

# 宇宙の始まりの前



東京大学 大学院  
理学系研究科・理学部  
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO



ビッグバン宇宙国際研究センター

横山 順一

# 宇宙

時間と空間・森羅万象

# 雪月花星

# 宙



宙組 COSMOS  
Troupe

1998年、東京での通年公演に向け5組制がひかれて誕生した若い組。時代を映すレビュー&ショーは躍動感があり人気を博しています。

宝塚  
歌劇



# 高さ14000kmから写した地球



半径6400km

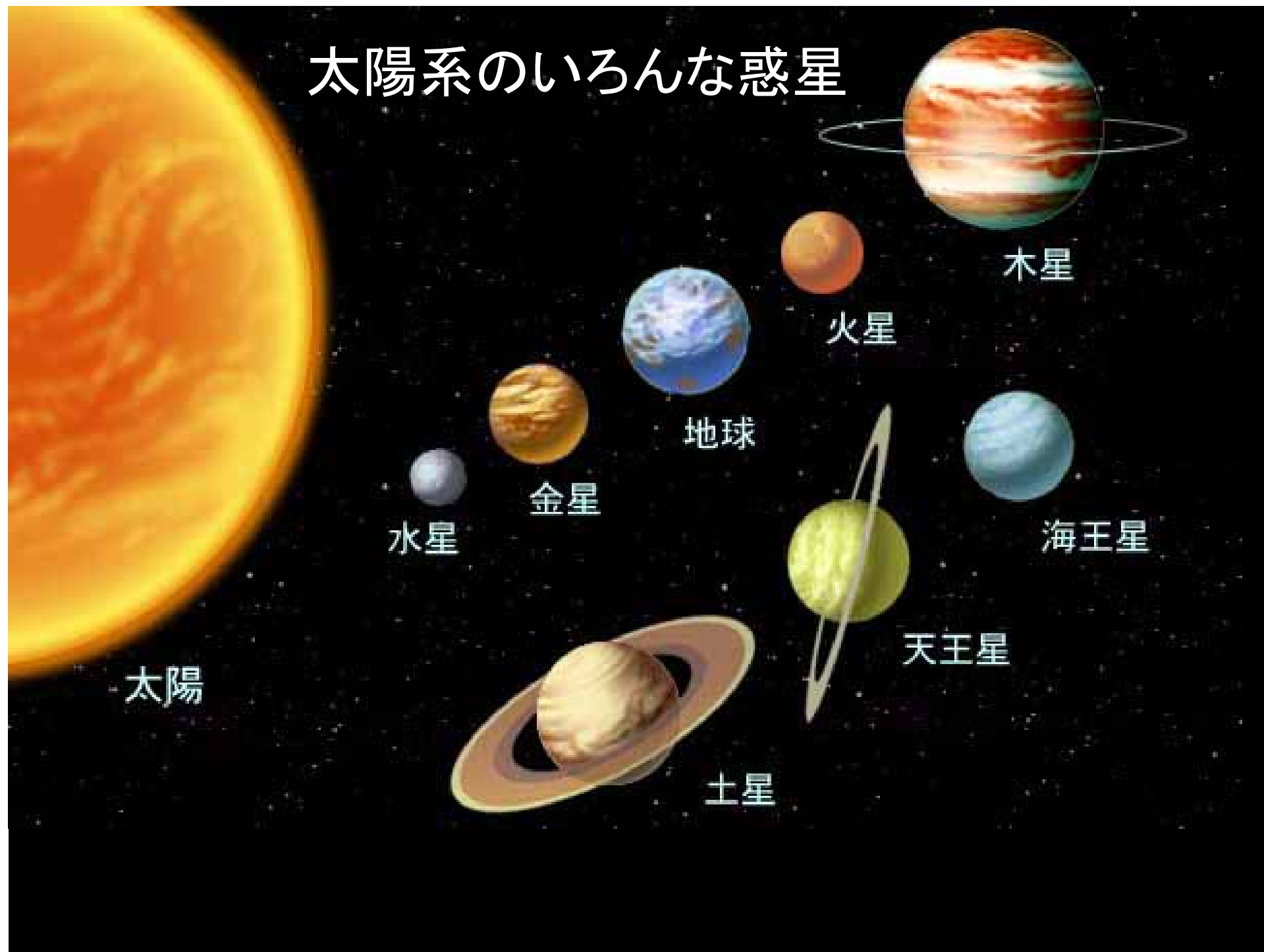
気象衛星  
ひまわり

14000km



スペースシャトル  
の高度は、  
わずか300km

# 太陽系のいろいろな惑星



もっと遠くに目を向けよう

星空

星座の星は  
全部恒星

天の川  
あまのがわ

多数の星の集まり

銀河(ぎんが)

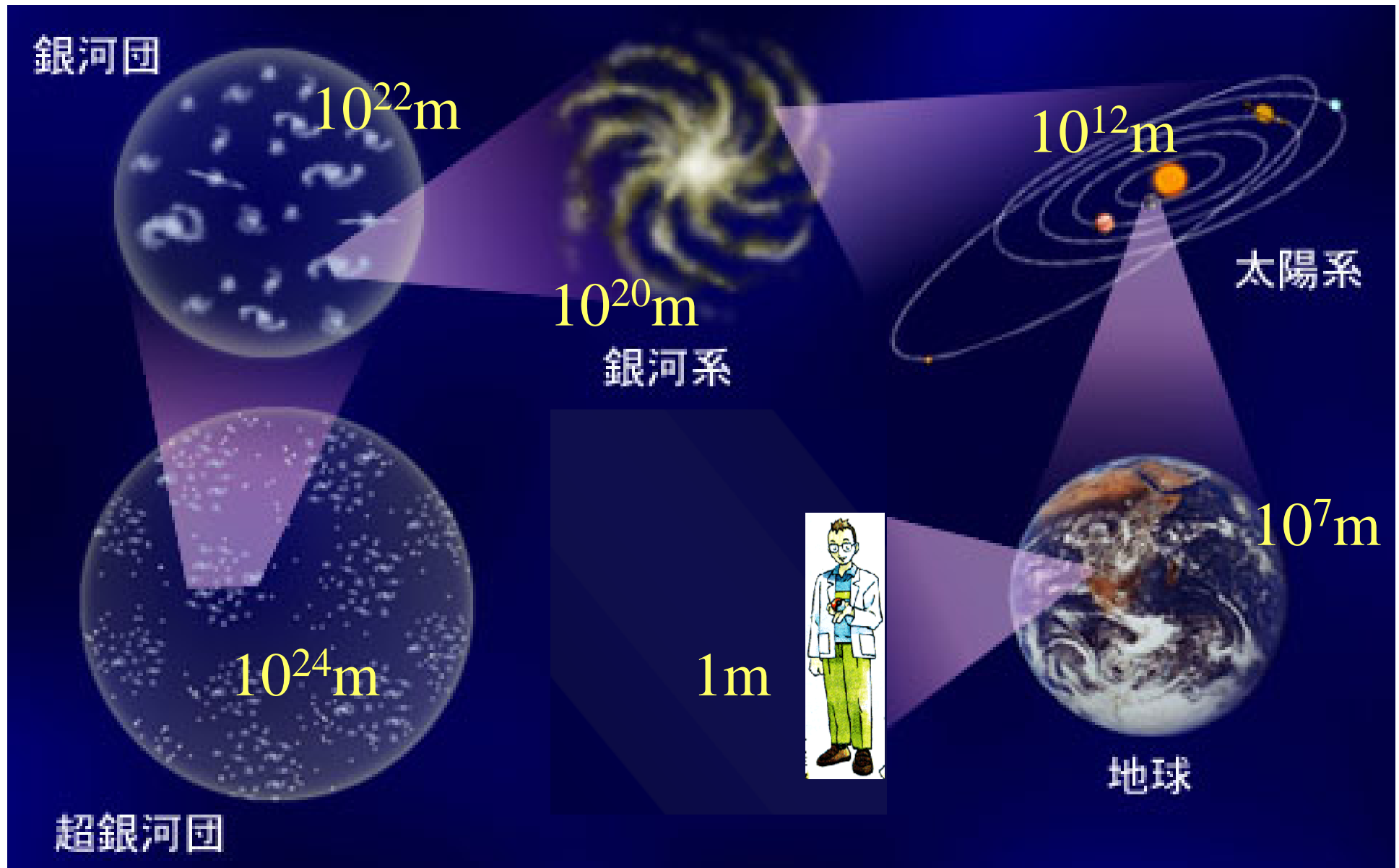
渡部剛氏撮影

ご近所の銀河：アンドロメダ銀河 M31

230万光年のところにある



# モノサシを変えると、いろいろな構造が見える





10000000

スペースシャトル

月ロケット

00000000

太陽系

0000000m

銀河

銀河団

超銀河団

宇宙の地平線

宇宙を支配する力

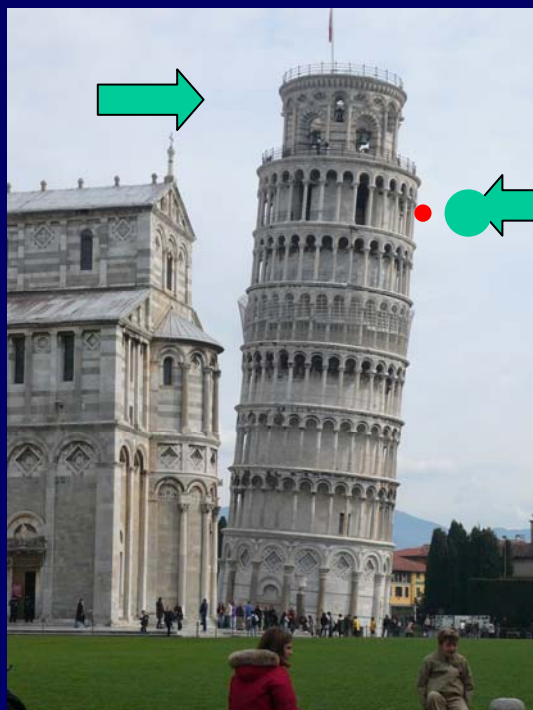
万有引力 = 重力

# ★ガリレオの実験

すべての物体はその種類によらず、質量に比例した引力を及ぼしあう。

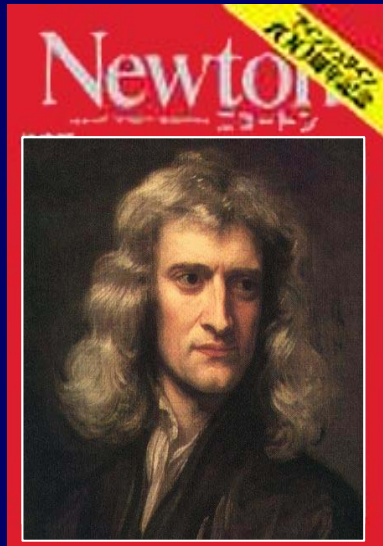
ガリレオはピサの斜塔から重さの異なる2種類の物体を落とし、同じ加速度で落ちることを確認した、といわれている。

**万有引力=重力**



# ★ ニュートン力学の誕生

ニュートン(1642-1727)は、リンゴを地球に向けて落とす力と月を地球の周りにとどめておく力は、おなじ万有引力だと悟った。



ニュートンのリンゴの木  
(東京大学理学部  
附属植物園)

太陽系の惑星の運動を理論的に説明した

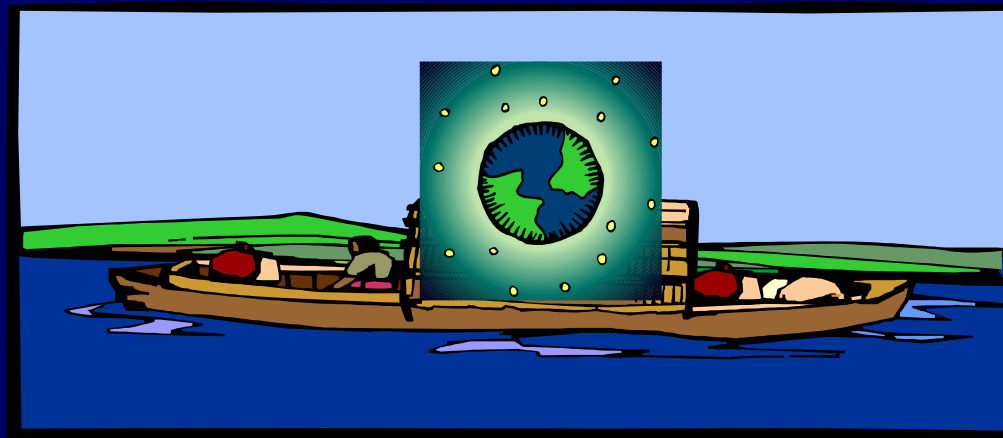
## ★ ニュートンの宇宙 (1686)

時間：過去から未来へ向かって  
永劫不変に流れていくもの

空間：彼の力学理論に従って運動する  
物体の単なる入れ物

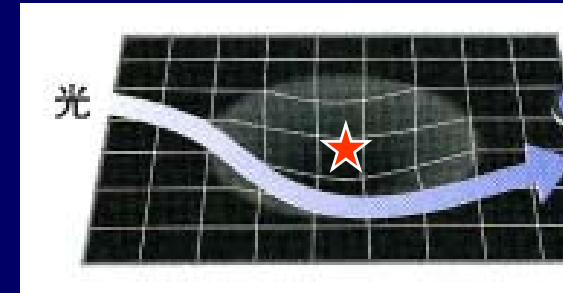
宇宙にどんな物質があろうと空間のあり方は変わらない

永劫不変な定常宇宙



# ★ アインシュタインの一般相対性理論

物質やエネルギーがあると  
まわりの空間がゆがんでしまう。



空間の状態を中身の物質(質量)が決める。

もし質量を保ったまま太陽を3kmにまで縮めると  
ブラックホールになってしまう。

もし質量を保ったまま地球を9mmにまで縮めると  
ブラックホールになってしまう。

# ★アインシュタインの宇宙 (1915)

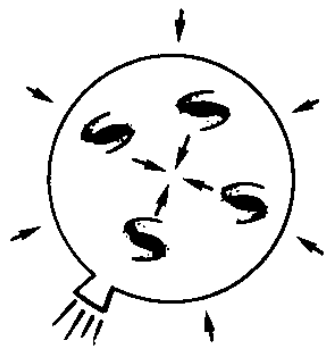
一般相対性理論:

中身の物質(エネルギー)が空間のあり方を決める。

定常宇宙を実現しようとしても、銀河同士の万有引力によって宇宙はつぶれてしまう!



空間自体に反発力(「宇宙項」)を持たせ、万有引力と釣り合わせて定常宇宙にした。



放っておくと万有引力でしぼんでしまう



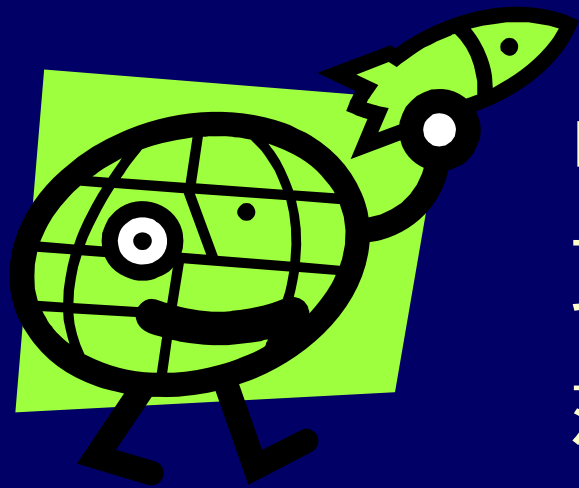
宇宙項 $\Delta$ を入れて宇宙がしぼまないようにした



## ★フリードマンの宇宙：膨張宇宙

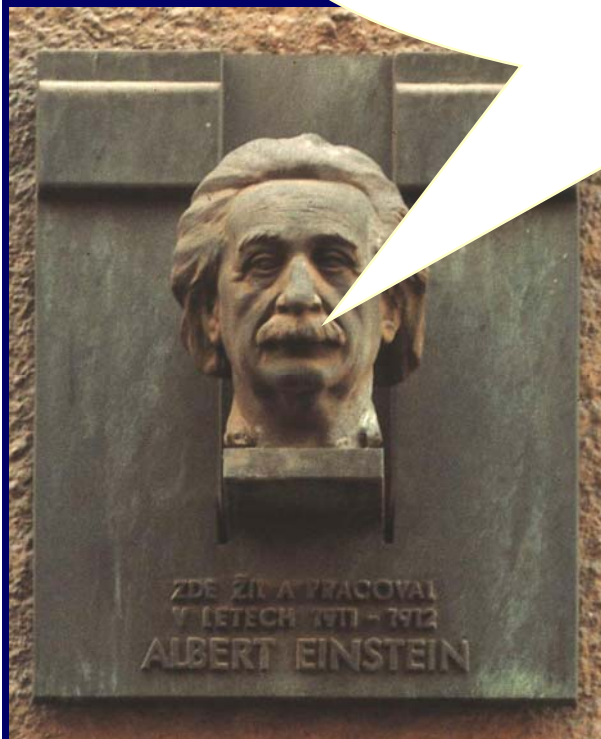
アインシュタインの方程式を、「宇宙項」など入れずに解き、膨張宇宙の解を発見した。

大きな初速度を与えれば、万有引力によって減速しながらも、膨張することが可能。



ロケットもはじめに大きな推力を与えれば地球の重力圏を脱出できるが、推力が足りなければ落下してしまう。

ナンセンス！  
宇宙が変化するわけない

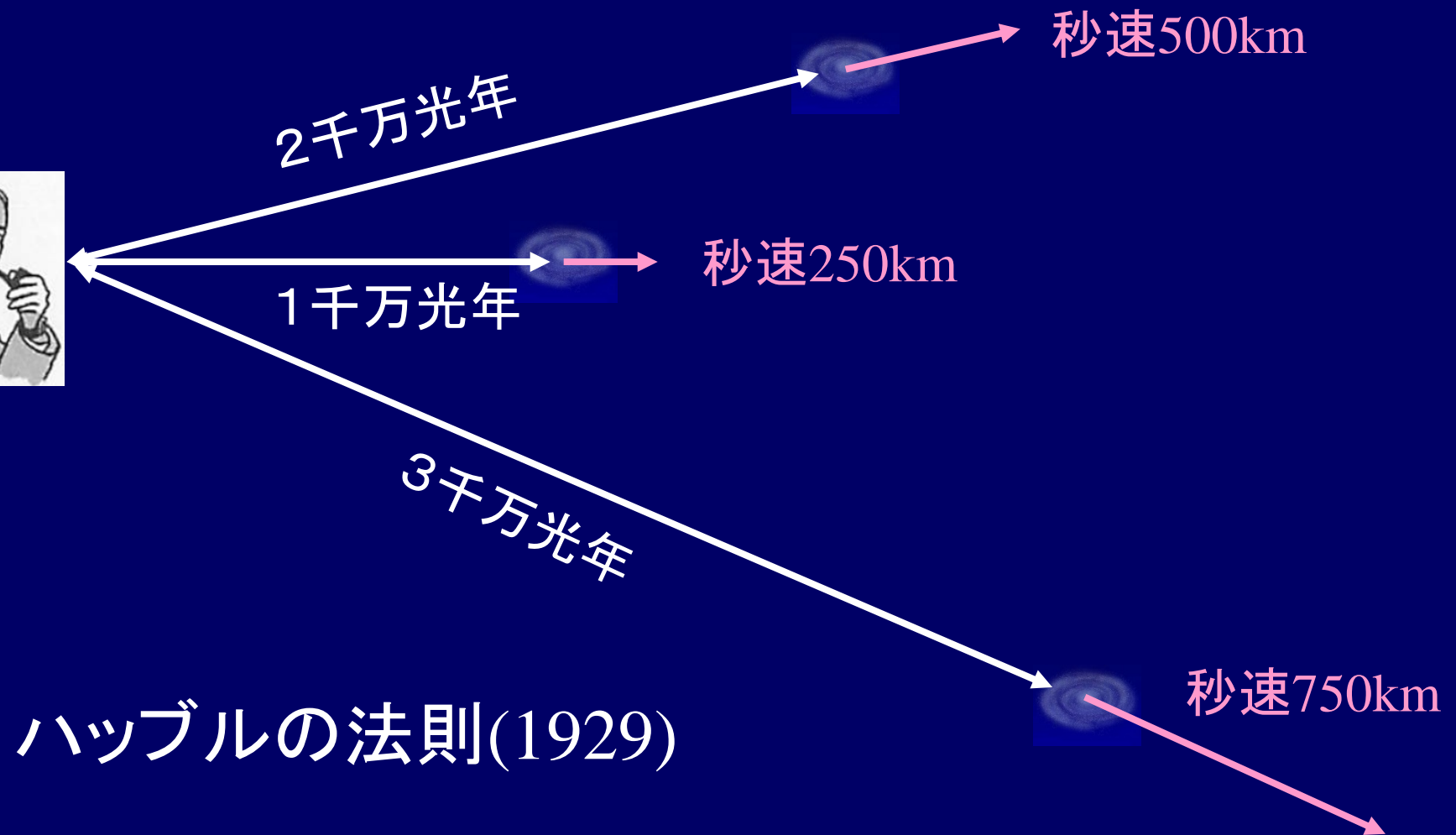


しかし、アメリカの天文学者  
エドウィン・ハッブルの観測  
によると、、、（1929）



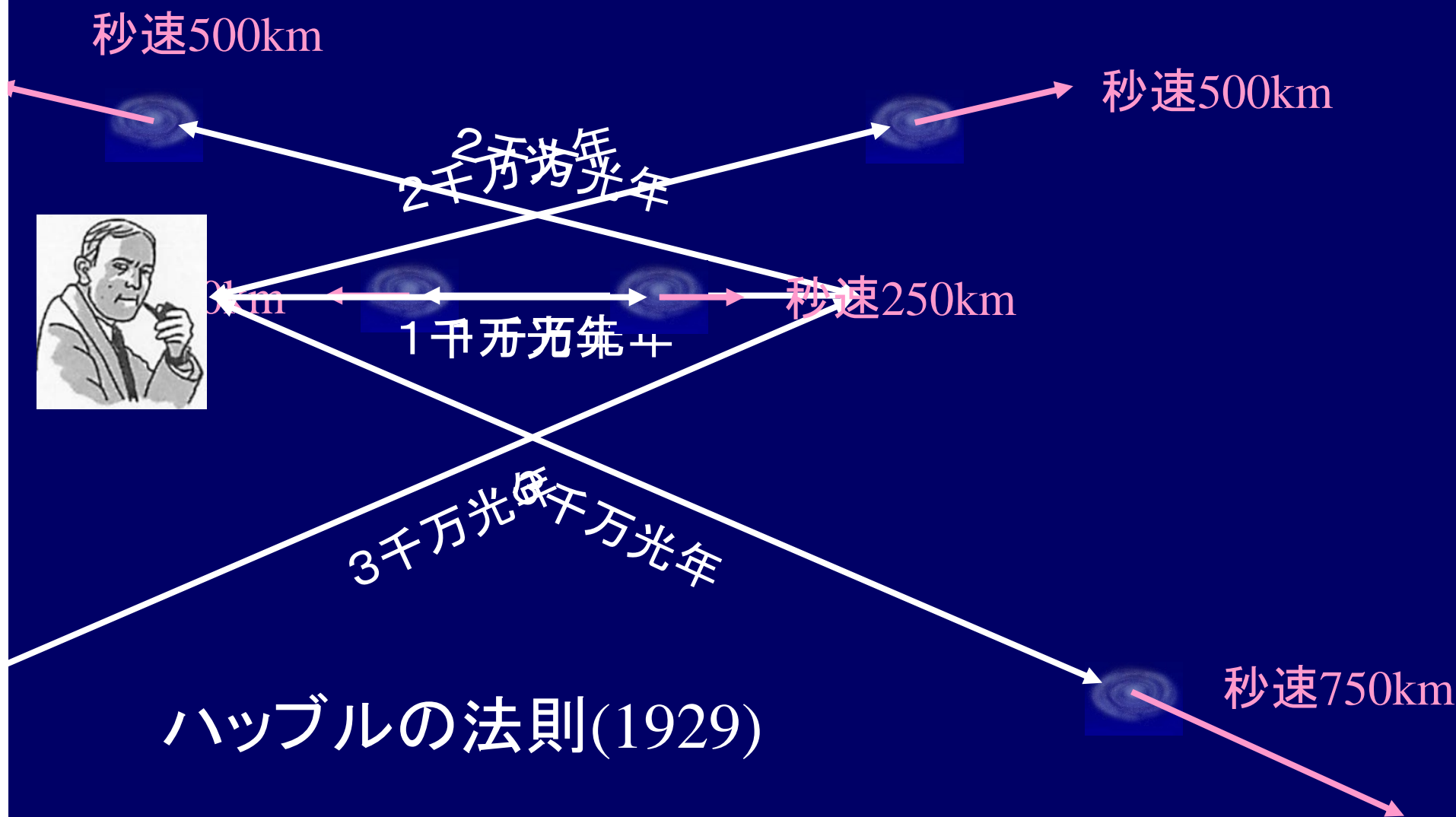
# ★ ハッブルの法則の発見(1929)

遠方の銀河はわれわれからの距離に比例した速度で遠ざかっている！



ハッブルの法則(1929)

遠くの銀河は私たちから遠ざかっている。  
しかも、遠くの銀河ほど速く遠ざかっている。



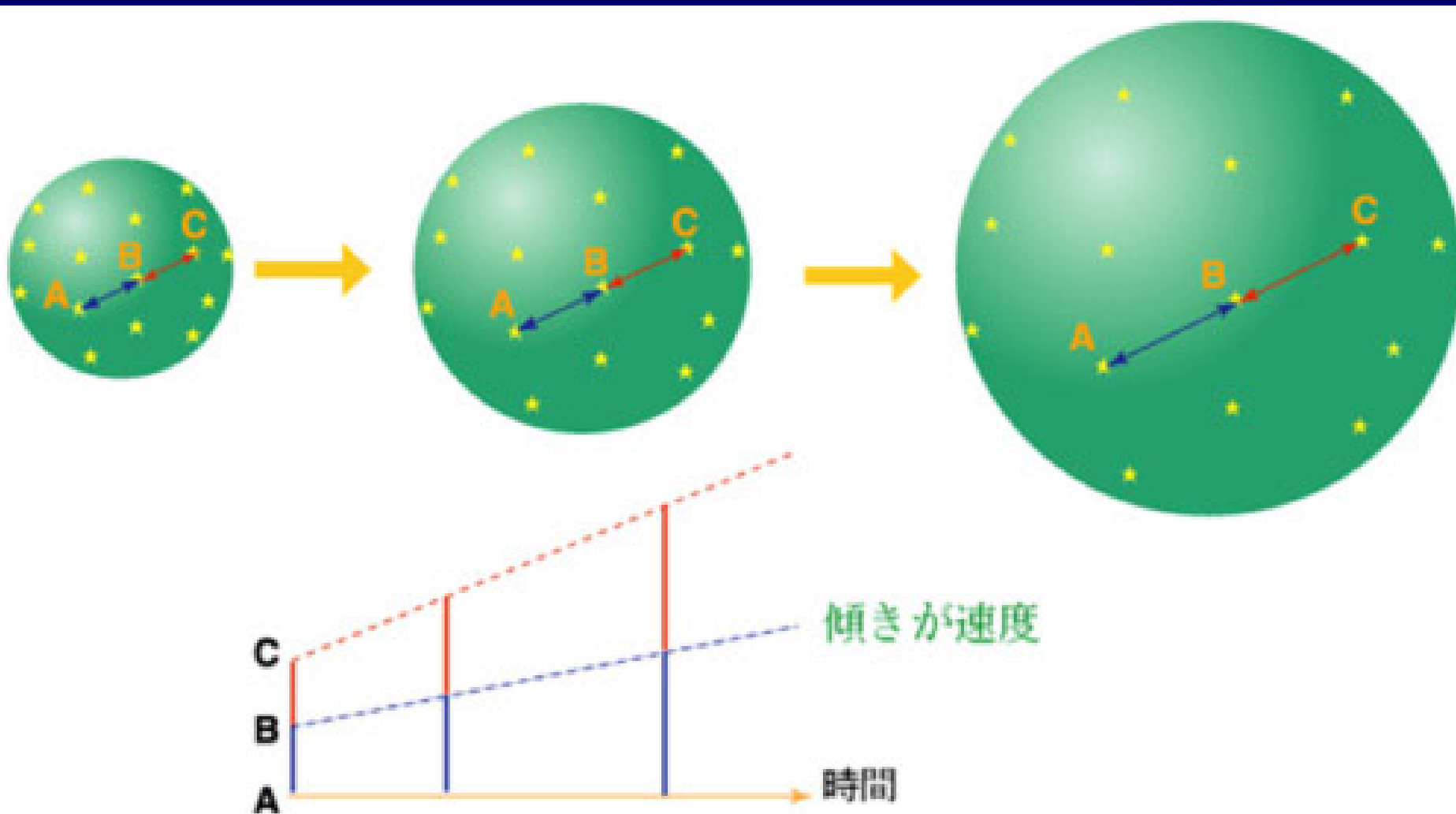
私たちは宇宙の中心にいるの  
だろうか？

たぶん違うだろう

地球ではなく、太陽が太陽系の  
中心だったし、、、

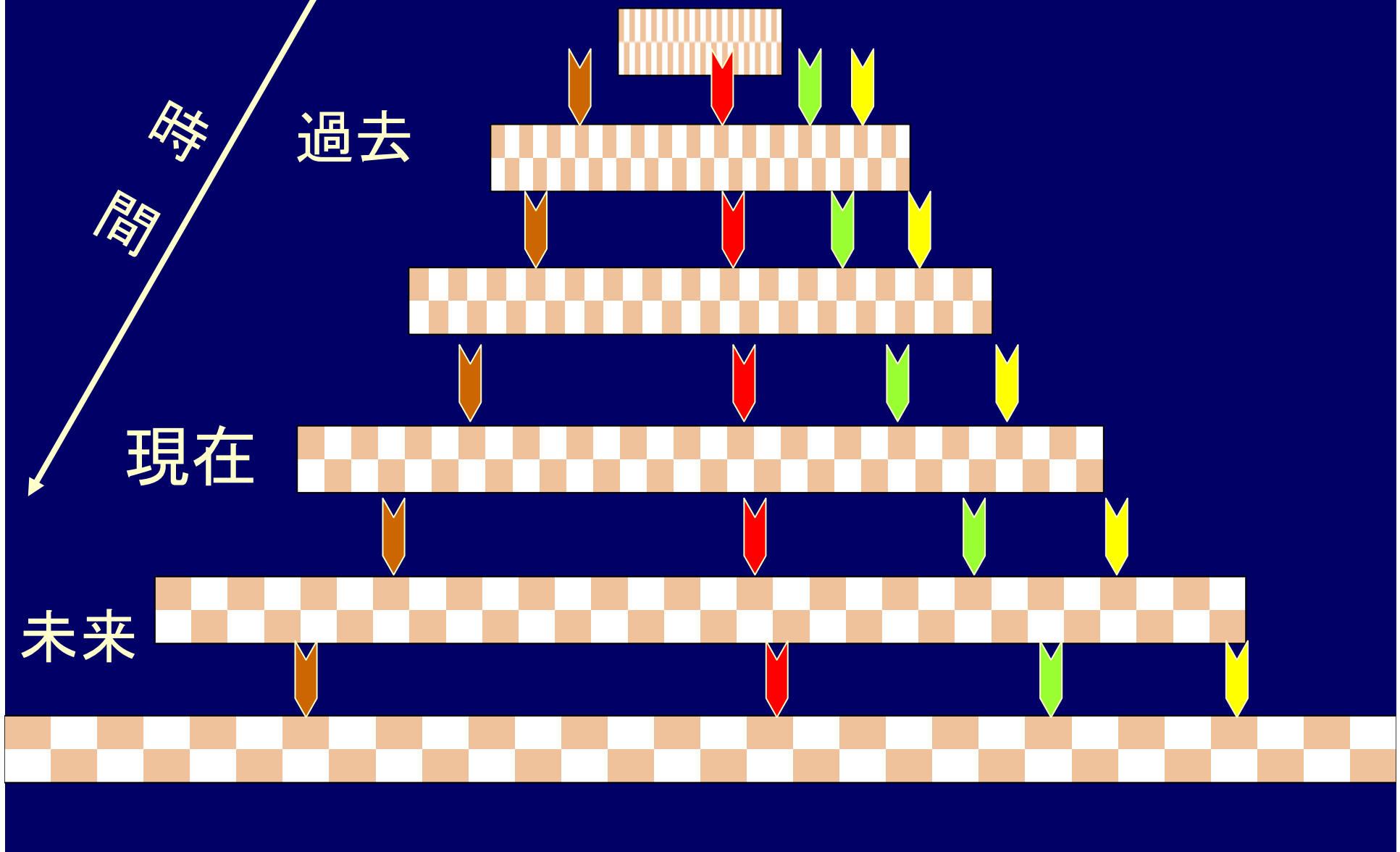
## 解釈2)

フリードマンの膨張宇宙の解が検証された！





宇宙が一様に膨張していると考えると、どの点から見てもより遠方にある点は距離に比例したより大きな速度で遠ざかることがわかる。

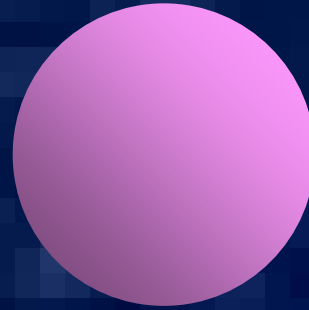
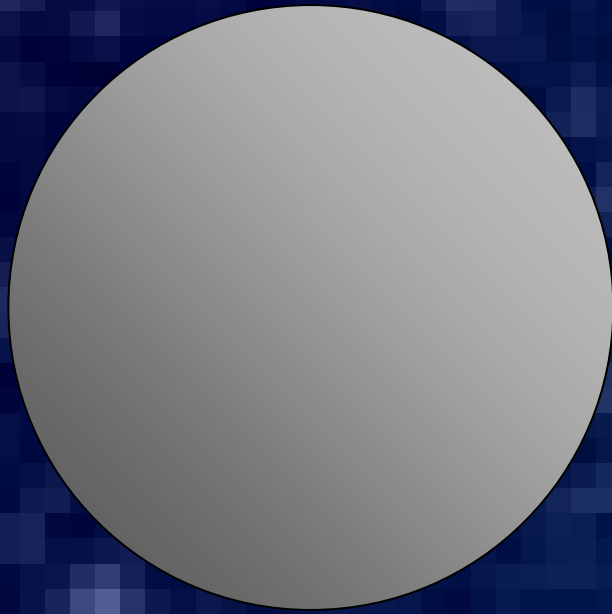


宇宙は大きくなり続けている

昔の宇宙は小さかった



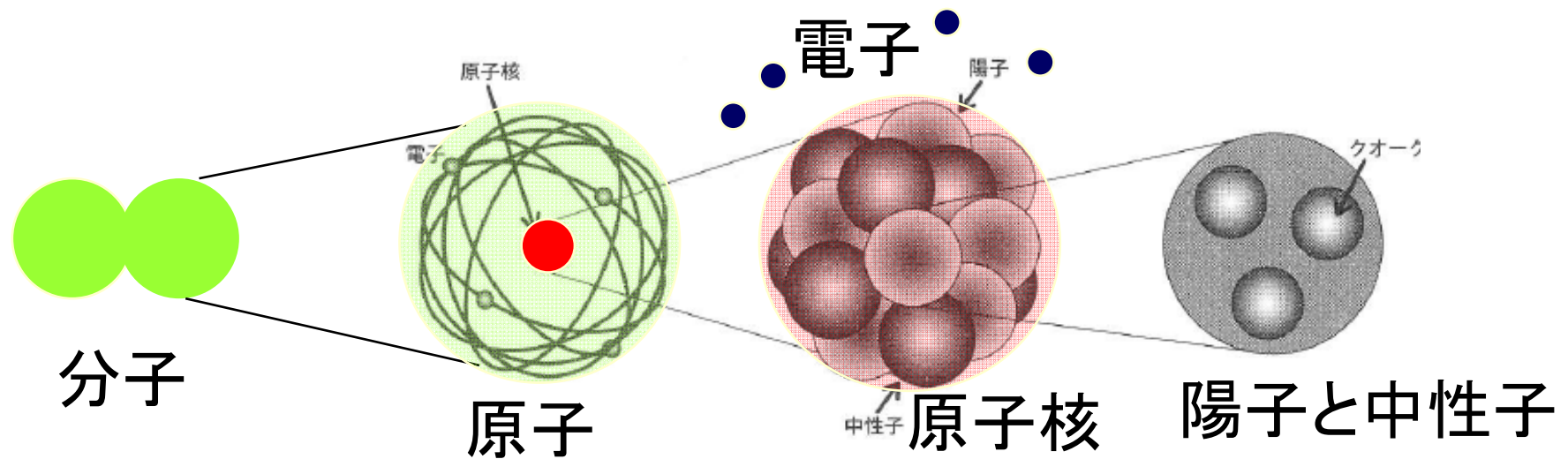
昔の宇宙は小さくて熱かった



現在

過去

温度が上がると何もかもバラバラになってしまう



宇宙には始まりがあった

いつはじまったのだろうか？

# 現在の宇宙の大きさ、年齢

われわれに見える範囲の

## ★ 宇宙膨張率の観測：

1千万光年 ( $10^{23}$  m) 離れた銀河は、  
秒速250kmで遠ざかっている。

$$\frac{1\text{千万光年}}{250\text{km/s}} = 130\text{億年}$$

# 宇宙は137億歳

宇宙の年齢は130億年くらい。(正しくは137億年)  
われわれに見える宇宙の大きさも137億光年くらい。  
しかし、その向こうにも宇宙は広がっていると考えられる。

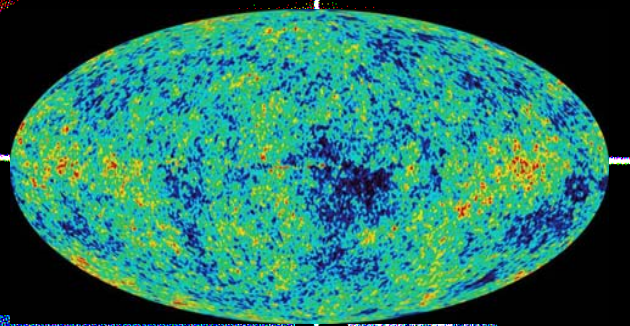
始まる前には何があったのだろうか？

宇宙の始まり 宇宙の果て



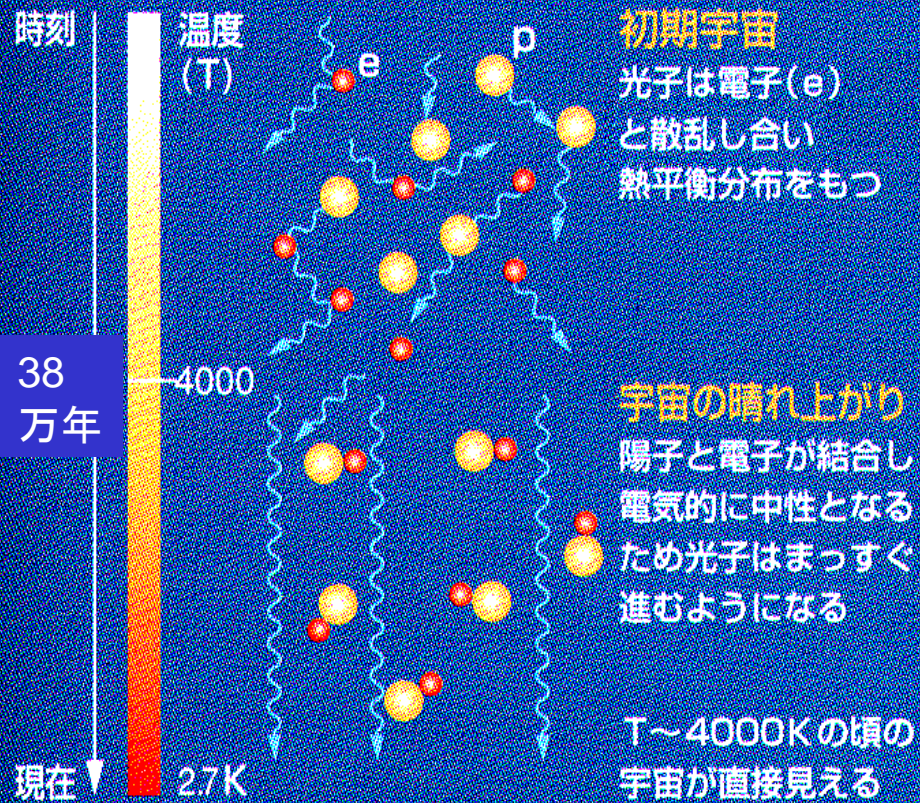
# 膨張宇宙を過去にさかのぼる

WMAPによる  
天空マップ



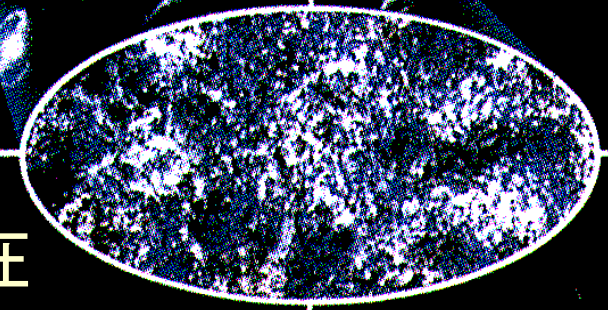
ビッグバンから  
38万年後

## 宇宙の進化の状態



最初の銀河からの光

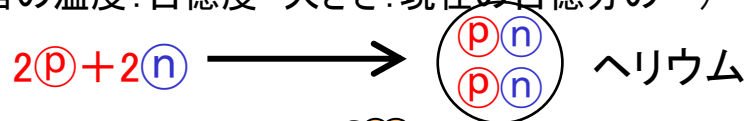
現在





# ビッグバン

ビッグバン後1秒から3分の間に陽子 $\text{p}$ と中性子 $\text{n}$ からヘリウムができた  
(そのころの宇宙の温度: 百億度 大きさ: 現在の百億分の一)

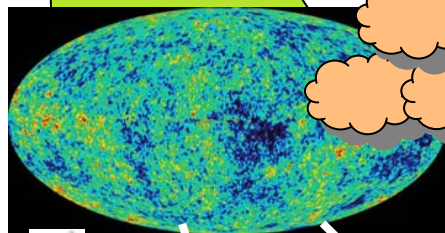


膨張  
冷却

晴れ上がりの前は光子は電子と何度もぶつかって自由に前進できない。  
=雲の中にいるのと同様。

宇宙の晴れ上がり  
38万歳の時の  
宇宙地図

温度4千度



光(電磁波)で直接見ることができるのはこのときまで。  
それ以前の宇宙は雲の中にあり、直接見えない。  
この**宇宙マイクロ波背景放射**は宇宙の最も遠くから来る、宇宙初期の名残を伝える生きた化石です。

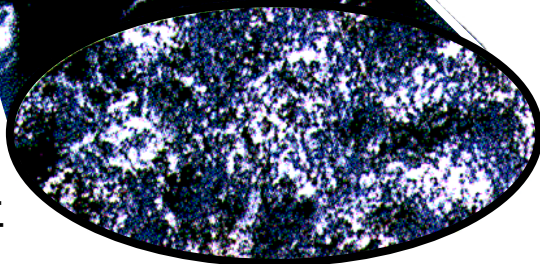
38万歳以降光はまっすぐ進める  
宇宙が直接見える

最初の  
星形成

銀河形成

2.7度

現在137億年

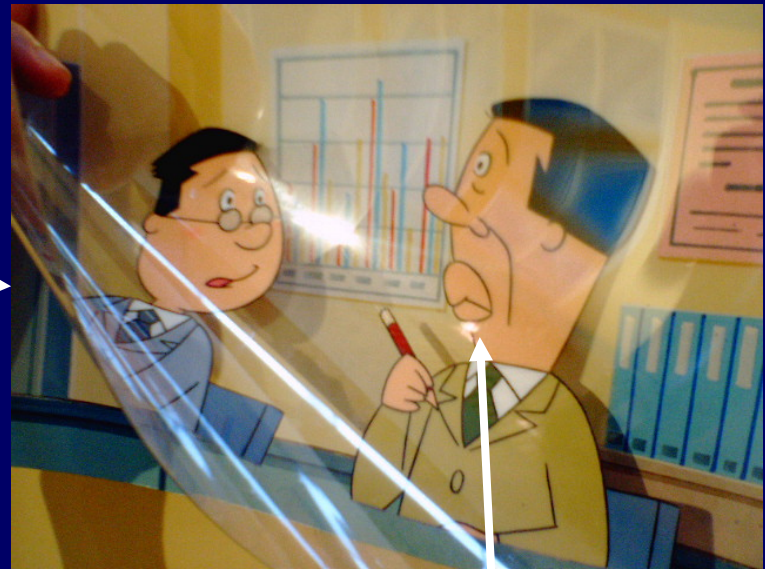


# 宇宙マイクロ波背景放射

宇宙の最も遠方から一様に飛来する電磁波



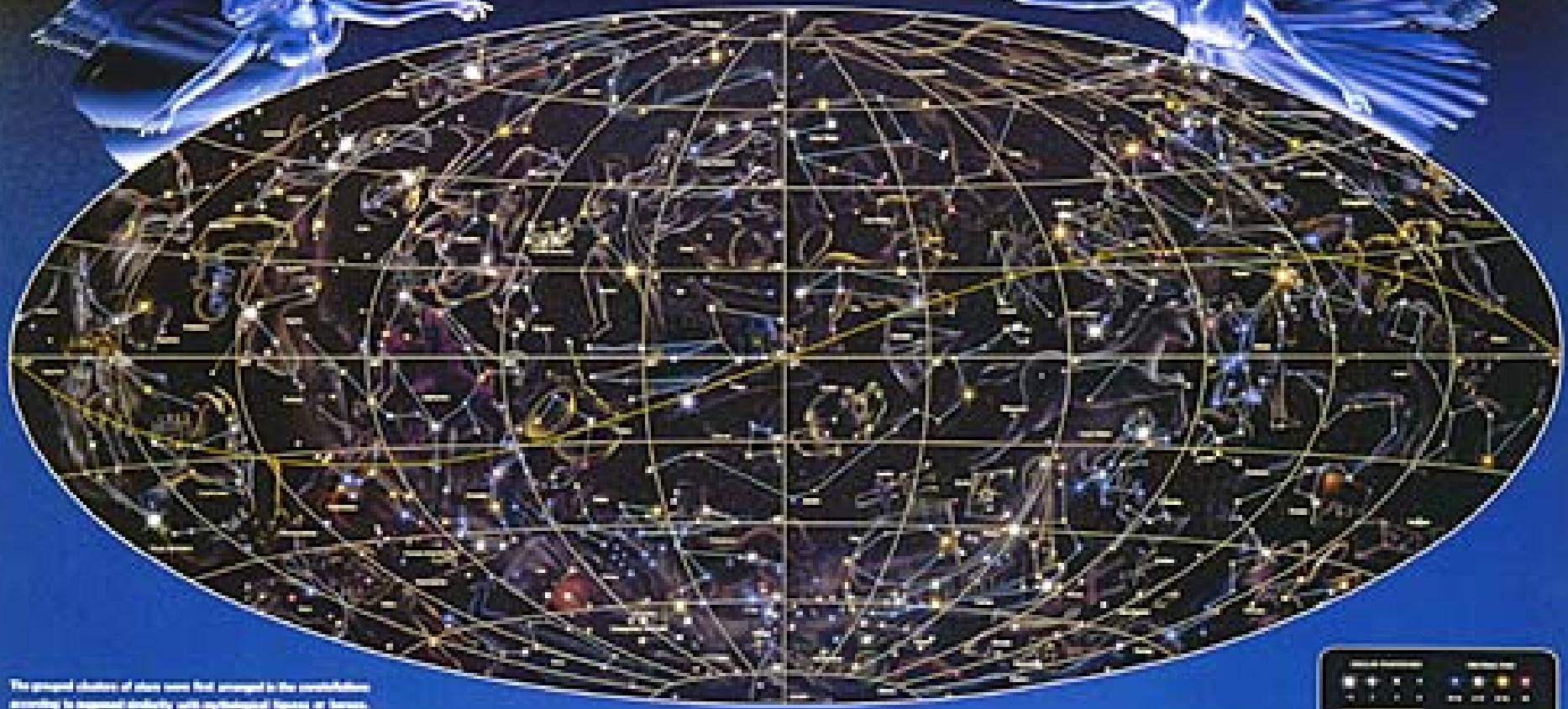
ベル研究所のペンジアス・  
ウィルソンがアンテナのテスト  
中偶然発見！（1965）



前景(星や銀河の光)

# 夜空の全天マップ(=前景)

Fantastic Starry Night  
CHART OF THE SKY CONSTELLATIONS

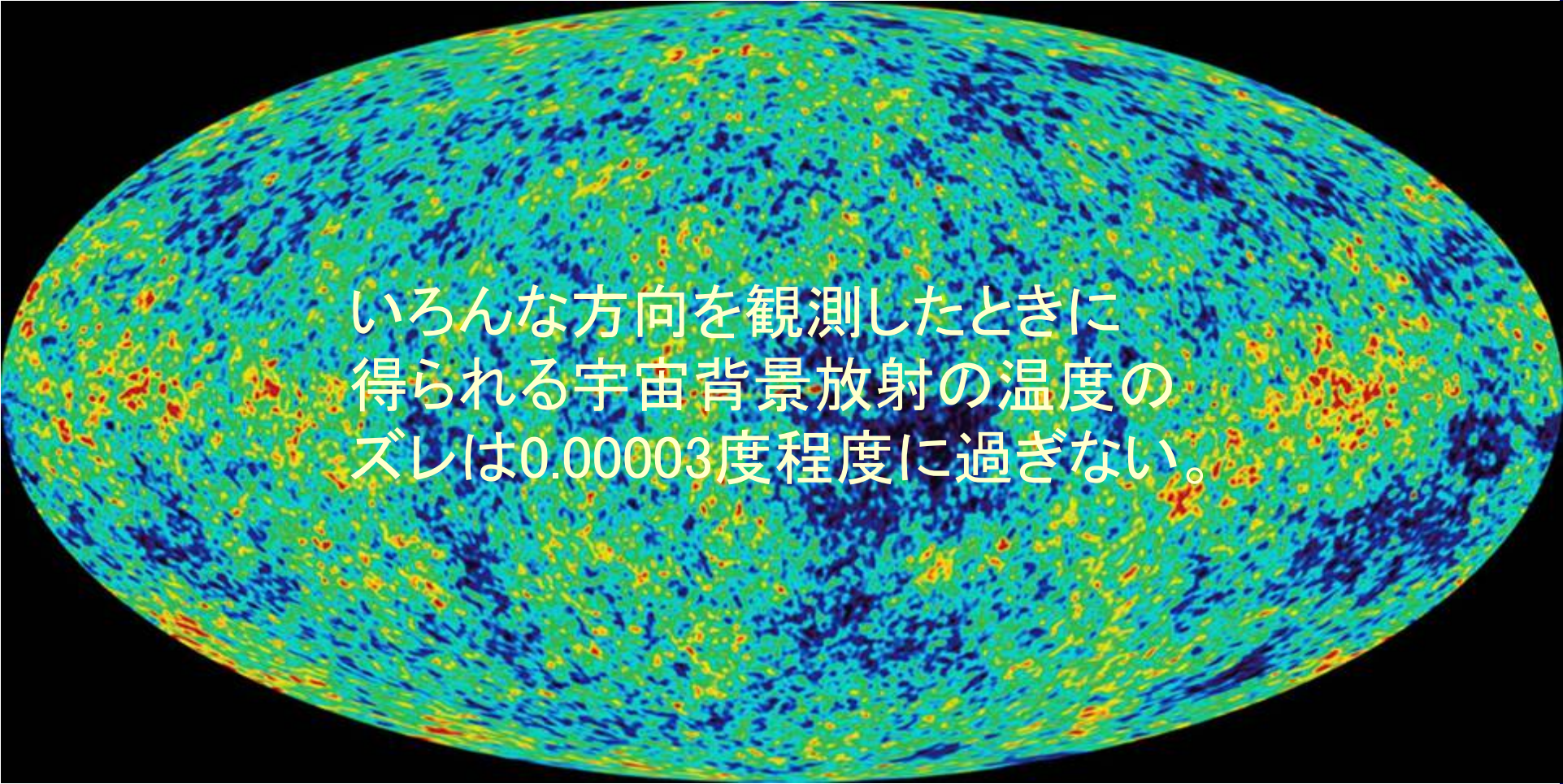


The general clusters of stars were first assigned to the constellations according to regional similarity with mythological figures or heroes. More than 100 years ago, Ptolemy drew up a list of 48 constellations which formed the basis for astronomical studies. How you can imagine 48 constellations of Fantastic Starry Night.



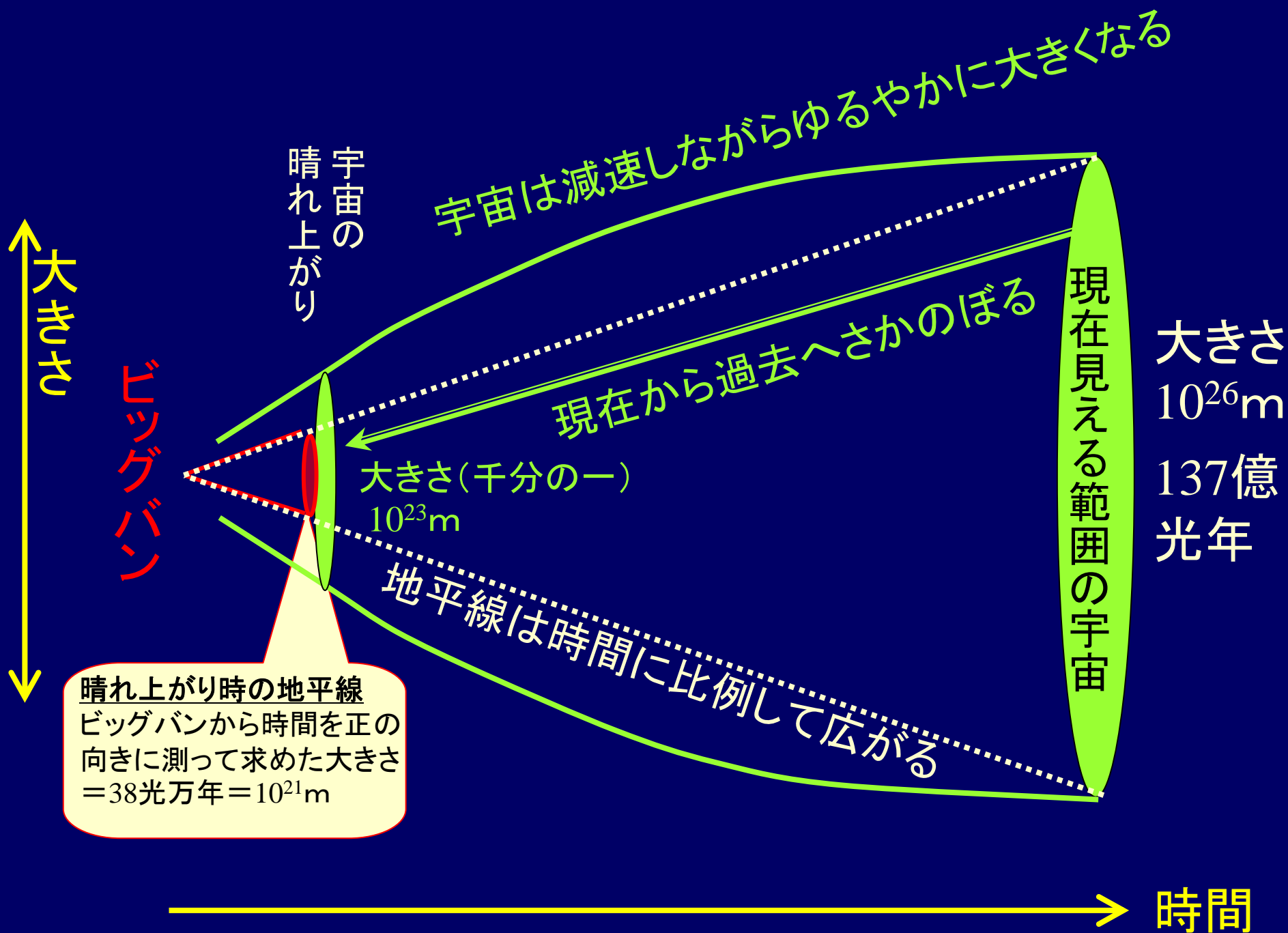


# 宇宙背景放射探査衛星の全天マップ



いろいろな方向を観測したときに  
得られる宇宙背景放射の温度の  
ズレは0.00003度程度に過ぎない。

宇宙は4桁の精度でのっぺらぼう



宇宙は減速しながらゆるやかに大きくなる

宇宙の  
晴れ上がり

ビッグバン

現在から過去へさかのぼる

大きさ(千分の一)  
 $10^{23}m$

地平線は時間に比例して広がる

現在見える範囲の宇宙

大きさ  
 $10^{26}m$   
137億  
光年

晴れ上がり時の地平線  
ビッグバンから時間を正の  
向きに測って求めた大きさ  
= 38光万年 =  $10^{21}m$

↑ 大きさ ↓

→ 時間

# 宇宙の晴れ上がりの時の地平線の大きさ

38万光年(の千倍)  
見込む角にして1度くらい

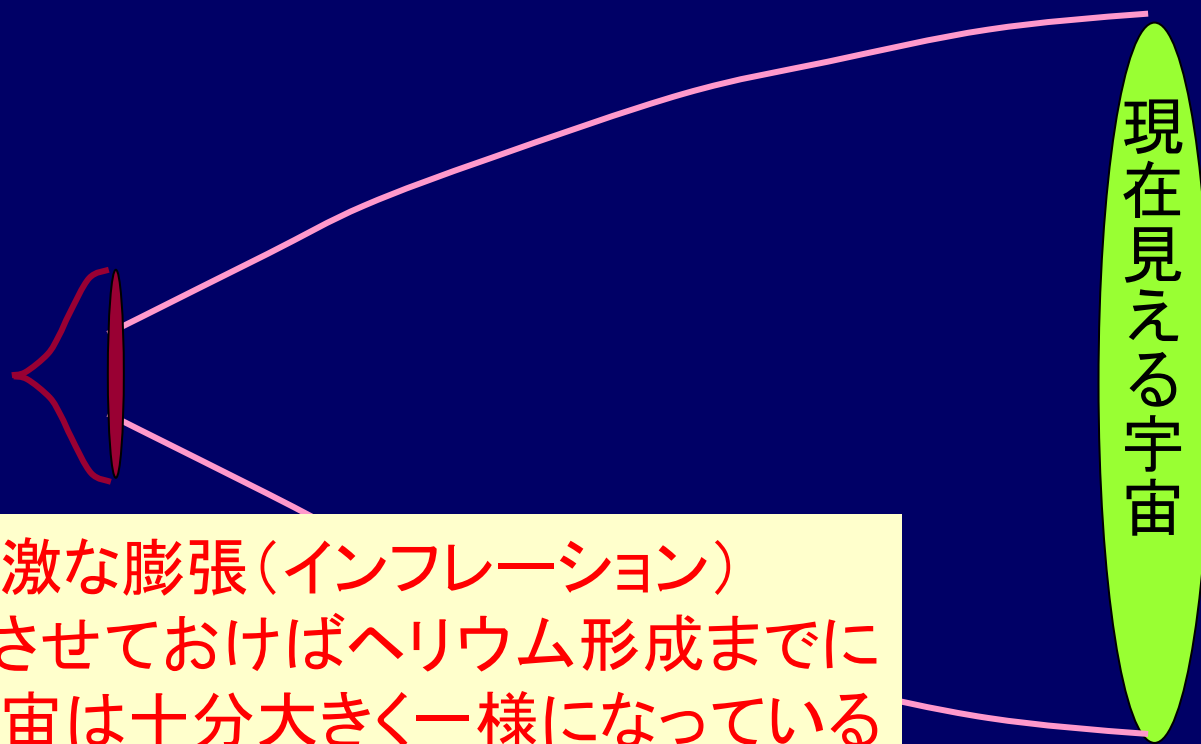
このスケールを遙かに超えたスケールで  
等方的に見える＝地平線問題(当時の  
地平線領域を多数集めてこないと現在の  
宇宙の大きさになれない、ということ。)

$$T = 2.728 \text{ K}$$

# 宇宙のインフレーション

はじめに宇宙を急激に膨張させればよい  
ネズミ算式の膨張

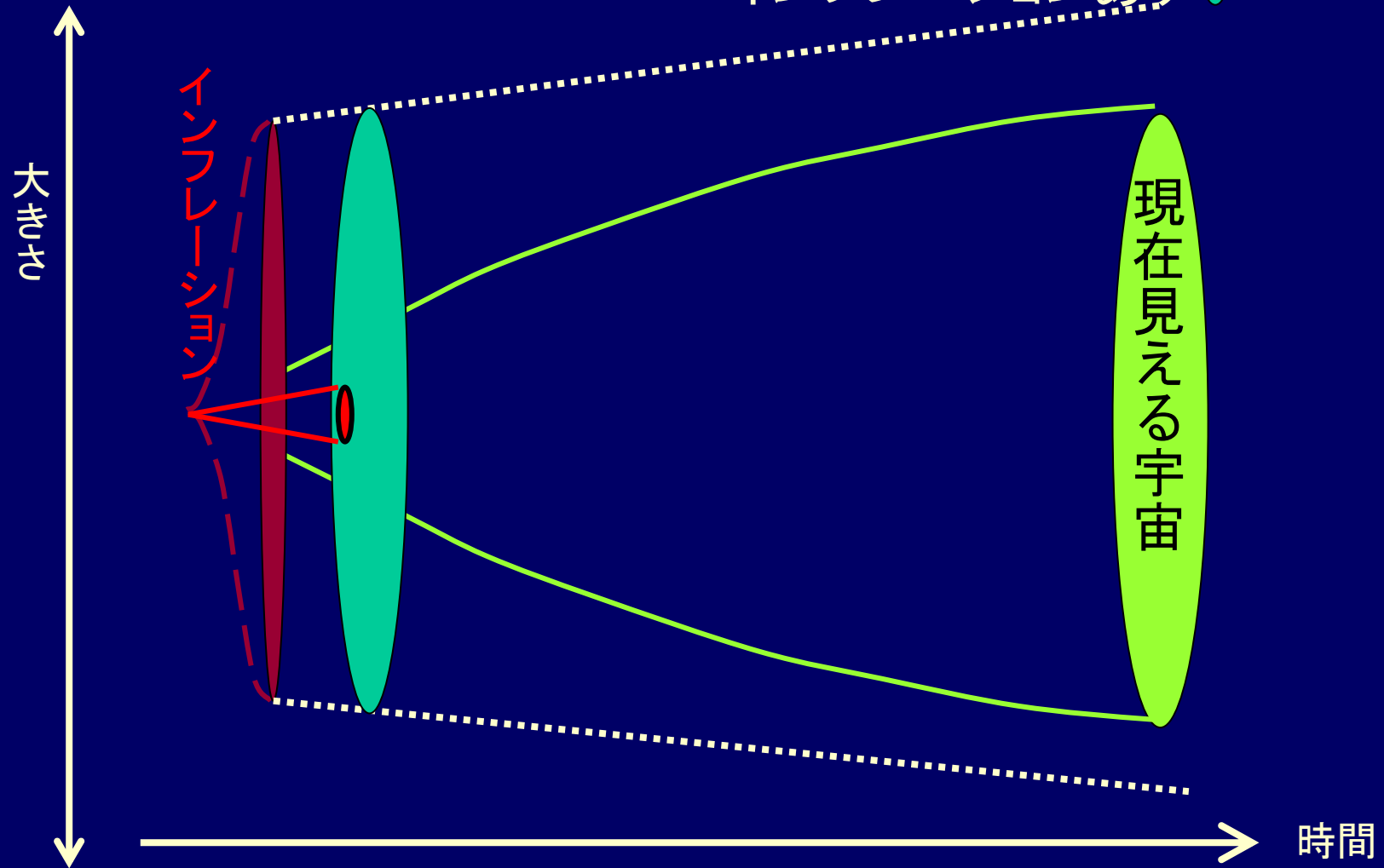
◀ ゆるやかな膨張では後につながらなかった



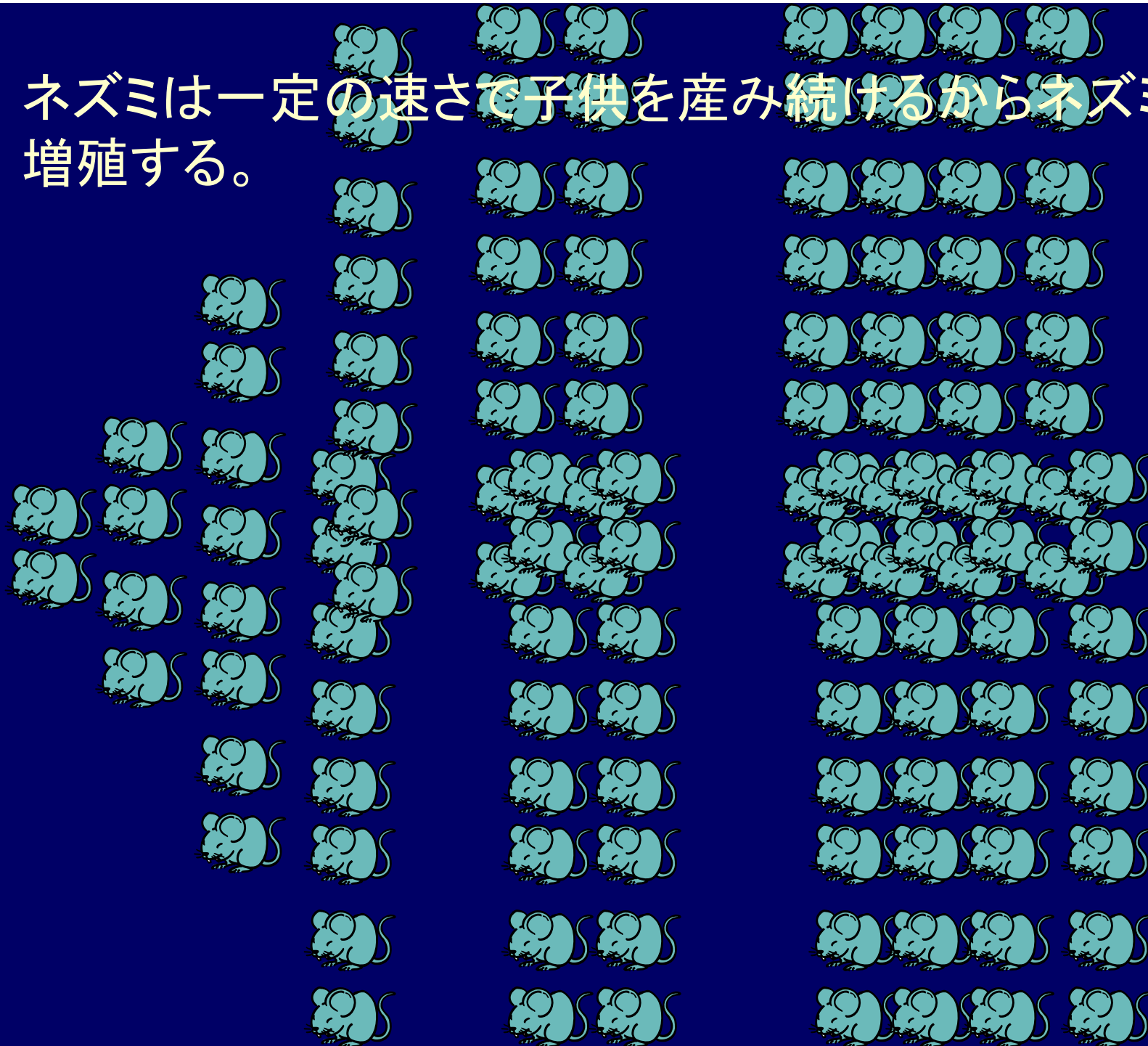


# 地平線問題とインフレーション宇宙論

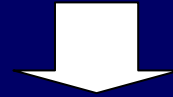
晴れ上がり時の地平線：インフレーションなし ●  
インフレーションあり ●



ネズミは一定の速さで子供を産み続けるからネズミ算式に増殖する。



ゆるやかな膨張: 万有引力を及ぼしあう、普通の物質  
が宇宙膨張を支配している場合



重力(万有引力)によって宇宙膨張  
はだんだん遅くなる。

インフレーション: スピードアップする急激な宇宙膨張



万有引力ではなく、むしろ反発力  
をもった新種のエネルギーが必要！

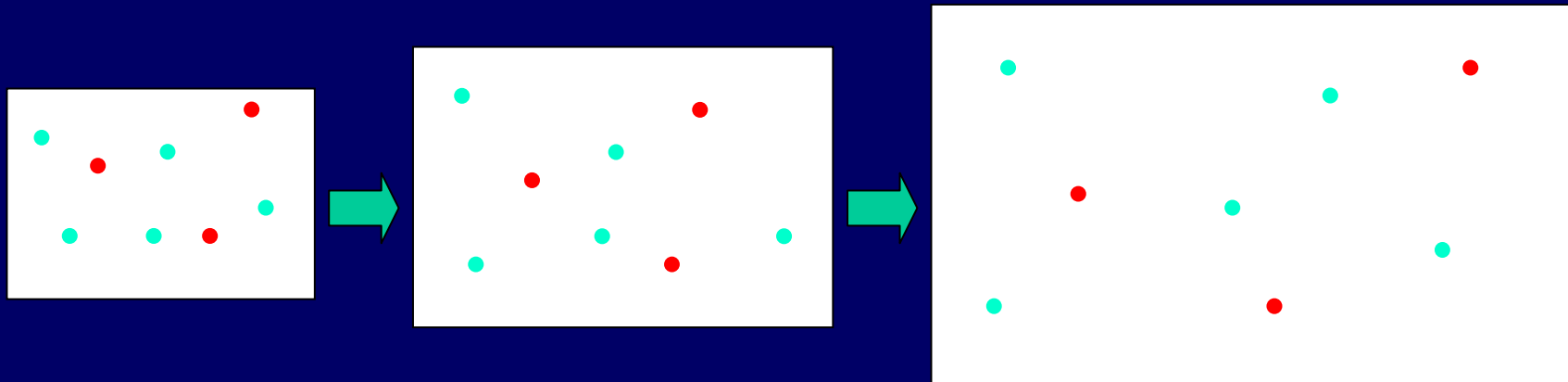
宇宙の位置エネルギー

# 位置エネルギー＝状態が決まるエネルギー

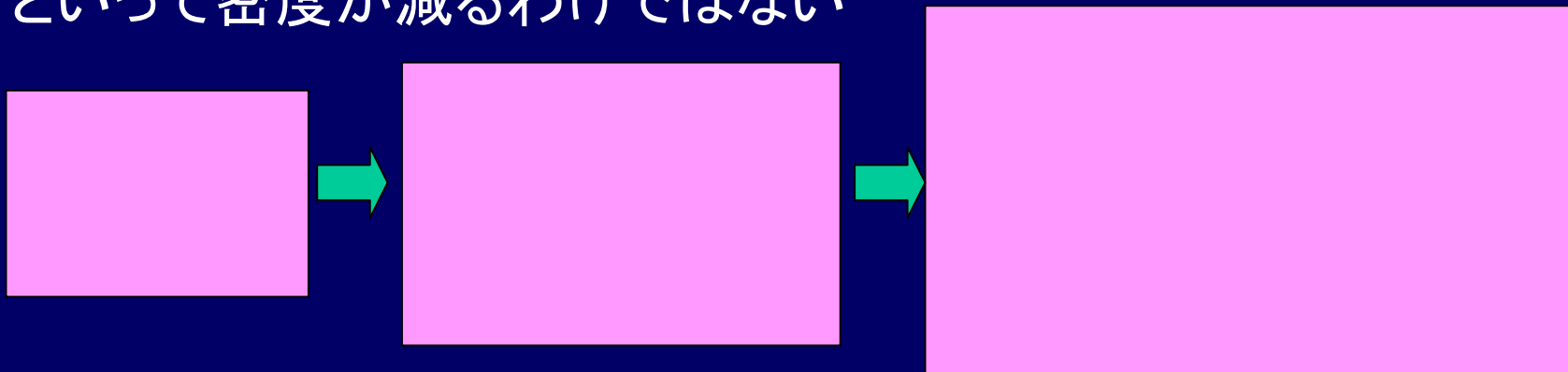


宇宙膨張の速さは $\sqrt{\text{エネルギー密度}}$ に比例する。

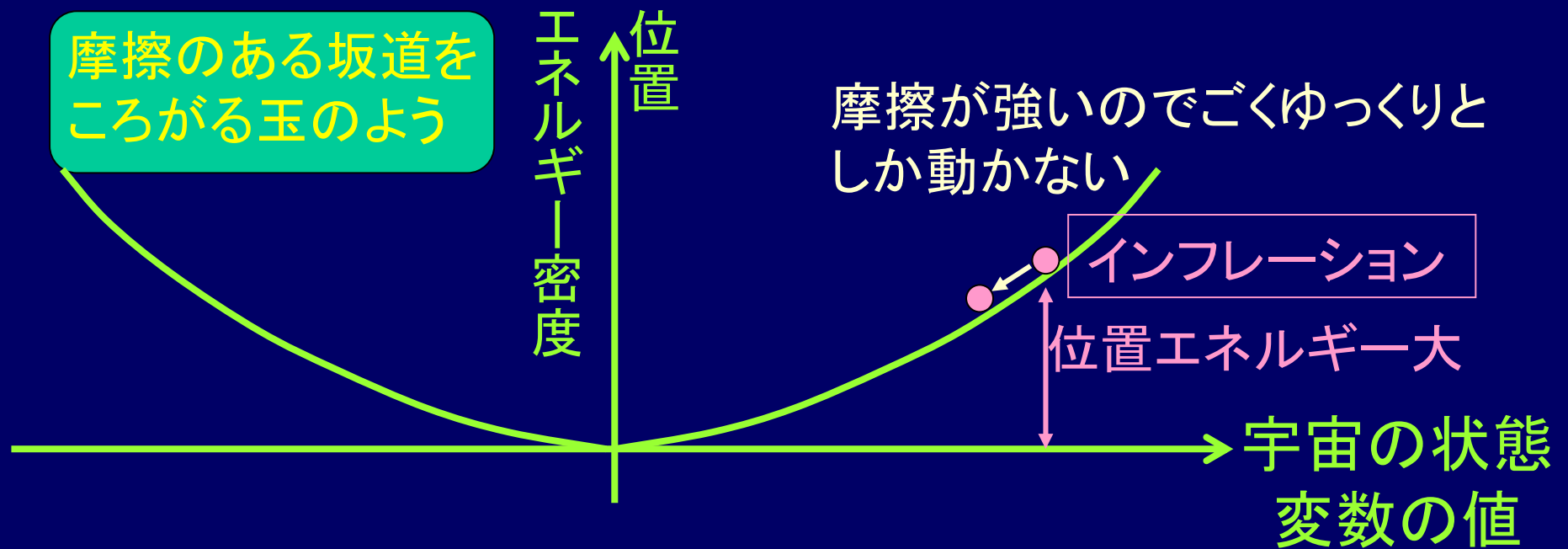
普通の物質のエネルギー密度は宇宙膨張と共に薄まってしまふ



位置エネルギーは状態だけで決まるので、宇宙が膨張したから  
といって密度が減るわけではない

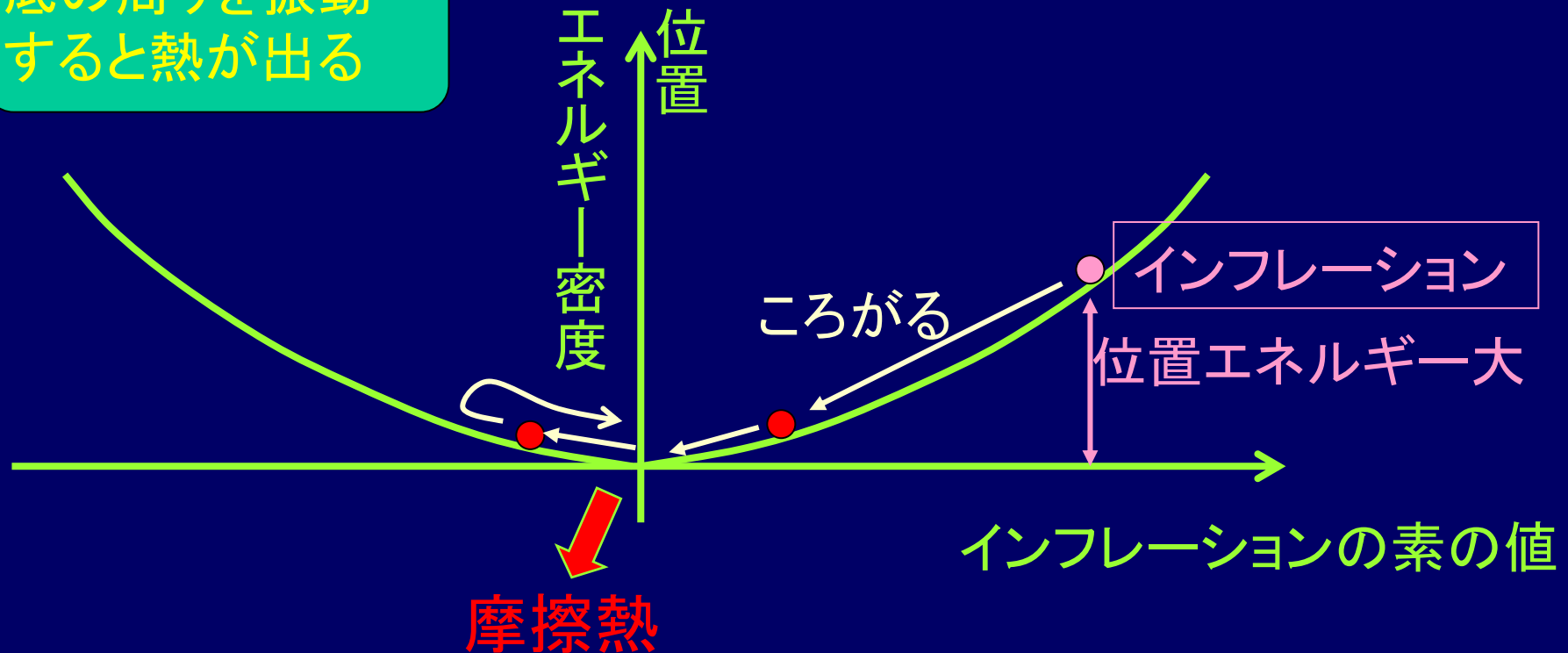


位置エネルギー密度の大きさは、宇宙の状態を表す変数「インフレーション素」の値によって、例えば図のようなモデルで与えられる。宇宙の状態変数の値が大きいと、位置エネルギーも大きい。宇宙の状態が変化しなければ、宇宙が膨張しても位置エネルギー密度は減らない！



位置エネルギーが小さくなってくると、摩擦も弱くなるので、インフレーションの素は速く動けるようになり、底の周りを振動する。振動のエネルギーは摩擦熱によって失われ、宇宙は暖められ、ビッグバン宇宙のはじめのように熱くなる。

底の周りを振動すると熱が出る



このようなインフレーションが起こるのは、宇宙が生まれてから $10^{-43}$ 秒から $10^{-32}$ 秒くらいの頃。

そのころの宇宙の大きさは原子や陽子よりもはるかに小さかった。 **ミクロの世界**

**ミクロな世界には粒子としての性質と波としての性質が共存している**

光の粒子性

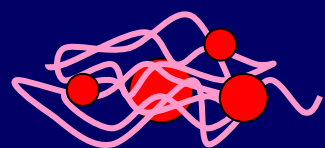
電子の波動性



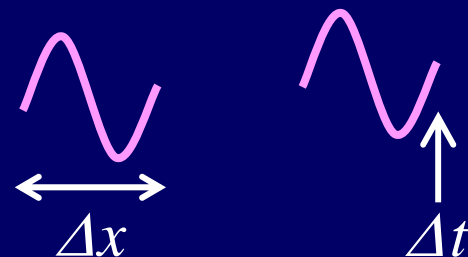
# ミクロの世界を支配する物理法則：量子論

陽子や電子など、ミクロな粒子は位置と速度を同時に正確に指定することはできない。

ハイゼンベルクの不確定性原理



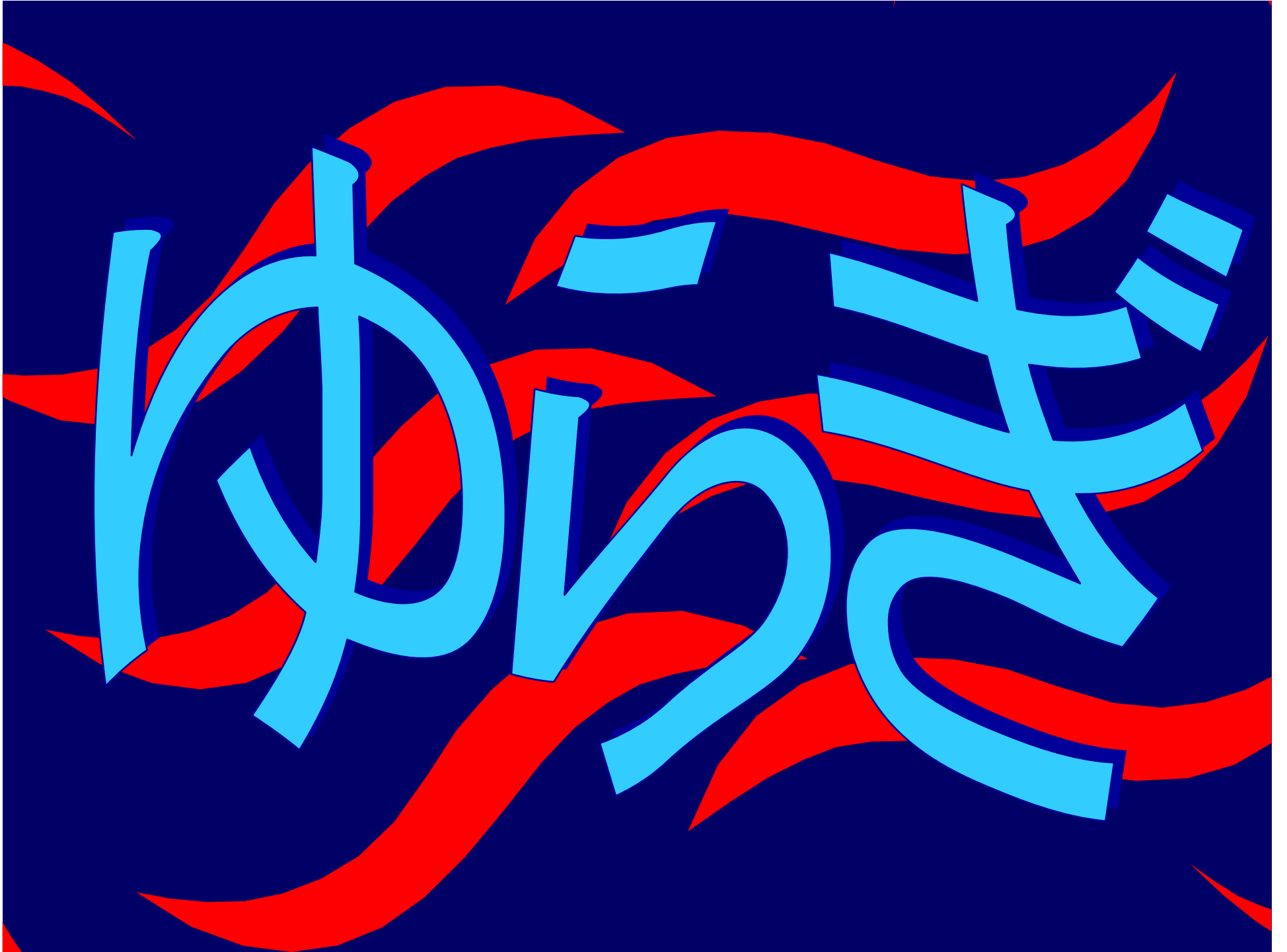
粒子性と波動性

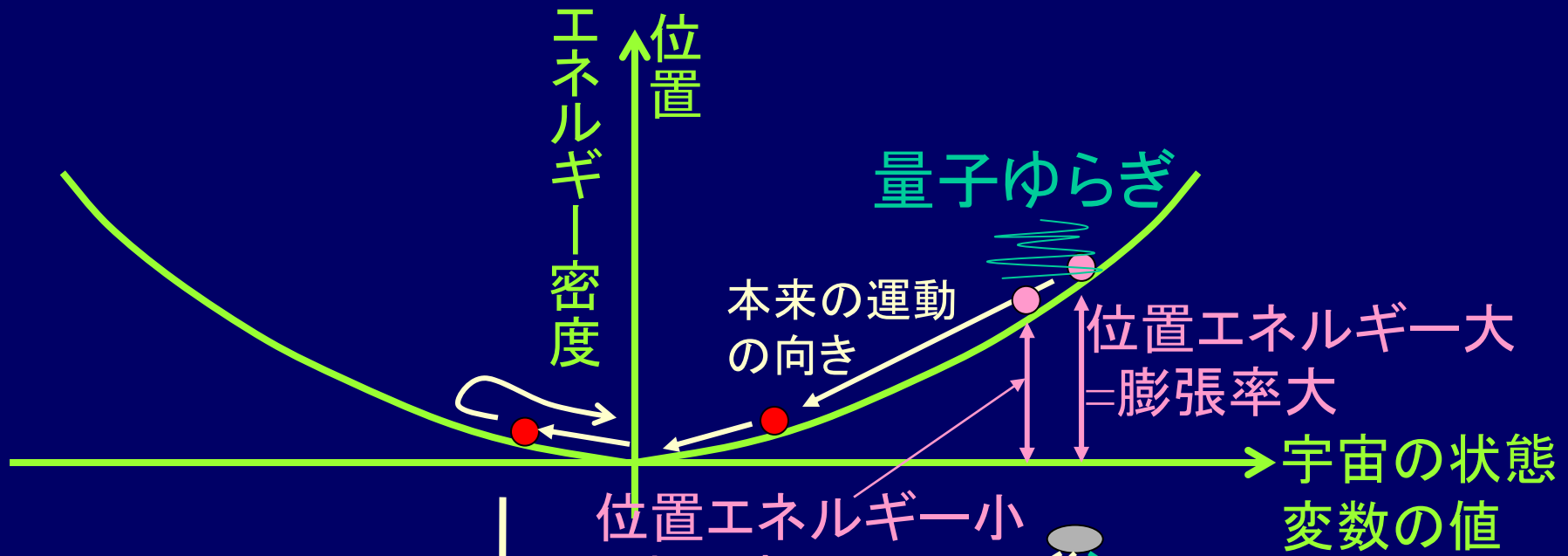


位置も速度もある幅を持ってふらついている。

=ゆらぎ

宇宙の状態も場所ごとに同じようにゆらいでいる。





位置エネルギー小 = 膨張率小

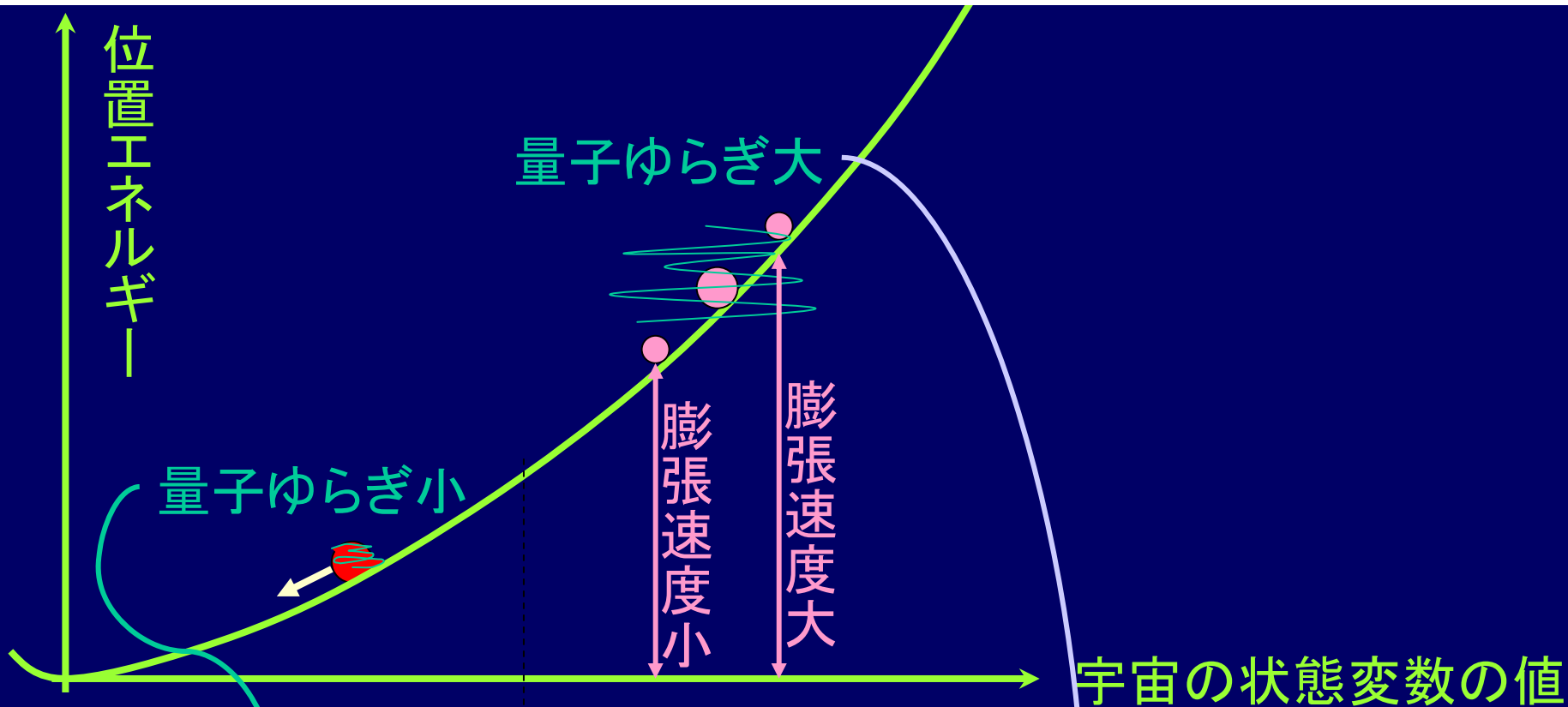
体積大

経過



偶然できた  
われわれの宇宙

ゆらぎの支配する  
世界



ゆらぎが小さくなると  
本来の運動の向きに  
決定論的に進化：  
われわれの宇宙  
この量子ゆらぎが  
銀河のたねになる

ゆらぎの支配する世界

ゆらぎの支配する世界では一定した  
方向に動くものはない。

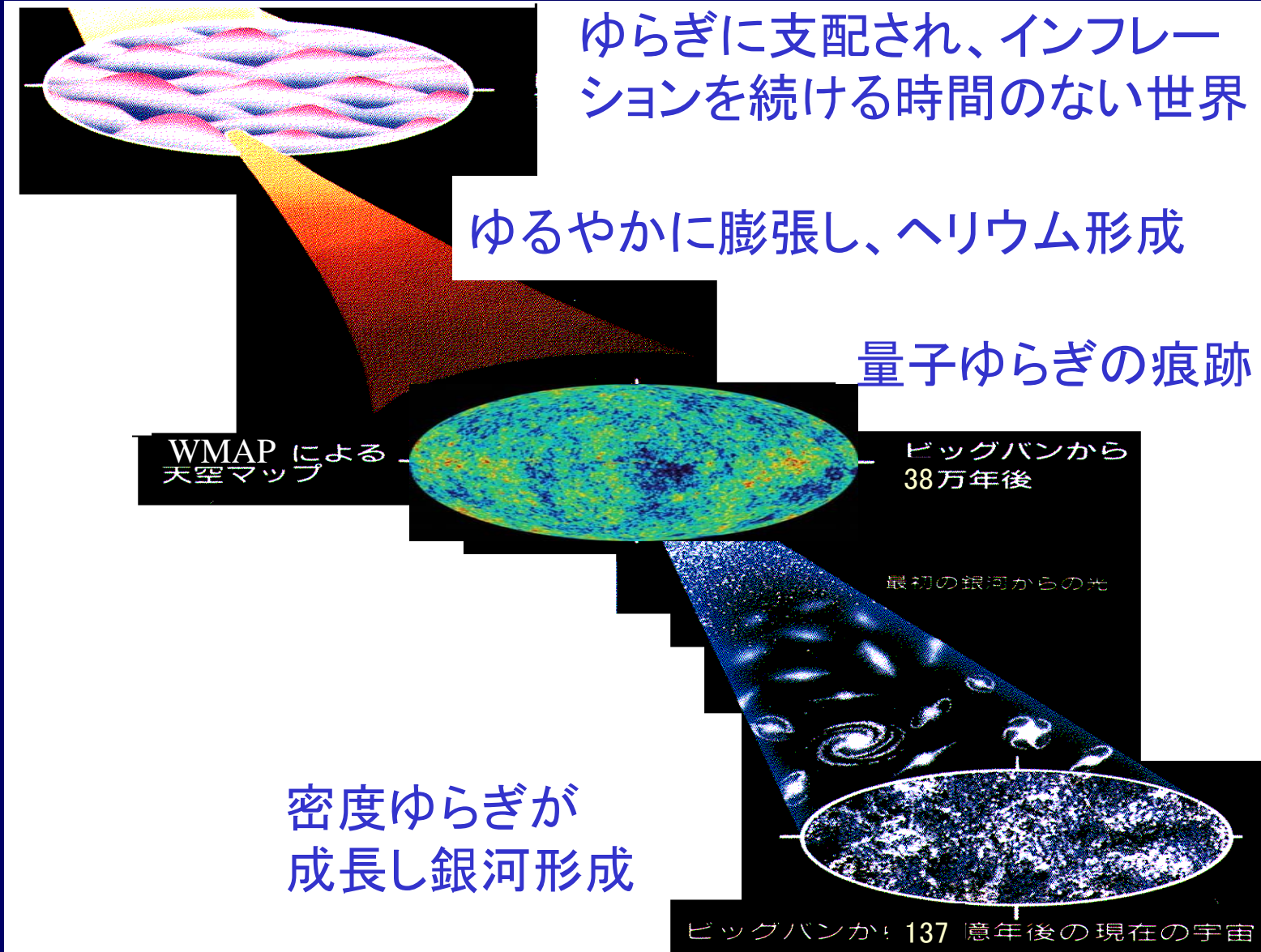


時間を計る時計もない！

# 宇宙のはじまり

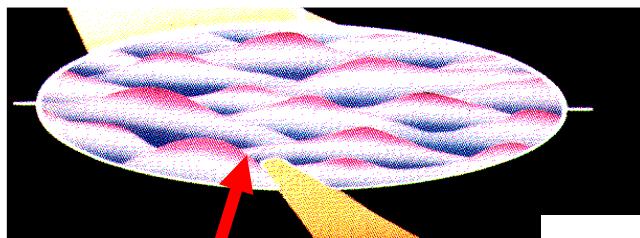
宇宙は時間の流れの中につくられた  
のではなく、**時間とともに**つくられた。

# 宇宙進化の歴史

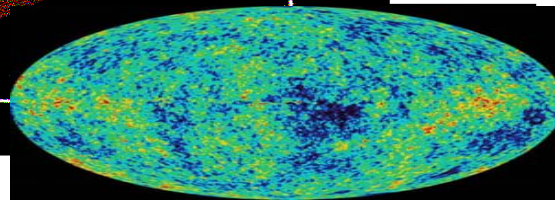


# 宇宙の果て

ゆらぎに支配され、インフレーションを続ける時間のない世界



WMAP による  
天空マップ



ビッグバンから  
38万年後

最初の銀河からの光



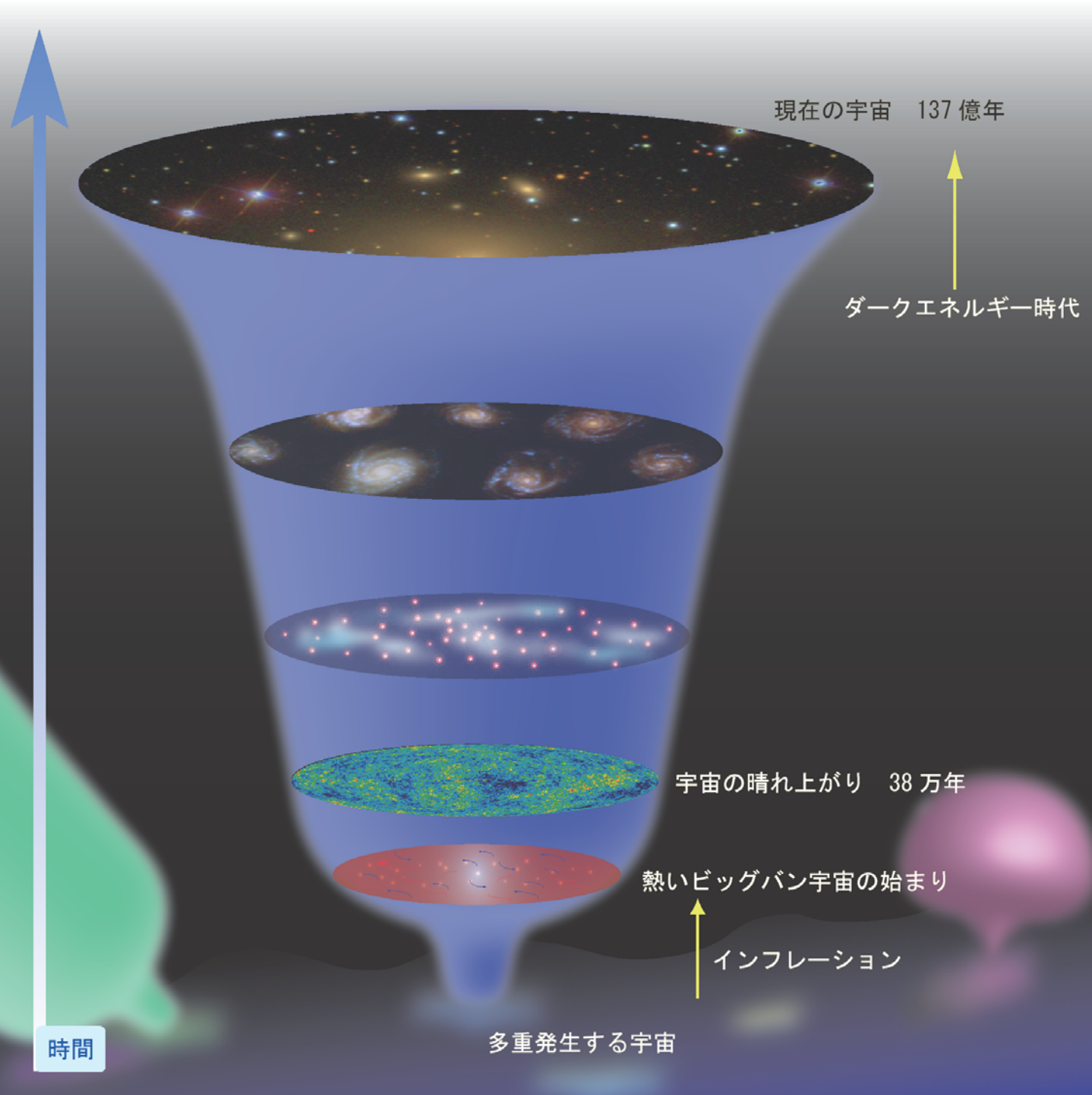
われわれの宇宙の外には  
インフレーションを永遠に  
続ける領域がある。

ビッグバンから 137 億年後の現在の宇宙

宇宙はゆらぎから生まれた

宇宙の外にはゆらぎの  
世界がある







上州  
剛毅  
唯以  
至誠  
神期  
勝利  
直接  
萬人  
誠易  
被欺  
亦無  
大

鑑三