

# 宇宙の創生と未来

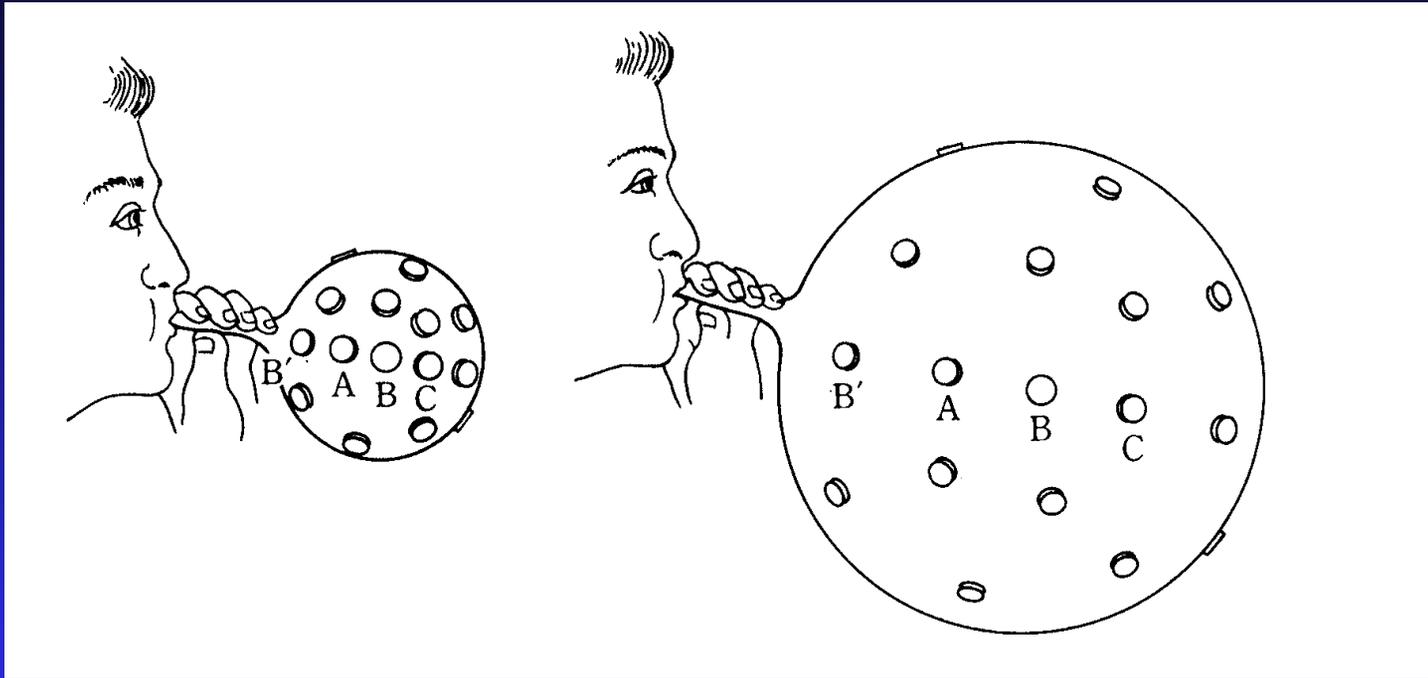
## - 宇宙論の新展開 -

東京大学大学院理学系研究科

佐藤勝彦

1. ビッグバンモデル解説
2. インフレーション理論と無からの宇宙創生
3. 観測的証拠
4. 新たな展開と生じた謎

# 膨張宇宙の発見 (E.Hubble,1929)



ハッブルの法則：

遠くにある銀河ほど、  
高速度で遠ざかっている。

ノーベル賞を束にして出してよい大発見。

もはやこの世界は永遠不変ではなく、始まりがあり、動的に進化する存在である。

$$V = H_0 \cdot r$$

# ビッグバン宇宙モデルの成立

1. 宇宙が膨張することは、発見の7年前に理論的に予言されていた。

フリードマンはアインシュタインの一般相対論の式を解き、宇宙が膨張することを示した(1922)。

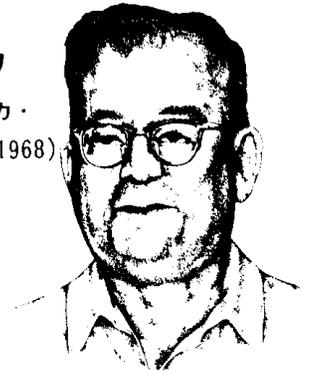
●フリードマン  
(ソ連・1888～1925)



2. ガモフは、原子核物理学に基づき、宇宙は熱い火の玉から始まらなければならないことを示した(1946)。

宇宙を構成する元素はほとんど水素やヘリウムであり、重元素は微量である。これを説明するためには、巨大な一個の原子核として始まった宇宙は高温で分裂しなければならない。

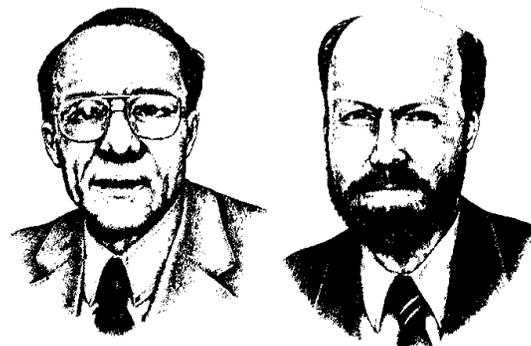
●ガモフ  
(アメリカ・1904～1968)



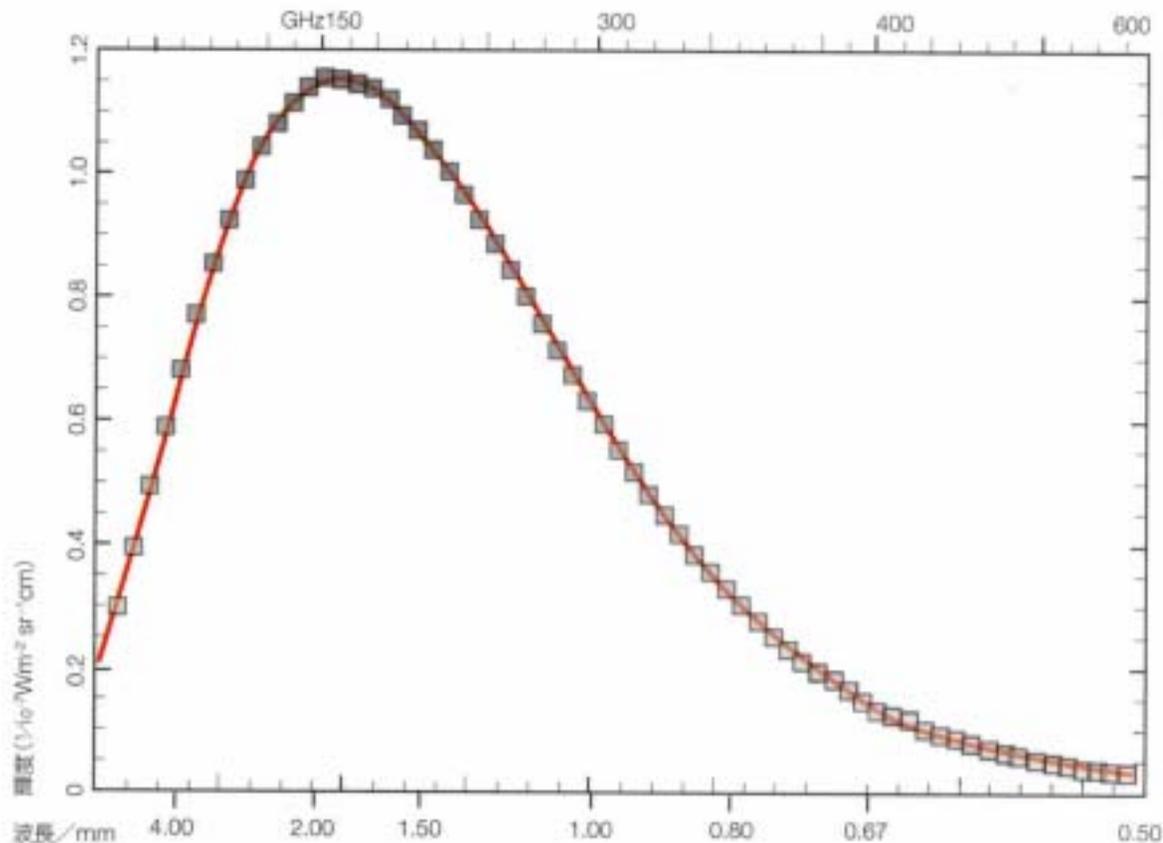
### 3. 宇宙マイクロ波背景放射の発見(1966)。 宇宙が熱い火の玉として始まった証拠

ペンジャス  
(アメリカ・1933 -)

ウィルソン  
(アメリカ・1936 -)



COBE衛星が観測した宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル



ガモフの弟子たちがビッグバンモデルより予言した、火の玉宇宙の名残である宇宙背景放射が発見された。

物理学の偉大なる勝利である。

特異点

# ビッグバンモデルの問題点

ビッグバン宇宙は、物理学が破綻する時空の「特異点」から始まらなければならない。



$t$  ↑



これらの困難を解決するため、インフレーション理論が提案された。

特異点

— 物理法則では決まらない神の一撃 —

# ビッグバンモデルからインフレーション理論へ

## ■ ビッグバンモデルの困難

1. なぜ火の玉として始まるのか？
2. 現在の宇宙構造の起源を説明できない。

銀河や銀河団の種を宇宙初期で仕込もうとしても、地平線(因果律)を超えてしなければならない。

3. 宇宙背景放射が地平線(因果律)を越えて一様であるのは謎である。
4. 宇宙は極めて平坦であるが、相対論から考えると不思議である。

# 力の統一理論

## —アインシュタインの夢—

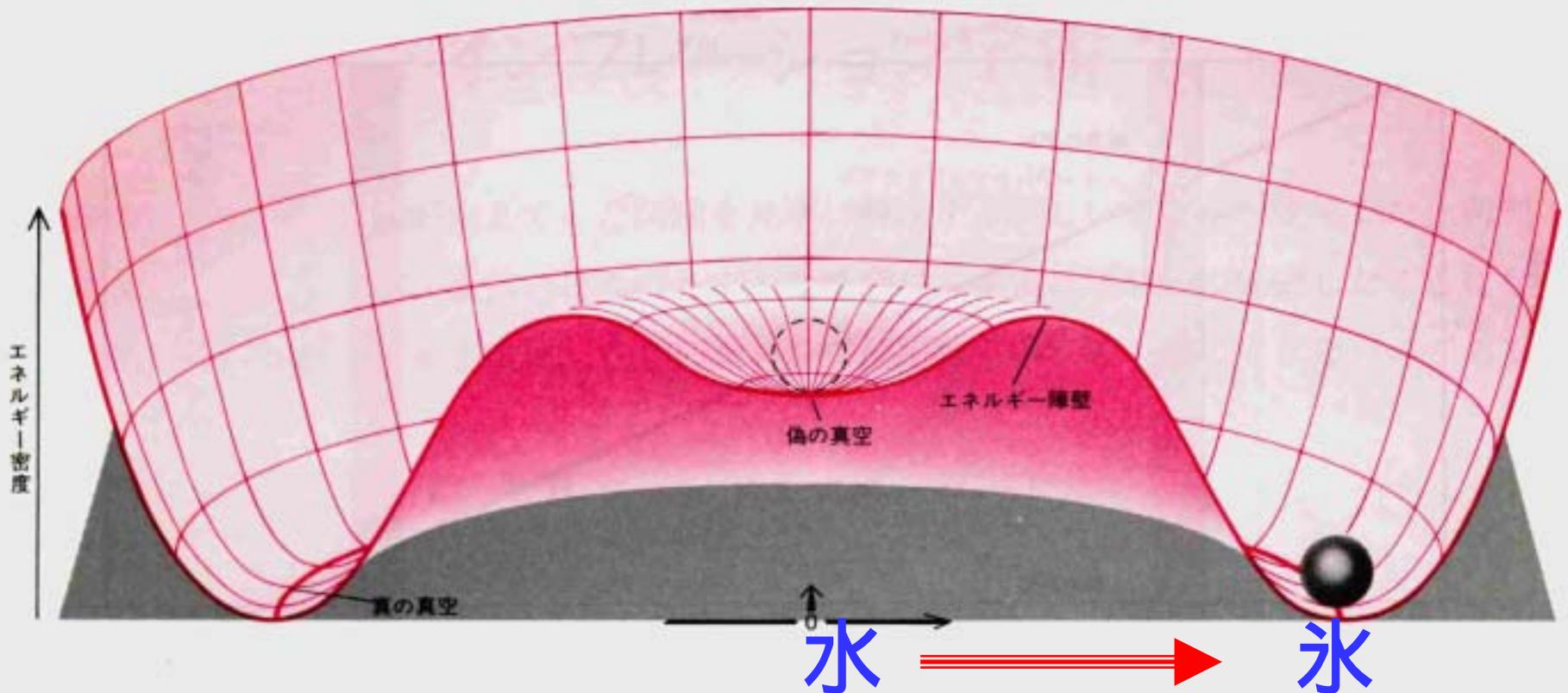
自然界を支配している4つの力

1. 重力
2. 電磁気力
3. 弱い力
4. 強い力

を、ひとつの力に統一する。

# 真空の相転移

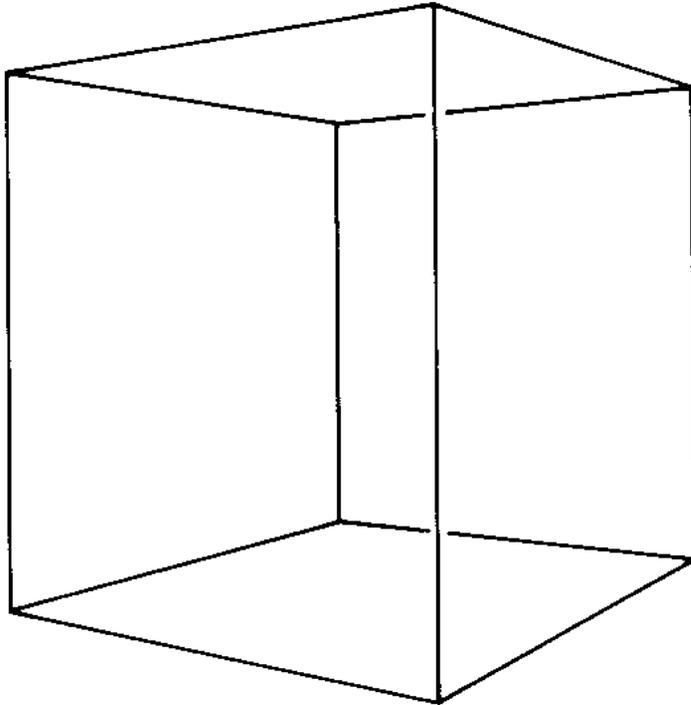
によって力は枝分かれを起こす。



真空も水が氷になるように相転移を起こす。

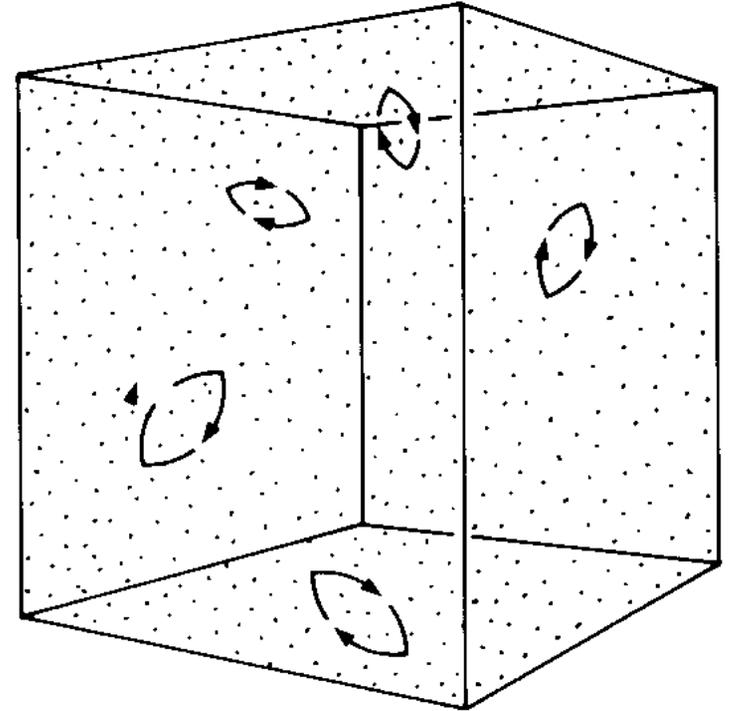
# 「真空」も物理学の実体である。

古典的真空



||  
からっぽの空間

量子論的真空



||  
真空も量子論的にゆらいでいる

水と同じように相転移を起こす。真空の相転移により、力は枝分かれを起こす。

アインシュタイン方程式と統一理論  
の真空の式(ヒグス場=スカラー場)  
の式を連立して宇宙膨張を解く。

1. 真空のエネルギーに働く斥力によって、宇宙は  
急激に膨張する。

真空のエネルギーが存在することはアインシュタインの宇宙定数が存在するの  
と数学的には同値。

2. 相転移が終わるときに真空のエネルギーは潜  
熱として解放され宇宙は、火の玉宇宙になる。

—火の玉宇宙の誕生を説明—

宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。

# インフレーション理論とその予言。

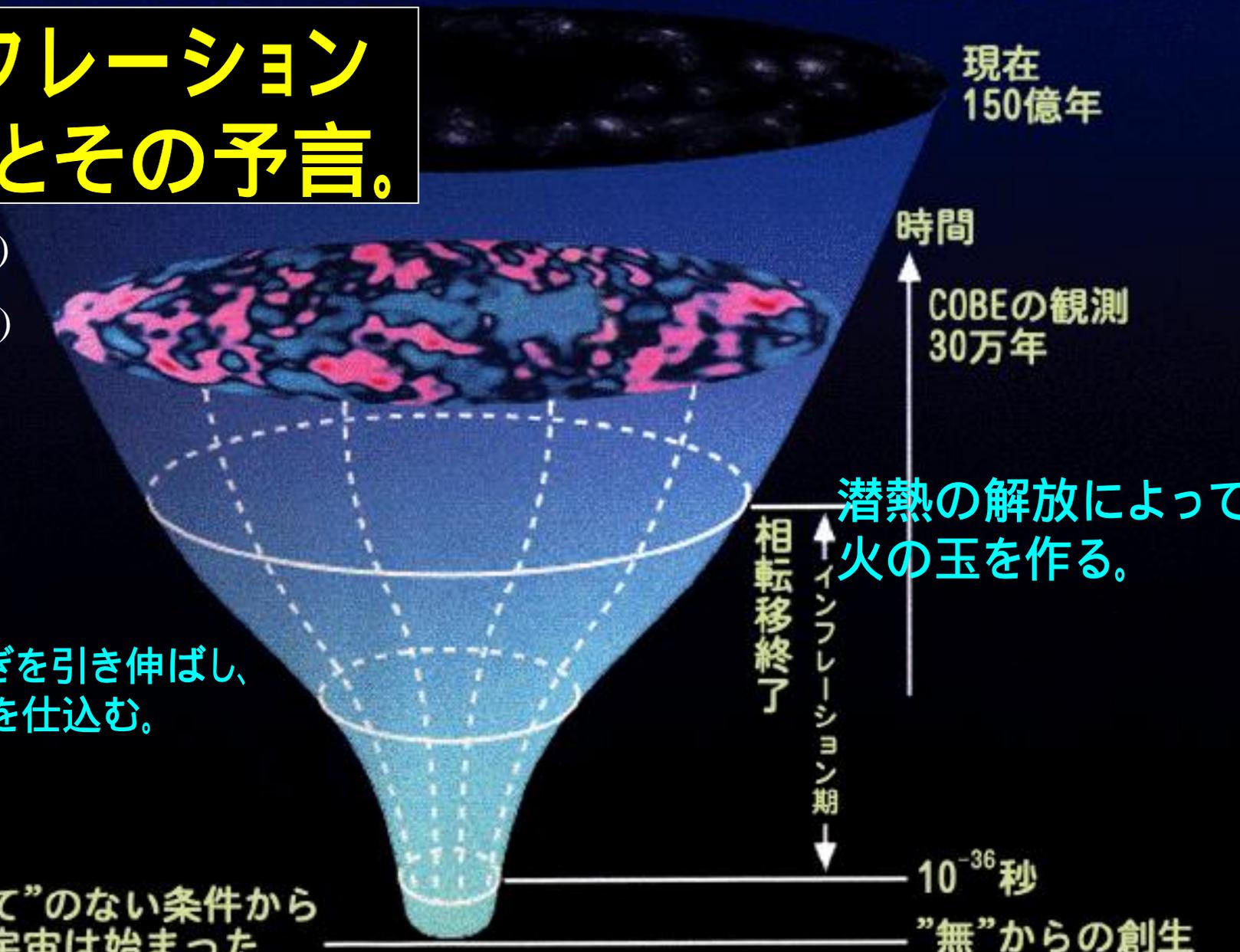
K.Sato (81)

A.Guth(81)

等

量子揺らぎを引き伸ばし、  
構造の種を仕込む。

”はて”のない条件から  
宇宙は始まった



潜熱の解放によって  
火の玉を作る。

相転移終了

↑インフレーション期↓

時間

COBEの観測  
30万年

現在  
150億年

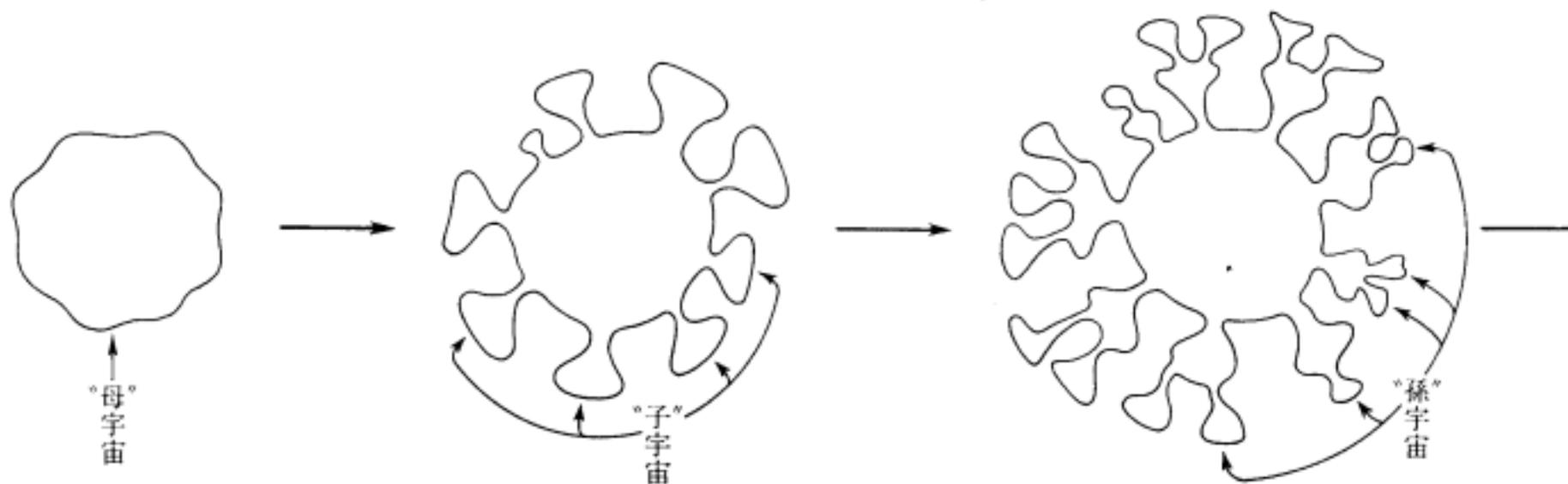
$10^{-36}$ 秒

”無”からの創生

# 宇宙の多重発生

(Sato, Sasaki, Kodama, Maeda, 1982)

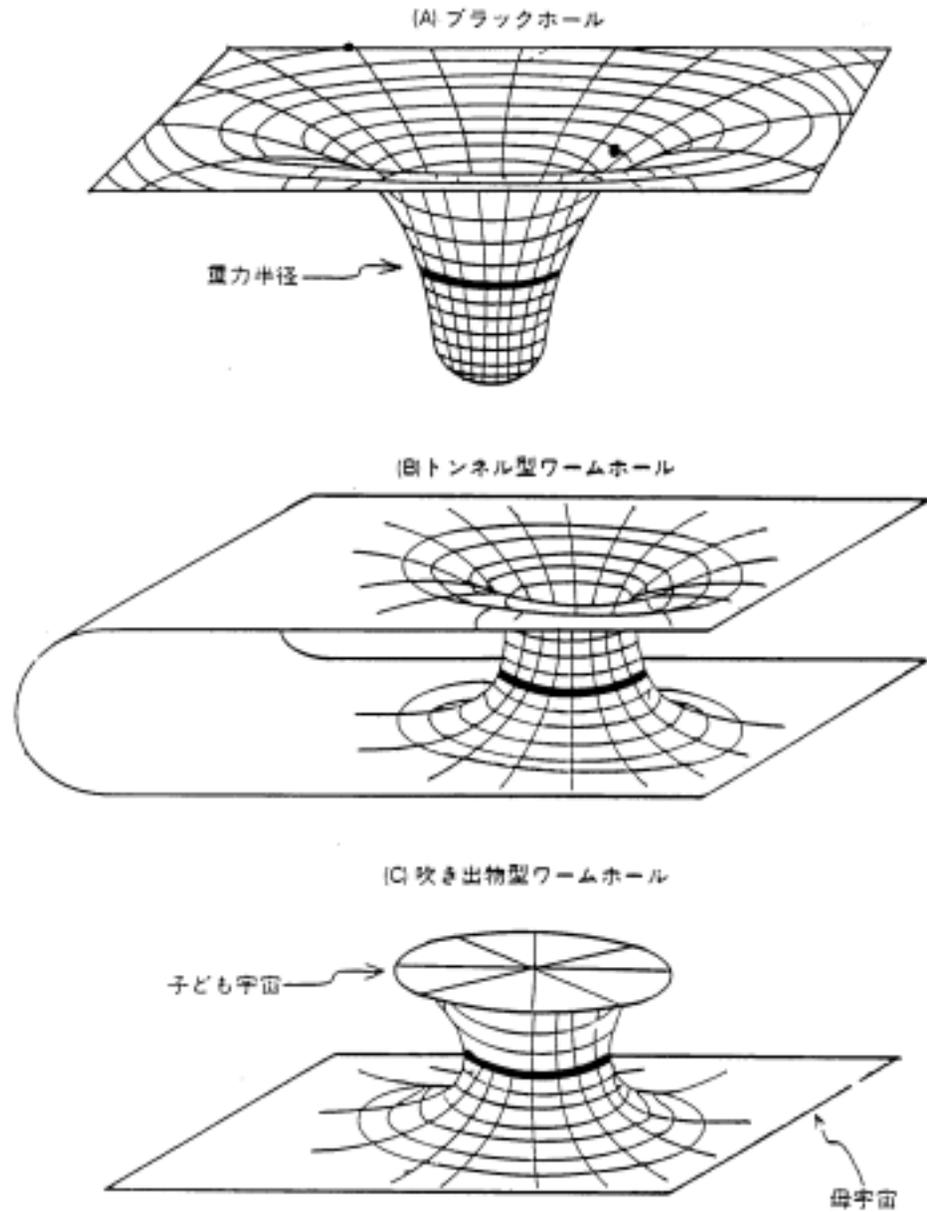
インフレーション期に宇宙は無限に作られる。



無限の宇宙(multiverse)。

-宇宙は我々の宇宙だけではなかった-

# 母宇宙から子宇宙、孫宇宙へ



# インフレーション理論

## 1. ビッグバン宇宙(火の玉宇宙)を作るメカニズムである。

小さな量子宇宙をマクロ宇宙へと膨張させ、量子揺らぎを引き伸ばし宇宙構造の種を仕込み、相転移によって真空のエネルギーを熱エネルギーに変え、宇宙に物質エネルギーを満たす。

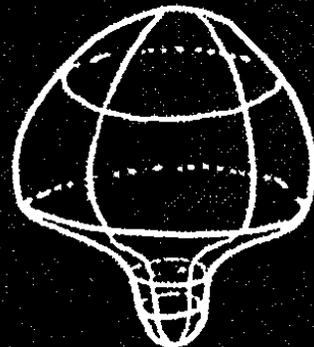
(しかし、統一理論が未完のため、インフレーションを起こす場が不明。インフラトン場とよばれている。)

## 2. 無限に宇宙を作るメカニズムである。 母宇宙から子宇宙を、そこから孫宇宙へと .....無限に。

# Creation of Universes from nothing !

— 宇宙は無から創生される。 —

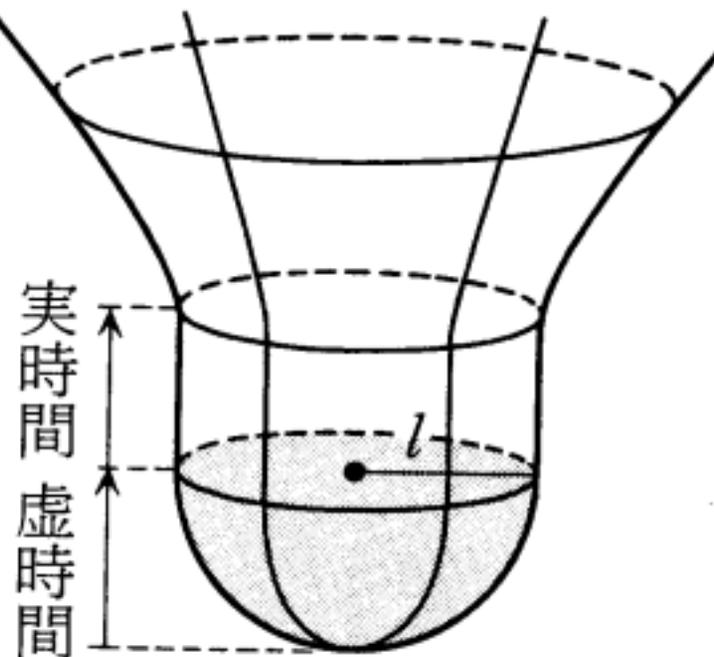
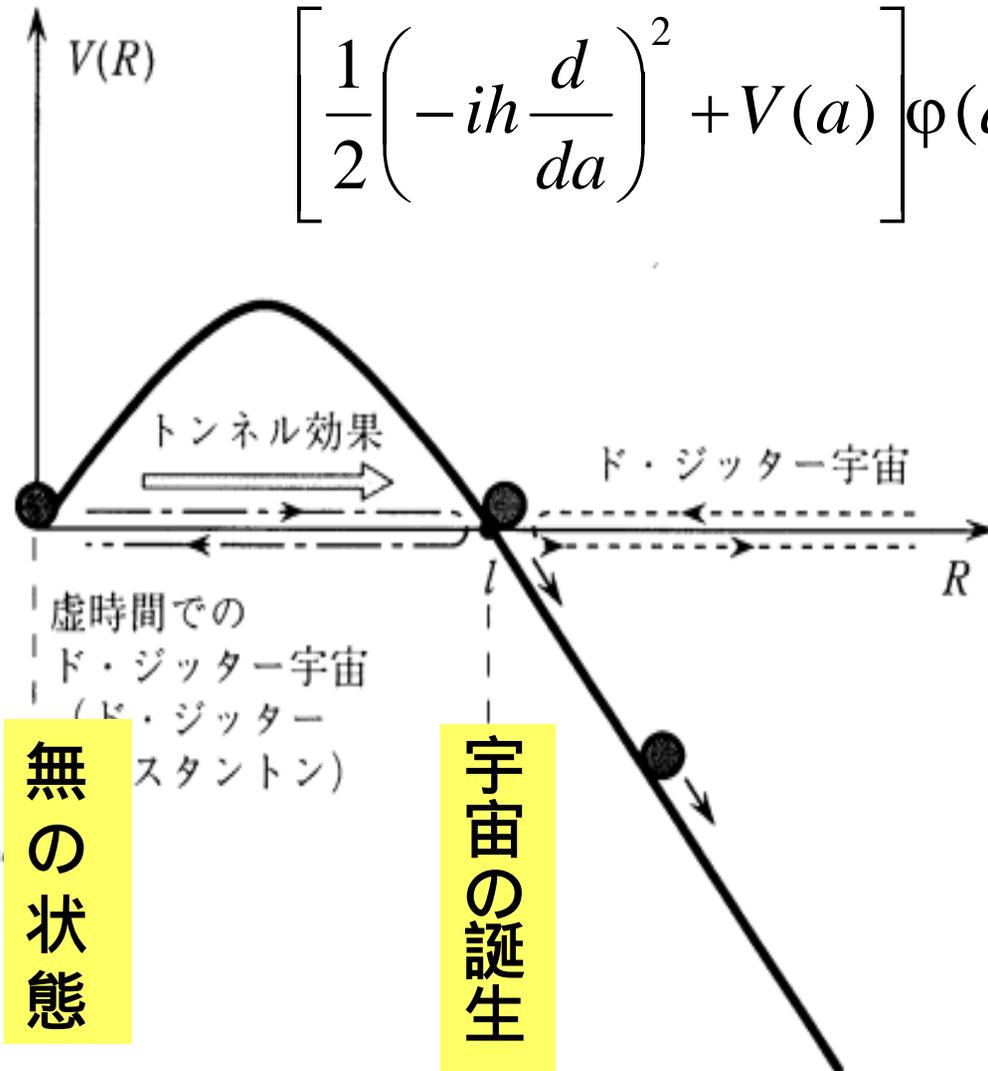
A. Vilenkin ( 83 )



量子重力理論

# “無”からの創生/果てのない条件からの創生

ウィーラ・ドイット方程式 (宇宙のシュレディンガー方程式)

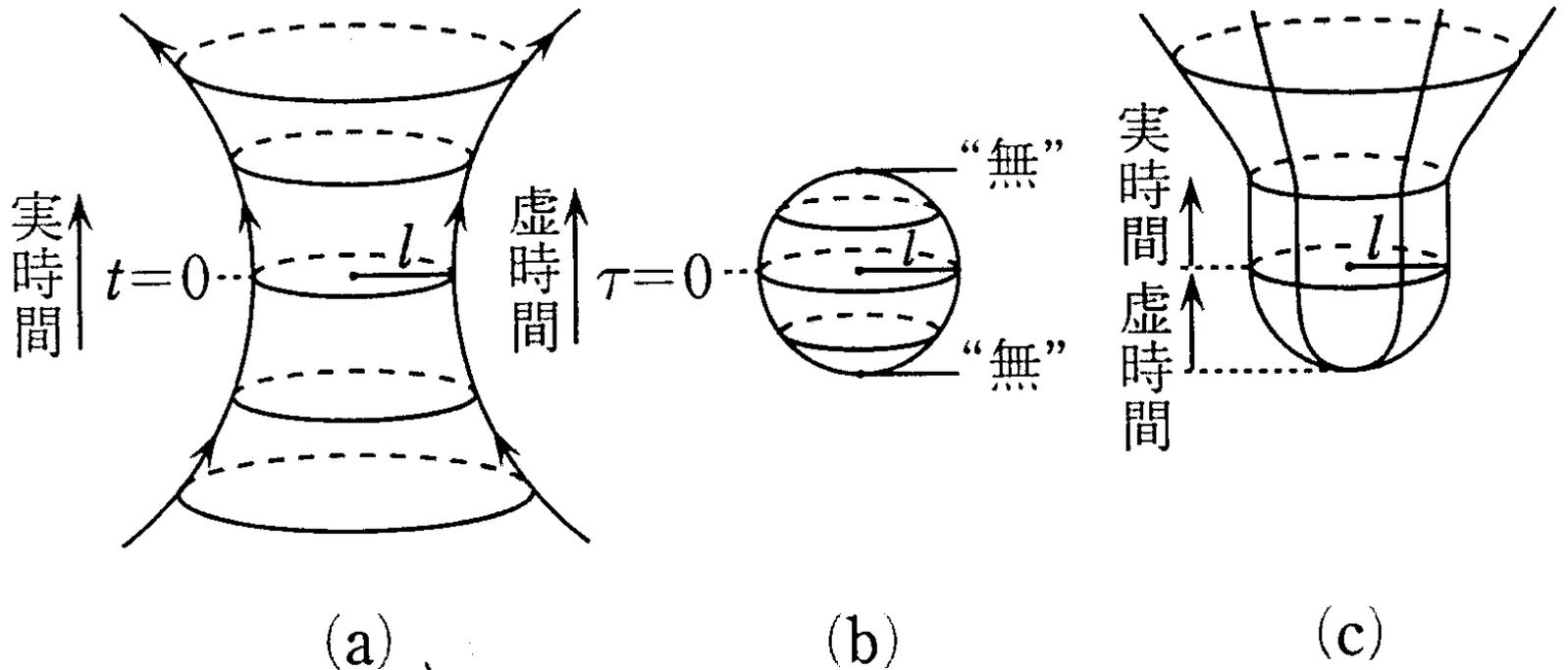


(c)

無の状態

宇宙の誕生

# 無境界仮説：宇宙は果てのない条件から始まった。 S.Hawking, J.Hartle (83)



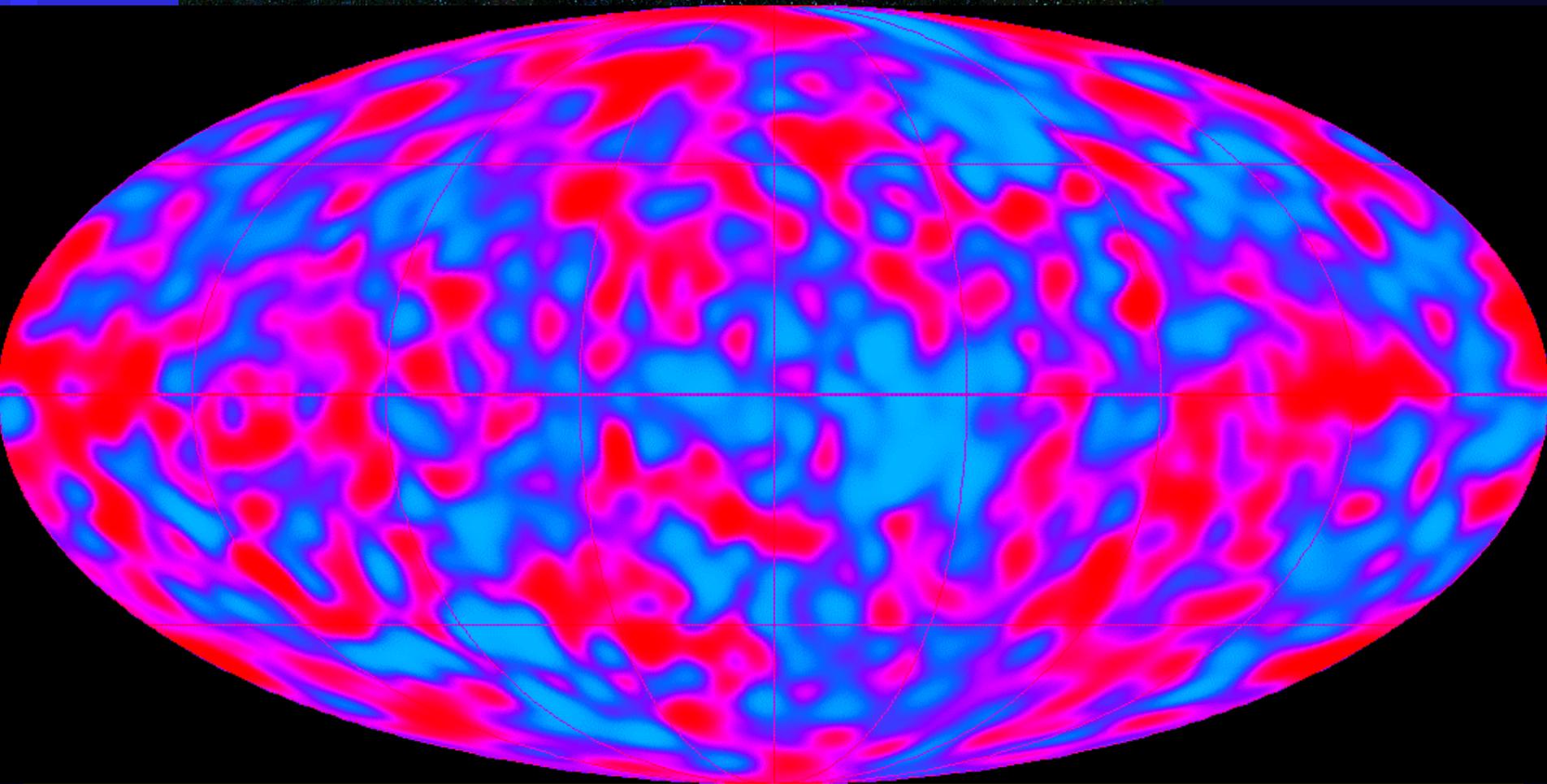
虚数の時間として宇宙が始まるならば、宇宙創生時の特異点は消え、果てがなくなる。

# 現在の宇宙創生と進化のパラダイム

1. 宇宙は無から生まれた。
2. 創生された量子宇宙はインフレーションを起こし、巨大な宇宙へと成長した。潜熱の解放により火の玉宇宙となった。
3. インフレーション中の量子揺らぎは引き伸ばされ、宇宙構造の種が仕込まれた。
4. 揺らぎはしだいに成長し、銀河、銀河団など現在の宇宙の豊かな構造を形成した。

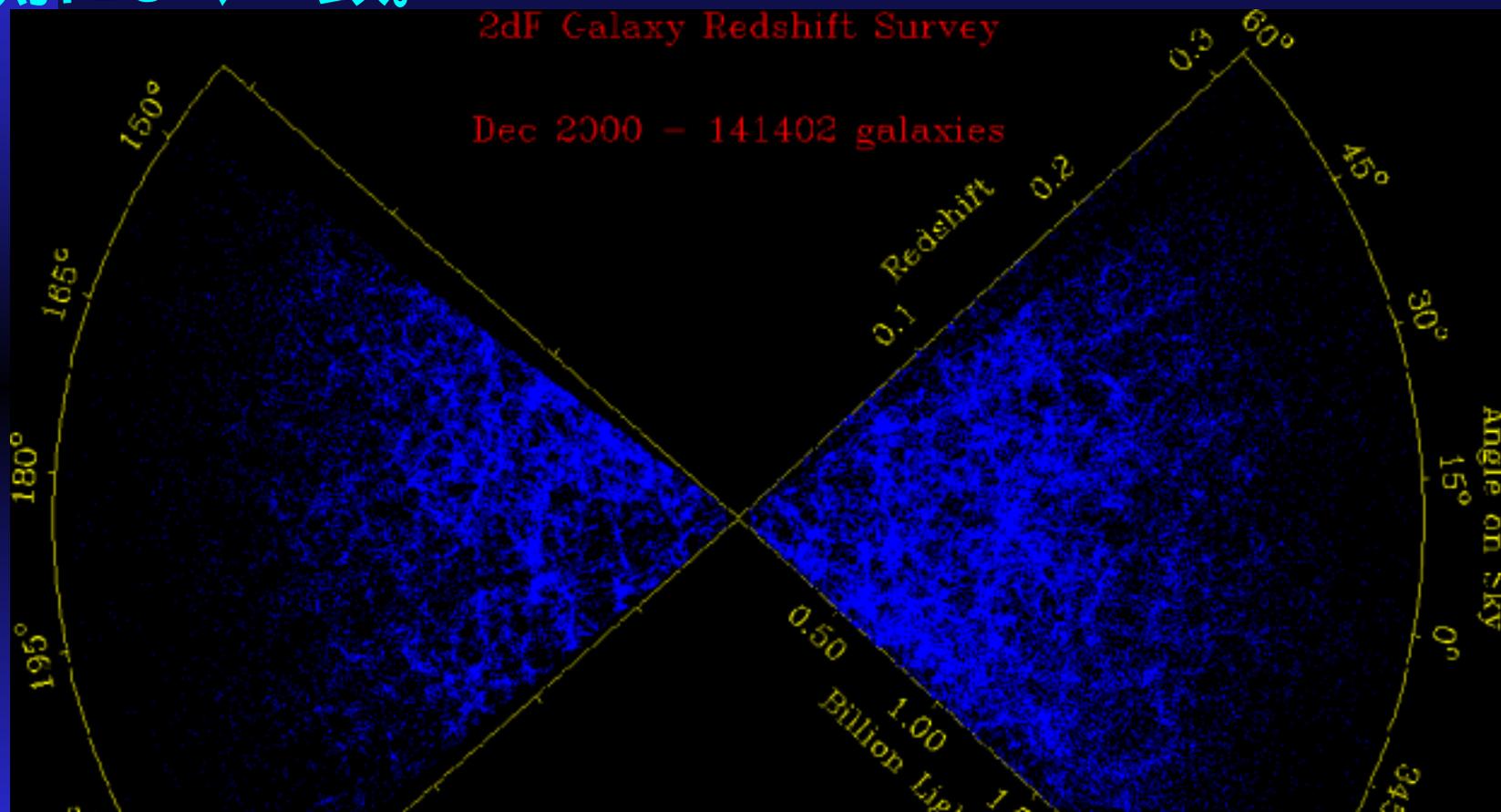
宇宙では遠くを見ることは、過去を見ることである。現在という時刻に居ながら、開闢の瞬間も原理的には見ることができる。

# インフレーション理論は観測的に裏付けられた。



COBEは宇宙開闢30万年ころの宇宙の姿を描きだし、宇宙構造の種を見つけた。それはインフレーション理論が予言した、量子揺らぎによる種と見事に一致した。

観測的宇宙論の急激な進歩で、宇宙の大スケールの構造が明らかになってきた。シミュレーションは観測によく一致。



インフレーションは量子揺らぎを100桁のスケールで引き伸ばす顕微鏡ともいえる。

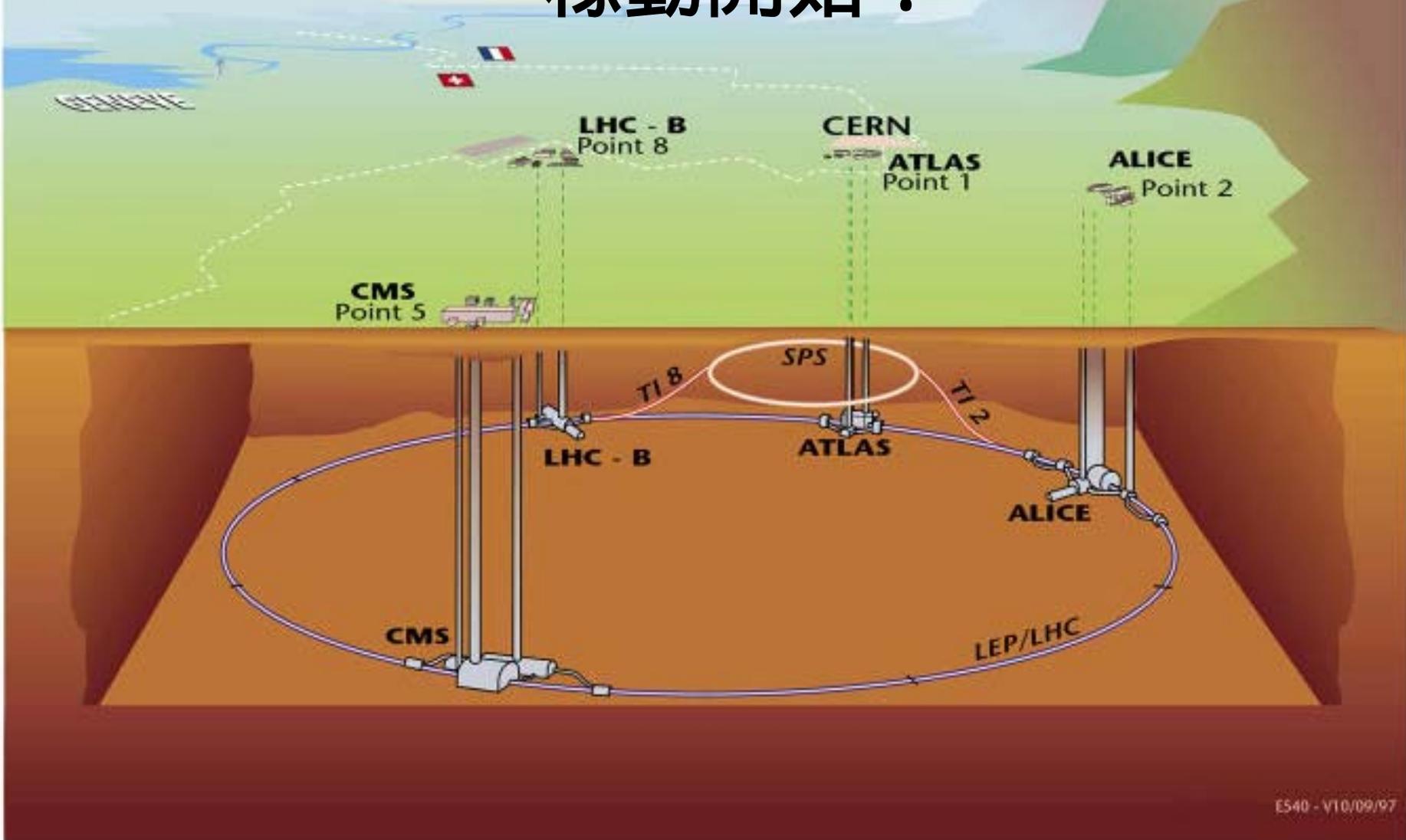
宇宙の大構造を観測することは、量子揺らぎを観測することである。

# LISA: 宇宙重力波レーザ干渉計



重力波の観測よりインフレーションの時刻の初期  
宇宙の地図が描ける時代が来るかもしれない。

# 2008年、LHC(ラージハドロンコライダ―稼動開始？



# 宇宙創生論の新展開

## 高次元宇宙

### 1. カルツア・クライン宇宙論

宇宙は10次元の時空として生まれ、3次元の空間は膨張するが、他の次元は小さく丸まったまま。

### 2. 我々の宇宙は10次元空間の中に浮かぶ

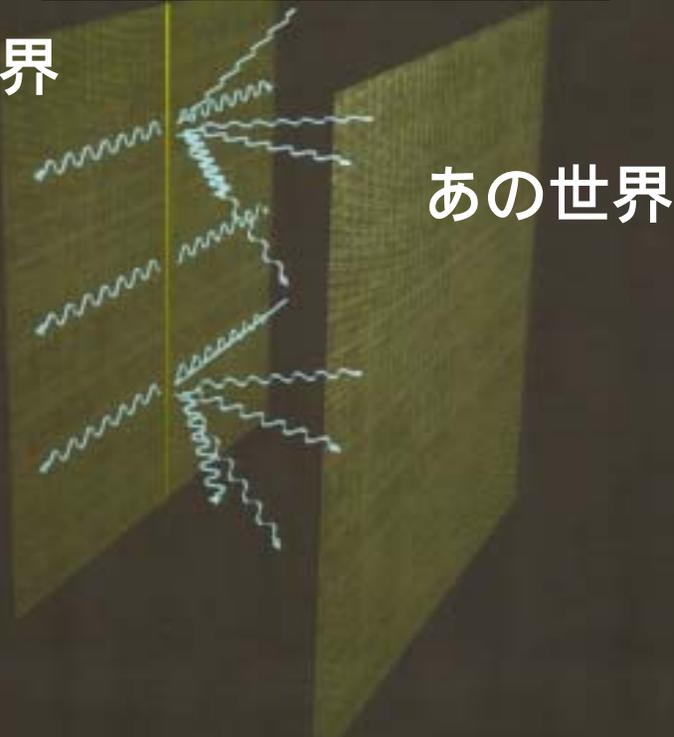
「“膜宇宙”(ブレンワールド)」かもしれない。

# 我々の世界は高次元空間に浮かぶ3次元膜 なのか？

## —素粒子の超紐理論/M理論の示唆—

### 2枚のブレンモデル

この世界



あの世界

膜理論が「究極の理論」なら、膜の世界(ブレンワールド)でもインフレーションは起こるのか？ その量子揺らぎは宇宙の構造を説明できるのか？ ブレンは“無”から創生されるのだろうか？

理論が深まると共に、新たな問題、謎も生まれてきた。

# Ekpyrotic Universe : 膜宇宙の衝突でビッグバン(火の玉)になるのかもしれない。

振動宇宙モデル (Turock, Steinhardt, 02)

宇宙はビッグバン後、収縮に転じ、再度衝突が起こり宇宙は再度ビッグバンとして生まれる。

時間

空間

ビッグバン

ブレーン、膜宇宙



知の世界が広がるとそのフロンティアも  
広がり、新たな謎も生まれてくる。

宇宙を構成する主要な物質の正体はまったく不明？

●通常物質：1%

我々の体や輝いている星を構成する物質。

●暗黒物質：29%

銀河や銀河団の中を満たしている正体不明物質。

●暗黒エネルギー：70%

宇宙全体に一様に広がった正体不明の  
真空のエネルギー。

# 暗黒物質の候補と探査

- 質量をもったニュートリノ(可能性はほぼ消えた)
- アキシオン(強い力に関連して予言されている粒子)
- ニュートラリーノ(超対称性理論が予言する未知の素粒子)
- 磁気単極子(モノポール)
- 影物質

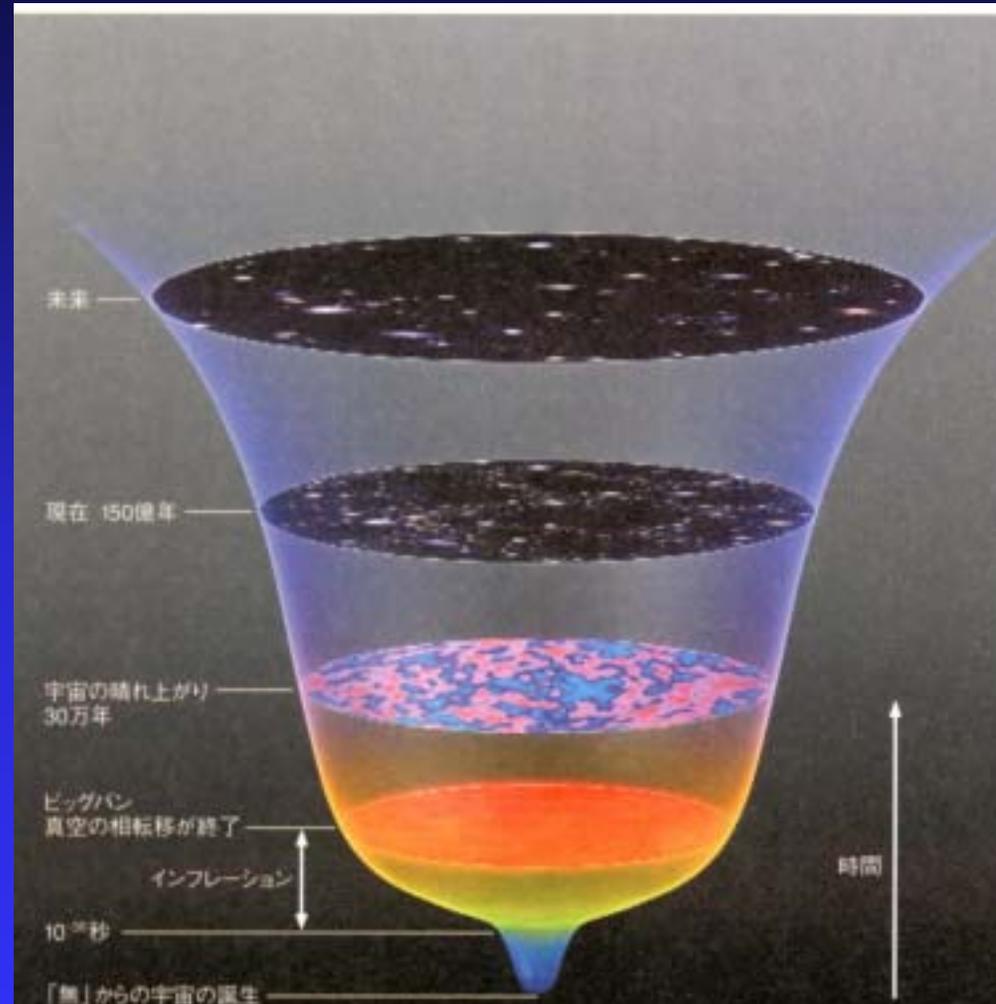


# 最近の驚くべき大発見？

米国科学雑誌Scienceは、1998年における科学の大発見のトップは、宇宙を満たしている“真空のエネルギーの発見”であると発表した。

真空のエネルギーに働く斥力により宇宙は今第2のインフレーションの時代に突入したのか？

二つのグループが遠方の超新星の観測から、宇宙のエネルギーの70%は真空のエネルギーであると報告(Permuter et al, '98, Schmitdt et al, '98)



# ダークエネルギー問題

## 1. ダークエネルギーの正体はいったい何か？

Quintessence (第5の元素仮説) ? P. Steinhardt et al, '98

地上の物質: 4種類の元素; 水、空気、土、火

天上の物質: **第五の元素**

時間的に変化するスカラー場のエネルギー

## 2. 小さすぎる問題 (smallness problem)

真空のエネルギーが量子重力的效果によっているなら、プランクエネルギー密度のスケールであるべき。それと比べるとに比べて120桁も小さいのは不思議？

現在の真空のエネルギー密度とプランクエネルギー密度の比

$$\frac{\rho_v}{\rho_{planck}} = \frac{(10^{-3} eV)^4}{(10^{19} GeV)^4} = 10^{-124}$$

あてずっぽうの推定  $\frac{\rho_v}{\rho_{planck}} = \exp(-2/\alpha)/(2\pi)^3 = 1.2 \times 10^{-123}$

理論物理学の最大のミスマッチ？

微細構造定数

### 3. 偶然性問題(coincidence problem):

なぜ宇宙は、宇宙開闢100億年余の時代に、第2のインフレーションを始めたのか？

#### ■ 人間原理のみが答えることができるのか？

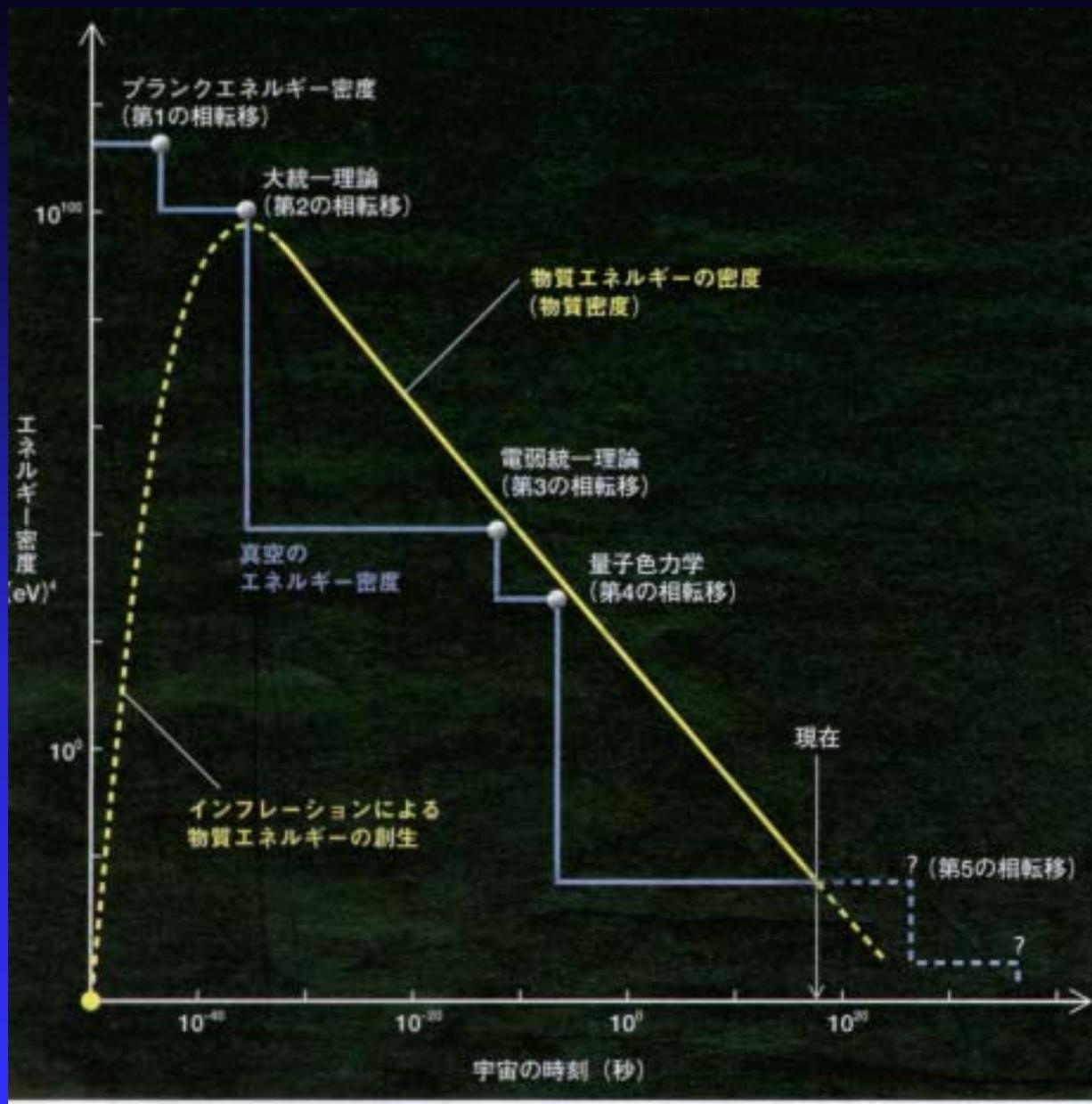
宇宙は無限に存在し、それぞれ異なった物理定数(この場合真空のエネルギー密度=宇宙定数)を持っている。その中でも、知的生命体(人間)が生まれる宇宙のみ認識される。

現在の値より、大きな値を持つ宇宙では天体の形成が進まず知的生命体も生まれない。

(S. Weinberg, 89)。

# 4.第5の相転移?

このエネルギーは、  
第1のインフレーションの様に、  
いつか消えるのだろうか?



知のフロンティアの拡大と共に  
新たな謎も生まれてきた。  
暗黒物質の正体は？  
ダークエネルギーの正体は？

現在我々はかつて建設した物理学の体系という摩天楼を破壊することなく、その欠陥のある土台を取り替えることに挑戦しているのだ。  
(L. アボット)

これを解くことによって21世紀の新たな  
宇宙像が描き出されるに違いない。