

# アインシュタインと宇宙の謎

京都大学基礎物理学研究所

江口徹

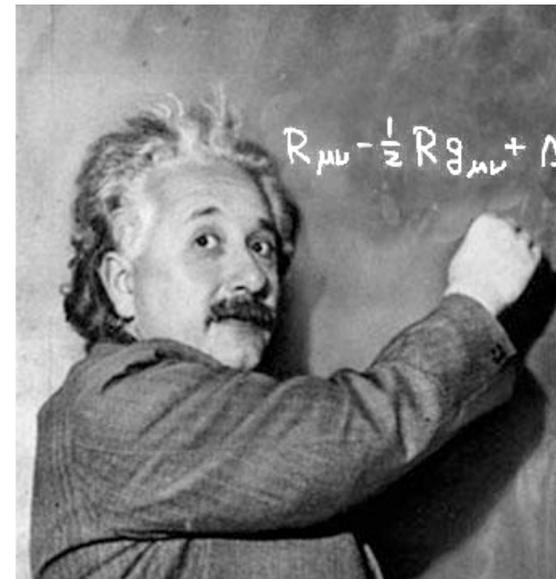
アインシュタイン奇跡の年：1905年  
(国際物理年：2005年)

特殊相対性理論

光電効果 → 量子力学

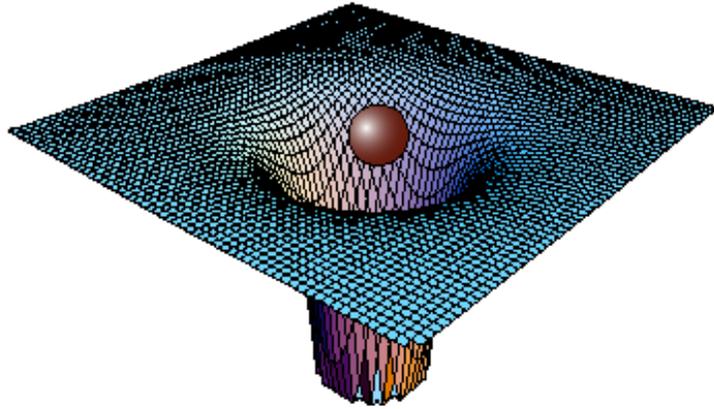
ブラウン運動 → 統計力学

20世紀の物理学の柱



アインシュタイン東大講演,1922

## ♠ 一般相対性理論： 1916年



質量エネルギーなど  
重力の源があると、  
周りの時空にゆがみを生じる

歪んだ時空の中で運動する粒子には、重力が働くように見える

### 等価原理

慣性質量と重力質量は高い精度で一致

$$m_I \alpha = F = \frac{GMm_G}{r^2}$$

$$m_I = m_G$$

## ★アインシュタイン方程式

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R + \Lambda g_{ij} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ij} \quad , i, j = 0, 1, 2, 3$$

時空
物質

計量
宇宙項 (アインシュタイン: 人生最大の失敗)

## ★測地線の方程式

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma_{jk}^i \frac{dx^j}{ds} \frac{dx^k}{ds} = 0$$

粒子は最短距離の経路に沿って動く

## ♠ 一般相対論の予言:

- 太陽の周りの光の屈折

$$\theta = \frac{4GM_{\odot}}{R_{\odot}} = 1.75 \text{秒}$$

エディントン 日食の観測  
1919年

- 水星の近日点移動

$$\theta = 43 \text{秒} / 1 \text{世紀}$$

19世紀より知られていた

- 重力波

中性子星連星からの重力波の放射: テイラー・ハルス1993年、  
LIGO実験 現在進行中

- 膨張宇宙の解

ハッブル1929年: 遠くの天体ほど早い速度で遠ざかる  
 ビッグバン

- ブラックホール

実験的な証拠が見つかった

# アインシュタイン晩年の夢

## 重力と電磁気力の統一

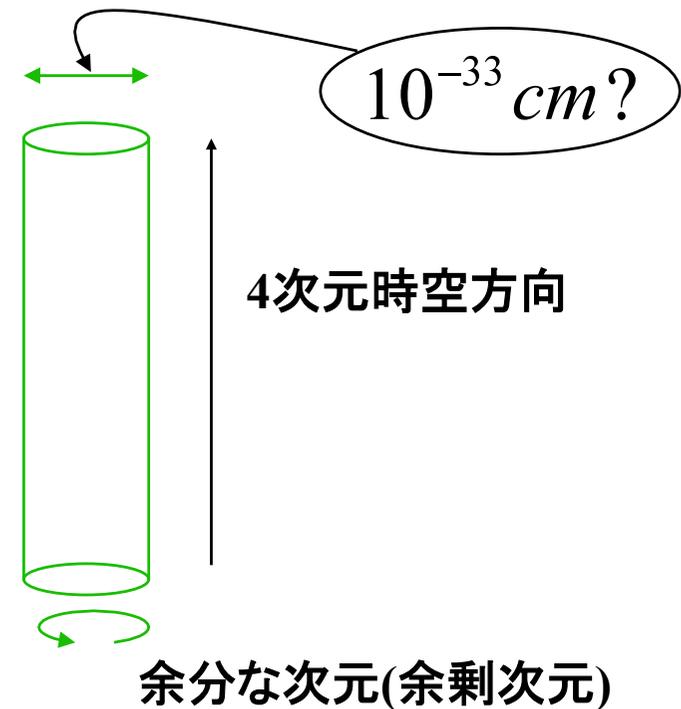
## 5次元時空の一般相対論

余分な次元は小さくて見えない

## 5次元の計量

$$G_{ij} = g_{ij}, \quad G_{i5} = A_i \quad \text{ゲージポテンシャル}$$

高次元統一理論(カルツァ-クライン理論)



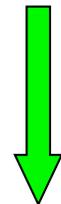
## ♠ 現代の素粒子論 :

☆強い相互作用:  
(核力)

☆電磁気力:  
繰りこみ理論

☆弱い相互作用:  
(原子核の崩壊)

中間子論



QCD(量子色力学)



弱電磁統一理論

(ワインバーグ・サラム模型)

これらの力はゲージ理論で理解できる。

一方

☆重力:

巨視的な重力現象は一般相対論で正しく記述される。  
しかし一般相対論は微視的な領域では破綻を生じる。

一般相対論は繰り込み可能な理論で無いため  
量子論的な取り扱いをすると、計算量がすべて発散  
するという意味の無い結果を与える。

(一般相対論と量子論はそのままでは互いに矛盾！)

膨大な量の物質が極微の空間に押し込められる

☆宇宙創生  
☆ブラックホール } の謎を解くためには・・

ミクロな世界の重力理論が必要

長い試行錯誤の歴史:

超重重力理論(超対称性を持つ一般相対論)  
などが期待された。

しかし、うまくいかない・・・

♡ 最有力候補 ♡  
超弦理論:

南部 陽一郎



開いた弦⇒ゲージ理論



エドワード・ウィッテン



出所 <http://www.sci.osaka-u.ac.jp/uploads/swfupload/20090525160604.jpeg>

閉じた弦⇒重力理論



ひもの長さ =  $10^{-33}$  cm

出所 [http://www.claymath.org/research\\_award/Witten/](http://www.claymath.org/research_award/Witten/)

素粒子は極微の紐から出来ている。  
紐の基底状態  { ゲージ粒子  
重粒子  
紐の励起状態は質量の大きな  
素粒子に対応する。

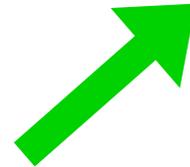
低いエネルギーの現象ではゲージ理論や一般相対論を再現。

しかし、極微の世界、超高エネルギーの現象でひもの励起状態が効いてくる。  一般相対論、ゲージ理論を修正。

数学的な整合性をもつ量子重力理論を与える。

ひもは10次元時空に存在(カルツァ-クライン型理論)

$$10\text{次元} = 4\text{次元} + 6\text{次元}$$



素粒子の内部空間  $K$  (サイズ $\sim 10^{-33}$  cm)

☆素粒子の持つ様々な量子数や

素粒子の世代の起源

空間 $K$ は特別な幾何学的性質を持つ

## ☆カラビリーヤウ多様体

$R_{ij}(g)=0, c_1(K)=0$   
 曲率のU(1)成分が消える



4次元での超対称性

## ☆ALE空間 ( $\times S^2$ )

消滅サイクルが存在



ゲージ対称性を  
生成

詳しい研究が行われている



S. T. ヤウ

♣ 弦理論にはこの10年感で非常に大きな発展が起きた！ (2nd string revolution)

☆string duality:  
(S,T 双対性)

異なるように見えた5種類の  
弦理論はすべて同一  
タイプI,タイプIIA,IIB,混成弦<sub>1</sub>,混成弦<sub>2</sub>

☆Dブレーンの発見:

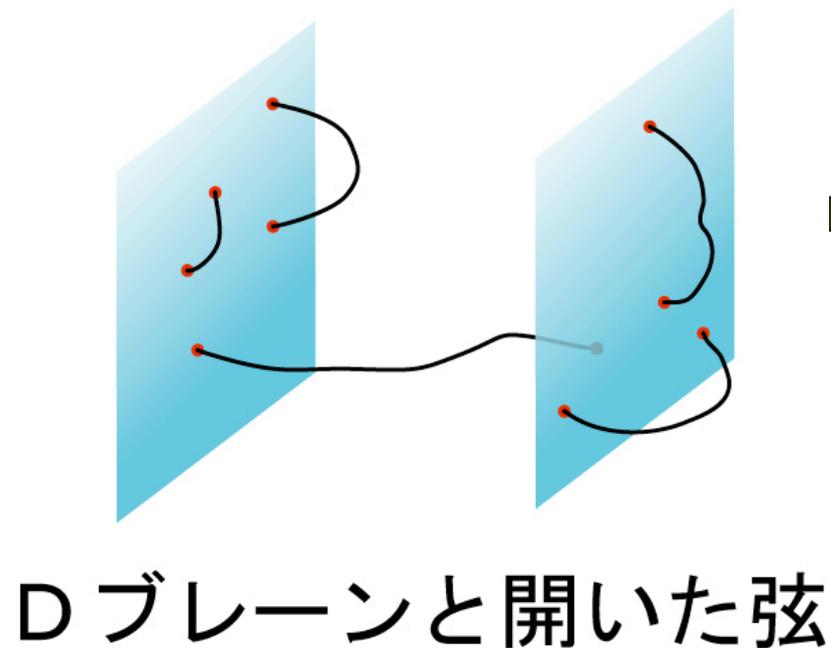
10次元時空中の中の超平面  
局在したゲージ理論が存在

☆M理論:  
(Mystery)

弦理論よりもさらに基本的な  
11次元の理論の存在の可能性

## Dブレーンとゲージ理論

Dブレーンには開いた弦の端点が付く



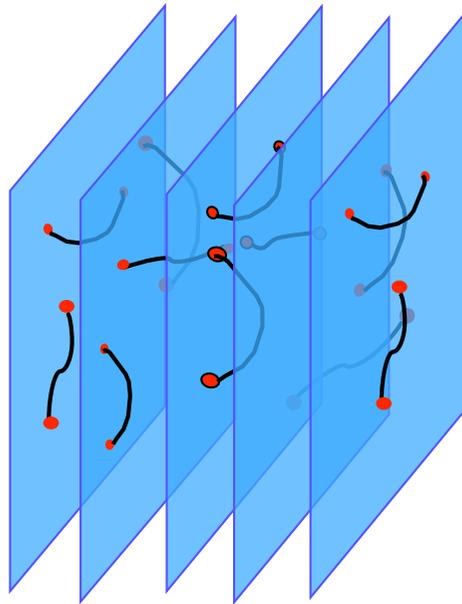
ブレーン上に局在した  
ゲージ場が存在

我々の住む世界が4元  
的に広がったブレーン  
である可能性がある

- ◆ **ブレーンワールド (brane world):**  
重なったブレーン、交差するブレーンなども考える
- ◆ **余剰次元 (Extra Dimension):**  
弦理論では6つの余剰次元。実験的な検証の可能性
- ◆ **宇宙創生の新しい描像:**  
ブレーン(反ブレーン)の衝突による宇宙の創成など

## ◆ AdS/CFT対応

重力理論



重力理論

ゲージ理論

D3ブレーンの周りの空間は歪んで5次元の反・ドジッター空間  $AdS_5$  (高次元の擬球面) になる。

D3ブレーン上のゲージ理論と  $AdS_5$  上の重力理論の間には密接な関係がある。

ゲージ理論の強結合領域は重力理論の弱結合領域に対応。 $(g^2 N = R^4)$  このため強結合のゲージ理論は重力理論にマップして調べることが出来る。

非常に詳しい研究が行なわれている。(両者とも完全可解系らしい)。

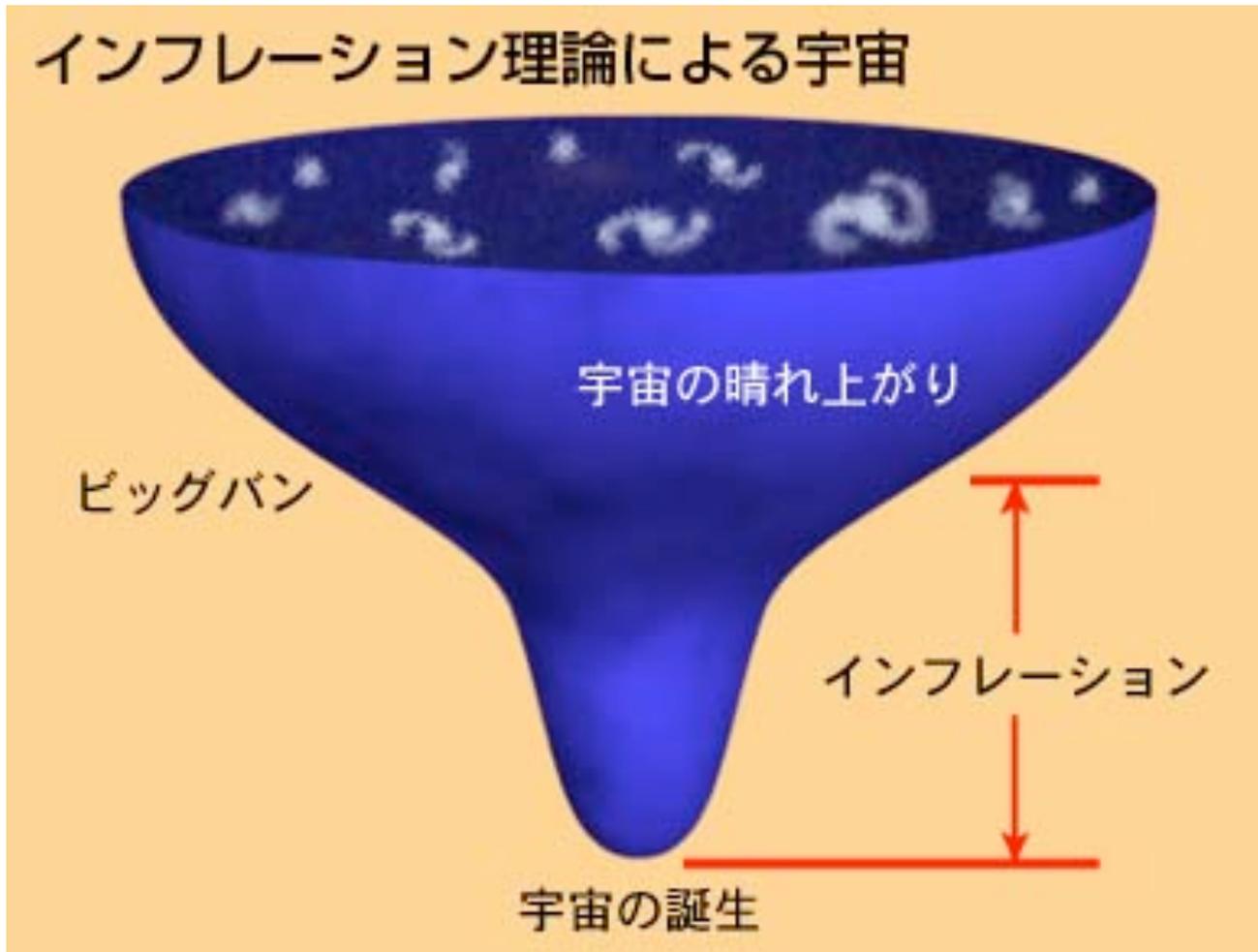
びっくりする新展開

高温のQCD、QGPの物性、ずり粘性率の計算に応用された。

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$$

## ♠ 宇宙論の進展

# インフレーション: 我々の住む宇宙を説明



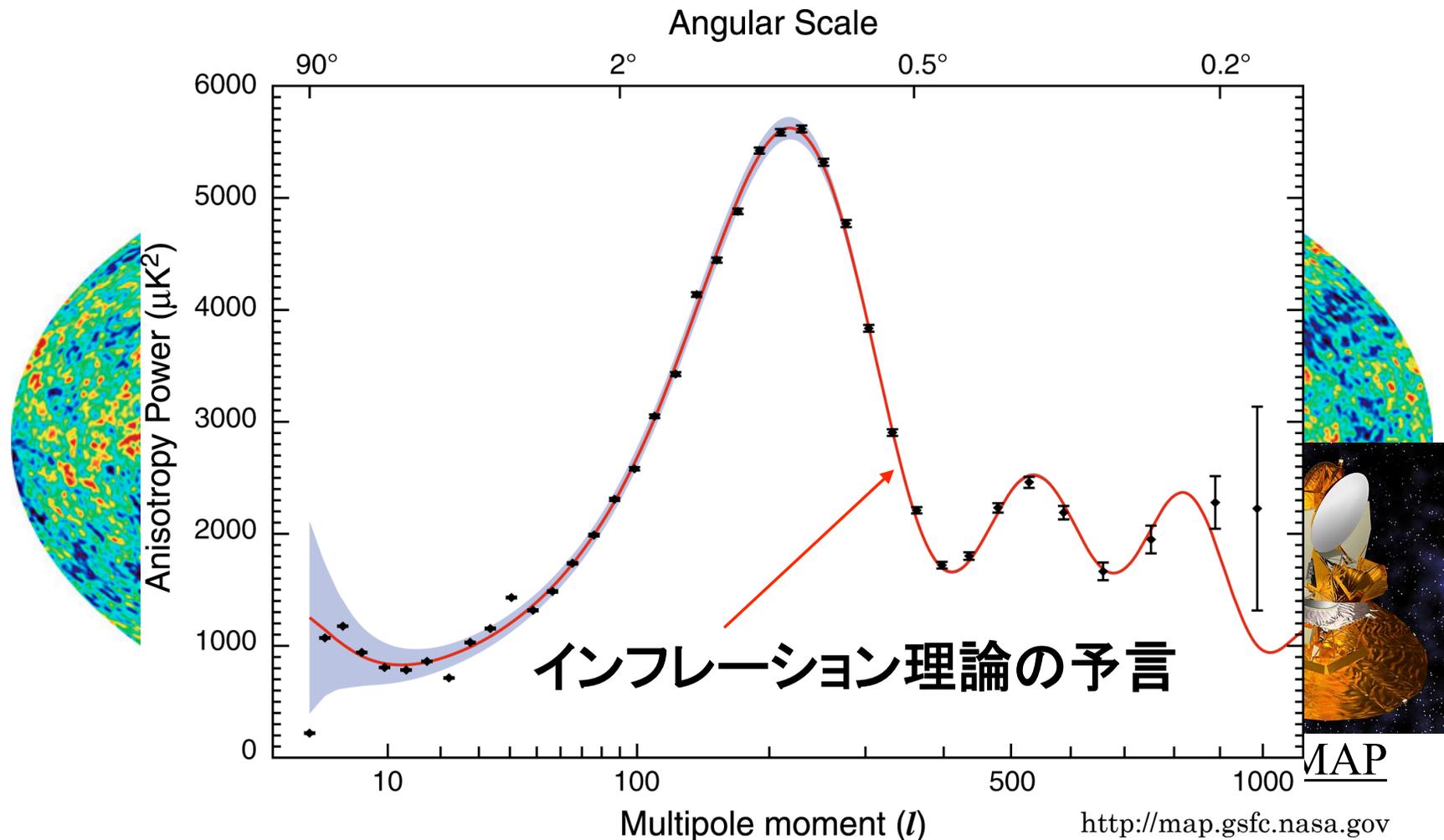
宇宙の創成期に  
宇宙の大きさが  
指数関数的な  
膨張する時期が  
あった



現在の宇宙の  
平坦さ、一様性

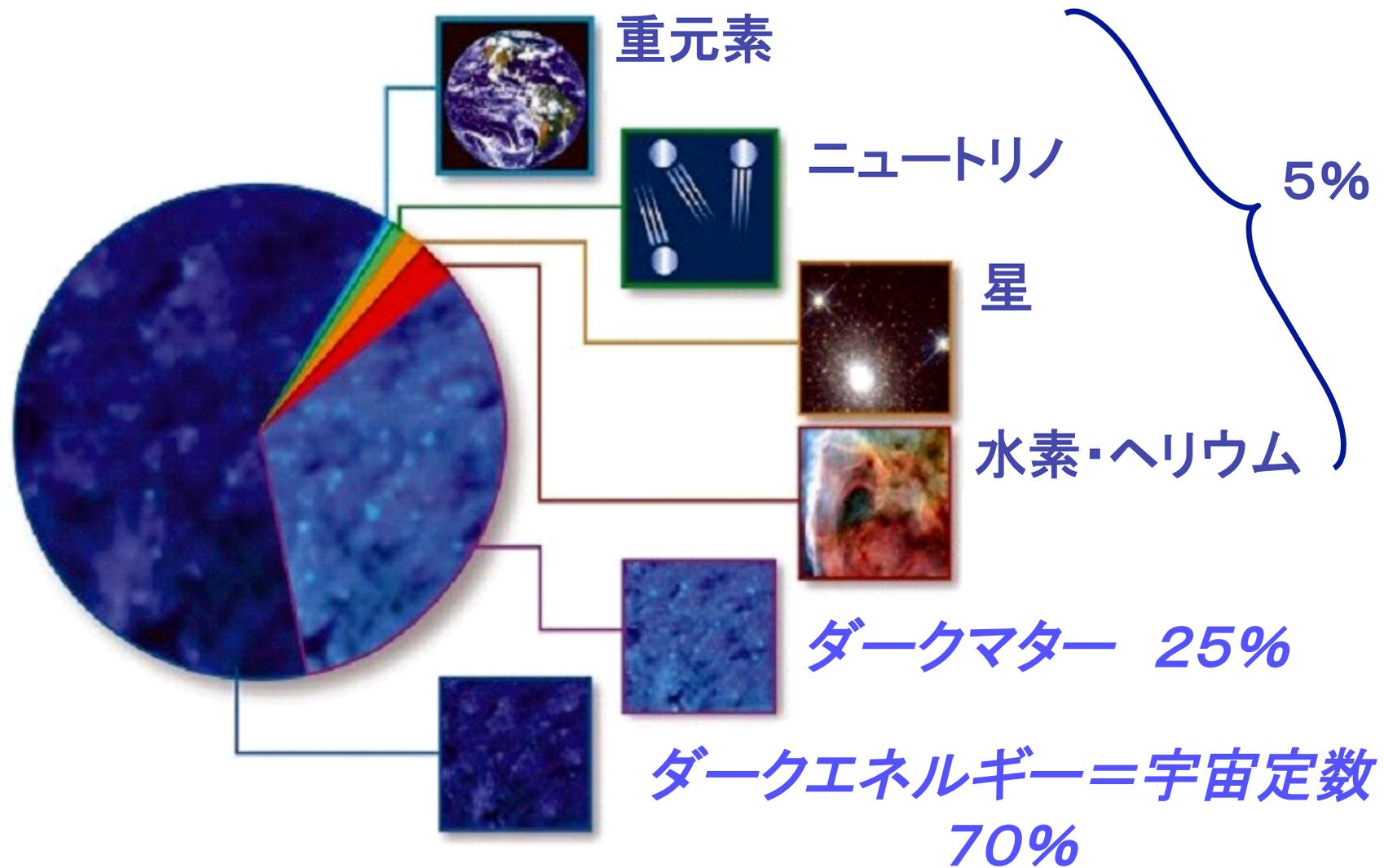
# ♠ 新しい観測結果 (WMAP)

## ☆宇宙背景輻射の揺らぎ



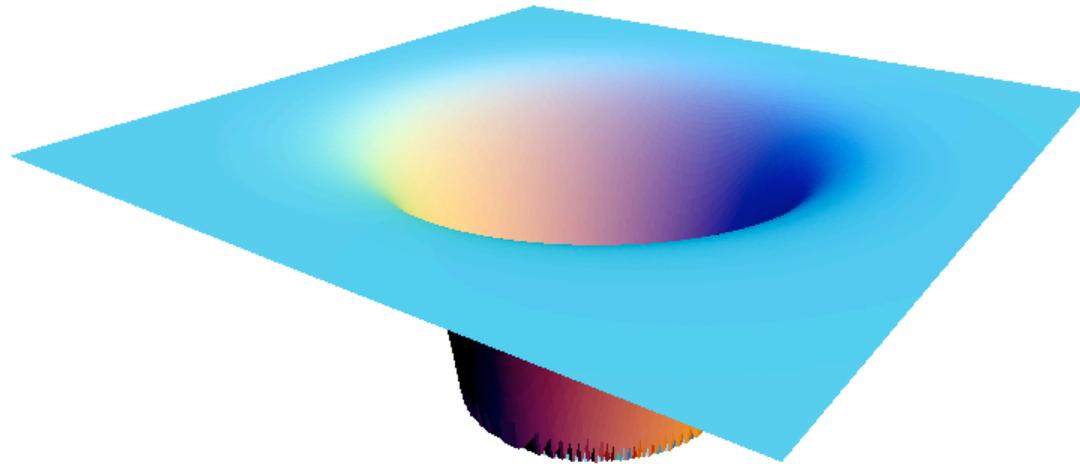
宇宙の大きさが今の千分の1くらいだった時の温度分布

# ☆宇宙の構成要素

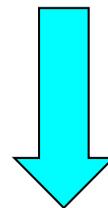


新たな謎； 構成要素の95%は未知の物質

♠ 弦理論の重要な成果：  
ブラックホールのエントロピーの導出



ブラックホールは情報を溜め込んでいる



エントロピーを持つ

$$S = \frac{A}{4}$$

ベッケンシュタイン・ホーキングの公式  
( $A$  はブラックホールの表面積)

一方  $W = \exp S$   $W$ : 縮重度 (ボルツマンの関係)

課題: ミクロな量子状態を数えて縮重度を求める

解決: 超弦理論はベッケンシュタイン・ホーキング  
の公式を再現

(強結合: ブラックホール 

弱結合: Dブレーンの複合系)

## ♠ 超弦理論の克服すべき課題:

超対称性(supersymmetry)に頼っている。

超対称性:

ボソンとフェルミオンが常に対になって理論に現れる。

非繰り込み定理。ホロモーフィー(正則性)。

しばしば、理論の厳密解を与える。

自然界では超対称性は破れた形で存在。

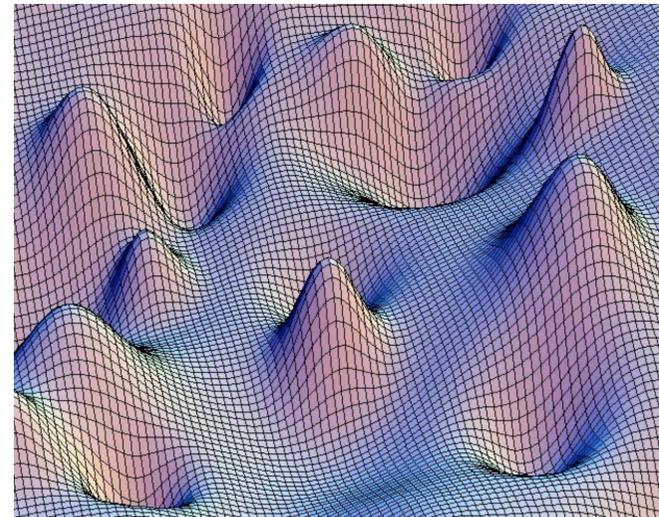
超対称性の(自発的)破れの機構が良く分かっていない。

超対称性が無いと近似に信頼性がなくなる

## 最近の進展

### ▪ string landscape

超弦理論は非常に多くの真空( $\sim 10^{300}$ 個)を持ち、そのほとんどは負で大きな宇宙項を持つ。現実の宇宙は小さな正の宇宙項を持っている。



正しい真空を選ぶ原理？ 論争中

## ♠ 宇宙の謎に超弦理論で迫る

超弦理論は30年以上にわたって全世界の研究者が参加して押し進めている一大プロジェクト。この先、大きな壁にぶつかる可能性もあるが宇宙の構造を解き明かす基本的な鍵はこの理論に秘められていると思われる。

今後の進展は物理学の他の分野にも大きな影響を与える可能性がある。