow$  1次元にみえる  $10^{-35}$

宇宙論入門

## ブレーンワールド

### ブレーンワールド

われわれの認識する4次元時空は、より高次元の次元の一部であり、高次元空間における4次元時空は3次元空間における2次元の膜のようなものだという考え。

3次元空間 3ブレーン

11次元 BULK

他の3次元空間 3ブレーン

## ブレーンワールド

### 超ひも粒子

- 電磁力、弱い力、強い力はブレーン内に閉じ込められているが、重力だけは余剰次元へ抜け出すことができる

ブレーン    パルク

電磁力    重力

M-theory

## ブレーンワールド

### エピキロティック宇宙論

#### EKPYROTIC SCENARIO

2012/8/13



## 7 ちょうどいい宇宙

- 月の大きさ
  - 皆既日食の時代
  - 海洋のリズム
- 力の大きさ
  - 万有引力
  - 原子の力
  - 時間と空間
- ちょうどいい宇宙

- ゴルディロックと3匹の熊
  - ちょうどいい住処
  - 住処のもちぬし



2012/8/13

宇宙論入門



## ゴルディロックと三匹の熊



2012/8/13

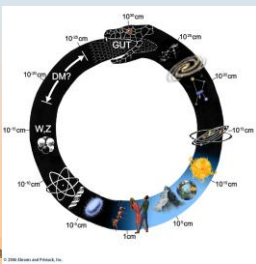


## ちょうどいい宇宙 巨大数の謎



- エディントンの巨大数
  - 宇宙に存在する粒子数
  - $= (10^{40})^2$
  - 宇宙半径/電子半径
  - $= 10^{40}$
- ディラックの巨大数
  - クーロン力/重力
  - $= 10^{40}$

ウロボロスの蛇



2012/8/13

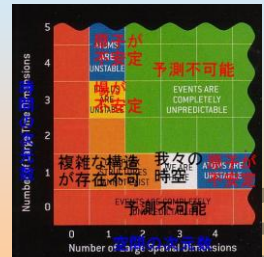
宇宙論



## ちょうどいい宇宙 時間と空間の次元



- 時間が1次元
  - 2次元あると因果律が成り立たない
- 空間が3次元
  - 2次元だと単純すぎ
  - 4次元以上は不安定



偶然の一致？



2012/8/13

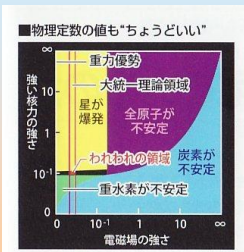
宇宙論入門



## ちょうどいい宇宙 4つの力



- 万有引力
  - 大きいと星がつぶれ、小さいと星ができない
- 電磁力
  - 大きいと原子核破壊
- 強い力
  - 大きいと核融合暴走
- 弱い力
  - 大きいと元素できない



2012/8/13

宇宙論入門



## ちょうどいい宇宙 宇宙の定数



- 宇宙定数  $\Omega = 1$  (平坦)
  - $\Omega < 1$ だと急膨張し星や銀河ができない
  - $\Omega > 1$ だと宇宙は収縮に転じつぶれる
- 膨張速度  $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ 
  - 遅いと宇宙初期に核融合しすぎ鉄だらけ

偶然の一致？



2012/8/13



## ちょうどいい宇宙 人間原理

**ディッケの弱い人間原理**

- 現在非常に特殊な時期
  - 10億年時だとまだ生命はないし、1000億年時だと太陽は死滅
- この時期にのみ、宇宙を認識する生命が存在している

**カーターの強い人間原理**

- 物理定数が適当でない宇宙にはそもそも生命は発生しないので認識されない
- 生命が存在できる範囲に物理定数が調整された宇宙にのみ、生命は存在し宇宙が認識されて宇宙も存在できる

2012/8/13      宇宙論入門

## ちょうどいい宇宙 最終人間原理

- この“幸運な宇宙”は偶然
  - 確率的にありえない
- 神・造物主が創造した
  - それにしては出来が悪い
- 無数の“多宇宙”の一つ
  - 科学者には支持多い
- 宇宙が自分自身で全して一となった
  - 生命(観測者)と宇宙の相互作用で収斂した

**ホイーラーの自己参照する宇宙**



2012/8/13      宇宙論入門

## 並行宇宙

- 量子力学的観測
- シュレジンガーの猫



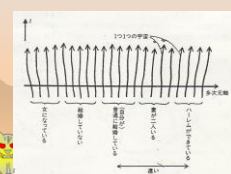
- 分岐する世界
- 多世界解釈




2012/8/13      サイエンスカフェ

## 並行宇宙

- 物理定数や物理法則が異なる



- インフレーション
- ブレーンワールド



2012/8/13      サイエンスカフェようご

## レベルIV並行宇宙

- レベルI
  - 無限宇宙の別地球
- レベルII
  - インフレーション宇宙
  - ブレーンワールド
- レベルIII
  - 量子力学的多世界
- レベルIV
  - 異界、魔界



2012/8/13      サイエンスカフェ

## 『涼宮ハルヒの憂鬱』 ～最終人間原理～

- ハルヒの望む世界
- 宇宙が望む世界
- 最終人間原理はハルヒ原理





2012/8/13      サイエンスカフェ