

宇宙の誕生と宇宙の未来

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
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

人類はその歴史が始まったところから
自らが住んでいるこの世界がどのよ
うなものであるのか問い続けてきた。

- 遠くに行けば世界はどうなっているのだろう
か？

世界には果てがあるのだろうか？

- この世界は昔からこのようであったのだろう
か？

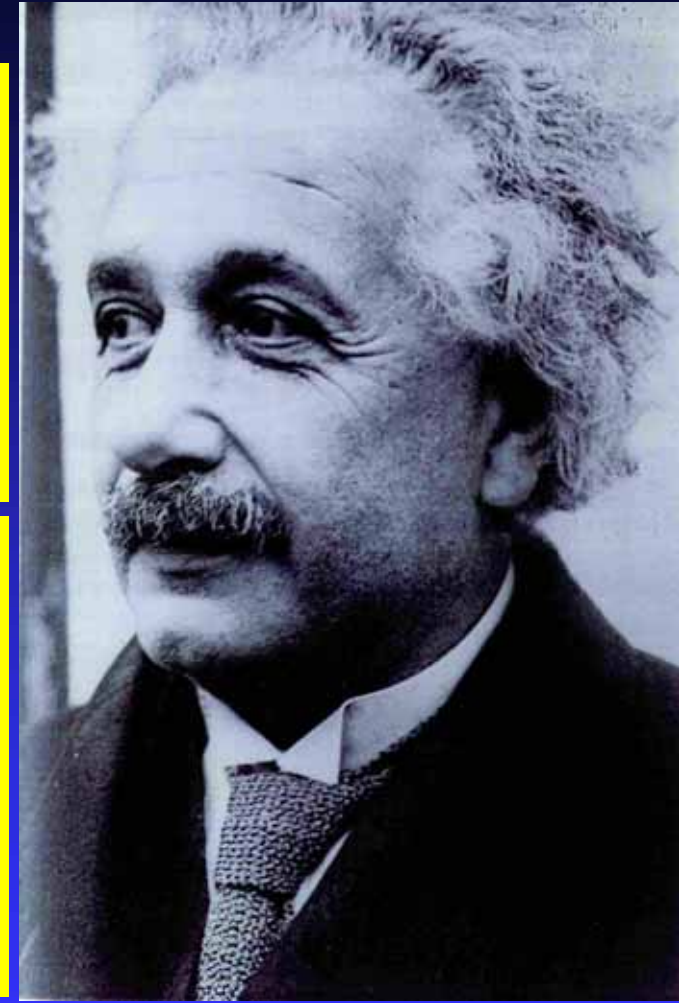
世界には始まりがあったのだろうか？

これらの問いかけは、神話や哲学の課題として問い
続けられてきた。

宇宙の創生： アインシュタインの言葉より

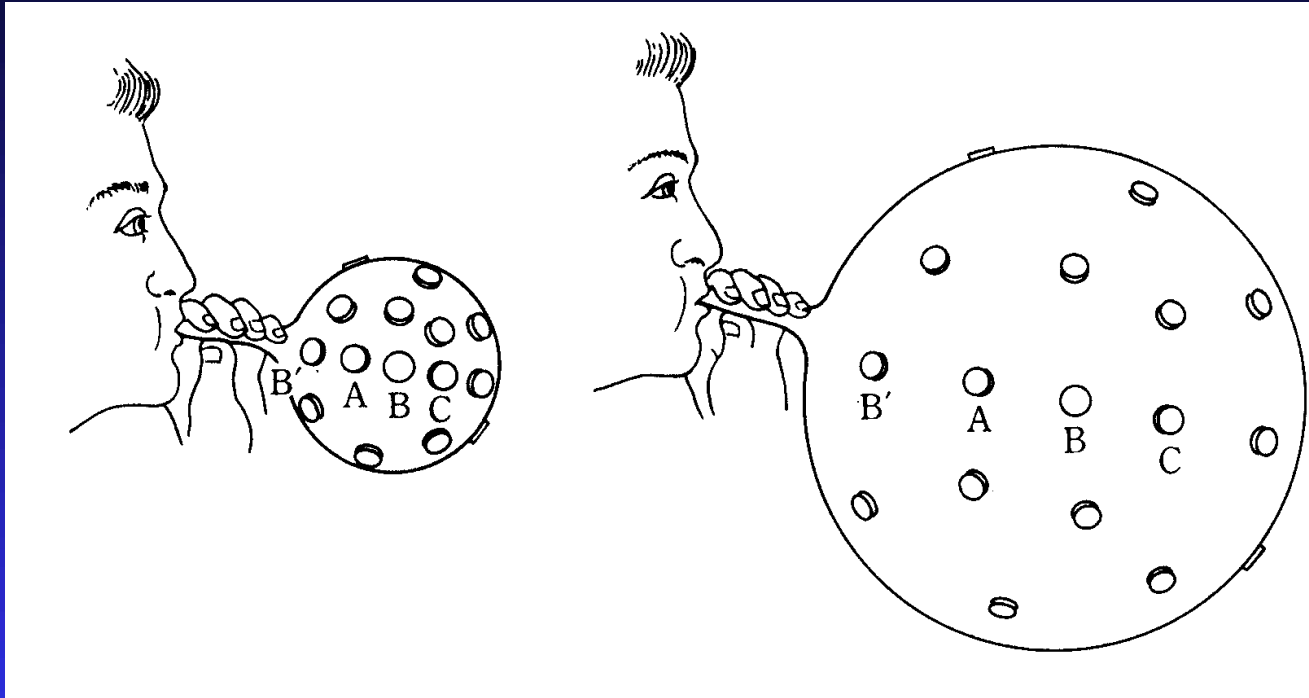
「私は神がどのような原理に基づいてこの世界を創造したのか知りたい。そのほかのことは小さなことだ。」

「私のもっとも興味を持っていることは、神が宇宙を創造したとき、選択の余地があったかどうかである。」



今、これらの疑問に科学の言葉で答えることのできる時代になった。

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。

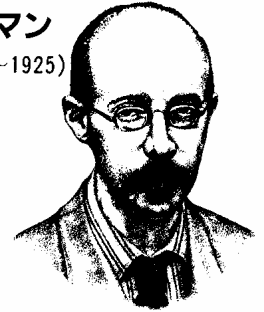
もはやこの世界は永遠不変ではなく、始まりがあり、動的に進化する存在である。

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)。

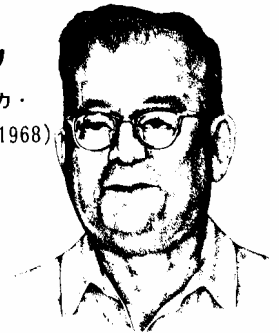
●フリードマン
(ソ連・1888~1925)



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)

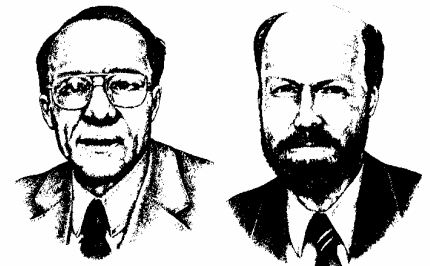


3. 宇宙マイクロ波背景放射の発見(1966)。

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-)



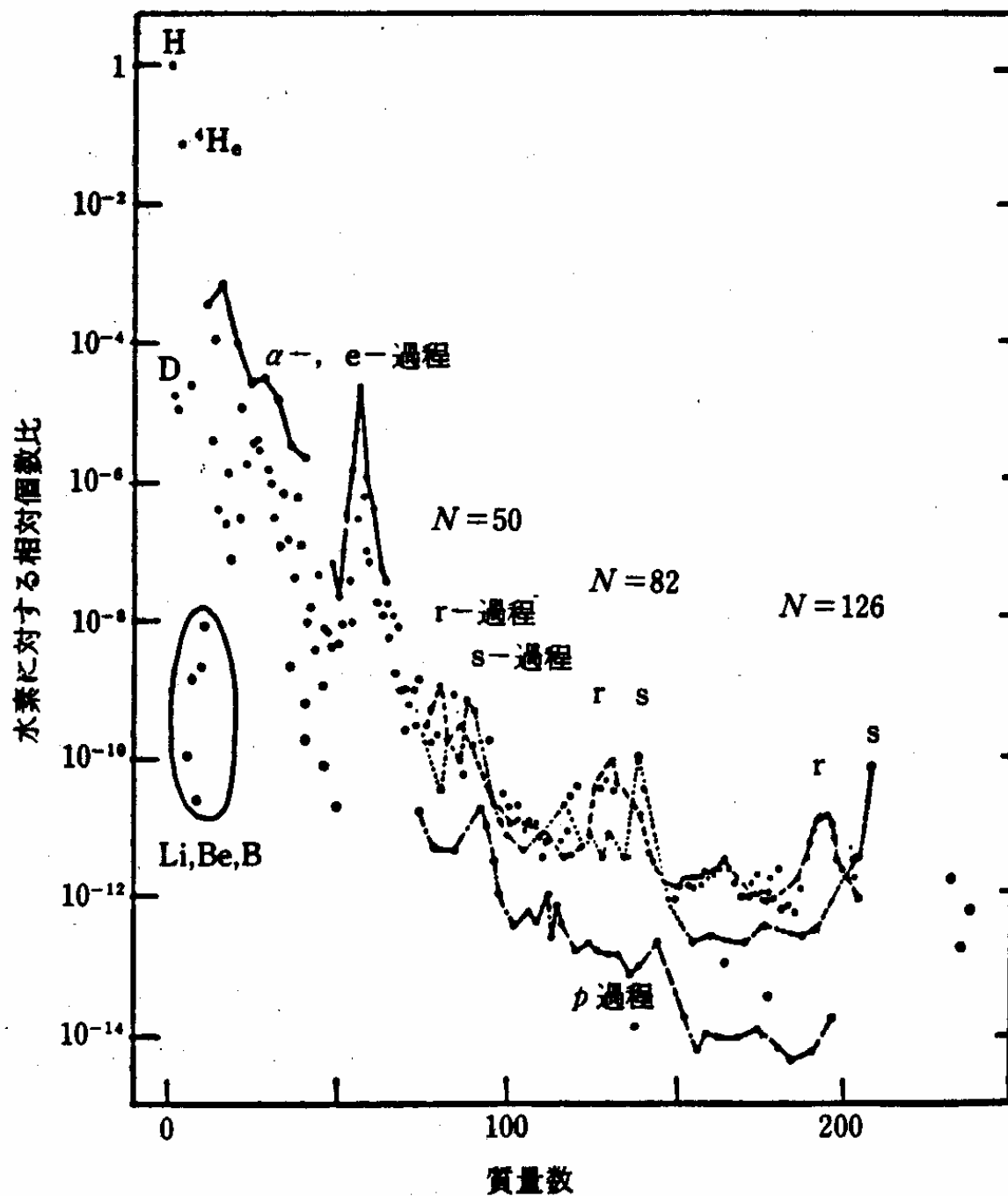
物理学の偉大なる勝利である。

宇宙における 元素の 組成比

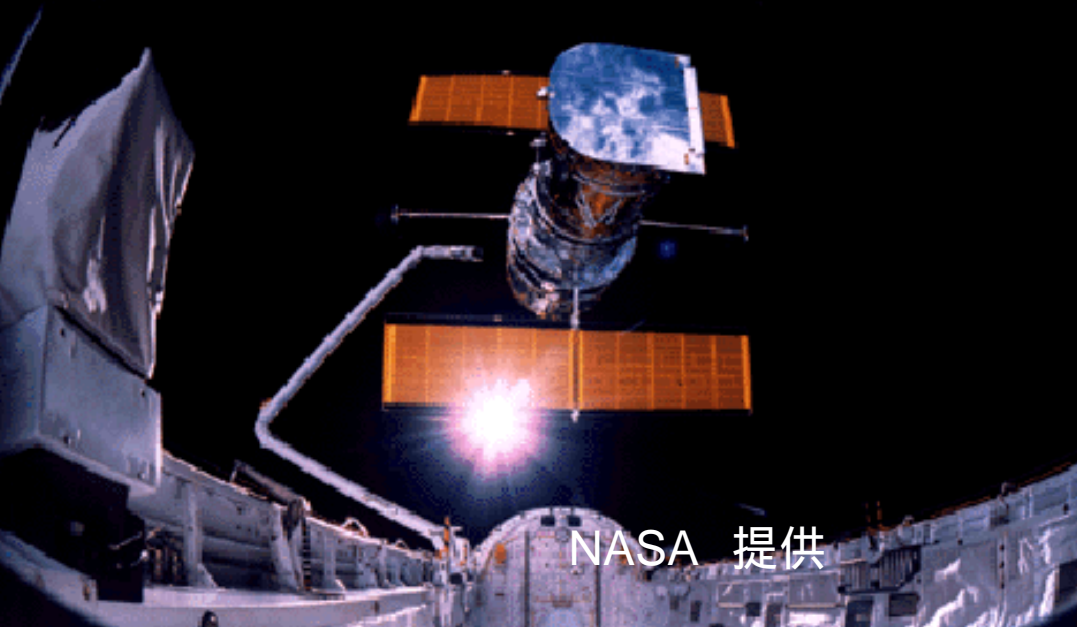
ガモフは元素の分布を
ビッグバンによって、一
拳に説明しようとした。

ビッグバンで合成され
る元素は軽元素
(H,D,He,Li)のみ。

他は星の中で合成され
る。



ハッブル宇宙望遠鏡



NASA 提供

- 1990年4月24日に打ち上げられた宇宙望遠鏡(口径2.4m)。打ち上げ直後はピンボケであったが、1993年12月、スペースシャトルエンデバー号による修理(コンタクトレンズの挿入)により0.1秒角の解像度を達成。



NASA 提供

特異点

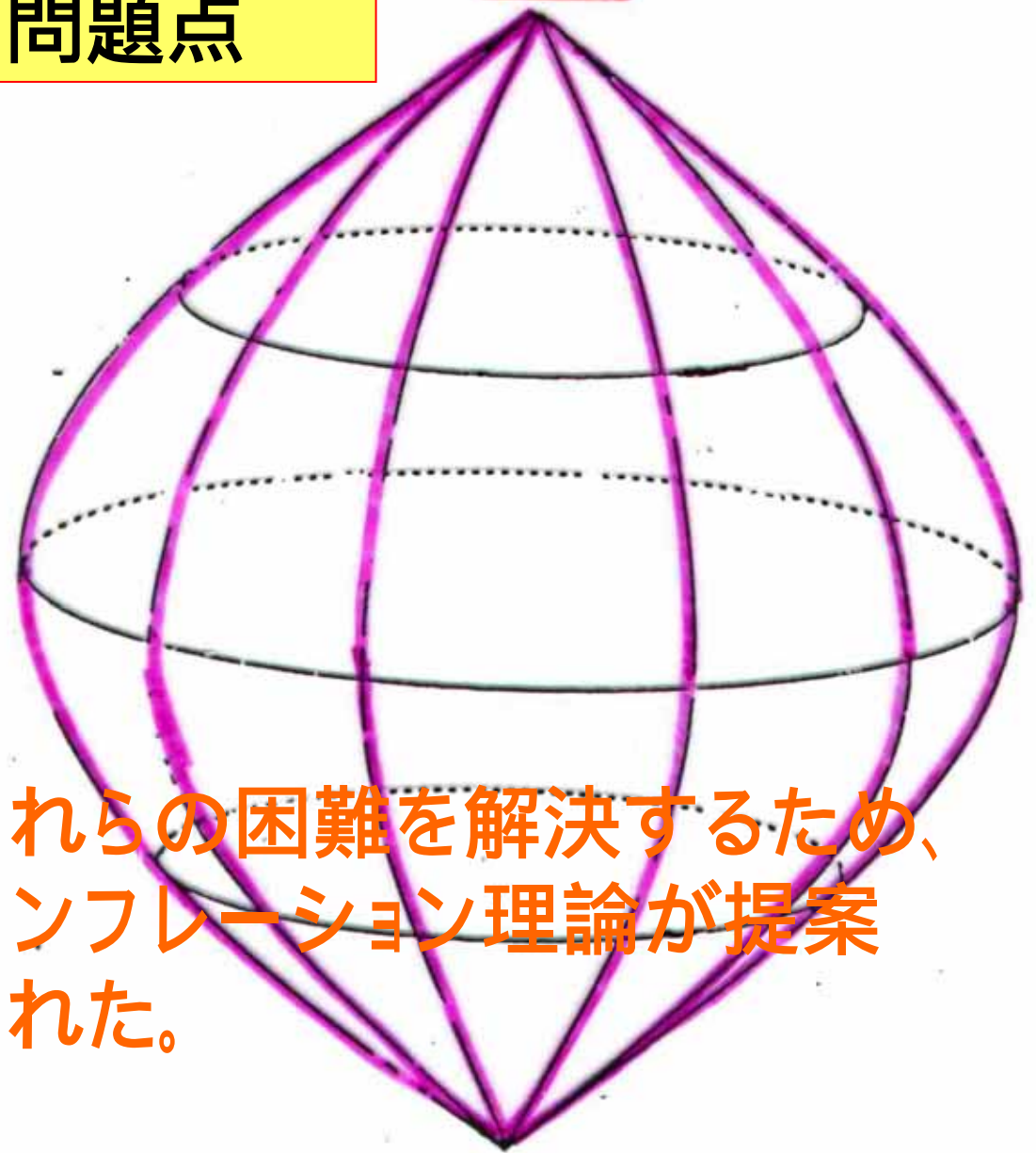
ビッグバンモデルの問題点

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。



— 物理法則では決まらない神の一撃 —

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

ビッグバンモデルからインフレーション理論へ

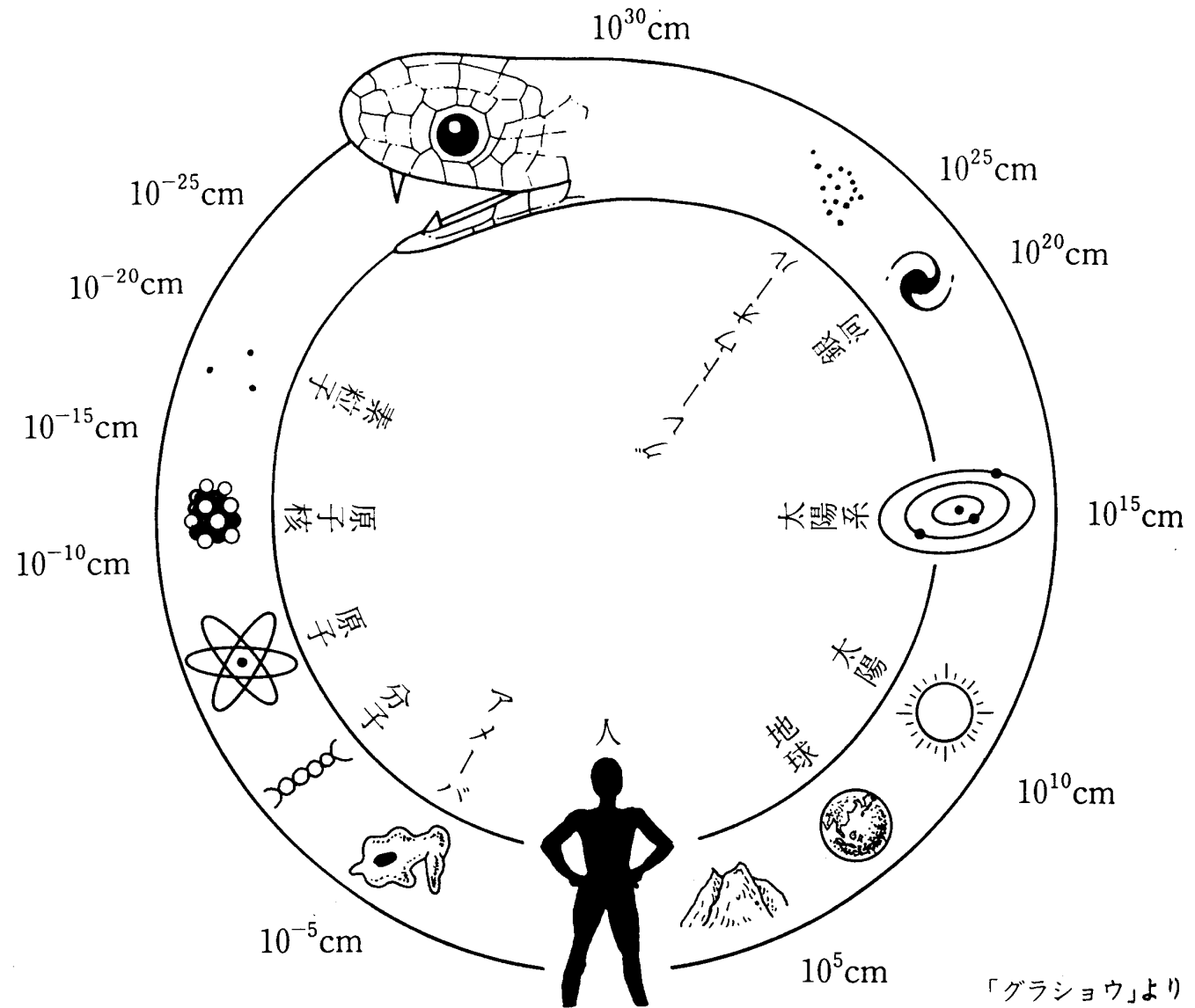
■ ビッグバンモデルの困難

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。

宇宙という物的存在としては最も大きな存在の起源を研究するためには、逆に最も小さな極限である素粒子の法則が必要である。



時空の量子論的スケール、プランク長さ($\approx 10^{-33}$ cm)から、観測的宇宙の果て($\approx 10^{28}$ cm)まで、60桁のスケールで世界の階層構造を知っている。

力の統一理論

—アインシュタインの夢—

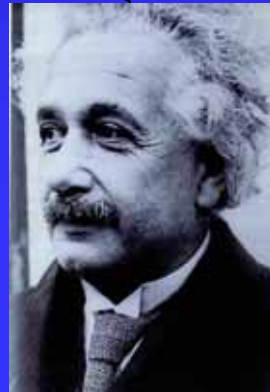
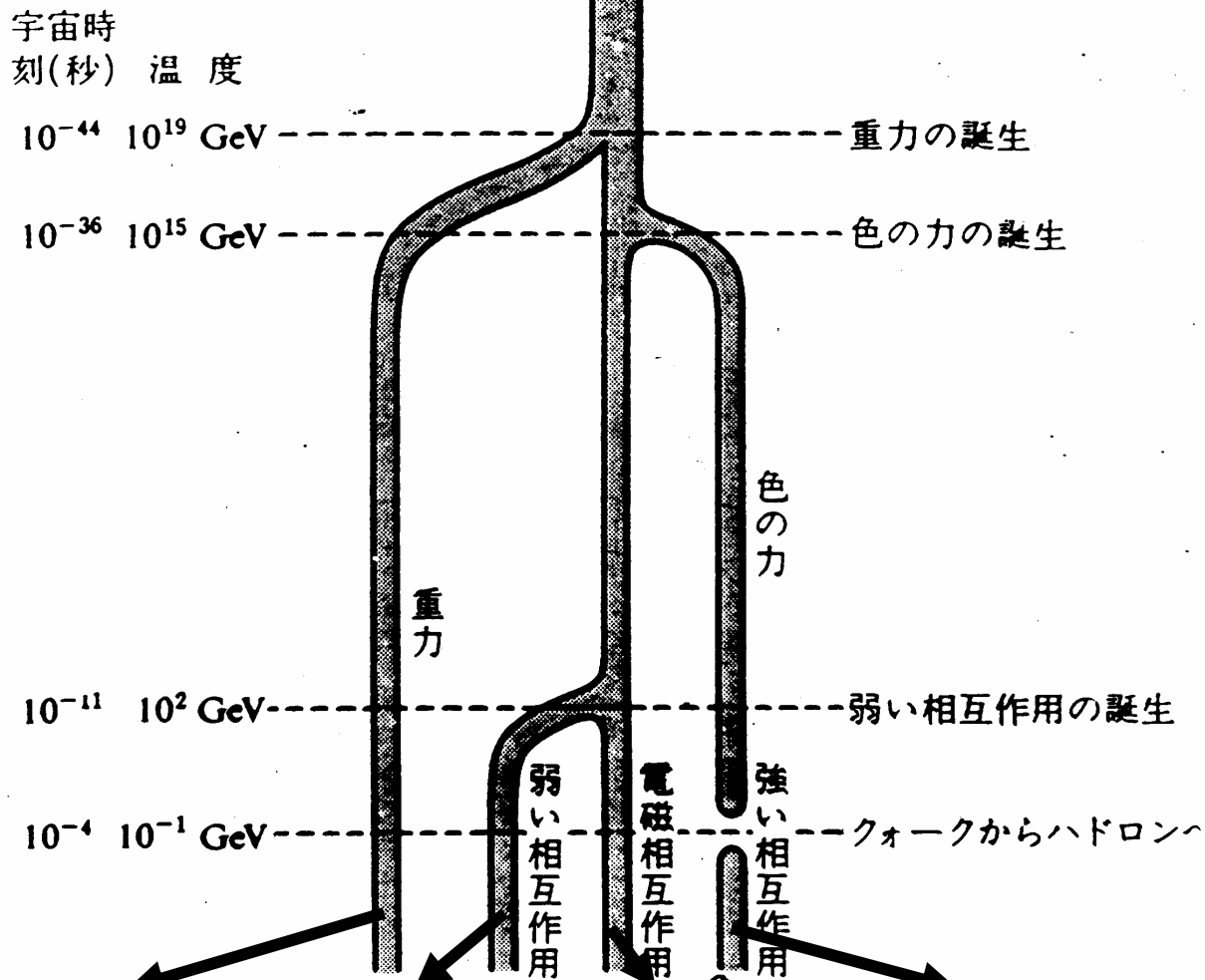
自然界を支配している4つの力

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。

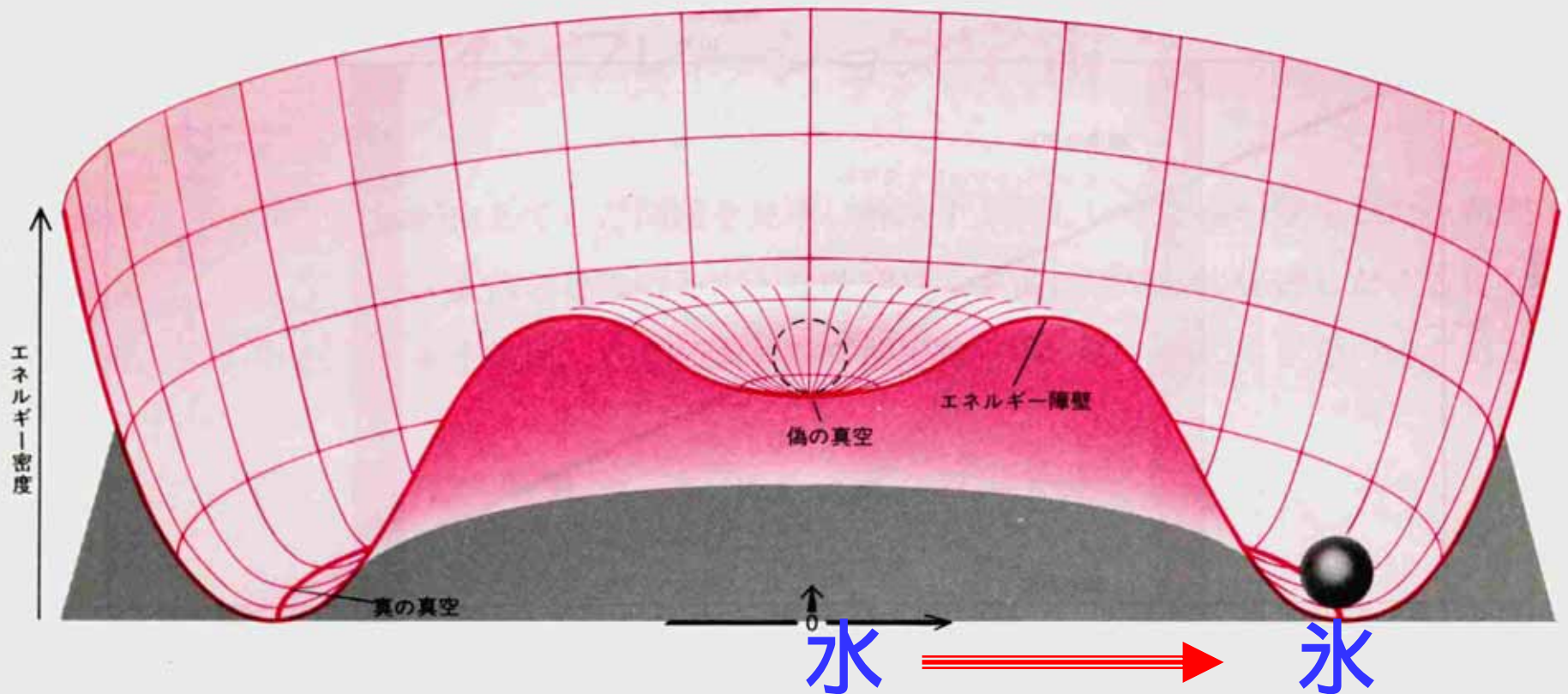
統一理論の 予言する 「力の進化」

生物の進化と
同じように、
力も枝分かれ
し進化する。



真空の相転移

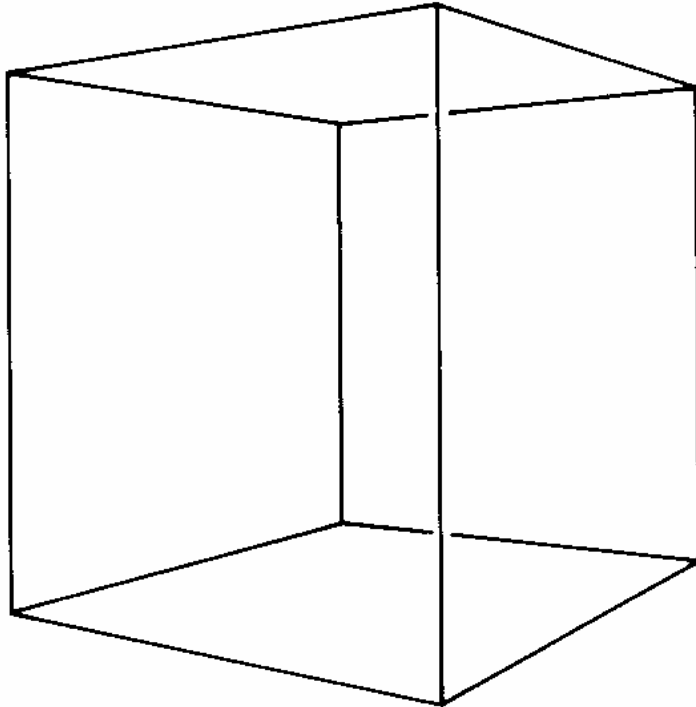
によって力は枝分かれを起こす。



真空も水が氷になるように相転移を起こす。

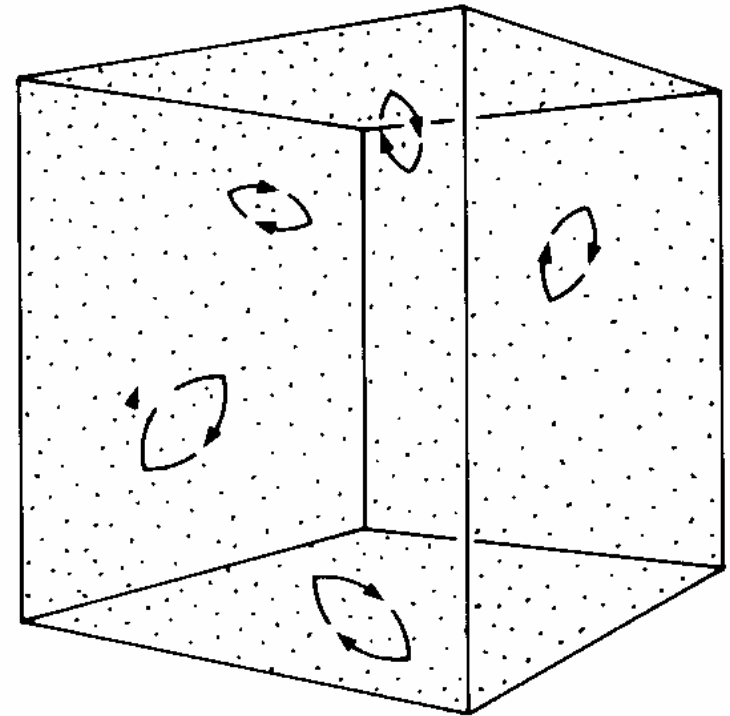
「真空」も物理学の実体である。

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。

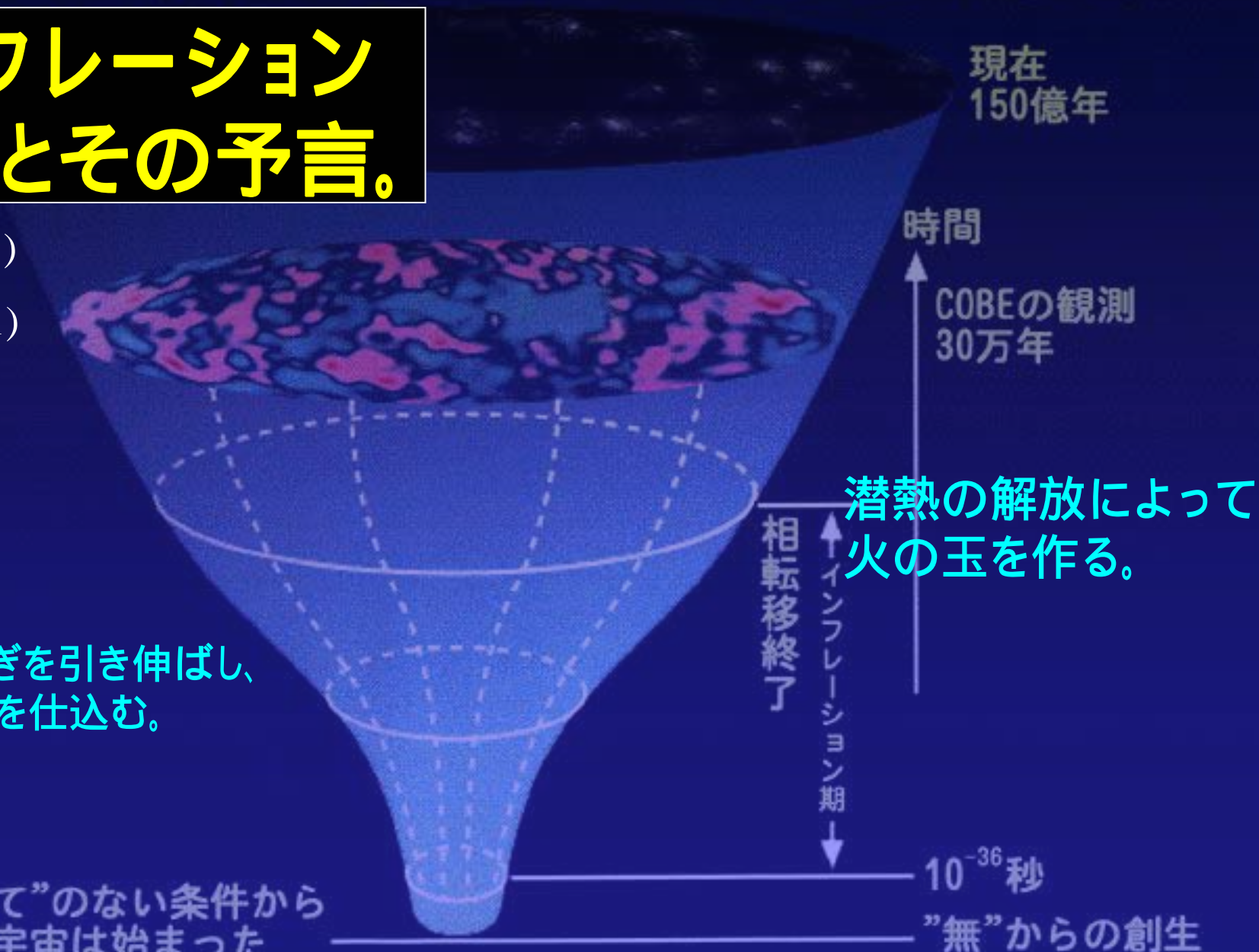
K.Sato (81)

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

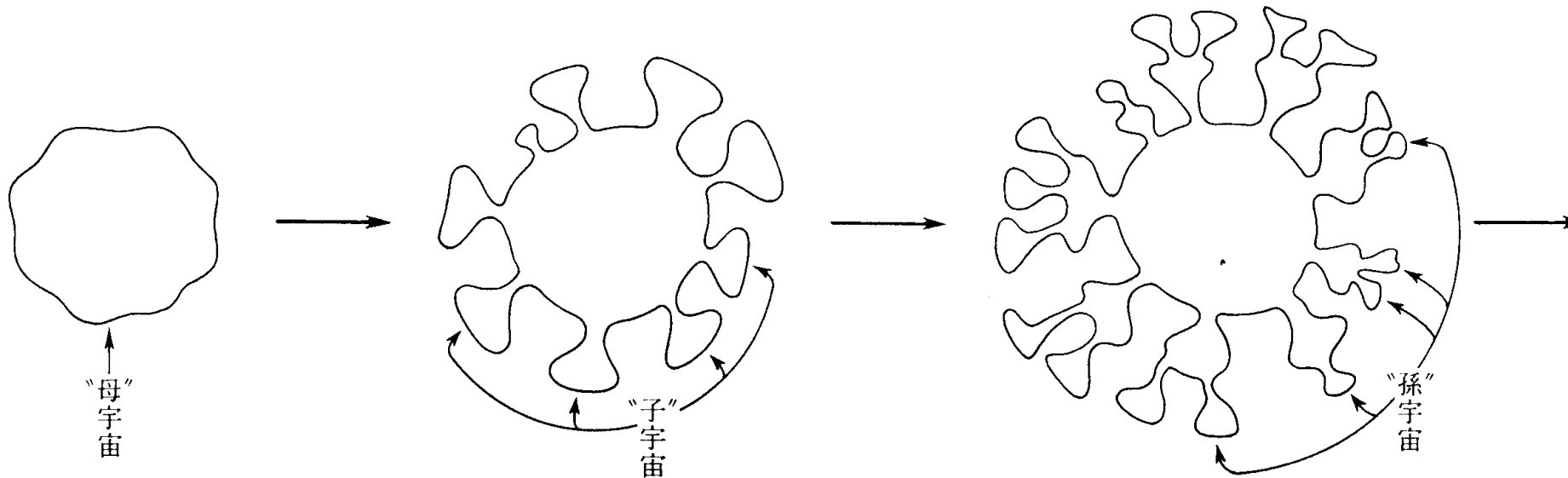


潜熱の解放によって
火の玉を作る。

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-

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。

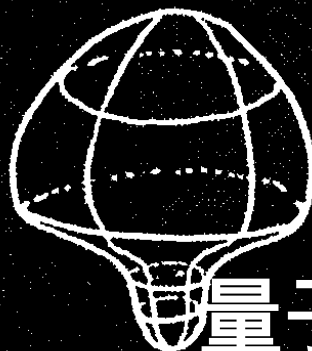
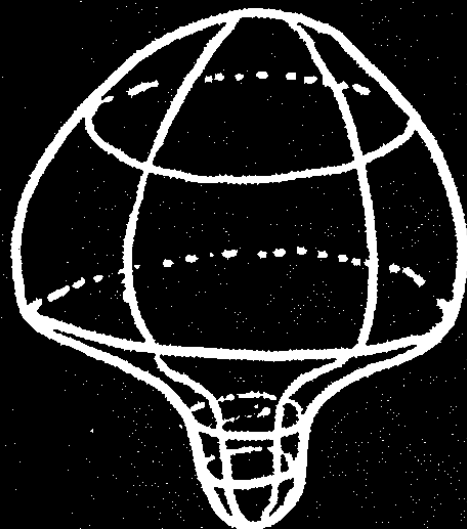
(しかし、統一理論が未完のため、インフレーションを起こす場が不明。インフラトン場とよばれている。)

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

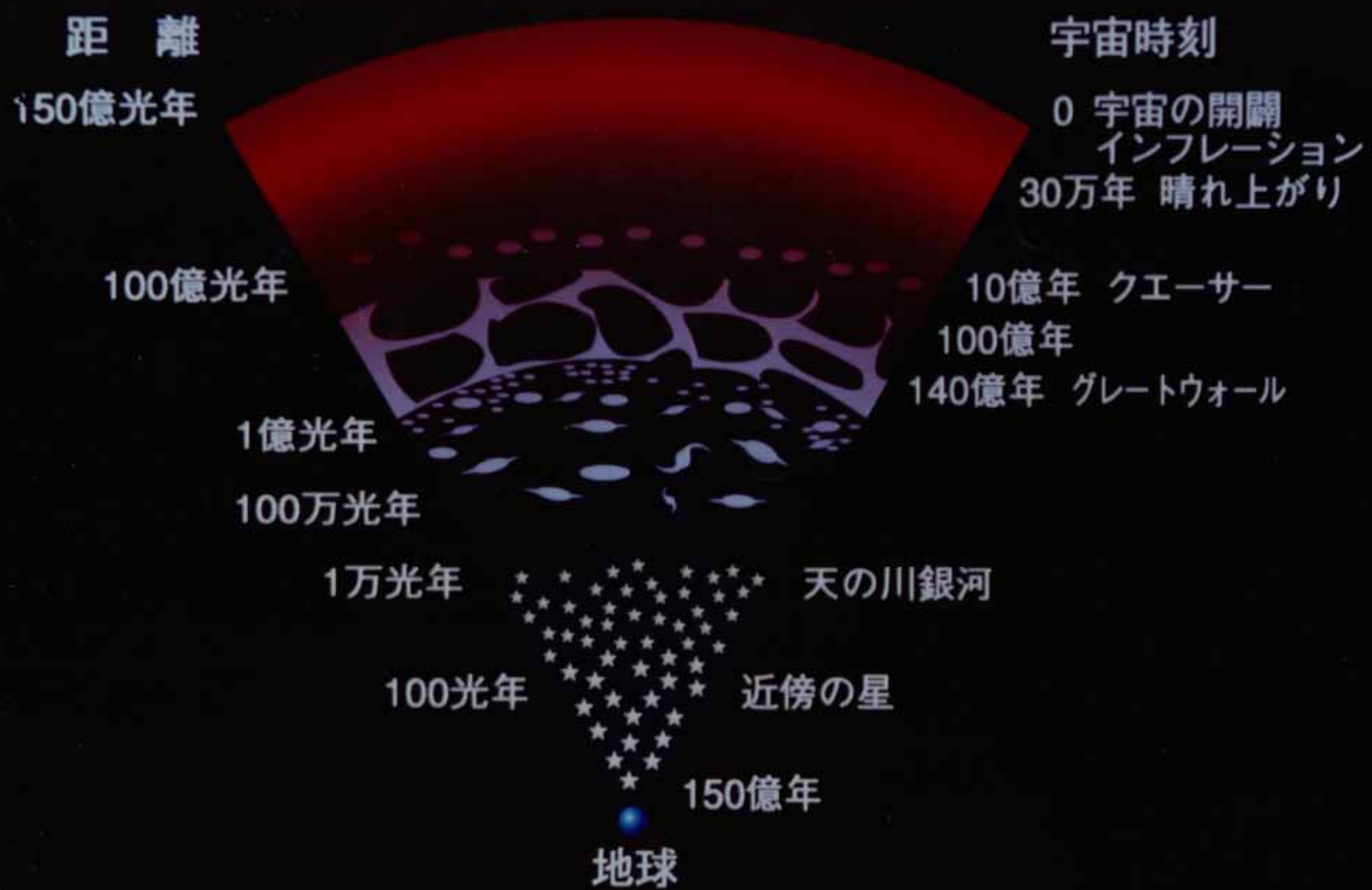


現在の宇宙創生と進化のパラダイム

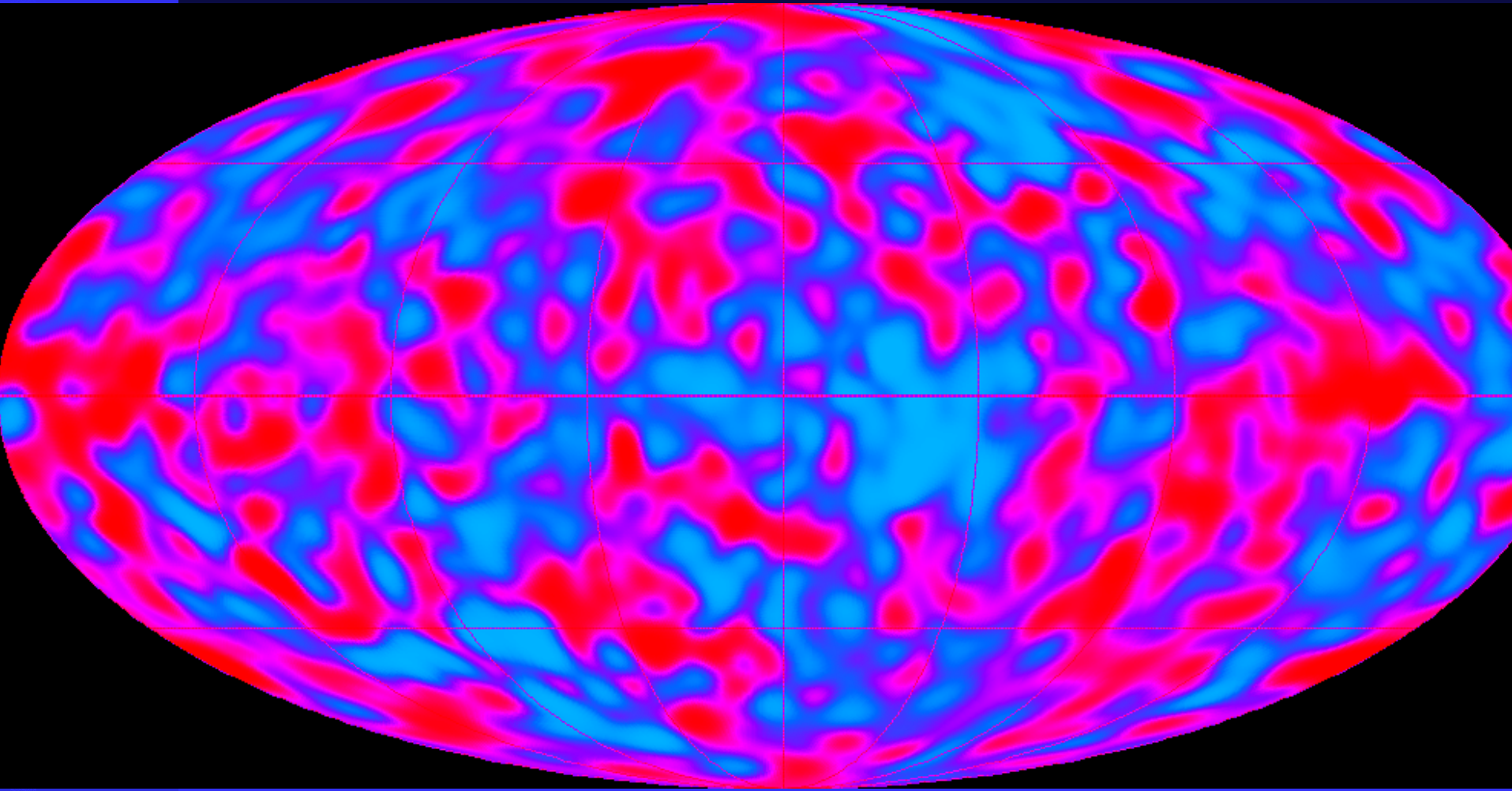
1. 宇宙は無から生まれた。
2. 創生された量子宇宙はインフレーションを起こし、巨大な宇宙へと成長した。潜熱の解放により火の玉宇宙となった。
3. インフレーション中の量子揺らぎは引き伸ばされ、宇宙構造の種が仕込まれた。
4. 揺らぎはしだいに成長し、銀河、銀河団など現在の宇宙の豊かな構造を形成した。

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。

宇宙では遠くを観測すれば過去が見える。



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。

WMAP

衛星の

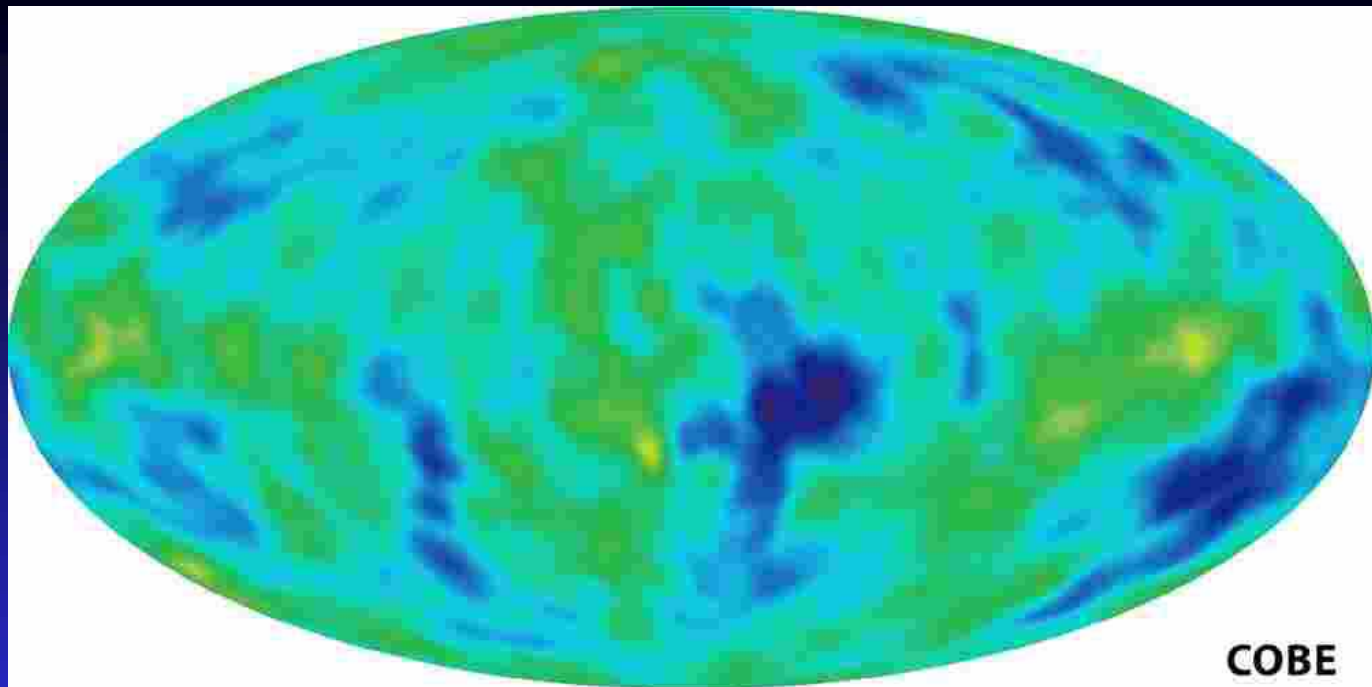
描いた

宇宙開闢

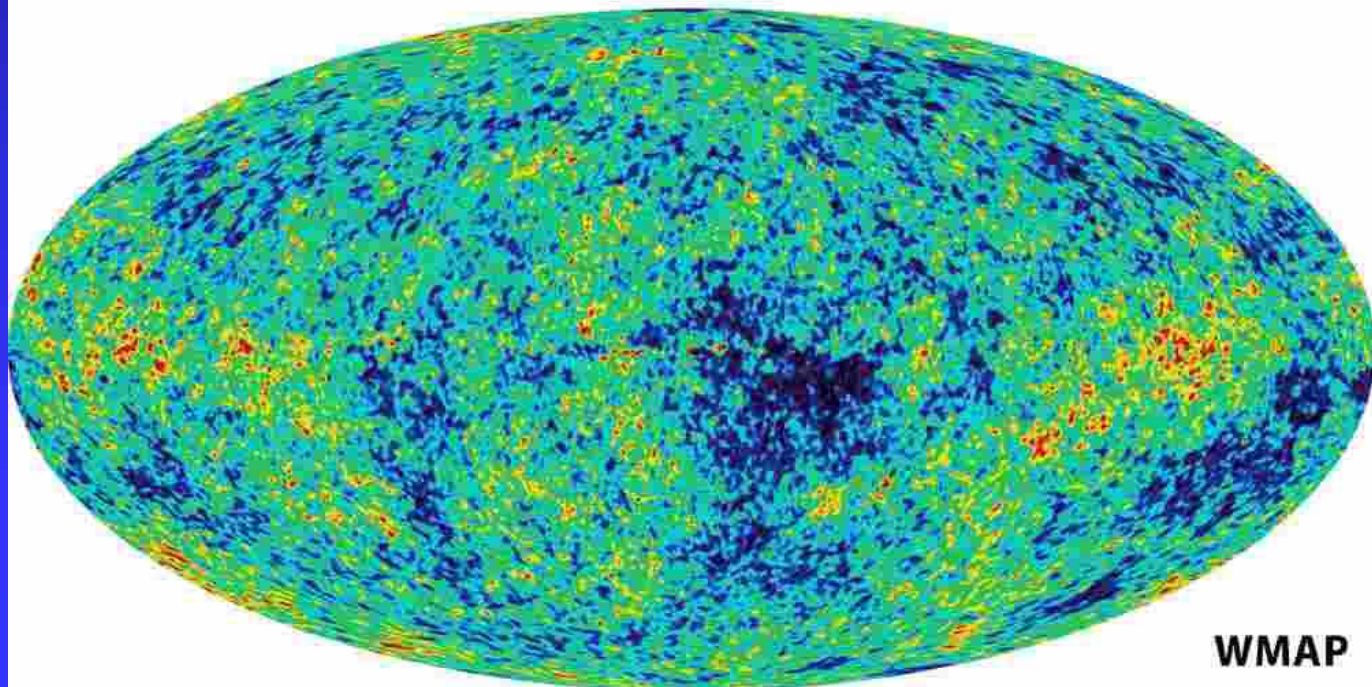
38万年

頃の宇宙

の姿



COBE



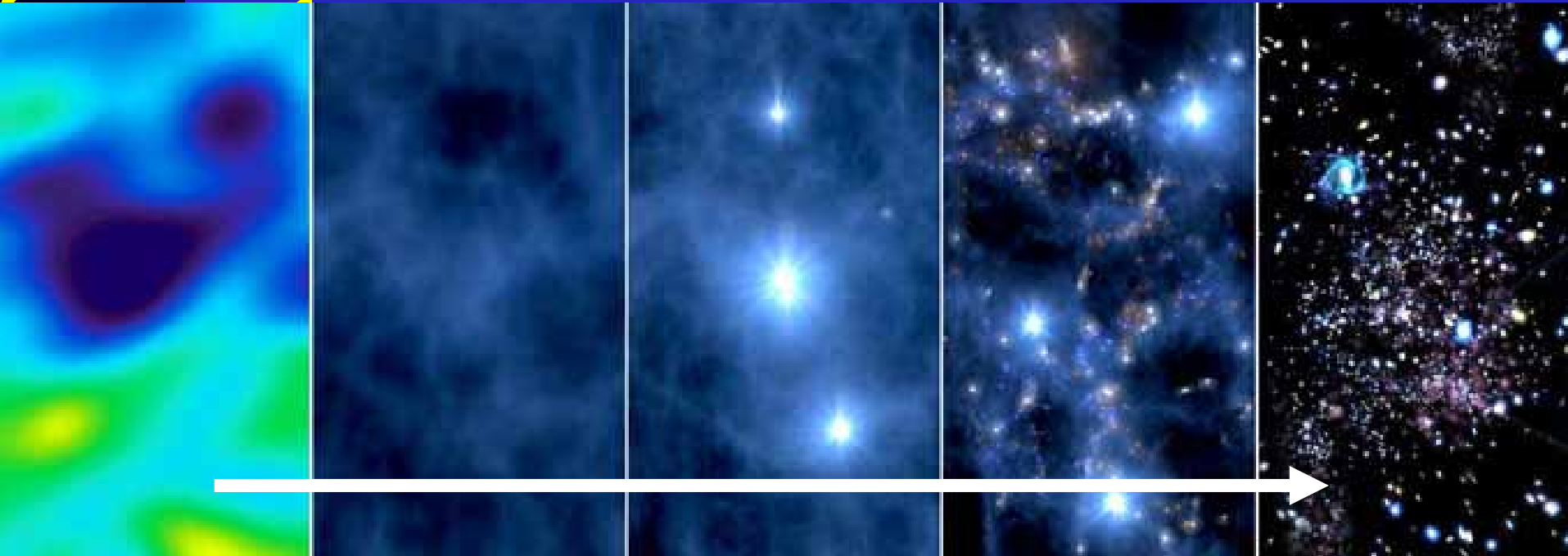
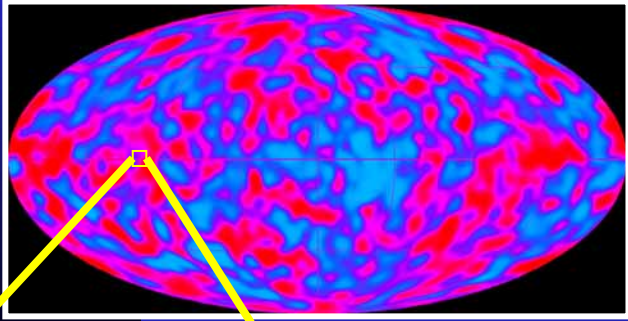
WMAP

宇宙の年齢は
137 ± 2億年と
決まった！

宇宙の構造形成の計算機シミュレーション

(須藤グループ)

- “構造の種“がCOBE/WMAPで観測された。
- その種を初期条件として重力によって物質が集まりグレイトウォール、銀河団、銀河が形成される。



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。

20億光年

スローンデジタルスカイサーベイによる宇宙の地図

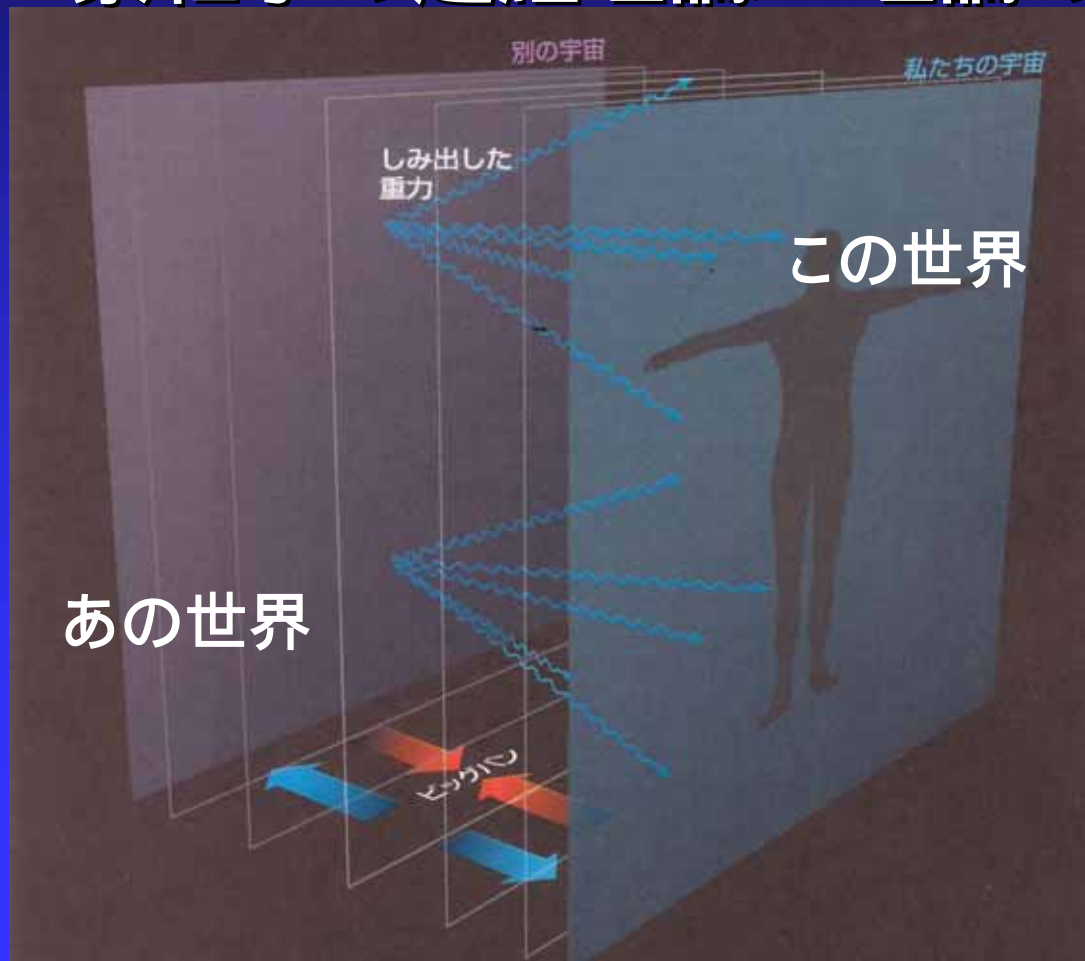
インフレーションは量子揺らぎを100桁のスケールで引き伸ばす
顕微鏡ともいえる。

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。

宇宙創生論の新展開

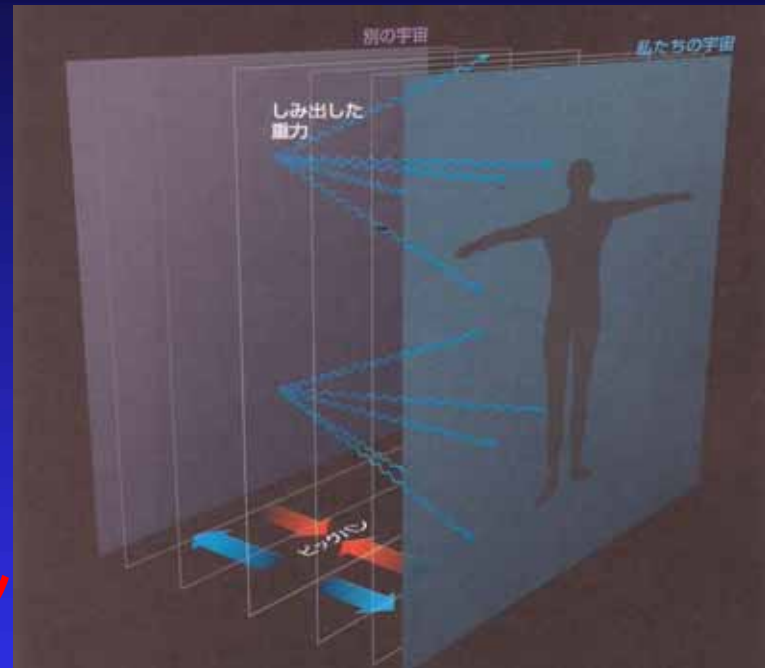
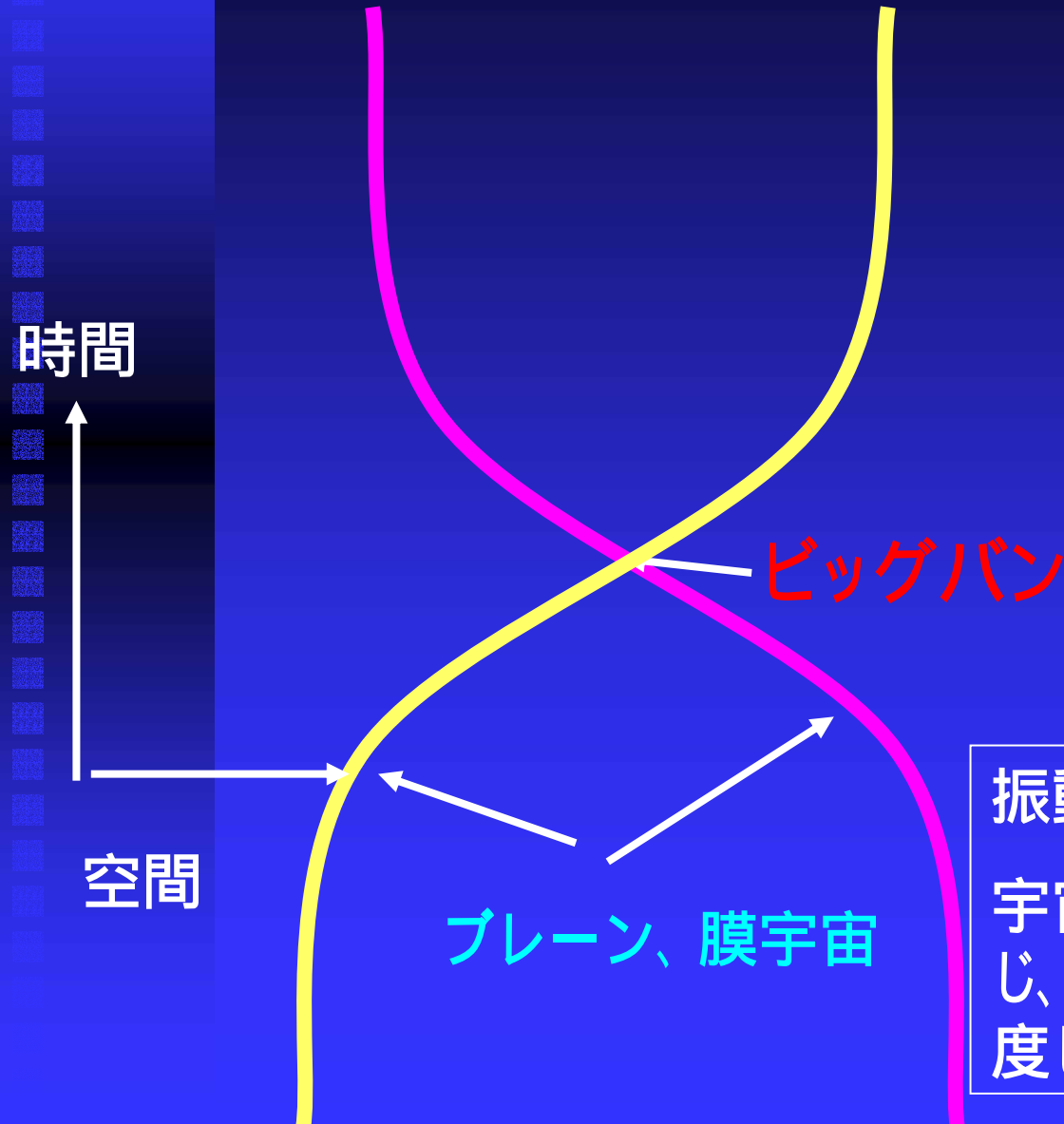
我々の世界は高次元空間に浮かぶ3次元膜なのか？

—素粒子の超紐理論/M理論の示唆—



エキピロテック宇宙モデル (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。

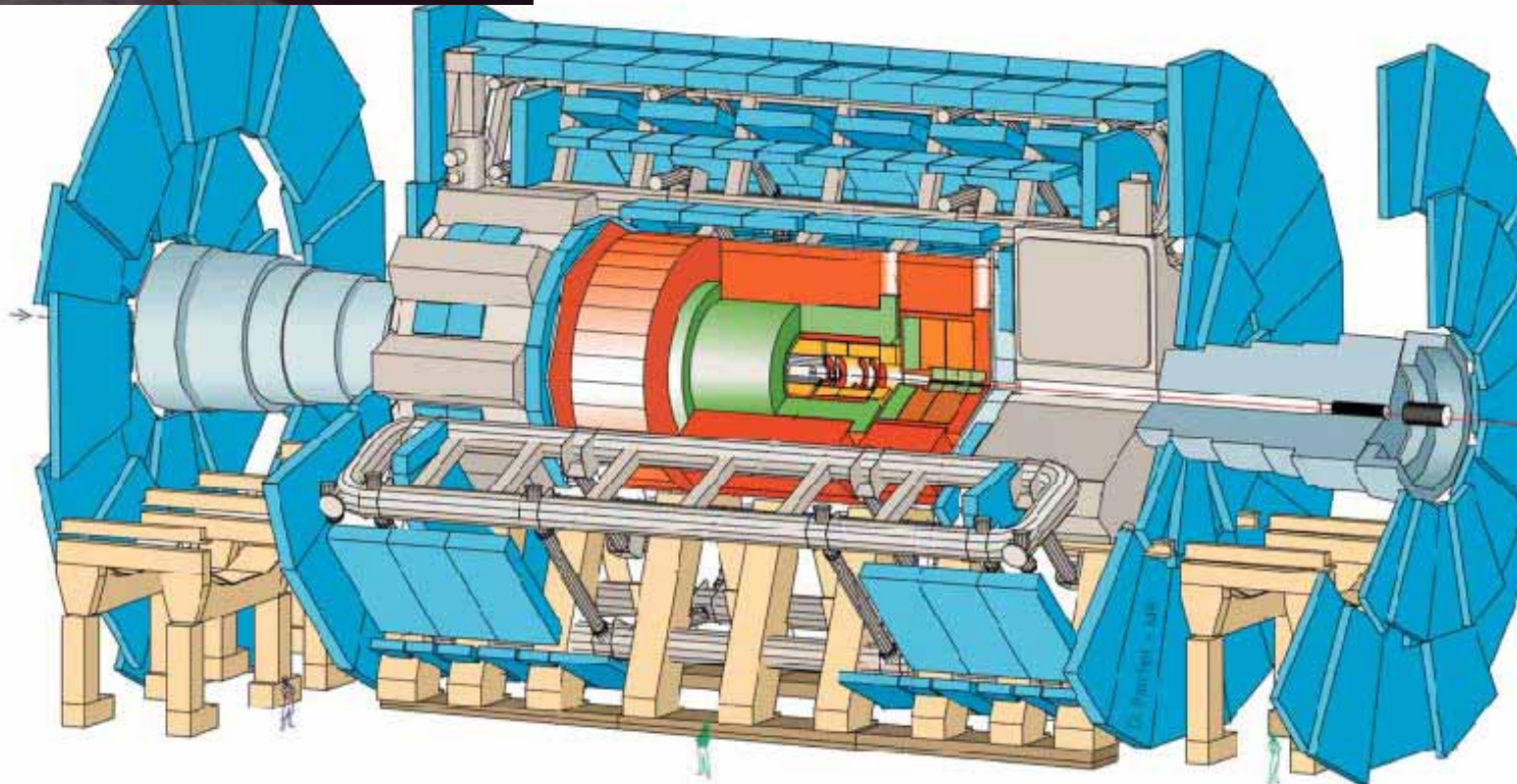
LHCでブラックホールが形成され、蒸発が観測されるかもしれない。



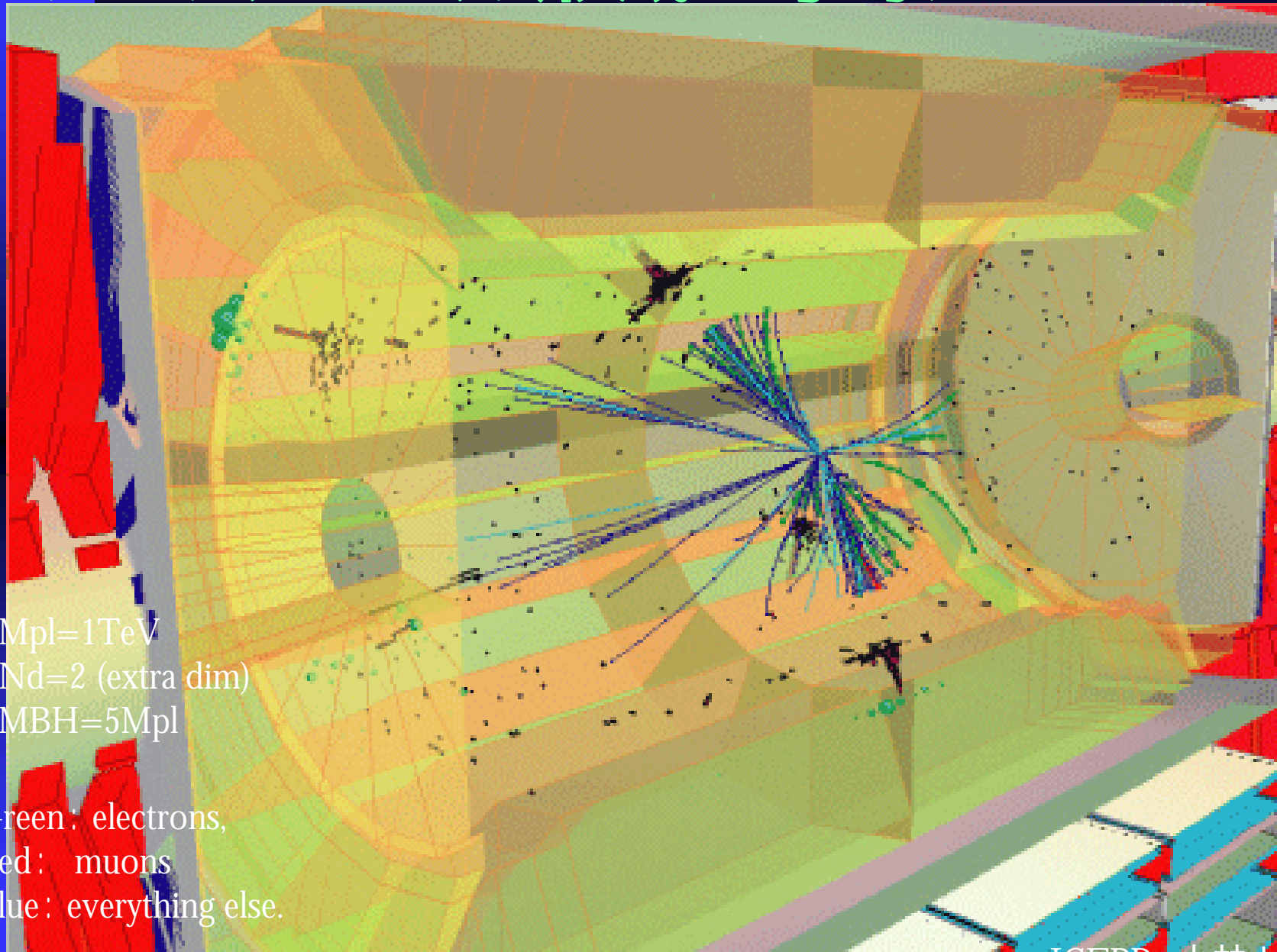


ATLAS測定器

- ・直径 22 m、長さ 44 m、重さ 7000 t
- ・世界最大の超伝導トロイド磁石



ブラックホール形成の事象



$M_{pl}=1\text{TeV}$

$N_d=2$ (extra dim)

$M_{BH}=5M_{pl}$

Green: electrons,

Red: muons

Blue: everything else.

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：4%

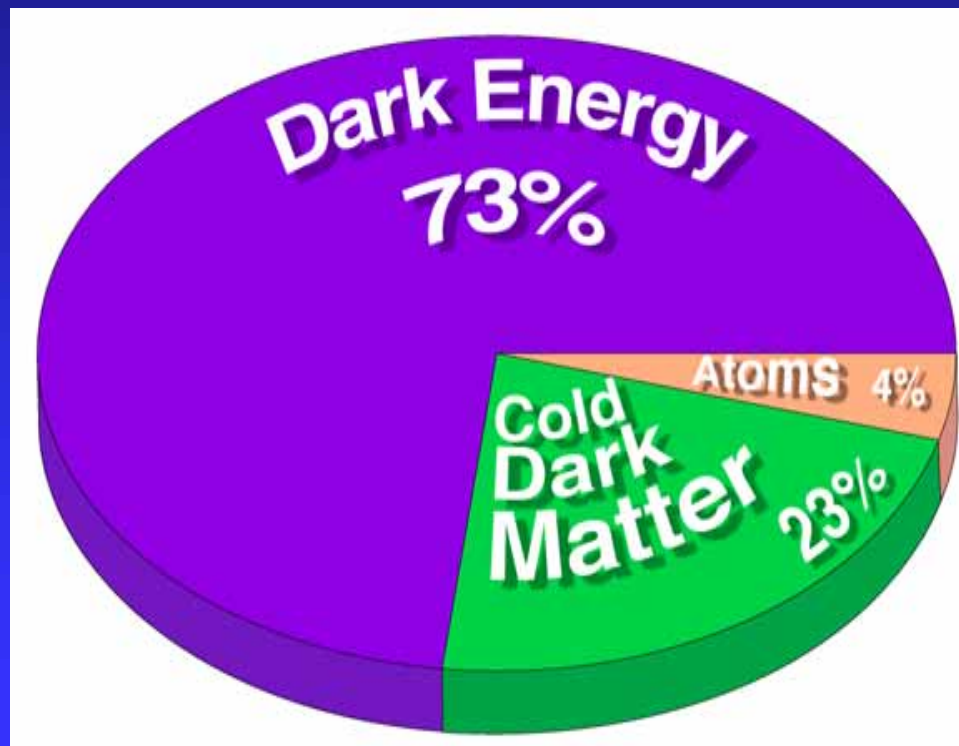
我々の体や輝いている星を
構成する物質。

●暗黒物質：23%

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：73%

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

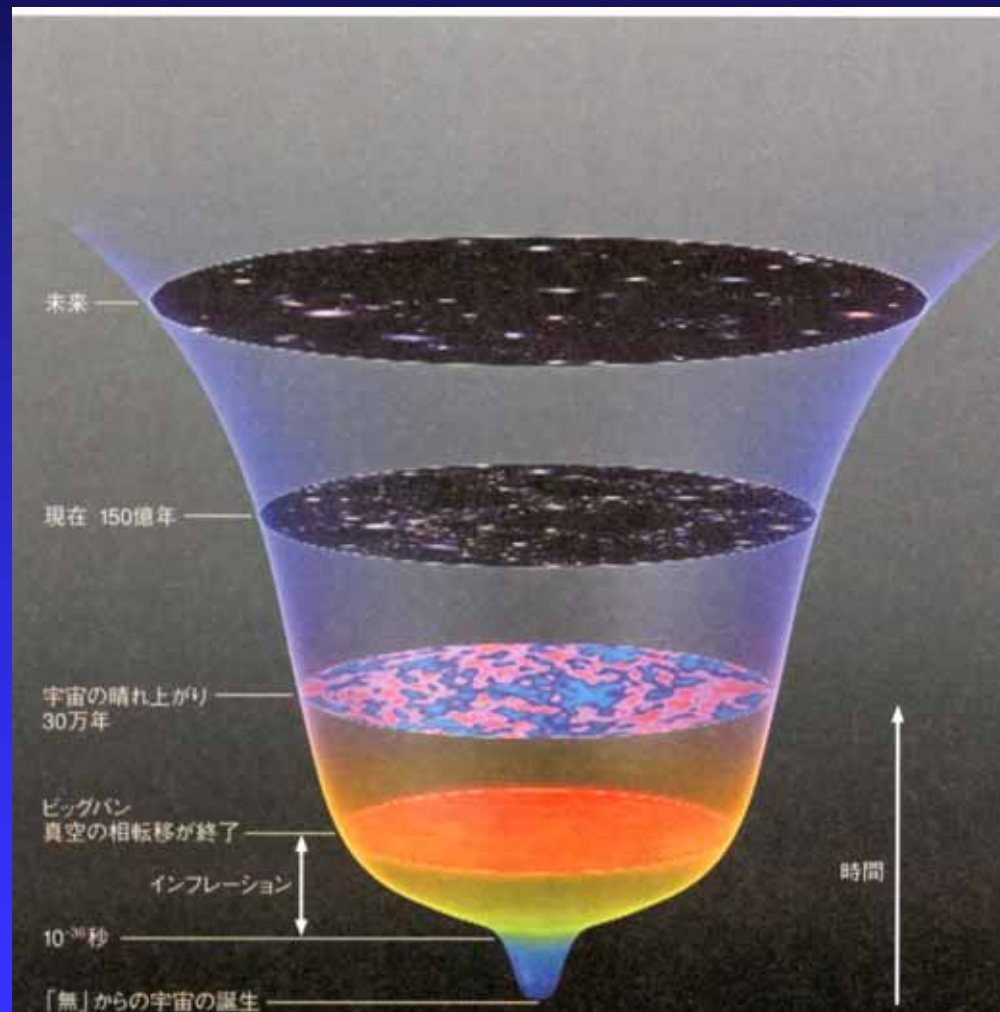
- 質量をもったニュートリノ(可能性はほぼ消えた)
- アキシオン(強い力に関連して予言されている粒子)
- ニュートラリーノ(超対称性理論が予言する未知の素粒子)
- 磁気単極子(モノポール)
- 影物質

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。

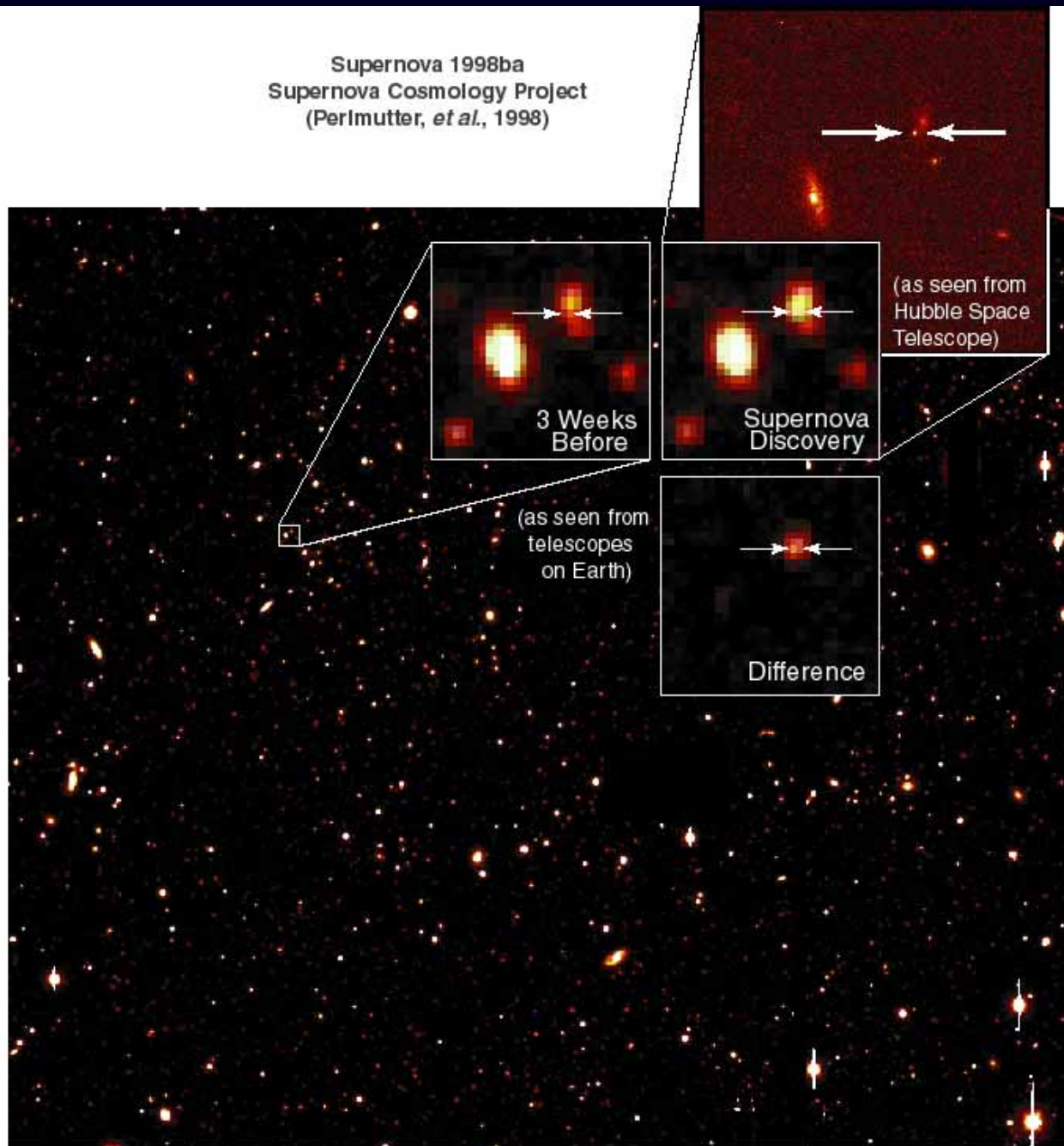
真空のエネルギーに働く斥力により宇宙は今第2のインフレーションの時代に突入したのか？

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%余りは真空のエネルギーであると報告 (Permuter et al, '98, Schmitdt et al, '98)



遠方の超新星
観測からダーク
エネルギーが
宇宙に満ちて
いることが
わかった。
WMAP衛星も
確認。

Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)



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. 偶然性問題: 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？

3. 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？

ダークエネルギー問題

■ 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)。

宇宙の未来

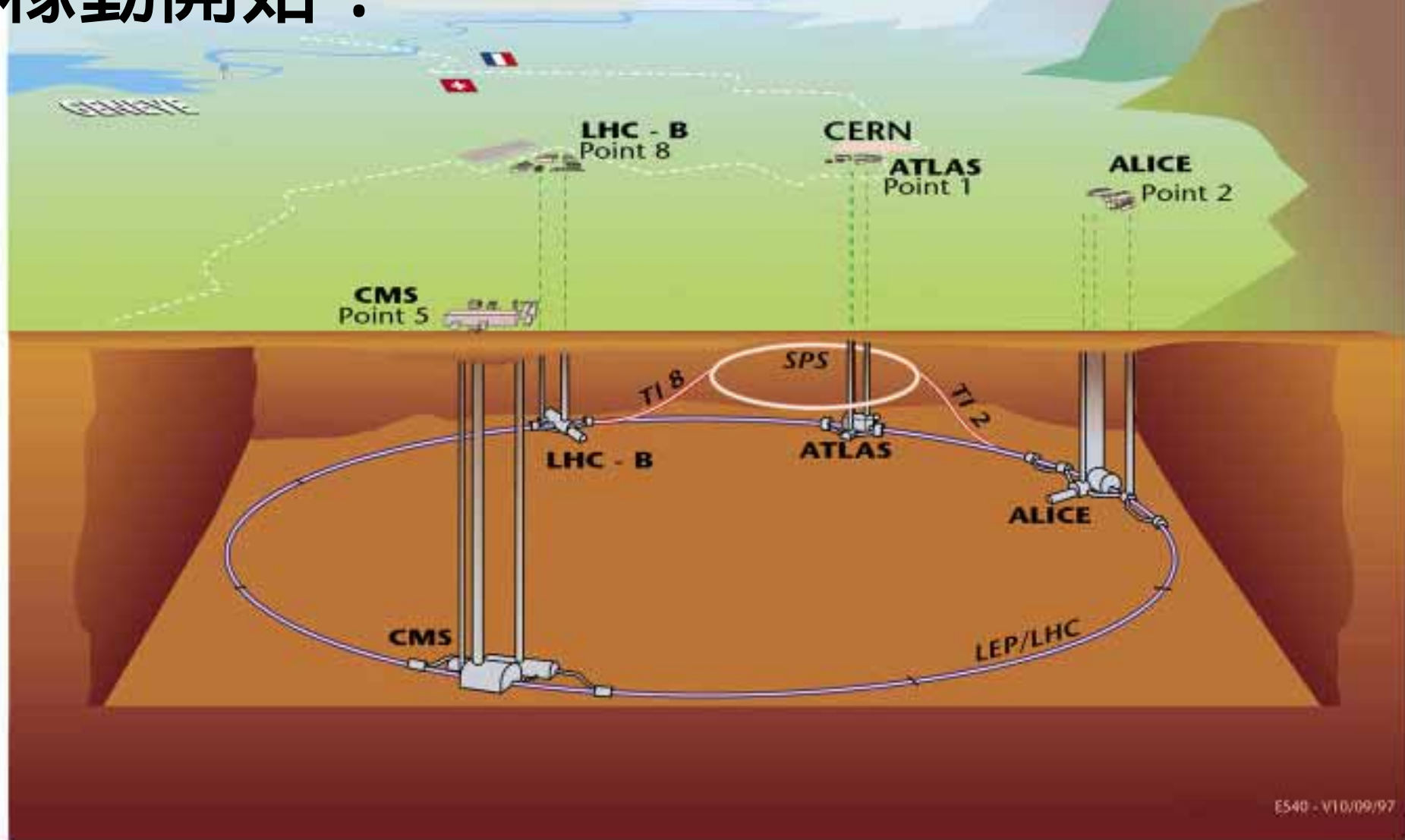
- この加速膨張は何時までも続くのだろうか？
いつか「相転移」がおり、ダークエネルギーは消えるのだろうか？
- 加速膨張が続くなら、我々が影響を及ぼすことのできる物質領域はどんどん狭くなる。もはや人類は無限の宇宙に広がることはできない。
- もし加速膨張が止まるなら、無限の世界に羽ばたくことが可能。また収縮に転ずる可能性も残されている。

LISA: 宇宙重力波レーザー干渉計



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。

2007年、LHC(ラージハドロンコライダー) 稼動開始?



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？

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。

「われら何処より来りしや」、
「われら何者なるや」、
「われら何処に去らんとするや」
「ゴーギャンの晩年の品」

人類の歴史が始まったところから問い続けられてきた問題に、科学の言葉で答えることができる時代となった。