

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

はじめも終わりもインフレーション

東京大学大学院理学系研究科附属
● ビッグバン宇宙国際研究センター

横山 順一

THE UNIVERSITY OF TOKYO

RESCEU



月ロケット
アポロ計画
1969年7月20日

ムーミンキャラクター

高さ14000kmから写した地球



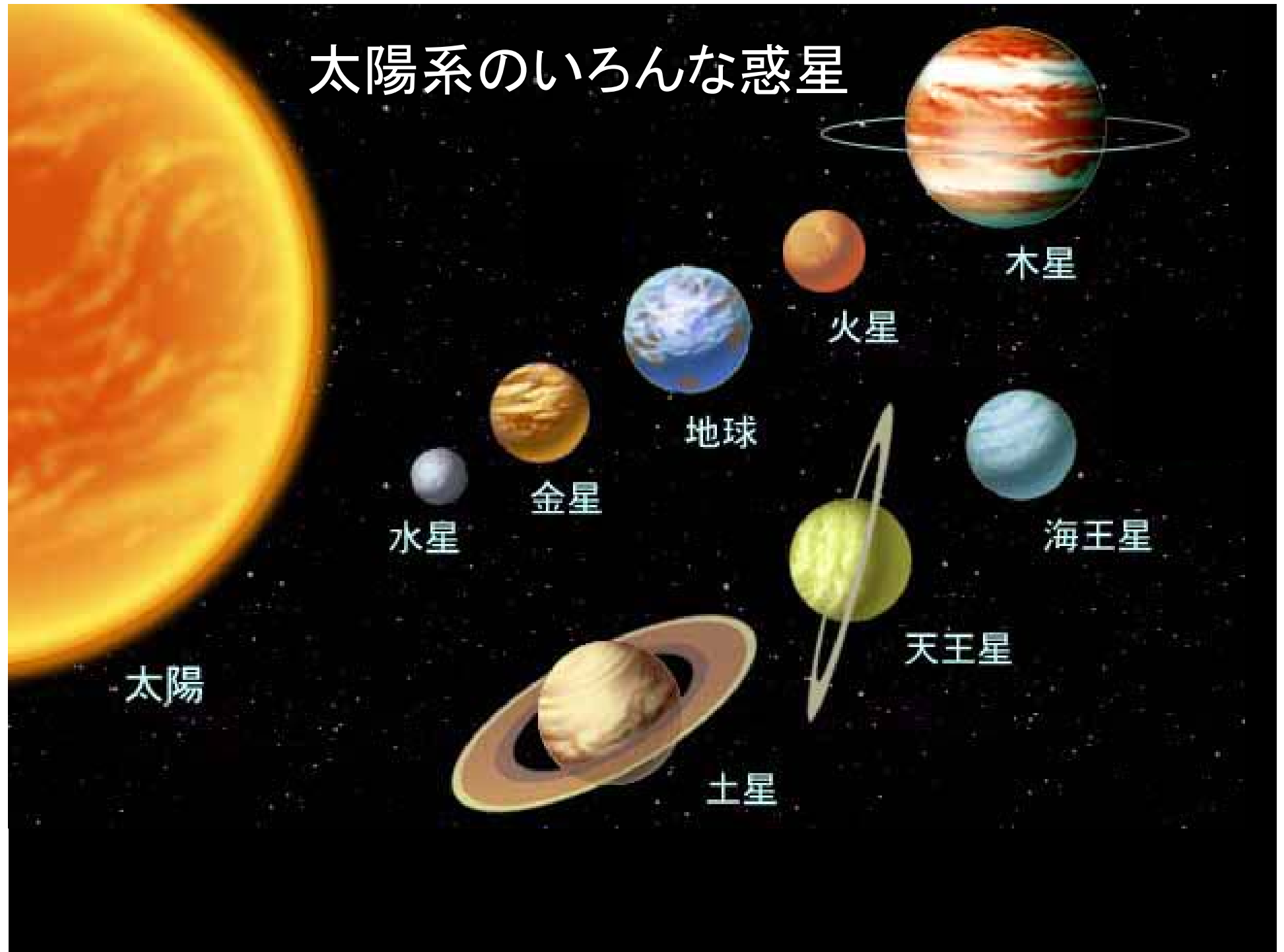
14000km


A yellow double-headed arrow indicates a distance of 14000km between the Earth and a satellite. The satellite is shown as a small object in the upper right corner of the main image.



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





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

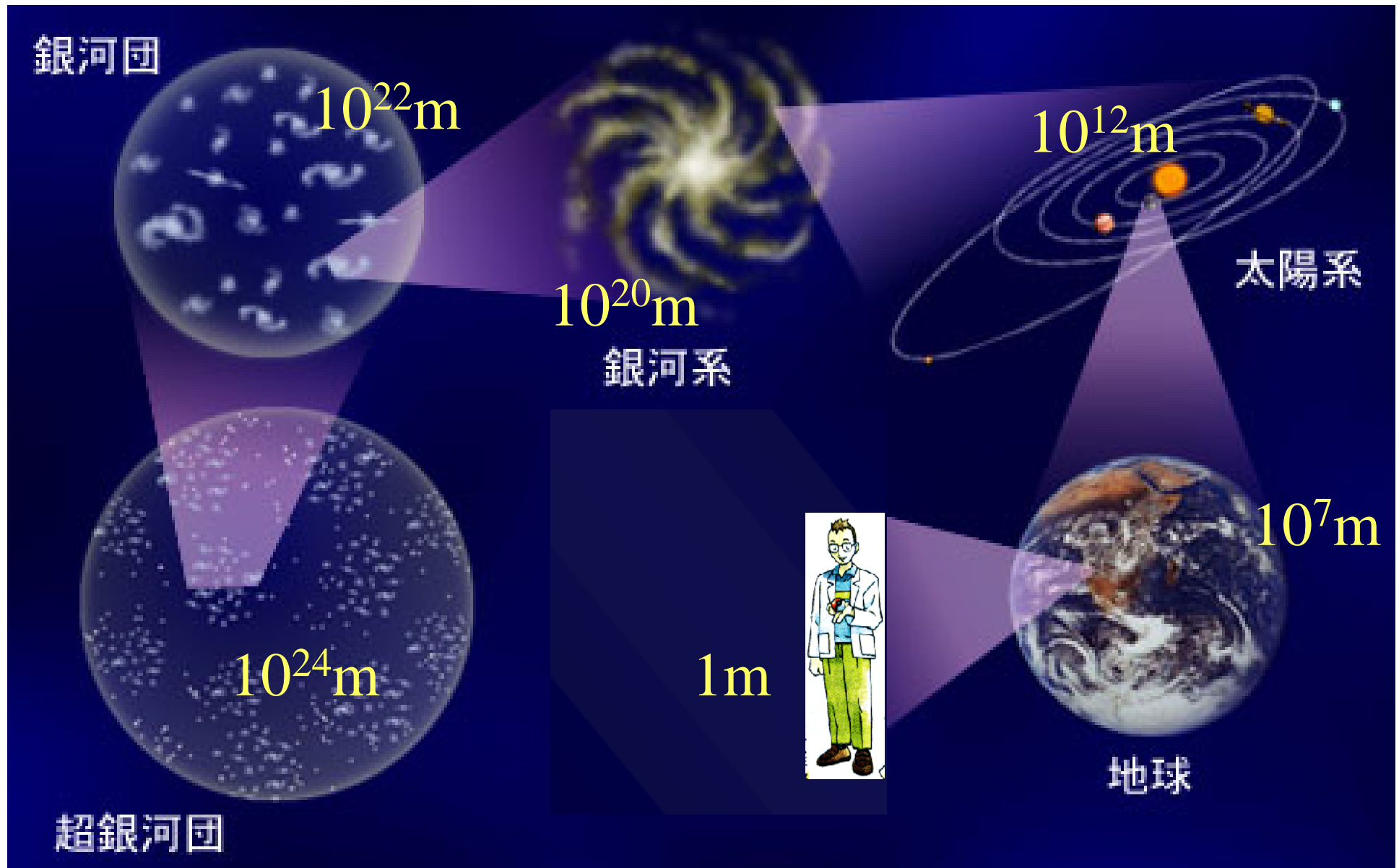


銀河(ぎんが)

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

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



基礎物理法則から 宇宙をさぐる

宇宙論

入れ物と力

なかみ



基礎物理法則から 宇宙をさぐる

宇宙論

ニュートンの
万有引力の
法則を拡張した
アインシュタイン
の理論

一般
相対性
理論

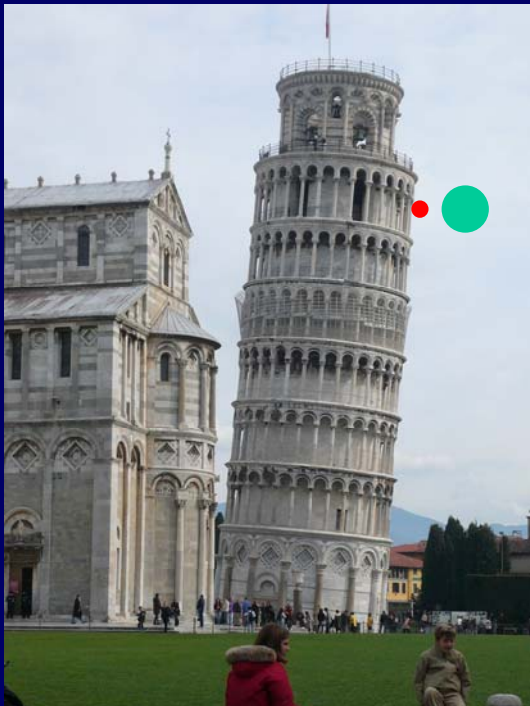
場の
量子論

素粒子の
理論

万有引力=重力

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。



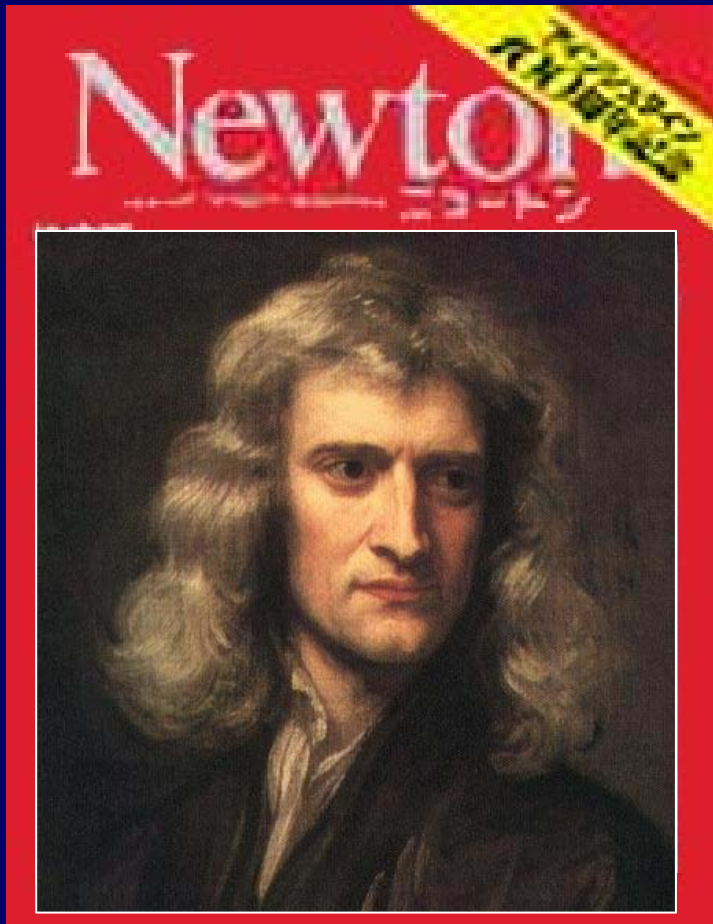
ヨハネス・ケプラーとチコ・ブラーエ：惑星の運行を観測



観測を行ったベルベデール宮殿



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)

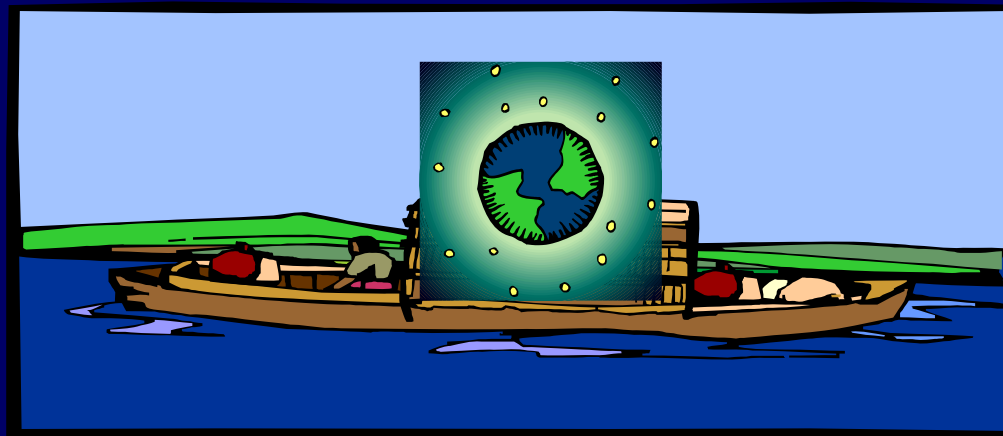
時間：過去から未来へ向かって

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

永劫不変な定常宇宙



★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!



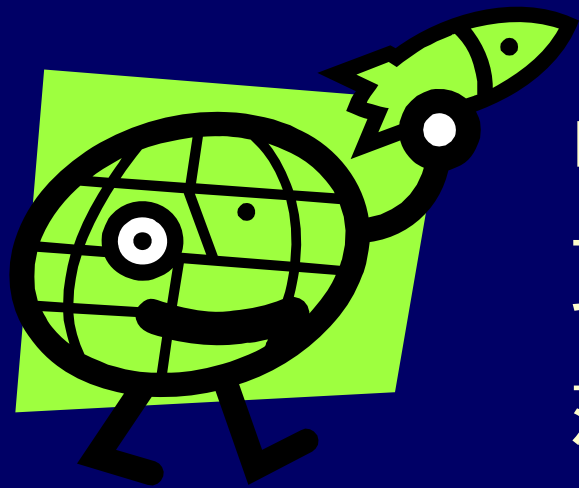
空間自体に一様な反発力(「宇宙項」)を持たせ、万有引力と釣り合わせて定常宇宙にした。
真空の性質を変えてしまったということ。



★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。

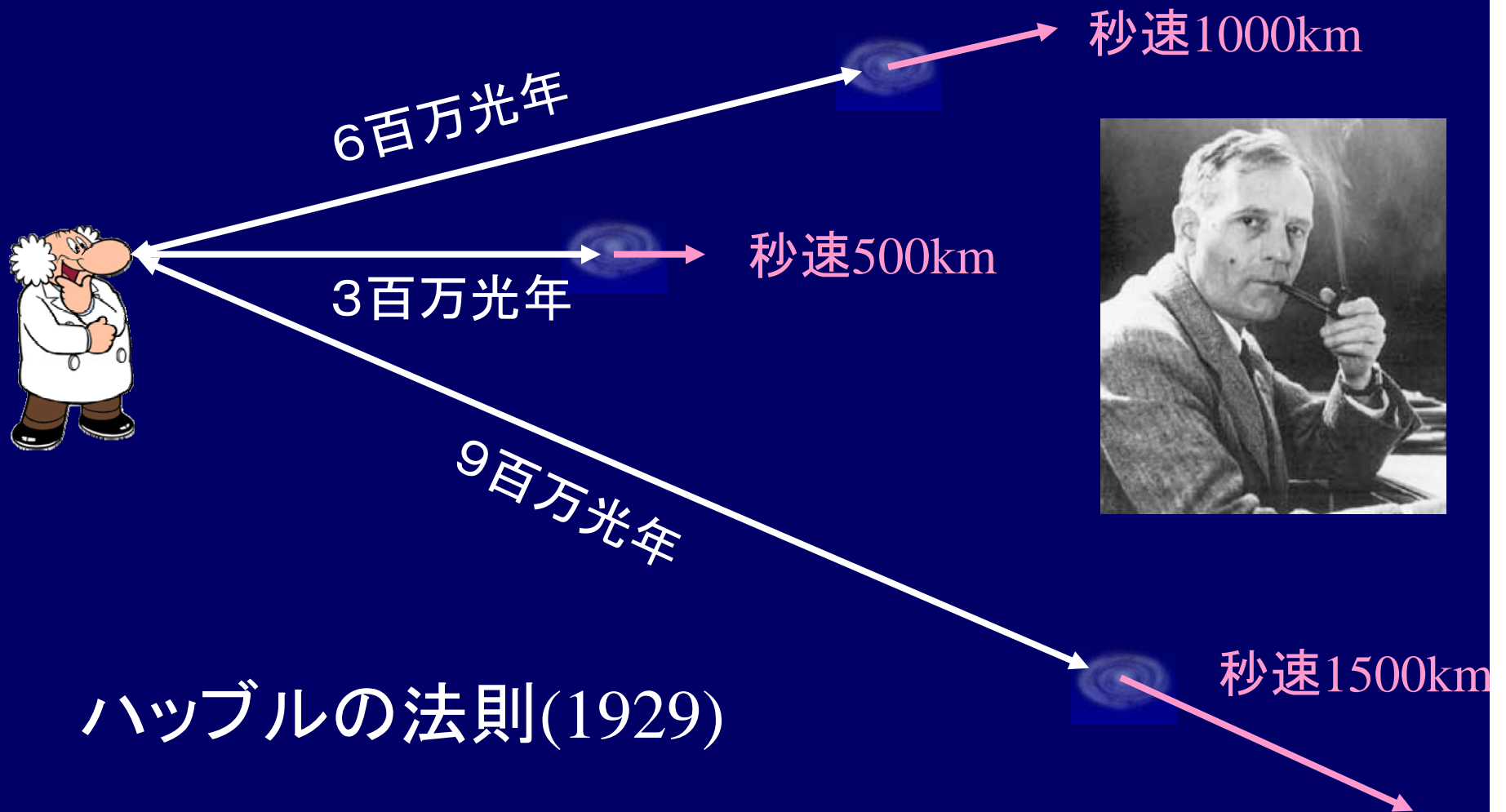
大きな初速度を与えれば、万有引力によって減速しながらも、膨張することが可能。



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。

★ 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！



★ ハッブルの法則の発見(1929)

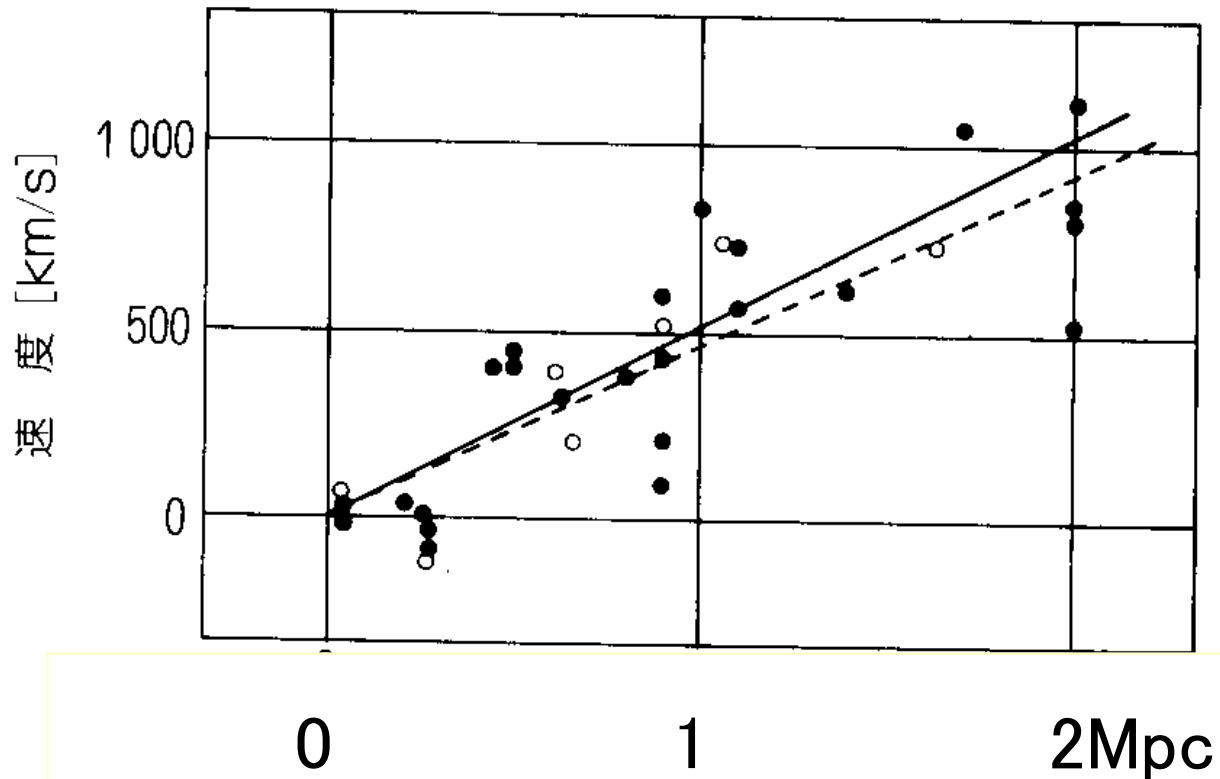
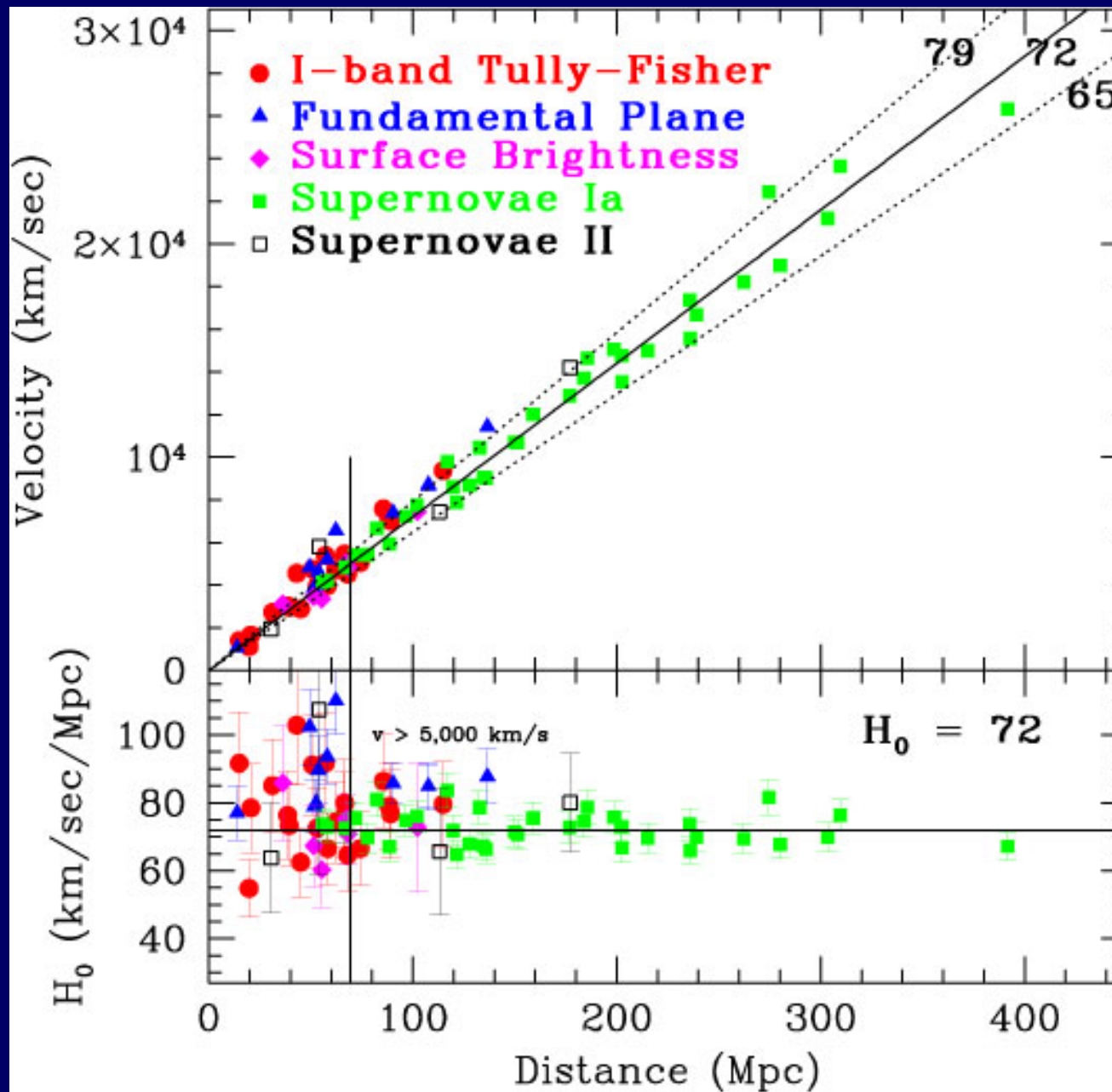


図 1.4 ハッブルの観測データと彼が引いた直線

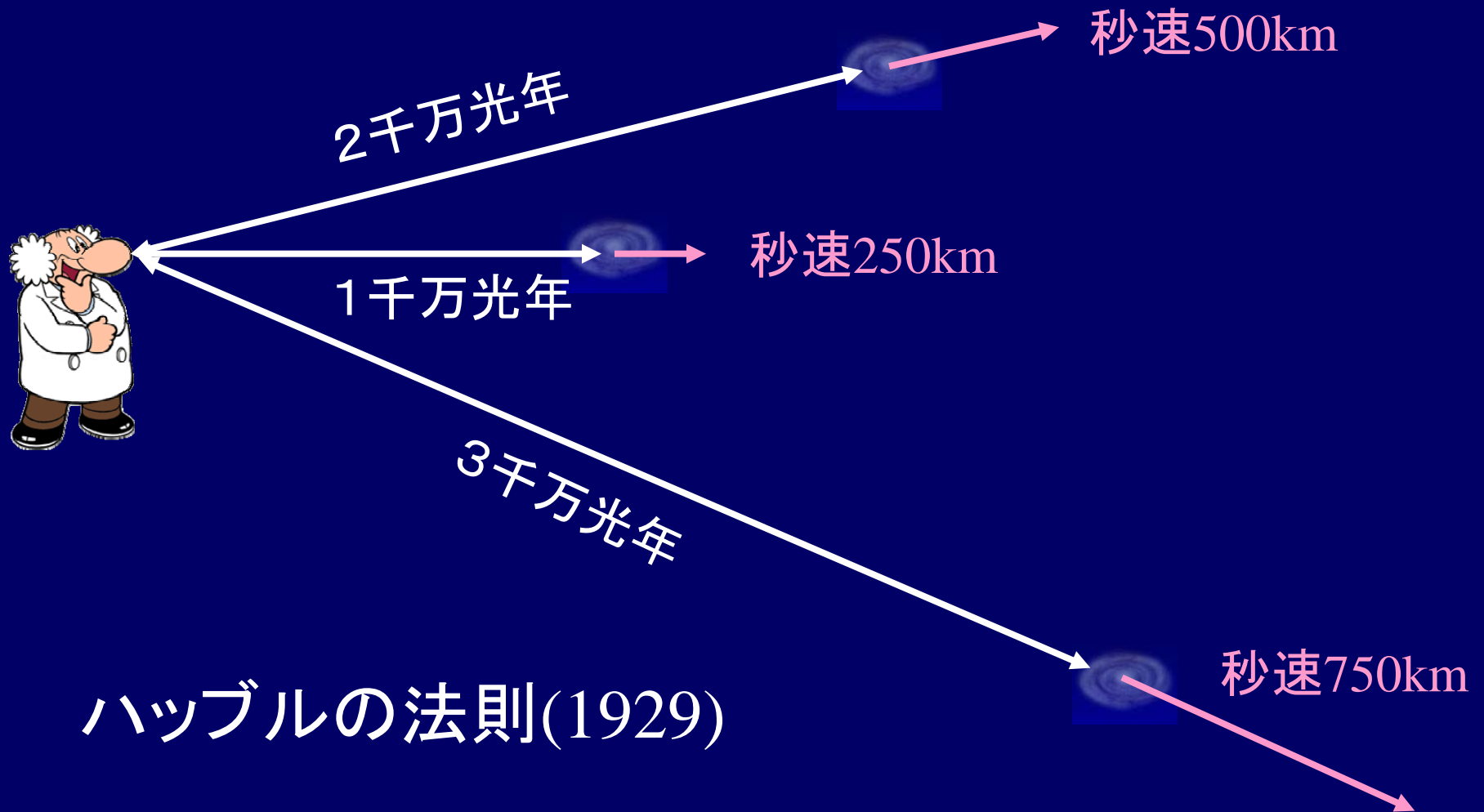
$$1\text{Mpc}=3\text{百万光年}=3\times 10^{22}\text{m}$$

現在の観測データ ハッブルの速度は7倍も大き過ぎた



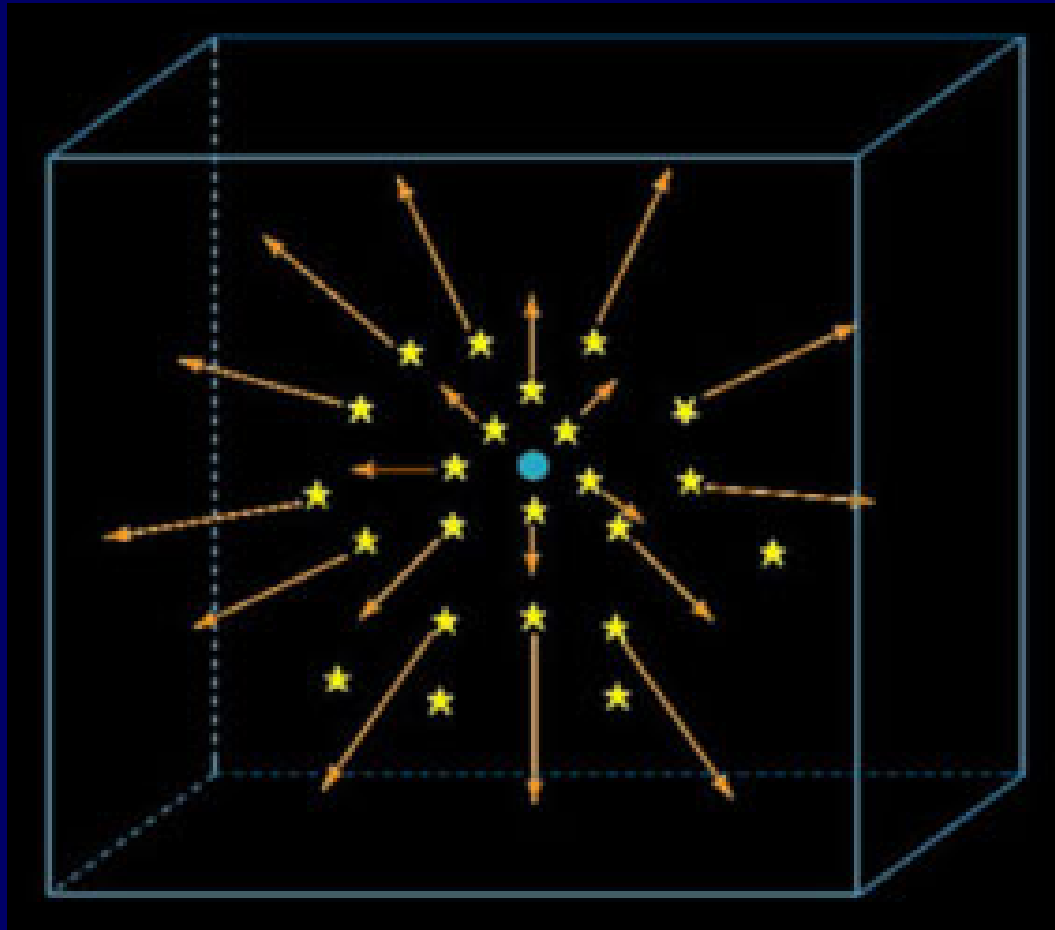
★ ハッブルの法則の発見(1929)

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！



解釈1)

すべての銀河はかつてわれわれの位置にあり、さまざまな初速度を持ってわれわれから遠ざかり始めた。



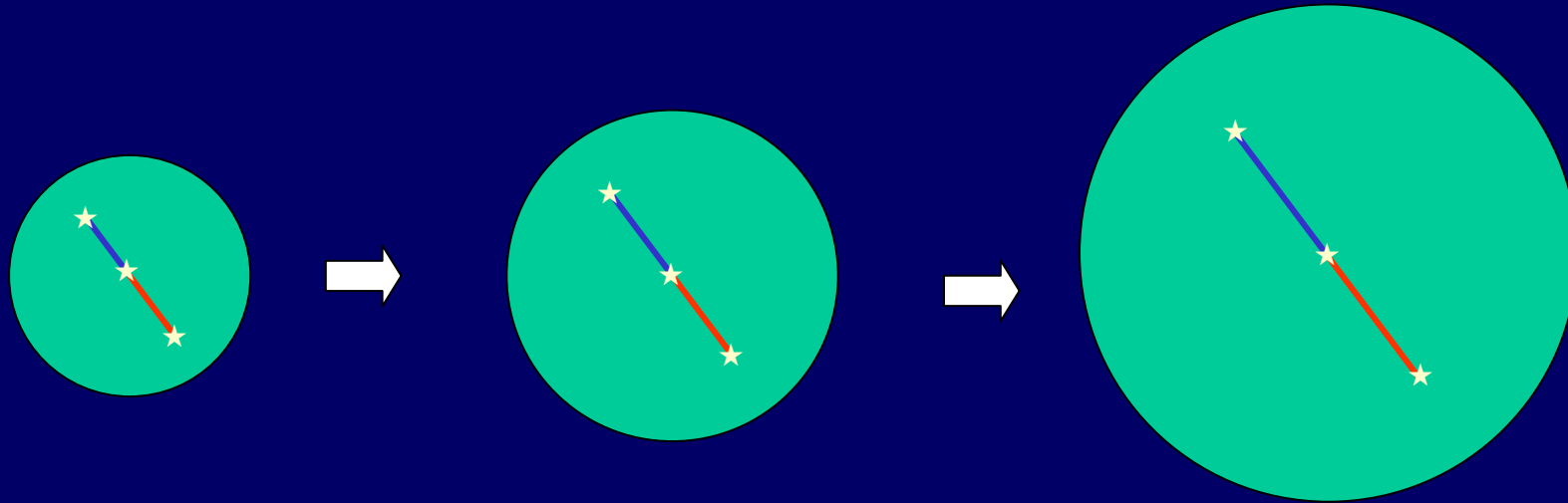
「足の速い人ほど
同じ時間に遠くまで
走れる。」

地球(私達の銀河)
中心説に逆戻りで、
よくない。

解釈2)

フリードマンの膨張宇宙が検証された！

宇宙のどの点からみてもハッブルの法則が成り立つ。



もともと2倍離れていたところにあった銀河は
2倍の早さで遠ざかる。



遠方の銀河は距離に比例した速度で遠ざかる。

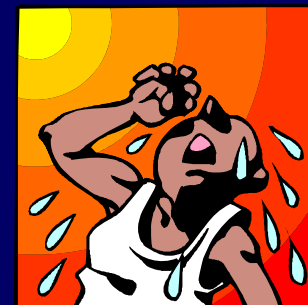
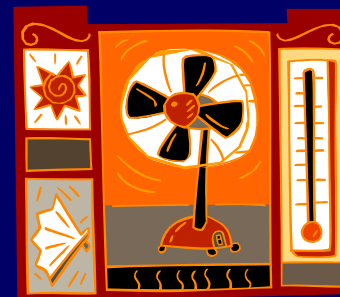
★膨張宇宙の意義

宇宙が膨張すると物質密度は下がる。

逆に、小さかった昔の宇宙は、物質密度、エネルギー密度が高く、温度も高かった。

昔の宇宙は熱かった。そして膨張しながら冷却し、現在の宇宙になった。

ガモフのビッグバン宇宙



光(電磁波)は温度に応じた波長を持つ。



宇宙初期の高温時に存在した短波長の光は、宇宙膨張で引き延ばされ、現在は長波長になっているはずである。

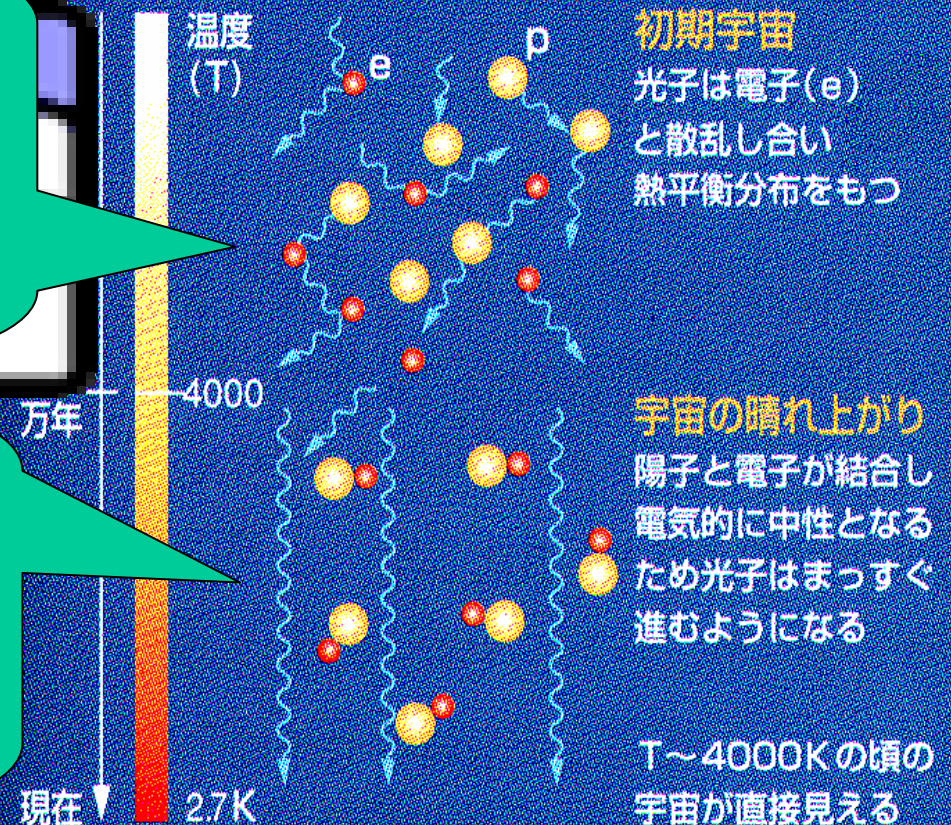
★宇宙マイクロ波背景放射の発見

1965年にアメリカ、ベル研究所のペンジラス、ウィルソンによって、熱い初期宇宙の名ごりの、宇宙を一様に満たすマイクロ波放射（宇宙背景放射）が発見され、昔の宇宙が熱かったこと、ビッグバン宇宙論が正しいこと、が証明された。

宇宙初期の高温時代は、
宇宙はイオン化し、光は
まっすぐに飛べない。
＝雲の中と同じ。

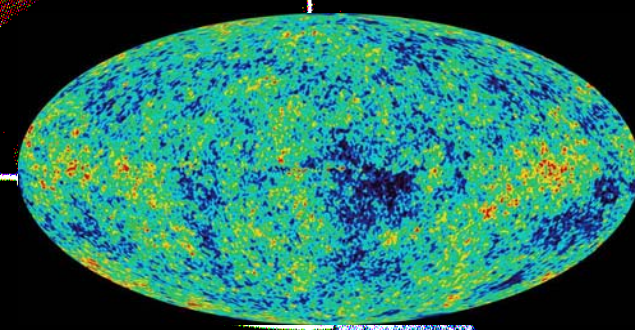
宇宙が膨張して冷えてくると
荷電粒子がなくなるので、
光はまっすぐ進める。
＝雲が晴れ上がった。

宇宙の進化の状態



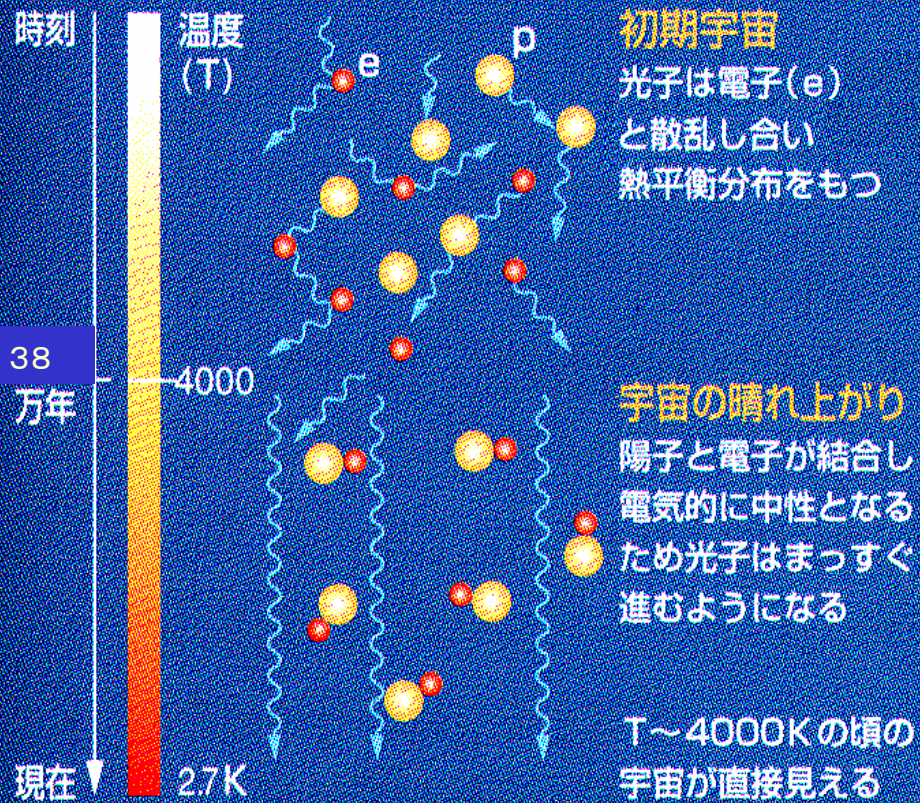
膨張宇宙を過去にさかのぼる

WMAPによる
天空マップ



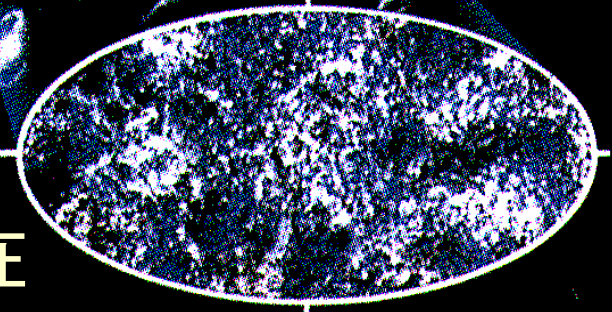
ビッグバンから
38万年後

宇宙の進化の状態



最初の銀河からの光

現在



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

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メガパーセク(三百万光年= 3×10^{22} m)離れた銀河は、秒速70kmで遠ざかっている。

$$\frac{1 \text{メガパーセク}}{70 \text{km/s}} = 140 \text{億年}$$

宇宙の年齢は140億年くらい。
われわれに見える宇宙の大きさは140億光年くらい。
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。



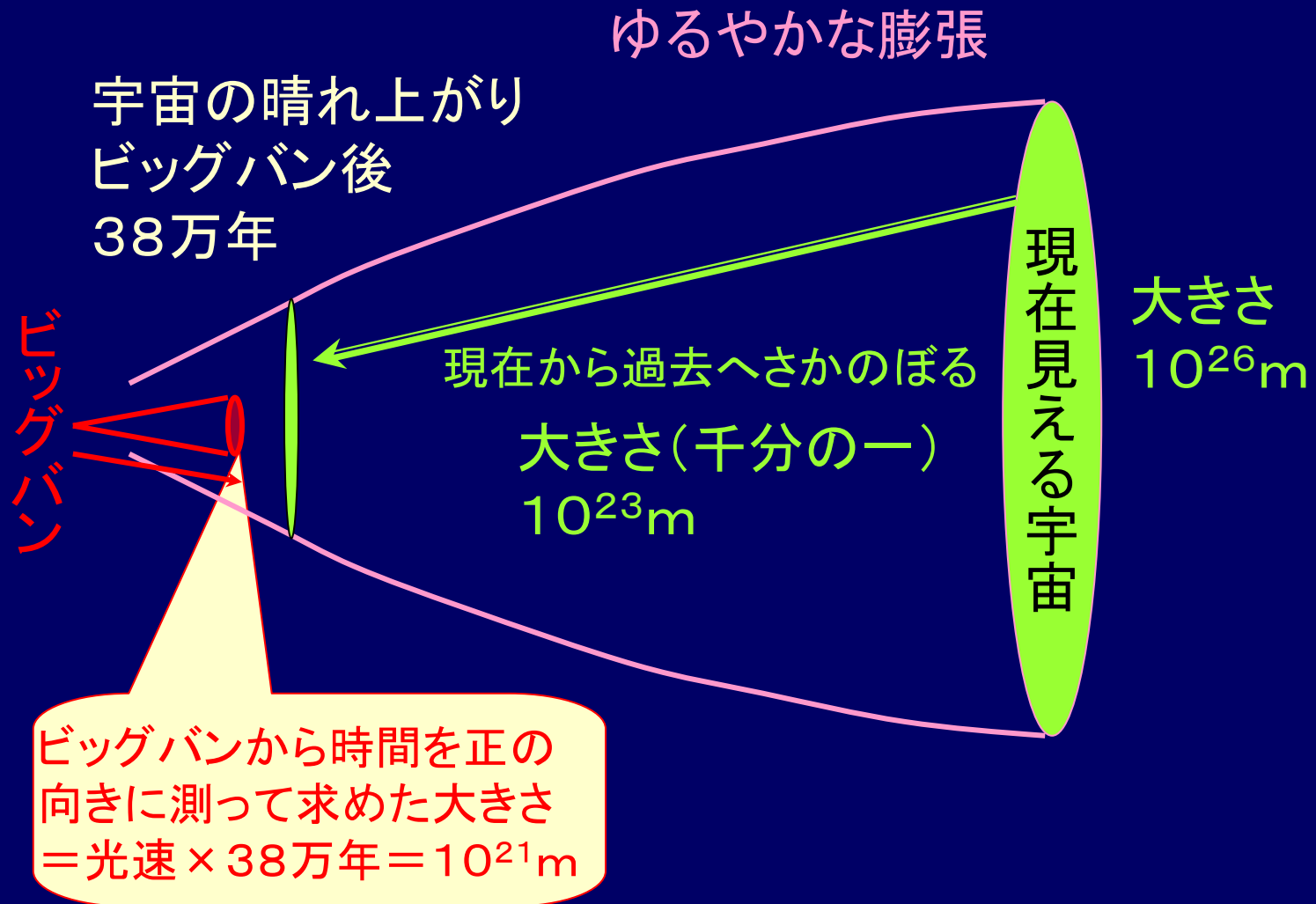
地平線の向こうにも、見えない世界がある



地平線の向こうにも、宇宙は広がっている



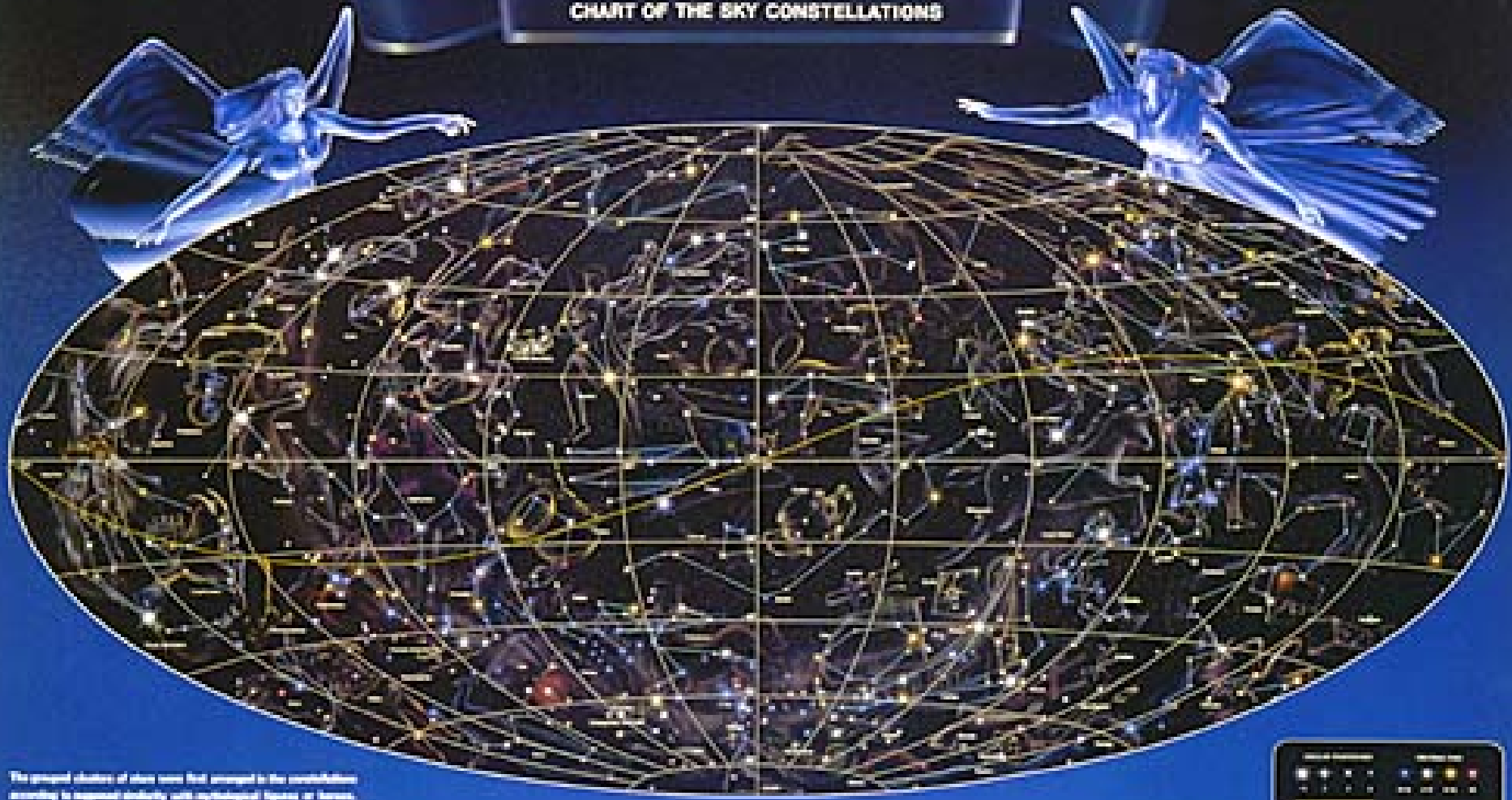
ところが、、、



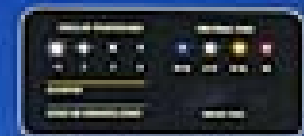
この二つは一致しない

夜空の全天マップ

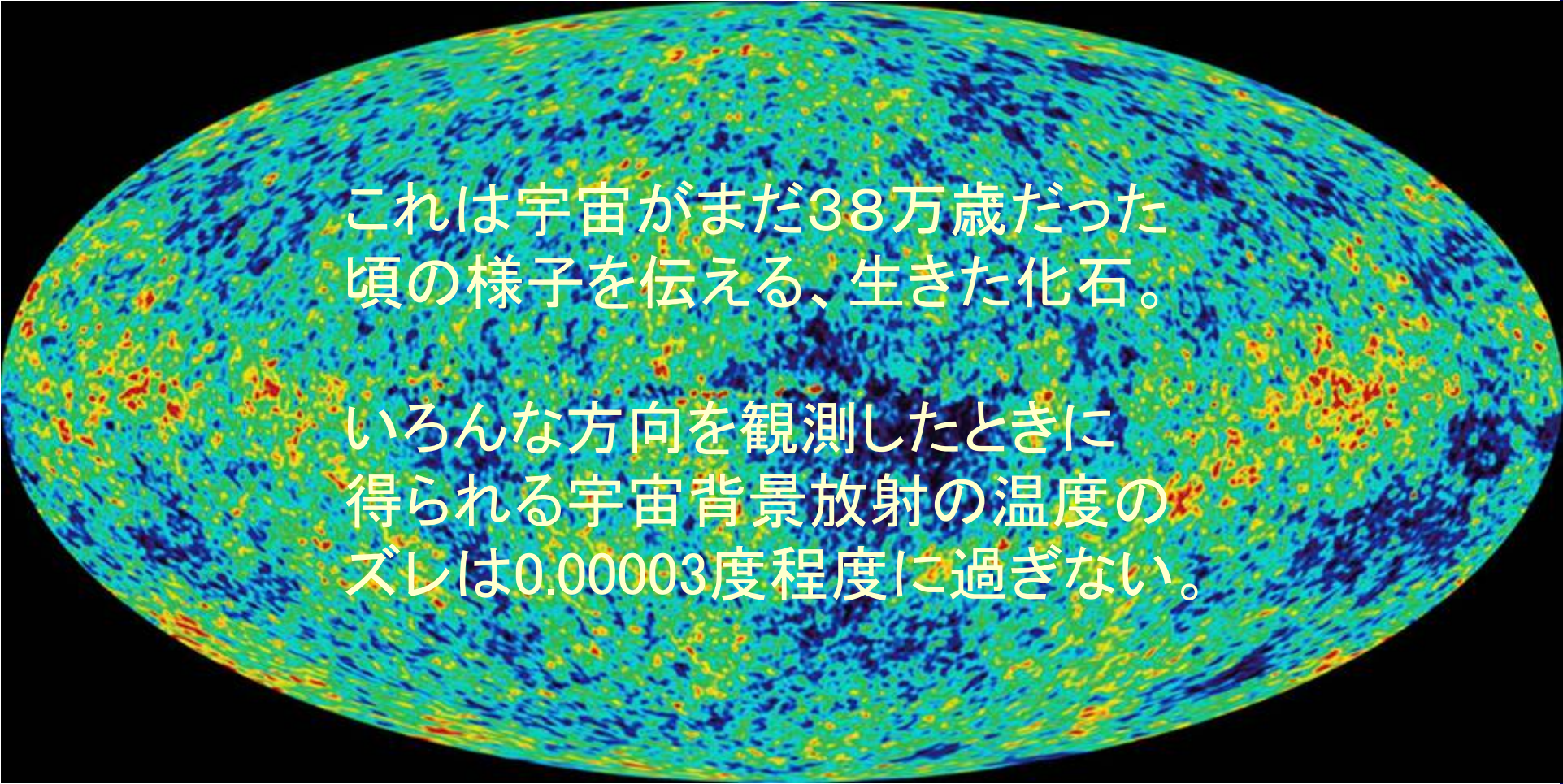
Fantastic Starry Night
CHART OF THE SKY CONSTELLATIONS



The general clusters of stars were first assigned to the constellations according to legend and history with mythological figures or scenes. More than 100 years ago, Flaming drew up a list of 48 constellations which formed the basis for astronomical studies. Here 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[®]



これは宇宙がまだ38万歳だった頃の様子を伝える、生きた化石。

いろん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桁の精度で大域的に一様・等方

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。)

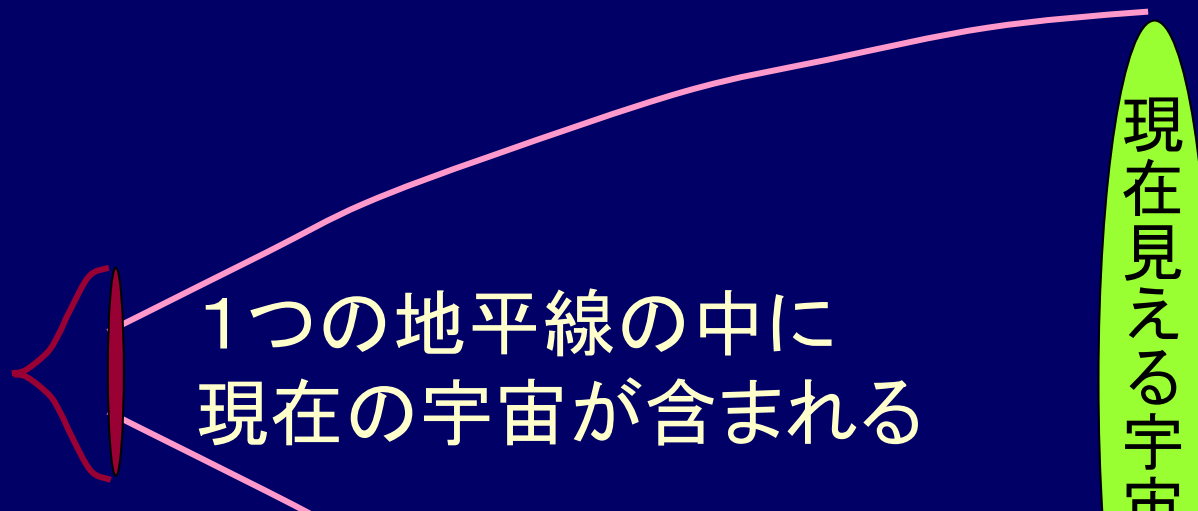
$$T = 2.728 \text{ K}$$

宇宙のインフレーション

佐藤勝彦(1981)
アラン・グース(1981)

はじめに宇宙を急激に膨張させればよい

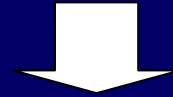
ゆるやかな膨張では多数の地平線領域を集めないと現在の宇宙にならない



急激な膨張(インフレーション)
をさせておけばヘリウム形成までに
宇宙は十分大きく一様になっている

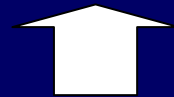
現在見える宇宙

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：膨張速度がだんだん早くなる、
加速的膨張



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！

インフレーションが起こるとそれまでであった凸凹は引き延ばされ、宇宙は平らになる。

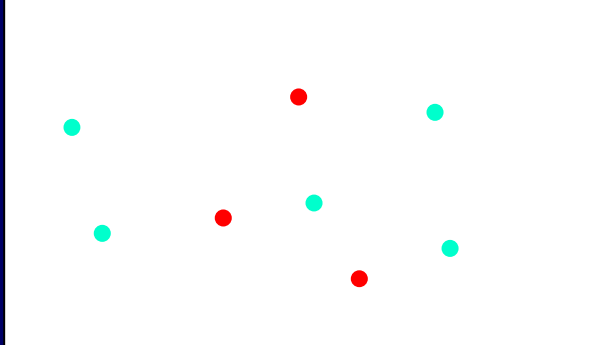
宇宙膨張率は $\sqrt{\text{エネルギー密度}}$ に比例するので、インフレーションがおこるためには、宇宙が膨張してもエネルギー密度が減らないような、**新種のエネルギー**が必要だということ。

真空のエネルギー

アインシュタインの考えた
「宇宙項」と同じ性質を持つ

真空？

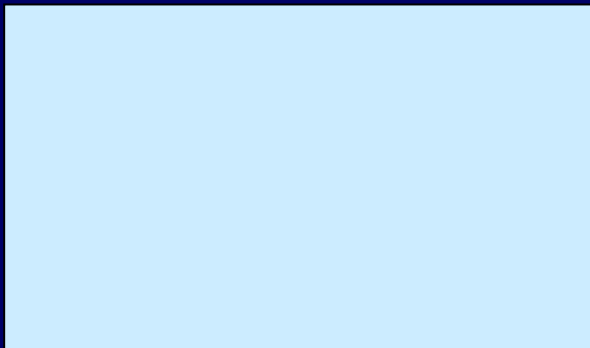
何もない状態？どこにも物質がない状態。



物質がある。
真空でない状態

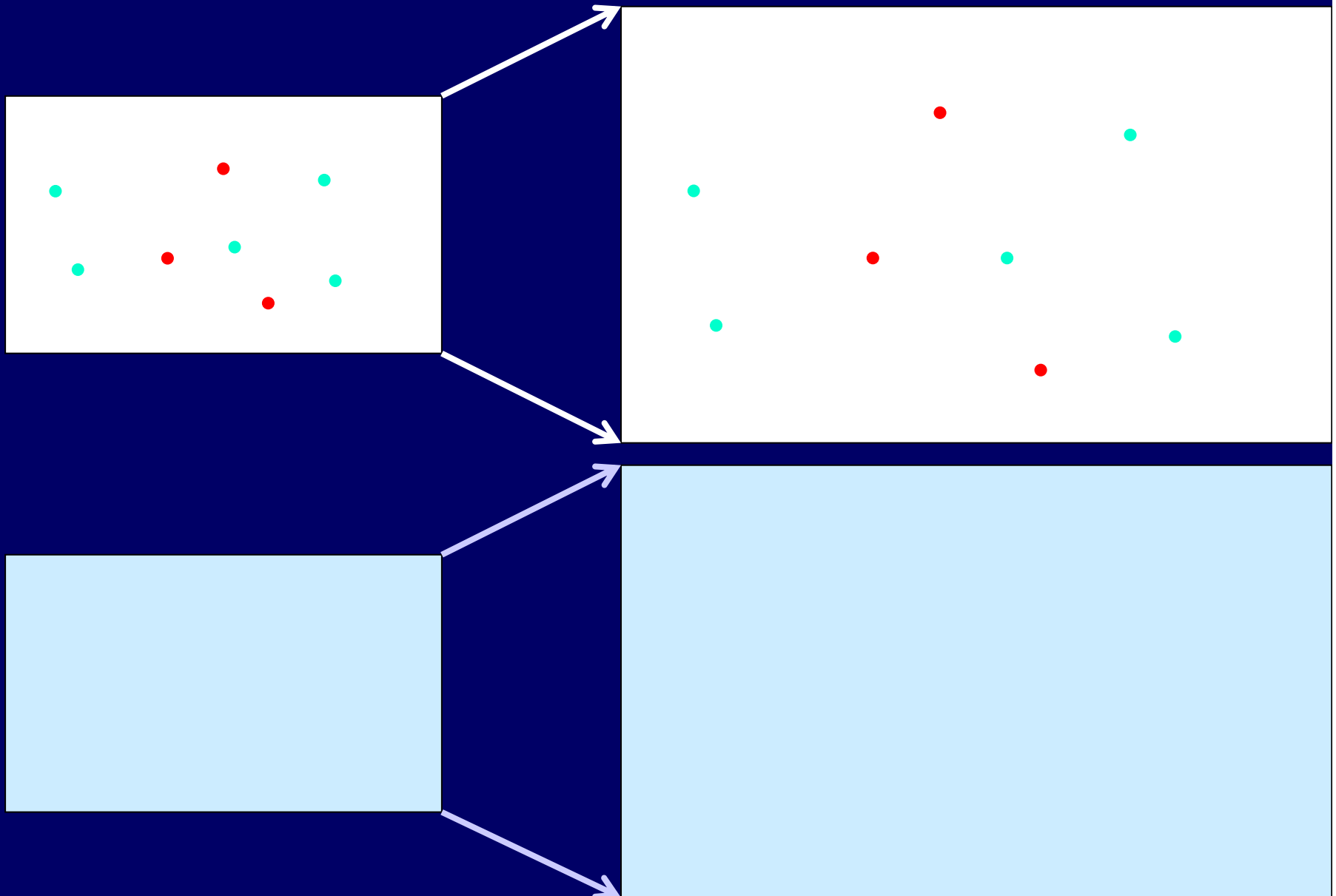


エネルギー密度も圧力もゼロの、
真の真空



物質はないが、一様にエネルギー
密度を持っている、偽の真空

物質のエネルギー密度は宇宙膨張とともに減少するが
真空のエネルギー密度は宇宙が膨張しても変わらない。



真空のエネルギー密度は場の理論によって表すことができる。

電磁場

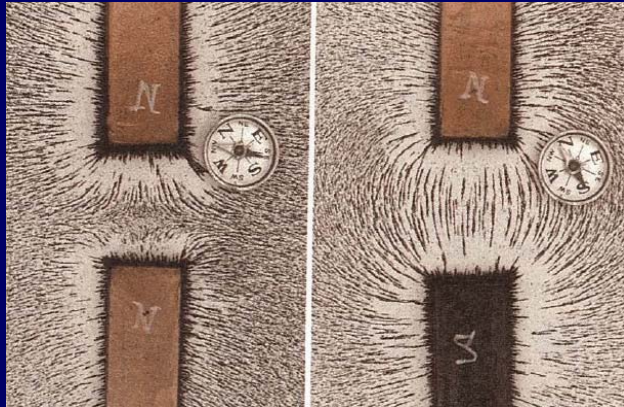
電気を持った粒子や磁石の周りには電場や磁場ができて、他の電気を持った粒子と力を及ぼしあう。

場の理論

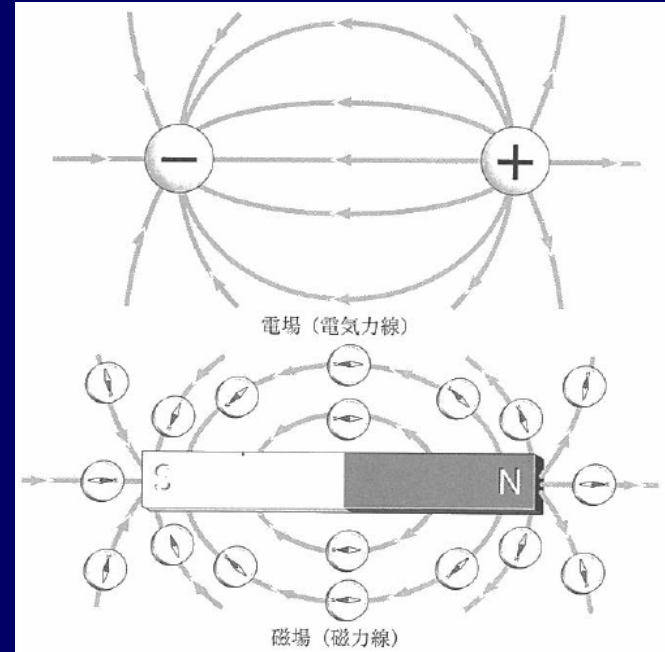
むしろ「場」(＝空間の状態を表す)の方が先にあって、それによってどのような粒子やエネルギーがそこにあるかが記述される。

電磁場

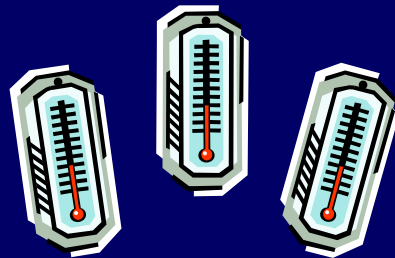
向きを持った、ベクトル場



磁石の周りには磁場が見える



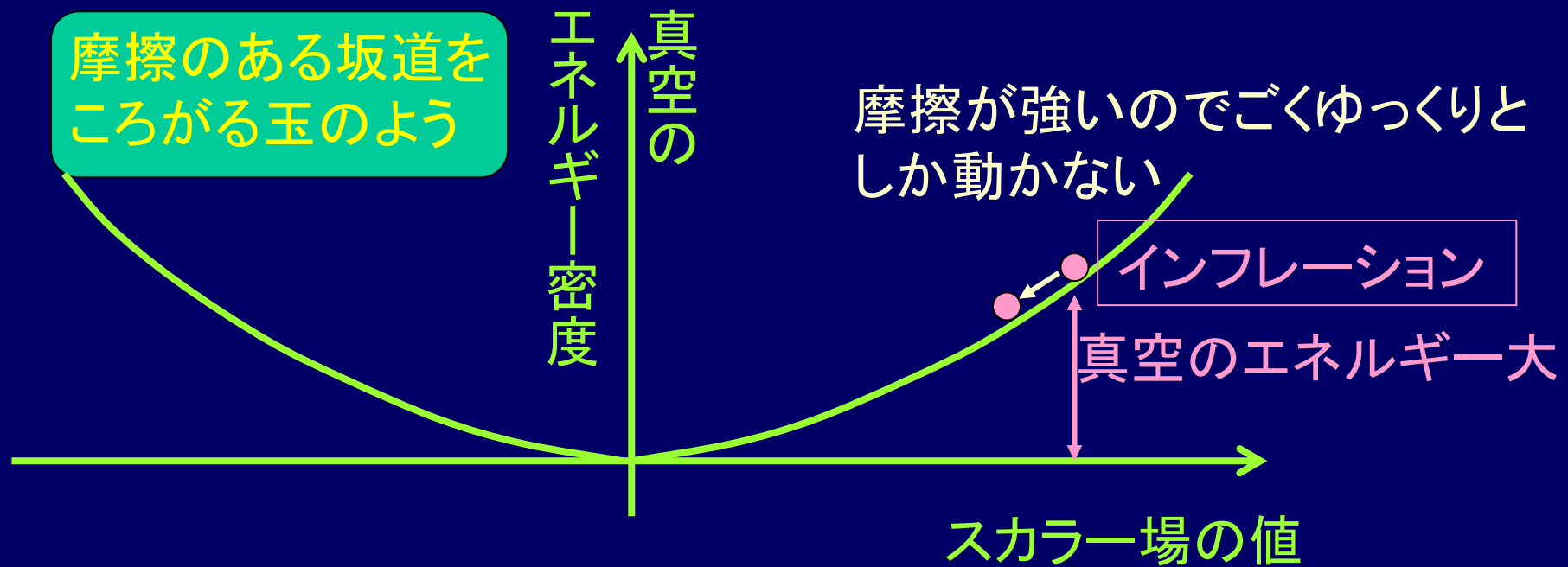
スカラー場



この部屋の各点の温度のように、向きを持たず、各点で値だけを持つ量。

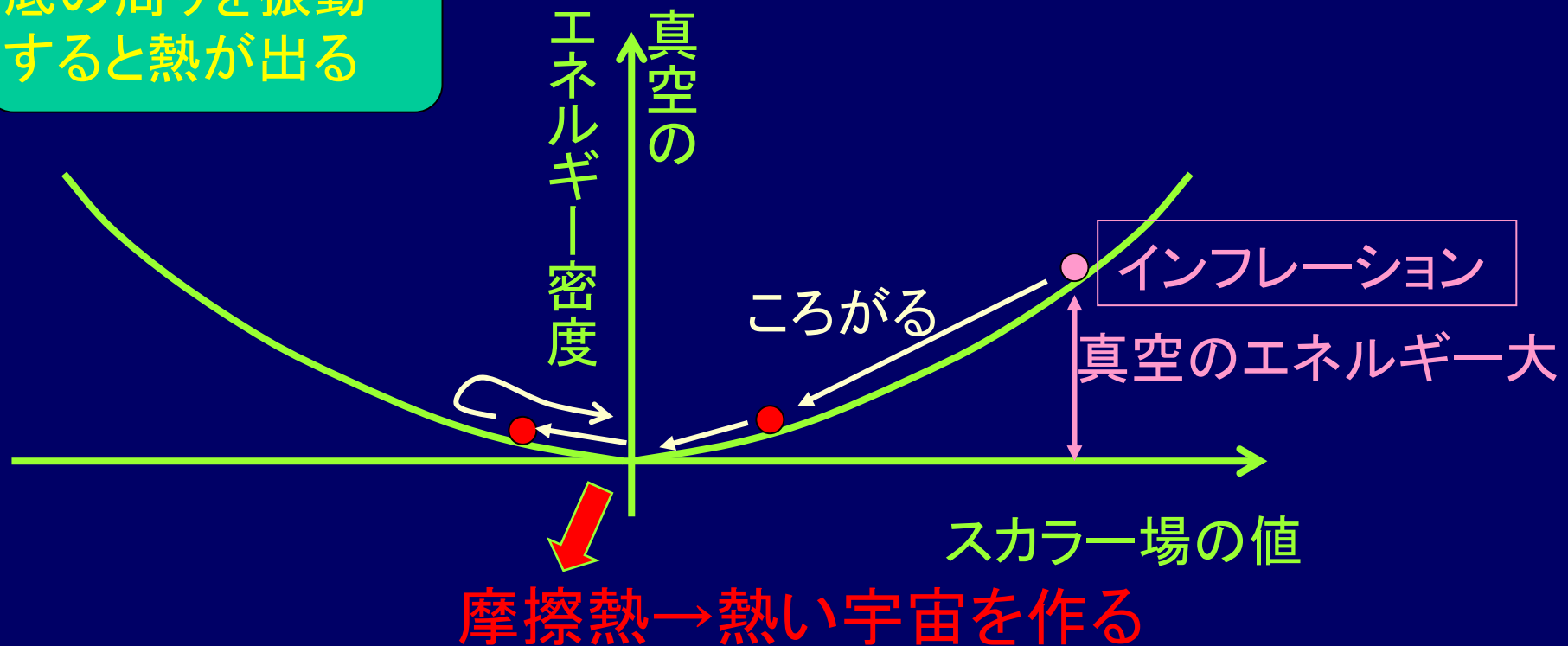
スカラー場の値によって真空のエネルギー密度やその場所にある粒子の質量が変わる。

真空のエネルギーの値はスカラー場の値によって、例えば図のようなモデルで与えられる。スカラー場の値が大きいと、真空のエネルギーも大きい。スカラー場の値が変化しなければ、宇宙が膨張しても真空のエネルギーは薄まらない！（アインシュタインの宇宙項のある状態と同じ。）



真空のエネルギーが小さくなってくると、摩擦も弱くなるので、スカラー場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、宇宙が創生してから 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**

そのころの宇宙の、、、

エネルギー密度 $\sim 10^{77} \text{g/cm}^3$!

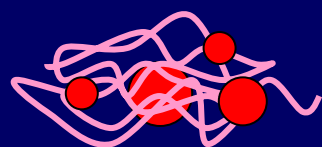
大きさ $\sim 10^{-29} \text{m}$!!

これがインフレーションによって1mm以上まで急膨張
「**バクテリアの大きさが銀河の大きさになるのと同じ**」

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。

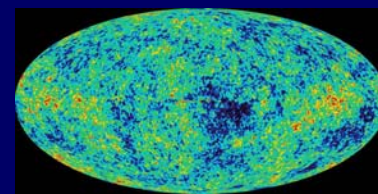
ある瞬間の位置がわかってても、その粒子が次にどこに現れるかわからない。



粒子性と波動性

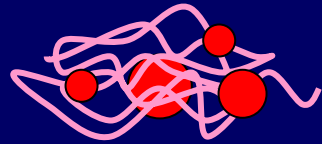
位置も速度もある幅を持ってふらついている。

=ゆらぎ



スカラー場も同じようにゆらいでおり、そのゆらぎが温度ゆらぎとしてWMAP等で観測されているとともに、銀河のタネを提供してくれる。

量子論の作る真空のエネルギーの謎



粒子性と波動性

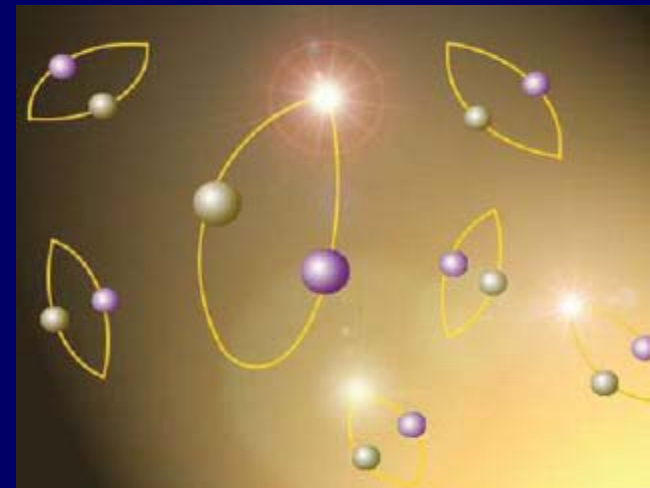
ある瞬間の位置がわかってても、その粒子が次にどこに現れるかわからない。



このことを場の理論の言葉で言うと、宇宙の各点では常に仮想的な粒子が生成したり消滅したりしていることになる。



真空は量子論的なエネルギーを持つはず。しかもその大きさは単純に計算すると観測値より120桁も大きい！ **謎**



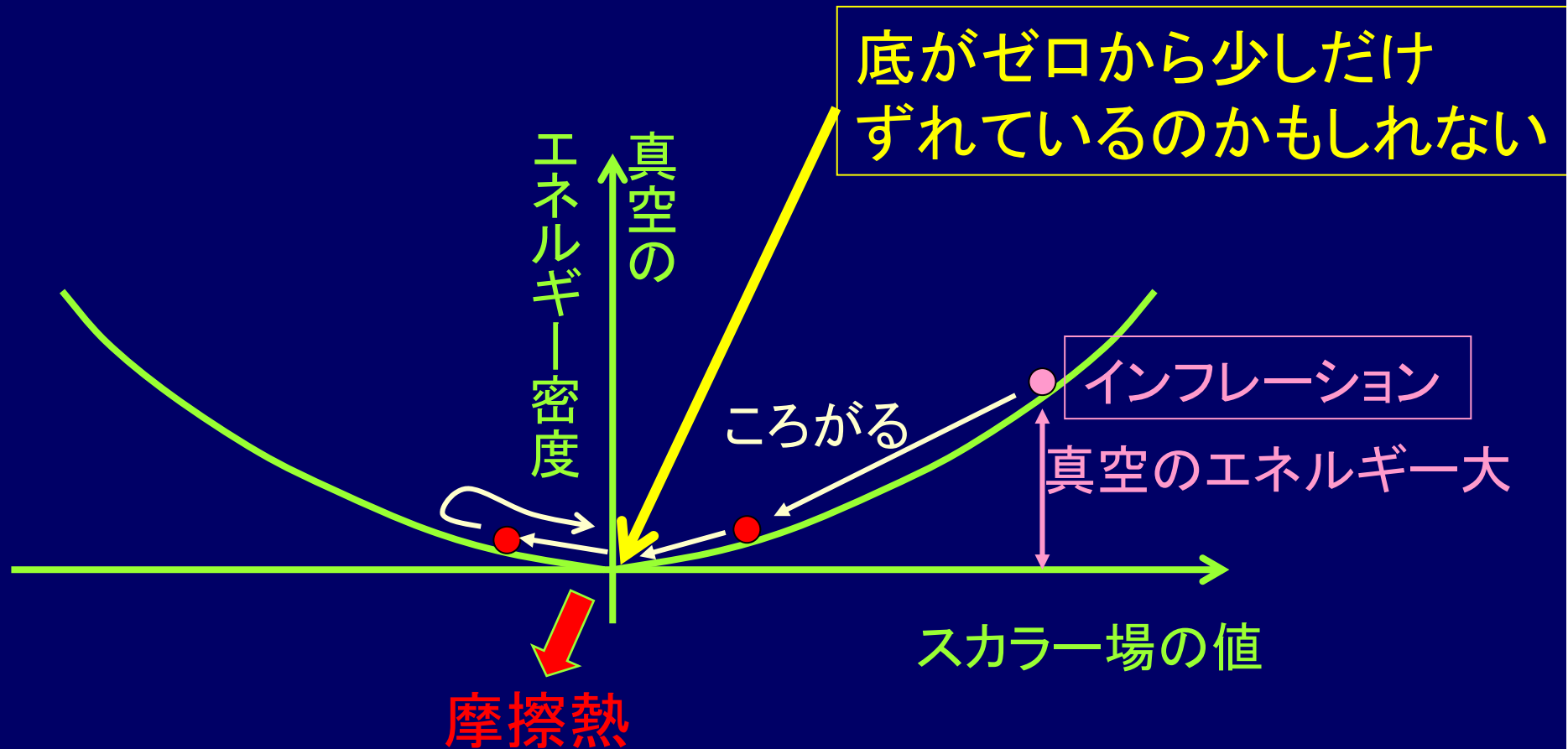
現在ダークエネルギーとして観測されている新種のエネルギーも、初期宇宙にインフレーションを起こした真空のエネルギーと同じ性質を持っている。

しかしその密度はけた違いに小さい。

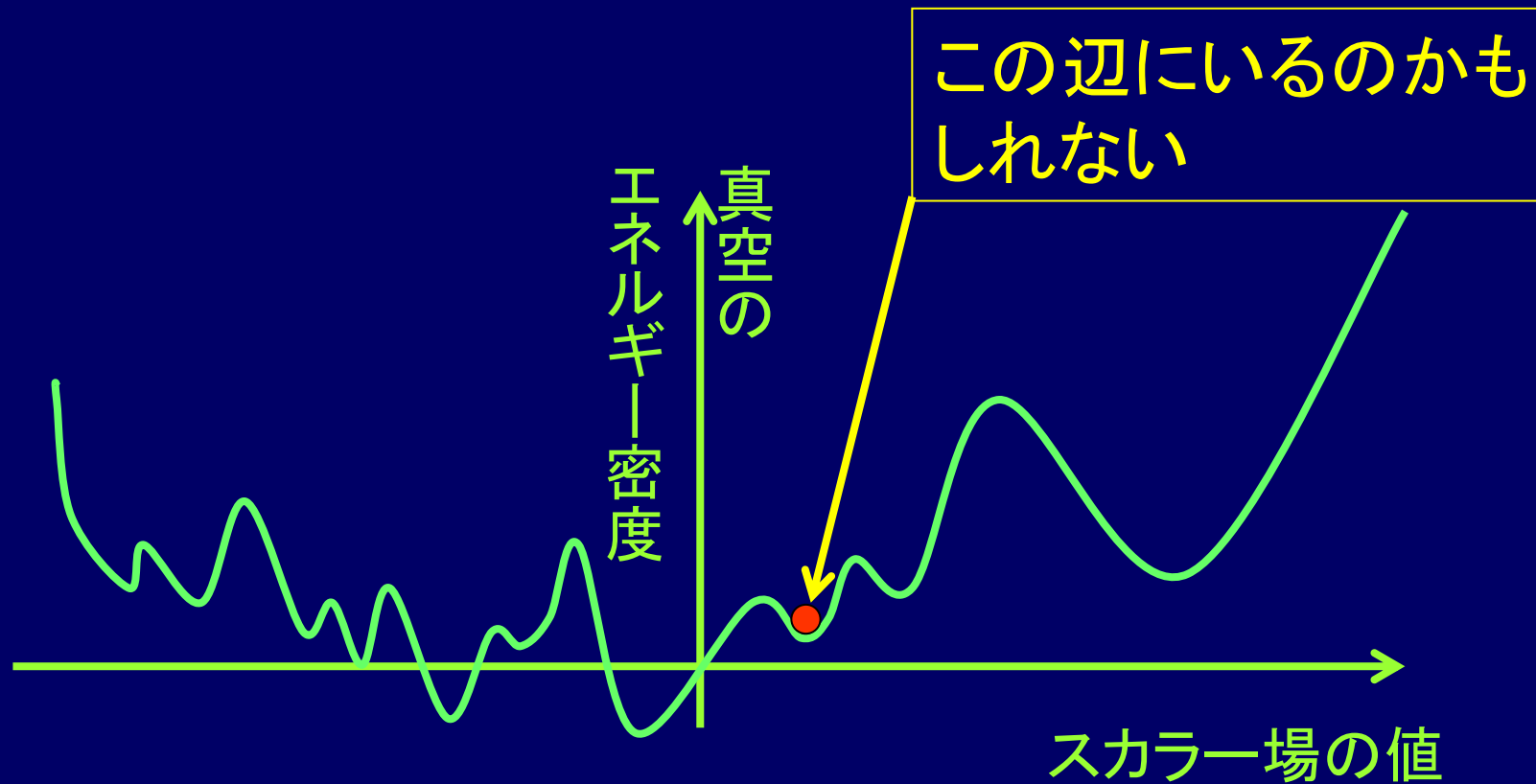
ダークエネルギーの密度 $7 \times 10^{-30} \text{g/cm}^3$!

(インフレーション時のエネルギー密度より100けた以上小さい)

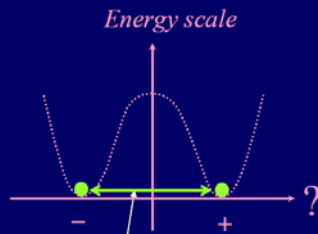
ダークエネルギーの起源も、スカラー場の値に応じて決まる真空のエネルギーかもしれない。しかし、なぜそのエネルギーがこんなに小さいのか、なぜゼロでないのか、わかっていない。



ダークエネルギーの起源も、スカラー場の値に応じて決まる真空のエネルギーかもしれない。しかし、なぜそのエネルギーがこんなに小さいのか、なぜゼロでないのか、わかっていない。



We consider a model with two (or more) degenerate perturbative vacua.



☆ Perturbative vacua $|+\rangle, |-\rangle$
with vacuum energy density ρ_0 .

☆ True ground state

$$|S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle).$$

$\langle +|+\rangle = \langle -|-\rangle = 1$, $\langle +|-\rangle = 0$ are assumed to the lowest order.

We assume an instanton solution exists which describes quantum tunneling with the Euclidean action S_0 .

☆ Calculate $\langle S|e^{-\rho T}|S\rangle$ by summing up contributions of instantons and anti-instantons.

$$\begin{aligned} \langle S|e^{-\rho T}|S\rangle &= \frac{1}{2}(\langle +|e^{-\rho T}|+\rangle + \langle -|e^{-\rho T}|-\rangle + \langle +|e^{-\rho T}|-\rangle + \langle -|e^{-\rho T}|+\rangle) \\ &= e^{-\rho_0 VT} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j)!} (kVT e^{-S_0})^{2j} + e^{-\rho_0 VT} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)!} (kVT e^{-S_0})^{2j+1} \\ &= \exp(-\rho_0 VT + kVT e^{-S_0}). \end{aligned}$$

Contribution of each instanton or anti-instanton.
 T : Euclidean time, V : Spatial volume, k : const.

☆ Energy density of the true ground state $|S\rangle$,
 ρ_S vanishes by assumption.

$$\rho_S = \rho_0 - k e^{-S_0} \equiv \rho_0 - m^4 e^{-S_0} = 0.$$

☆ If we live in one of the perturbative vacua, we would find a vacuum energy density,

$$\langle \rho_0 \rangle = m^4 e^{-S_0}$$

☆ Perturbative vacua should be long-lived:

Tunneling rate/volume/time $\Gamma \approx m^4 e^{-2S_0}$.

Demanding that there should be no tunneling in the horizon volume in the cosmic age, we find

$$1 > \Gamma H_0^{-4} \approx \frac{9 M_G^4}{m^4}, \quad \text{with } H_0^2 \approx \frac{\rho_0}{3 M_G^2} = \frac{m^4 e^{-S_0}}{3 M_G^2}.$$

☆ From $\rho_0 = 10^{-120} M_G^4$ and $\Gamma H_0^{-4} < 1$, we find

$$m > M_G, \quad S_0 = 120 \ln 10 + 4 \ln(m/M_G) \approx 276.$$

けた違いに小さな
ダークエネルギーを
自然に導き出す方法

アインシュタインの一般相対性理論がまちがっているのかもしれない

その一つの可能性として、われわれの宇宙空間には、たて・横・高さ以外に第5、第6、の目に見えない方向があり、それが4次元世界に住む私たちには、ダークエネルギーのように加速的宇宙膨張を引き起こす元になっている、**という高次元宇宙論**も研究されている。しかし、うまくいっている理論はない。



宇宙の将来

ダークエネルギーに支配された状態がこのまま続くと宇宙膨張はどんどん加速され、まわりの銀河もどんどんとおざかってしまう。**第二のインフレーション。**

- ☆ 天の川銀河はアンドロメダ銀河と140億年以内に合体する。
- ☆ 宇宙構造の進化は今後280億年程度でほぼ終了。
- ☆ 1000億年後には地平線内には銀河が一個しかない。

1000億年後の宇宙はさびしい宇宙
私たちは現在、豊かな宇宙に暮らしている

宇宙はインフレーションによって始まり、
インフレーションによって終わる!?

東京大学大学院理学系研究科附属

ビッグバン宇宙国際研究センター公開講演会

宇宙最大のなぞ：ダークエネルギー

- ダークエネルギーについて、宇宙について、わからないことはまだまだたくさんあります。
- しかし、1000億年後ではなく、現在に
- 生きている私たちにはさまざまな観測的なデータが与えられつつあり、それに基づいて活発な研究を繰り広げています。



RESEARCH CENTER FOR

THE EARLY UNIVERSE

THE UNIVERSITY OF TOKYO

RESCEU





RESEARCH CENTER FOR

THE EARLY UNIVERSE

THE UNIVERSITY OF TOKYO

RESCEU

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