

時間と空間の物理学

4

宇宙

竹下徹 (理学部)

膨張宇宙

□ 光速一定

宇宙

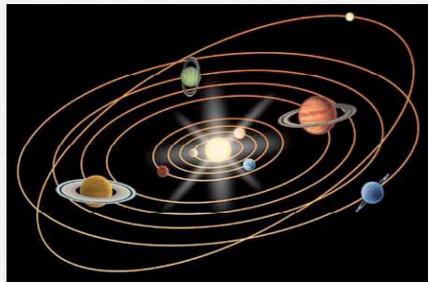
□ 遠く = 時間の過去

□ 天文学：宇宙の過去を探る学問

□ 単位：光年（光が1年走る距離）

□ $\sim 3 \times 10^7 \text{ (s)} \times 3 \times 10^8 \text{ (m/s)} = 9 \times 10^{15} \text{ (m)} \sim 10^{16} \text{ m}$

大きさ 10^{12} m



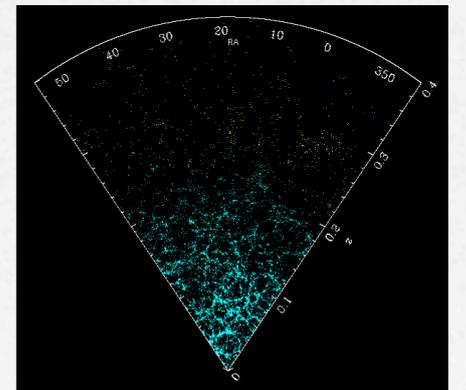
過去 10^{-3} y

10^{21} m



10^5 y

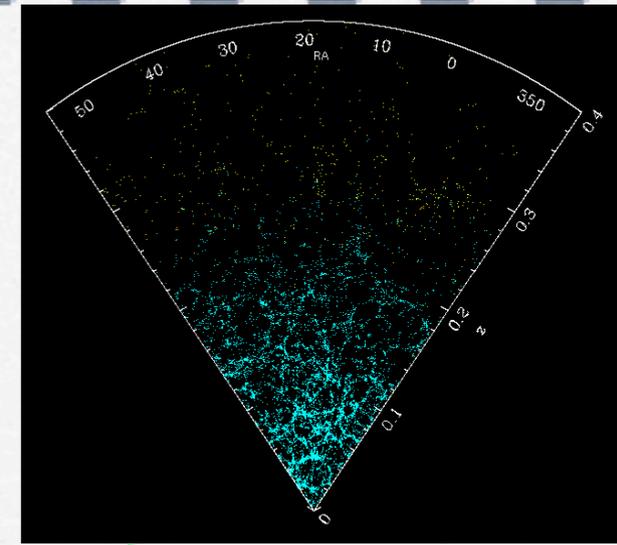
宇宙 $\sim 10^{26} \text{ m}$



10^{10} y

オルバーズのパラドクス

- 観測事実
 - 宇宙の星や銀河の大局的な密度一定
 - 宇宙は大きい
 - とすると夜空は星で一杯になるはずだ
 - 夜空が輝く
 - これは矛盾だ



オルバーズのパラドクス-1

夜空をながめる

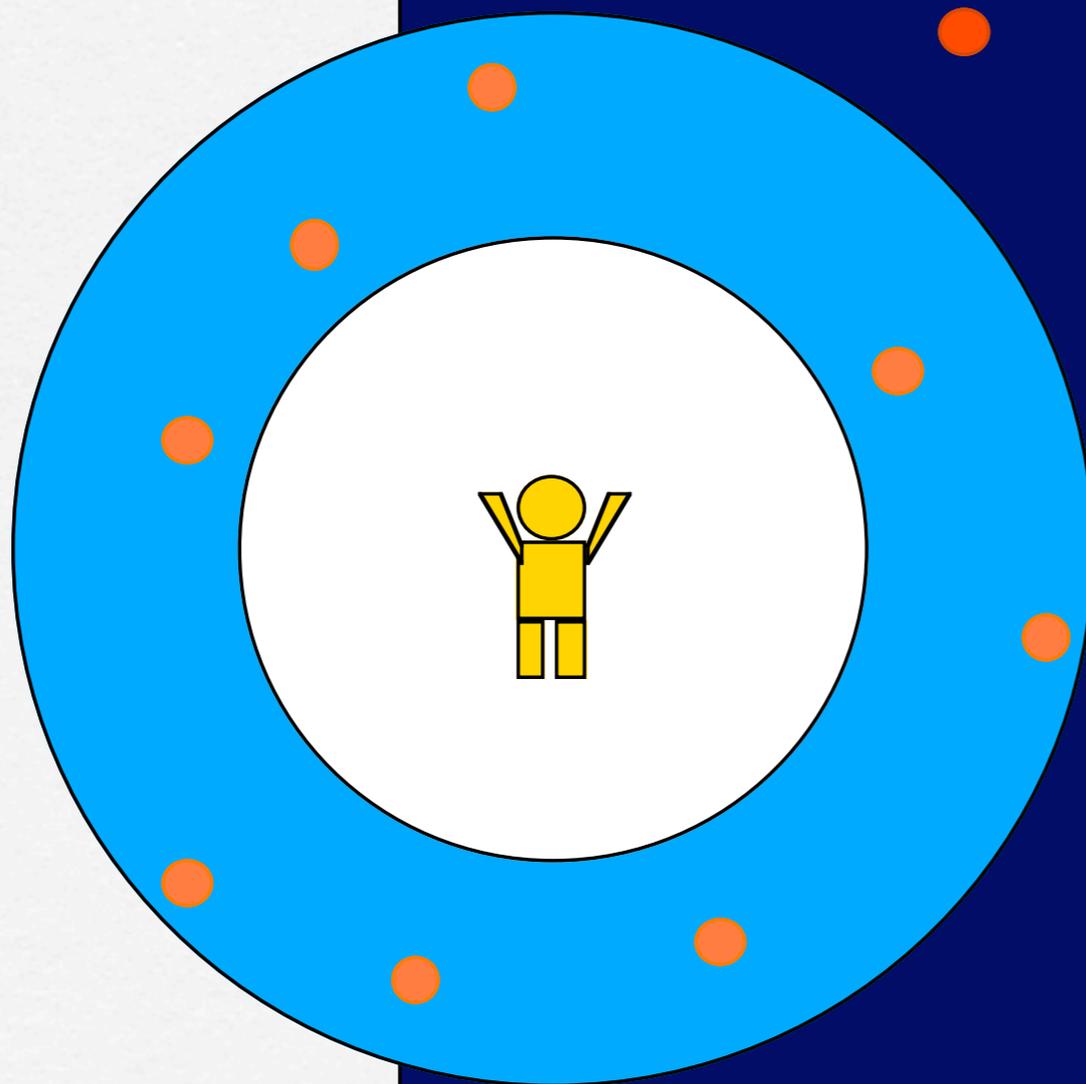
星がどこにもある



星がたくさんある

オルバーズのパラドクス-2

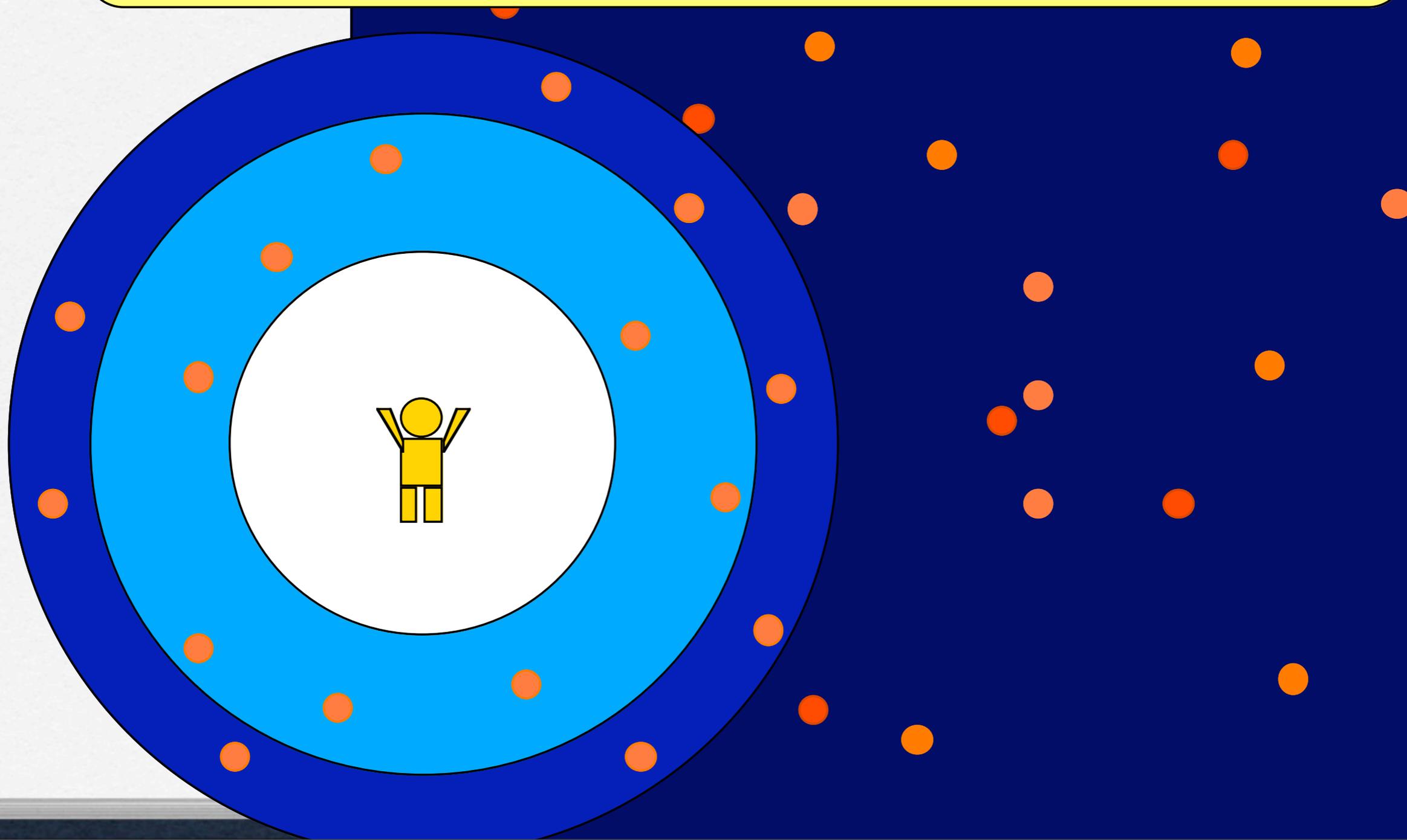
夜空をながめる：近くだけ見る



オルバーズのパラドクス-3

オルバーズのパラドクス-3

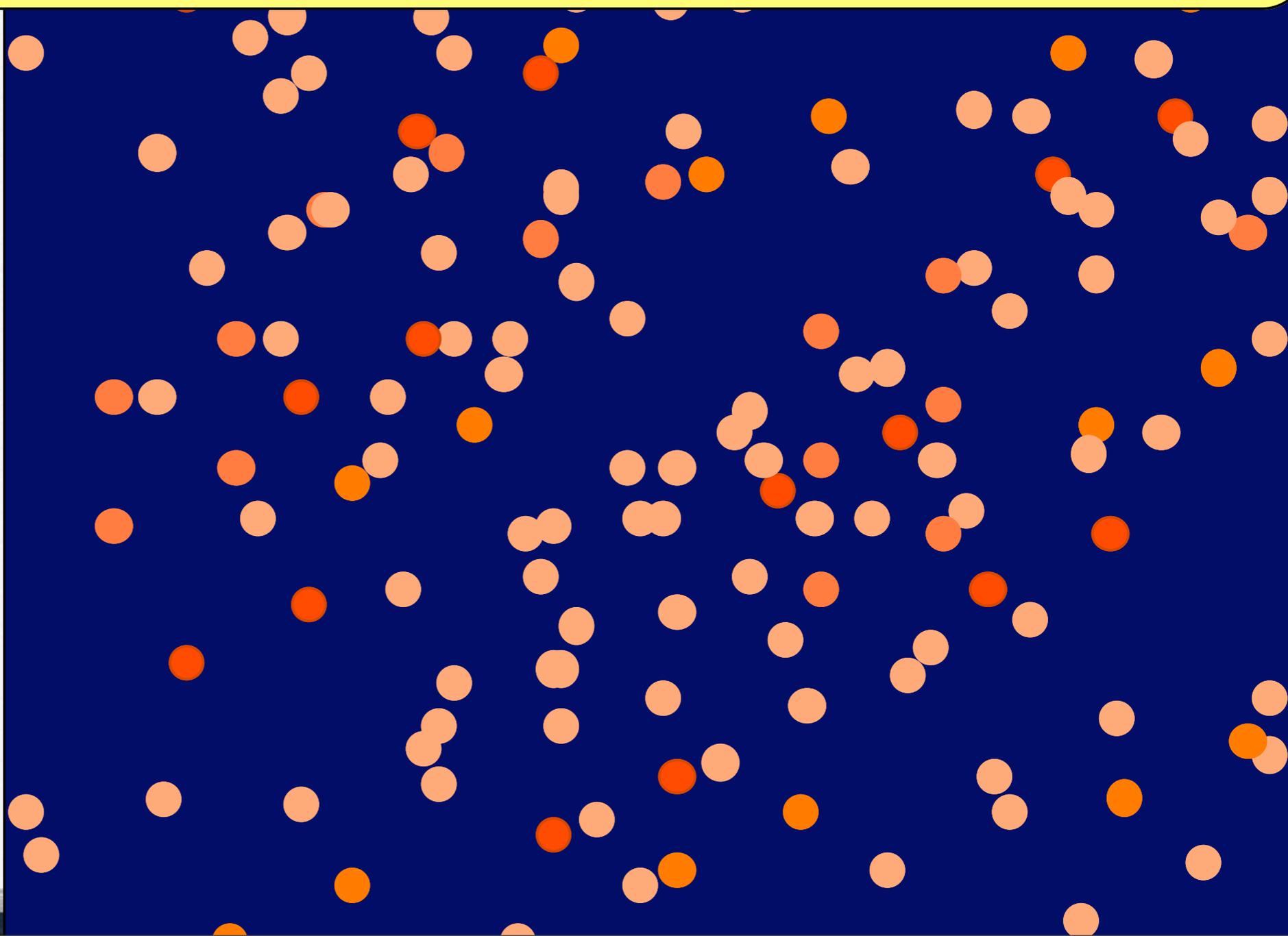
夜空をながめる：遠くも見る



オルバーズのパラドクス-4

オルバーズのパラドクス-4

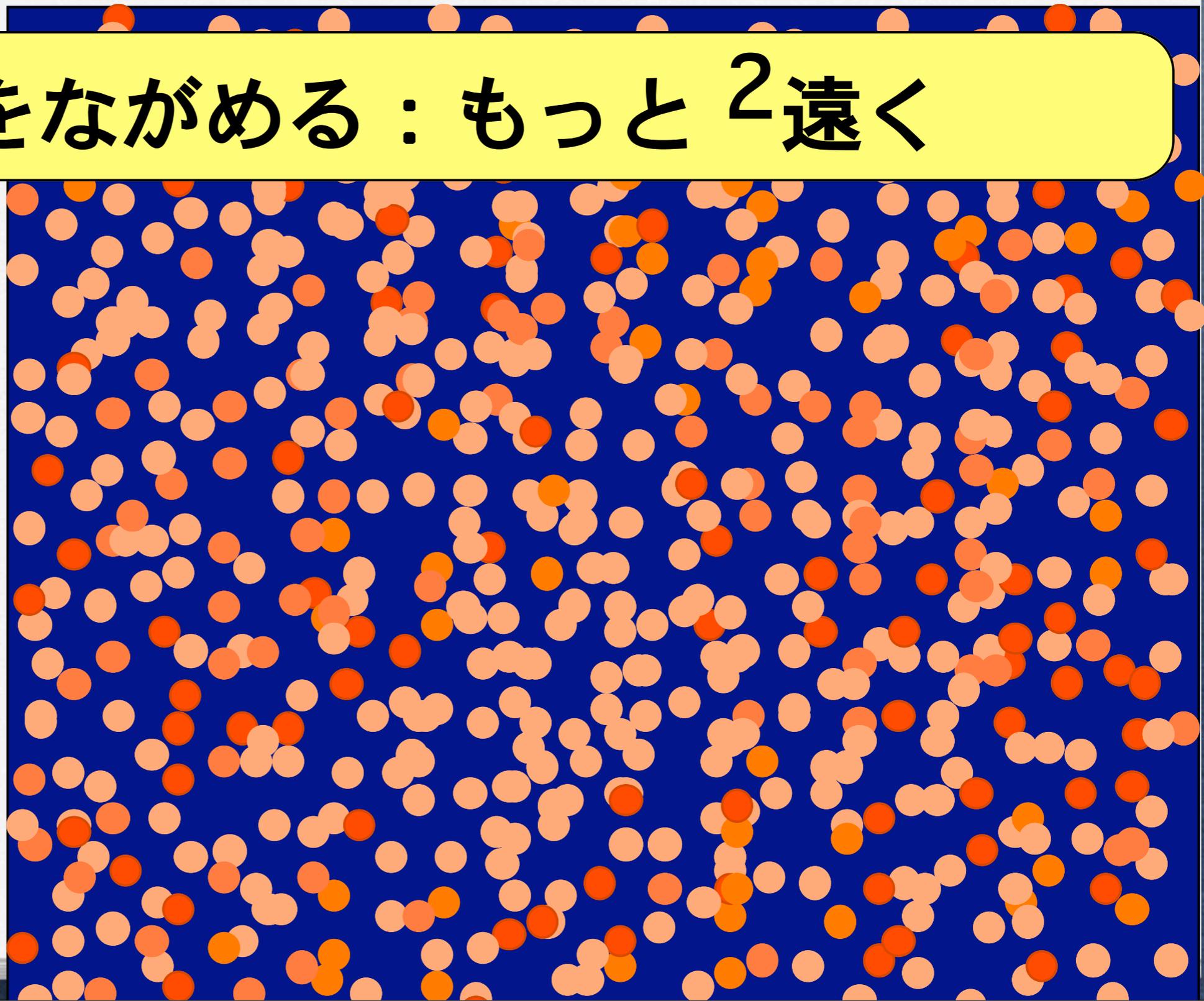
夜空をながめる：もっと遠く



オルバーズのパラドクス-5

オルバーズのパラドクス-5

夜空をながめる：もっと²遠く



オルバーズのパラドクス-5

オルバーズのパラドクス-5

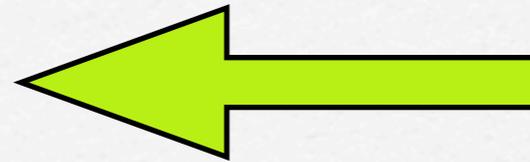
夜空をながめる：もっと ∞ 遠く

夜空は光輝いているはずだ！

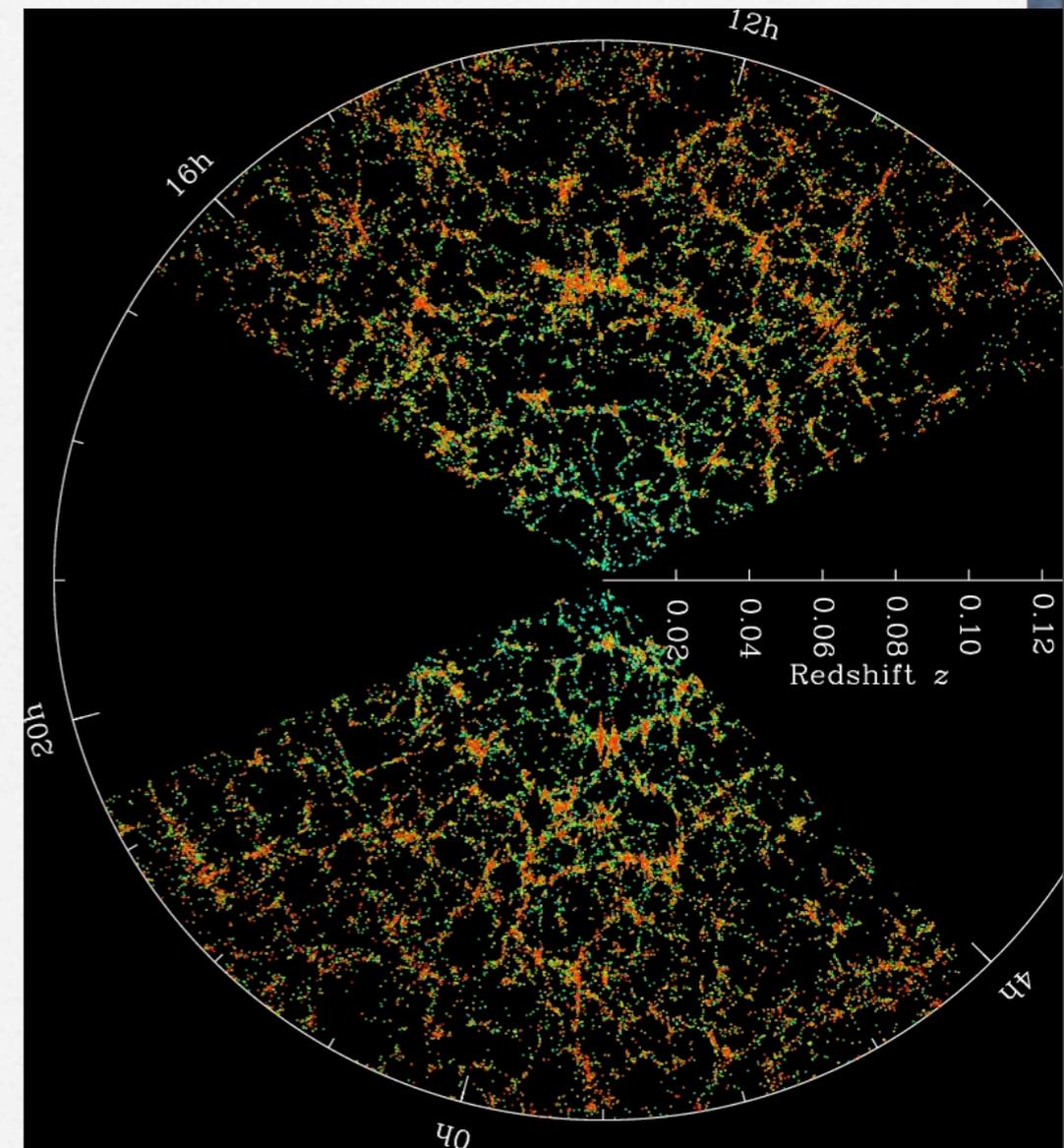
オルバーズのパラドクスの仮定

星の密度 = 一定
一様等方

観測事実



宇宙の大きさ = 十分大きい

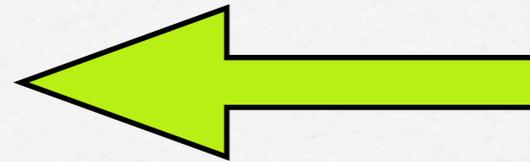


<http://www.sdss.org/>

オルバーズのパラドクスの仮定

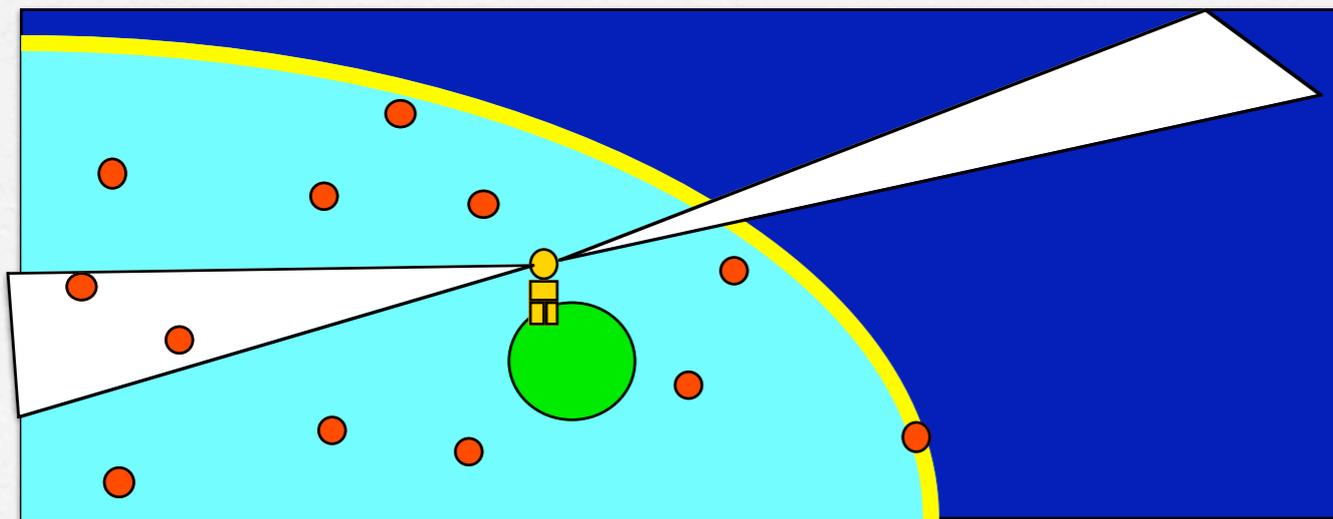
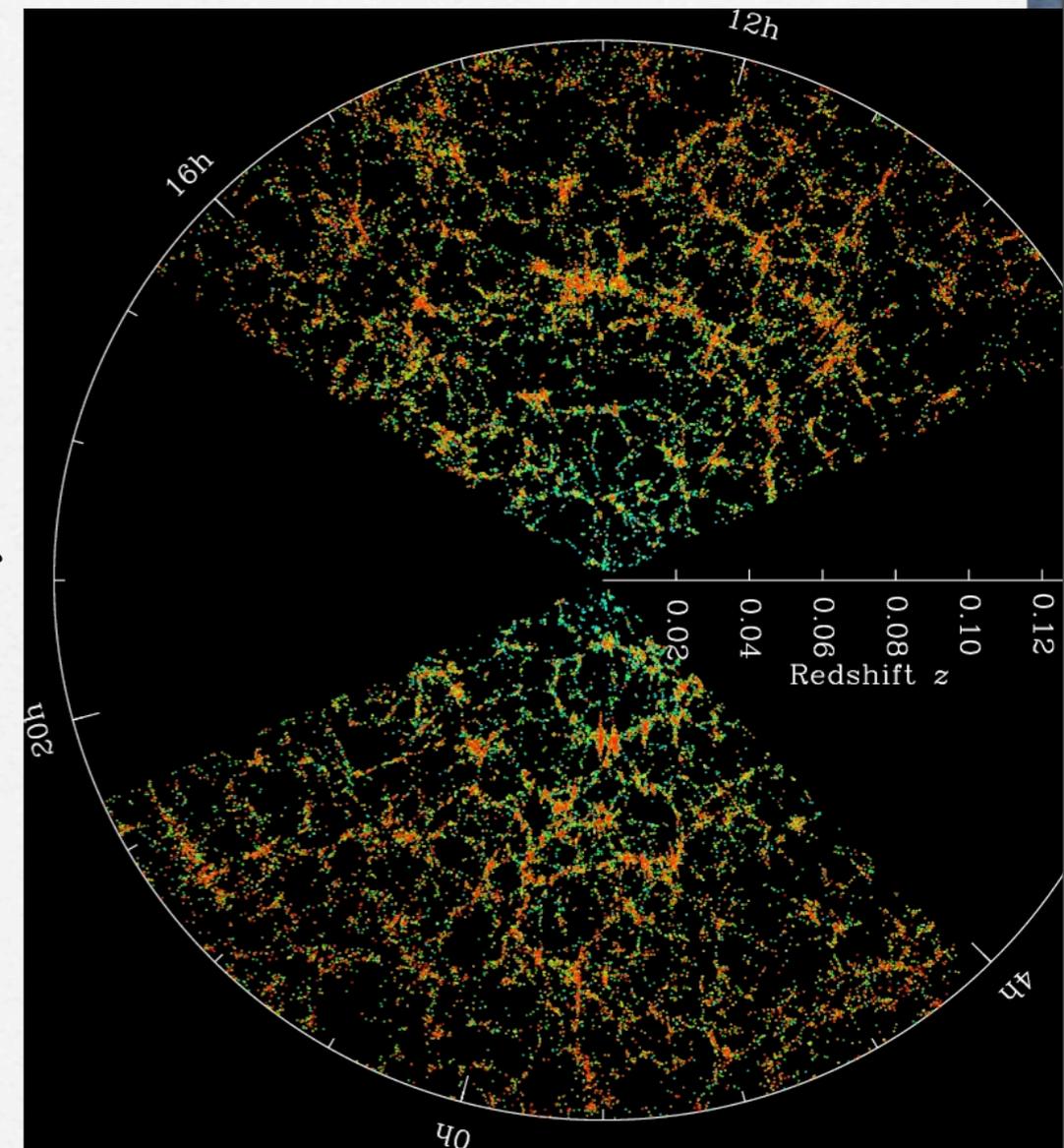
星の密度 = 一定
一様等方

観測事実



宇宙の大きさ = 十分大きい

宇宙の大きさに限りがあると



<http://www.sdss.org/>

パラドクスの解決

- 静的モデルの思い込み
- 宇宙は動的な存在だ！
- 宇宙は膨張している
- 大きいが見える範囲は限られている
- 宇宙の地平線の存在

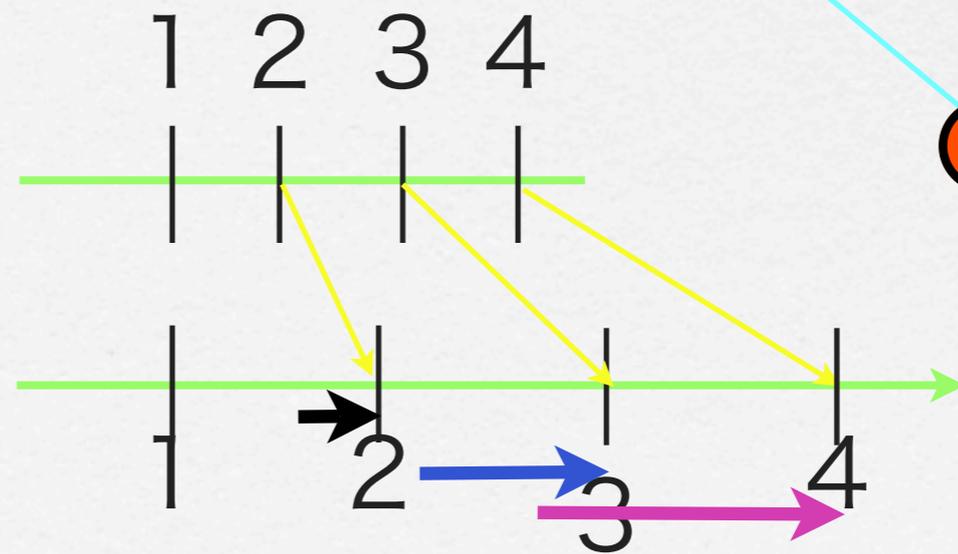
137億光年向こう

宇宙膨張(ハッブル1929)



遠い星は速く
遠ざかる

ゴムひもモデル



光の ドップラー効果

- 星の光には特徴
- 吸収線
- 原子の構造

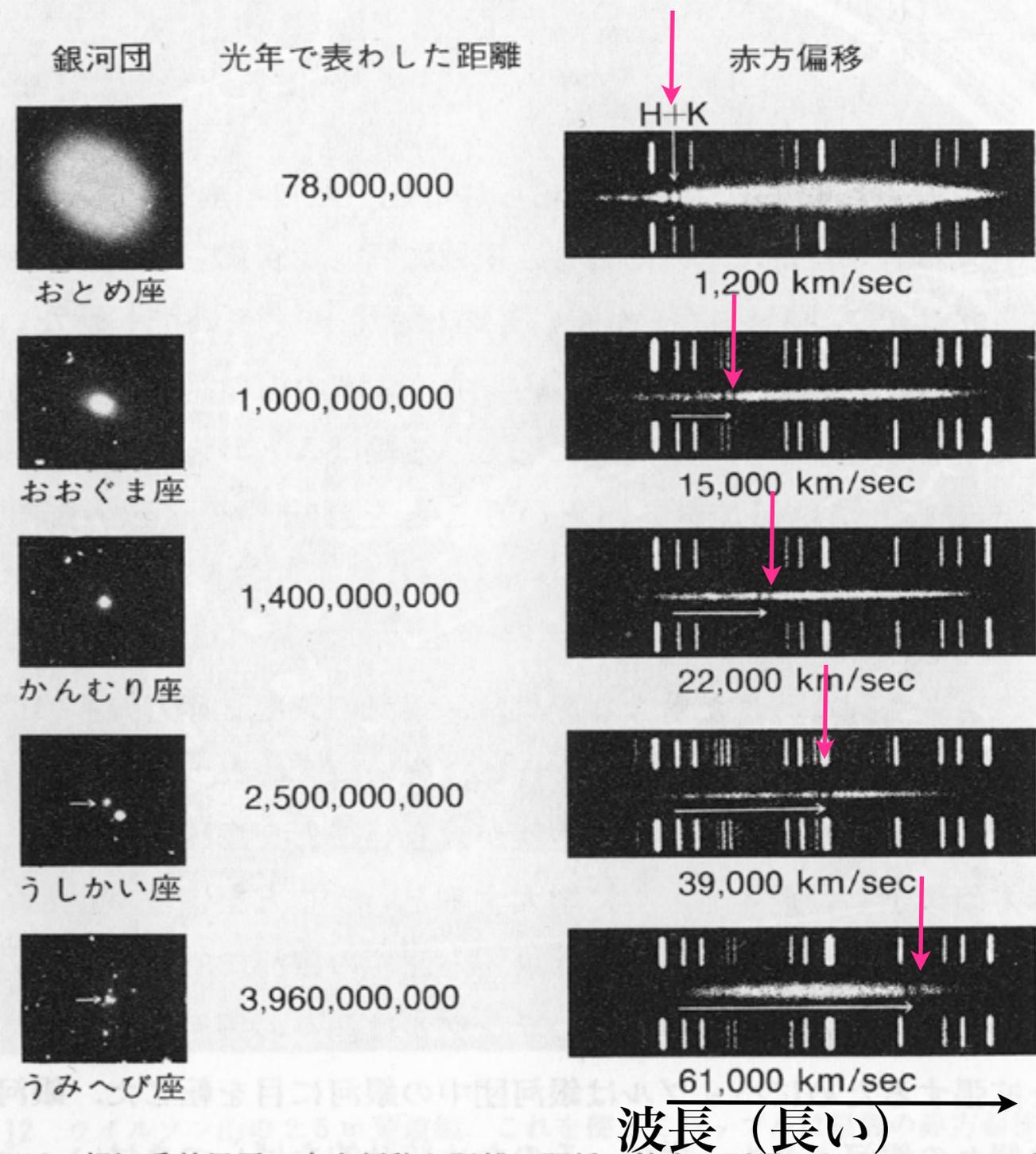


図 12-13 銀河系外星雲の赤方偏移と距離の関係. 特定の原子からのスペクトル線, えばカルシウムのH線とK線 (矢印で示されている) の赤方偏移をドップラー効果によるものと解釈すれば, 図に示された速さとなった. 赤方偏移は速度 $c\Delta\lambda/\lambda$ で表わされる. 1光年は約9.5兆 (9.5×10^{12}) km に等しい. 距離は1pcを3.26光年として, km/秒/Mpcの膨張率に基づいている. (Hale Observatories)

銀河の距離と速さ

1000km/s

□ Hubbleの法則

500km/s

A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE

□ **1pc**=年周視差が1角度秒（3600分

の1度）の時の距離を1パーセクpc

1角度秒とは、約2 km先にある1cmの物

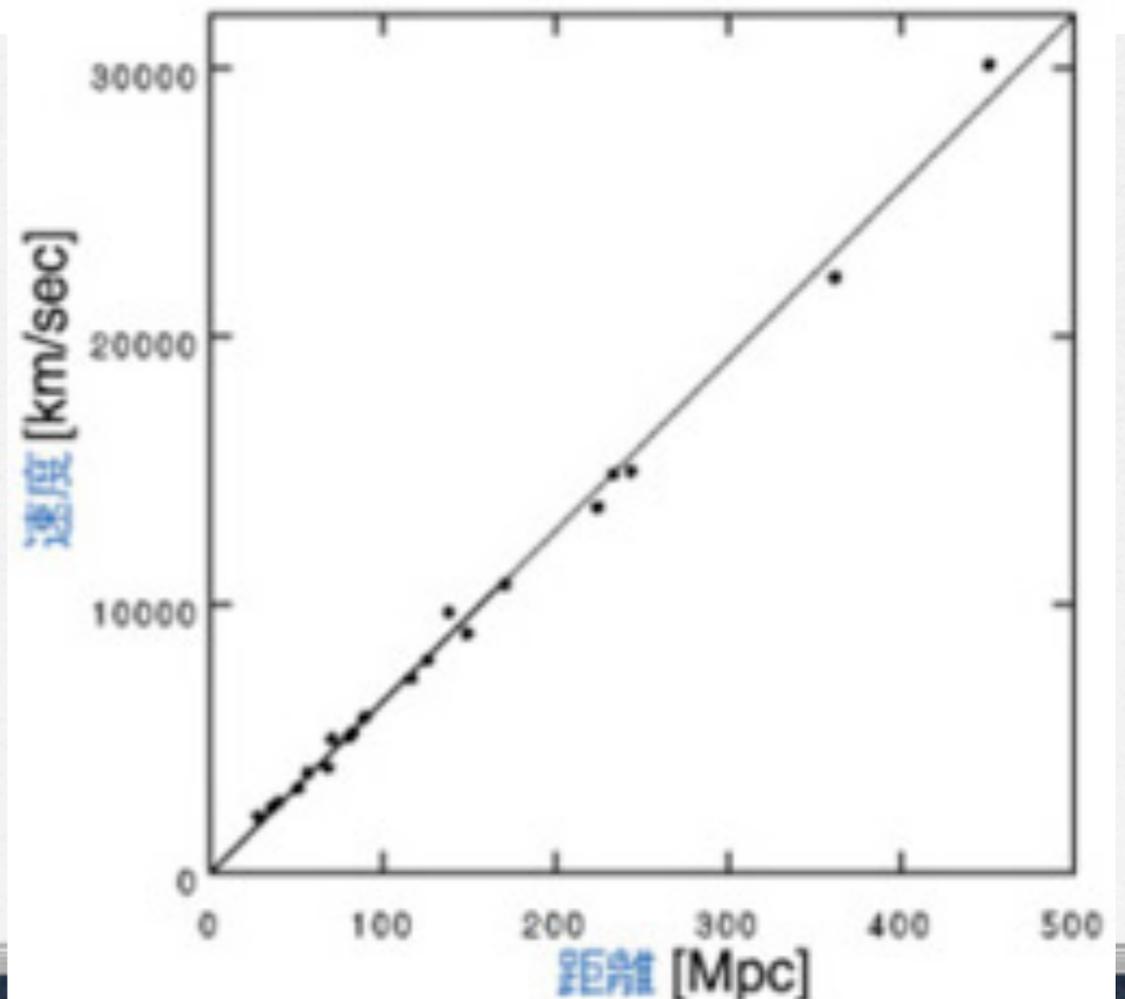
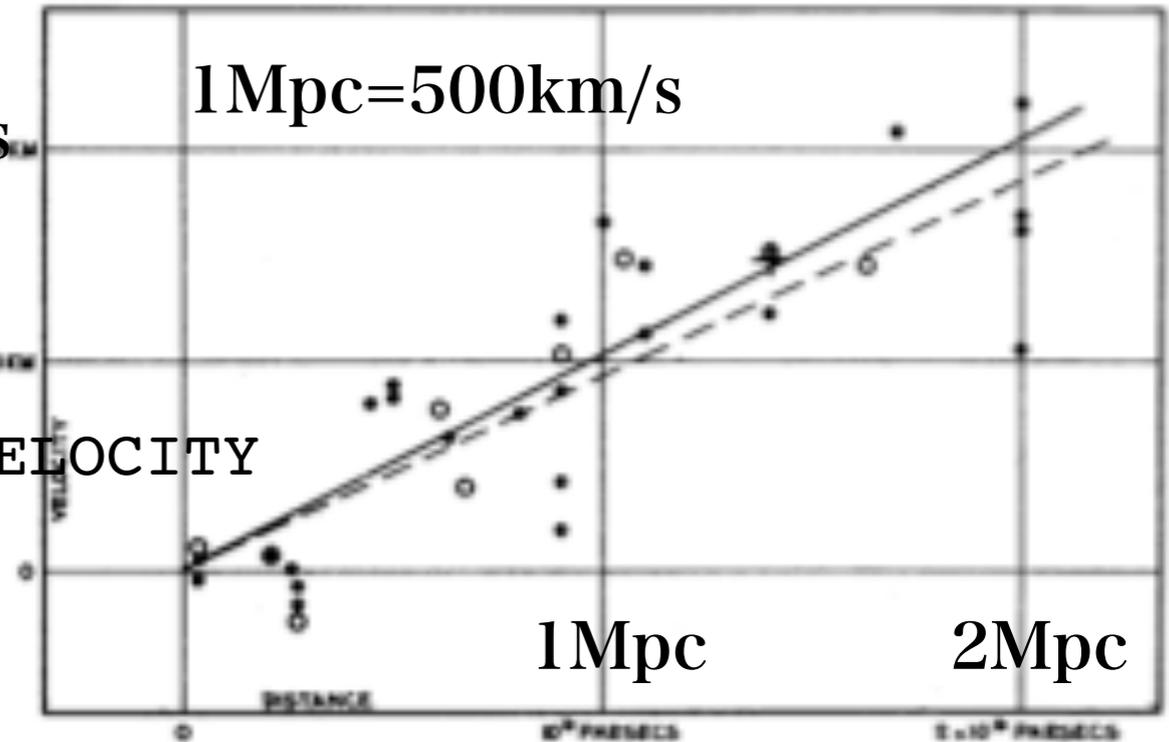
1 pc = 3.26光年

□ 現代の測定

□ $H=72\text{km/s/Mpc}$

□ 遠いほど速く逃げる

□ $v=Hr$

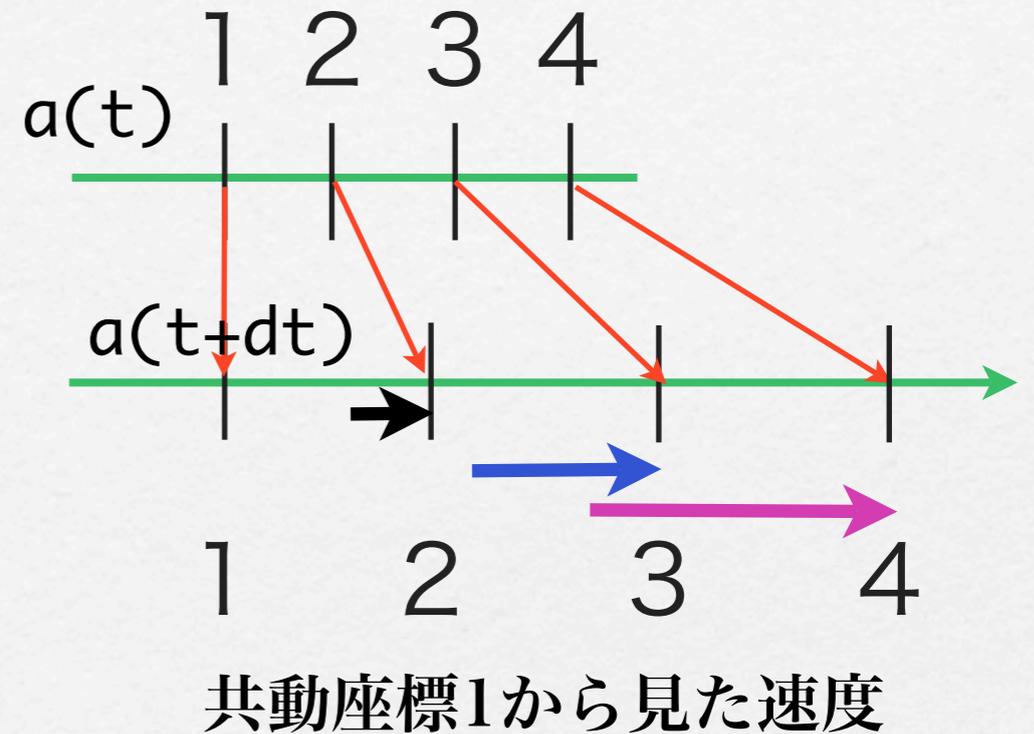


宇宙膨張

- $v=Hr$ (Hubbleの発見)
- 遠い星ほど速く遠ざかる
- 共動座標 χ
- 伸びるゴムひもに乗った点の間隔 a が広がる
- Hubble定数 H は間隔 a の時間的变化を表す

$$v = \dot{r} = \chi \dot{a} = \chi a \frac{\dot{a}}{a} = rH, H = \frac{\dot{a}}{a}$$

ゴムひもモデル



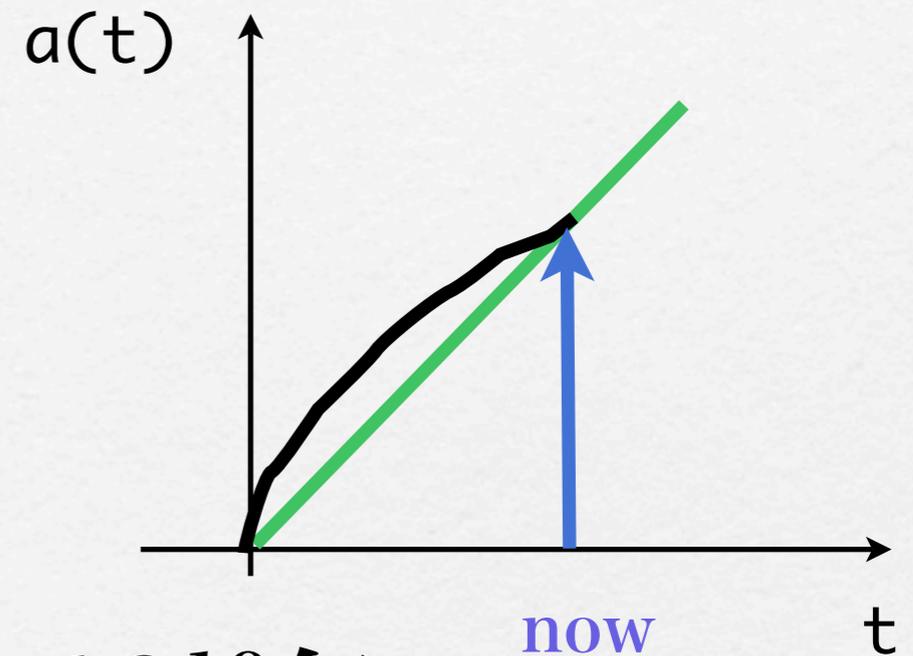
Hubbleの法則の示すもの

- 遠いほど速く逃げる
- $v=Hr$: $H=72\text{km/s/Mpc}$

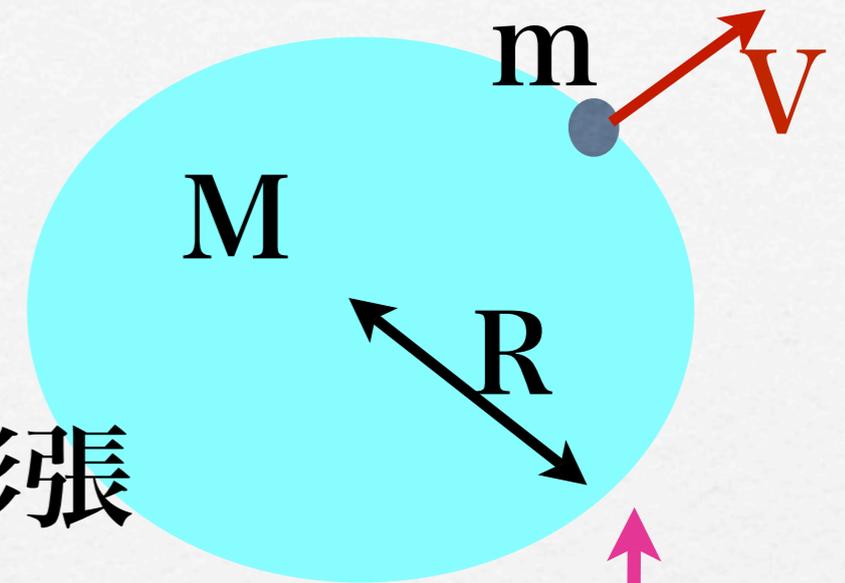
□ 宇宙膨張

- $1/H=(1/24)\times 10^{19}[\text{s}]=1.3\times 10^{10}\text{年}$
=130億年 : 宇宙年齢 (膨張が同じよう
に続いたと仮定して)

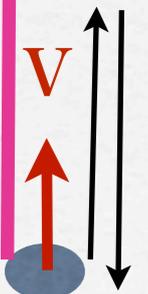
$$1\text{pc}=3.26\times 10^{13}\text{km}$$



単純膨張モデル



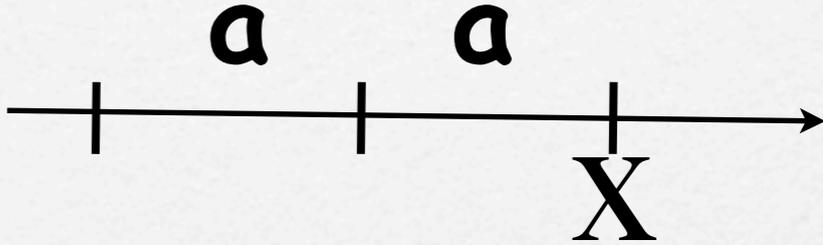
- 半径 R ,全質量 M の3次元球が膨張
- 表面に質量の m の物体がのって、膨張を観測
- 速度 V が十分大きいと膨張は永遠に続く
- 速さ V が小さいと一旦膨張、収縮
- あたかも地上の石を真上に投げ上げたとき



宇宙方程式

$$H^2 a^2 (1 - \Omega) = \frac{2E}{m\chi^2}$$

□ 飛び去るぎりぎり

$$E = \frac{1}{2} m V^2 - \frac{GMm}{R} = 0$$


$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho \quad V = Hr = H\chi a$$

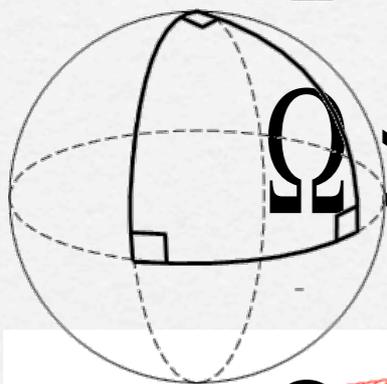
$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{CR}} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

$$\rho_{CR} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 10h^2 \text{Atom}/m^3$$

宇宙の進化

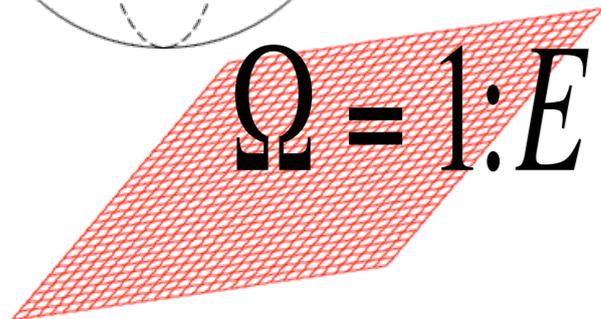
□ 宇宙の Ω 総物質質量 で決まる

□



$\Omega > 1: E < 0$

閉じた宇宙

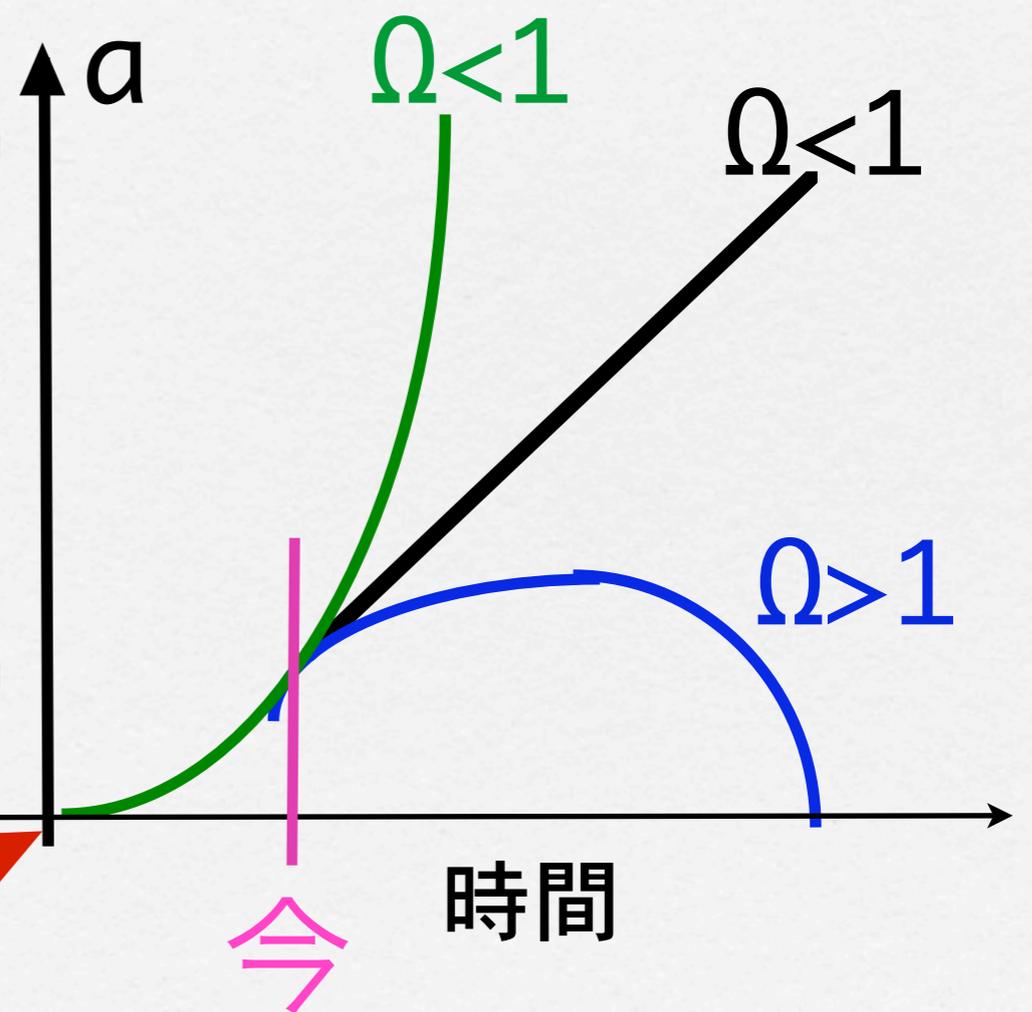
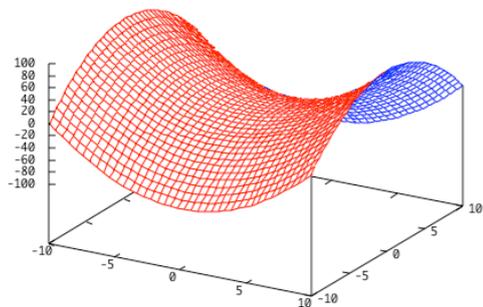


$\Omega = 1: E = 0$

平坦宇宙

$\Omega < 1: E > 0$

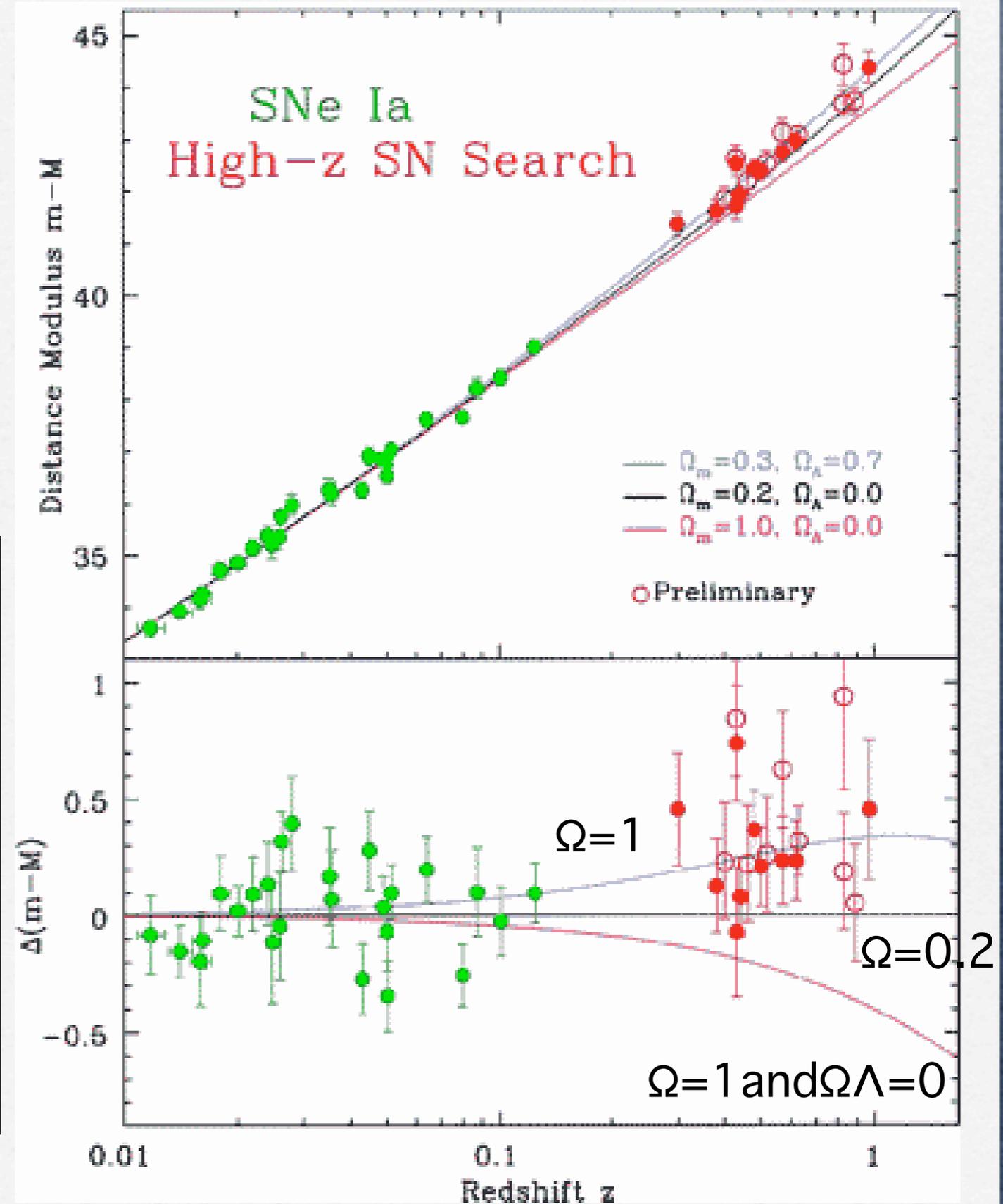
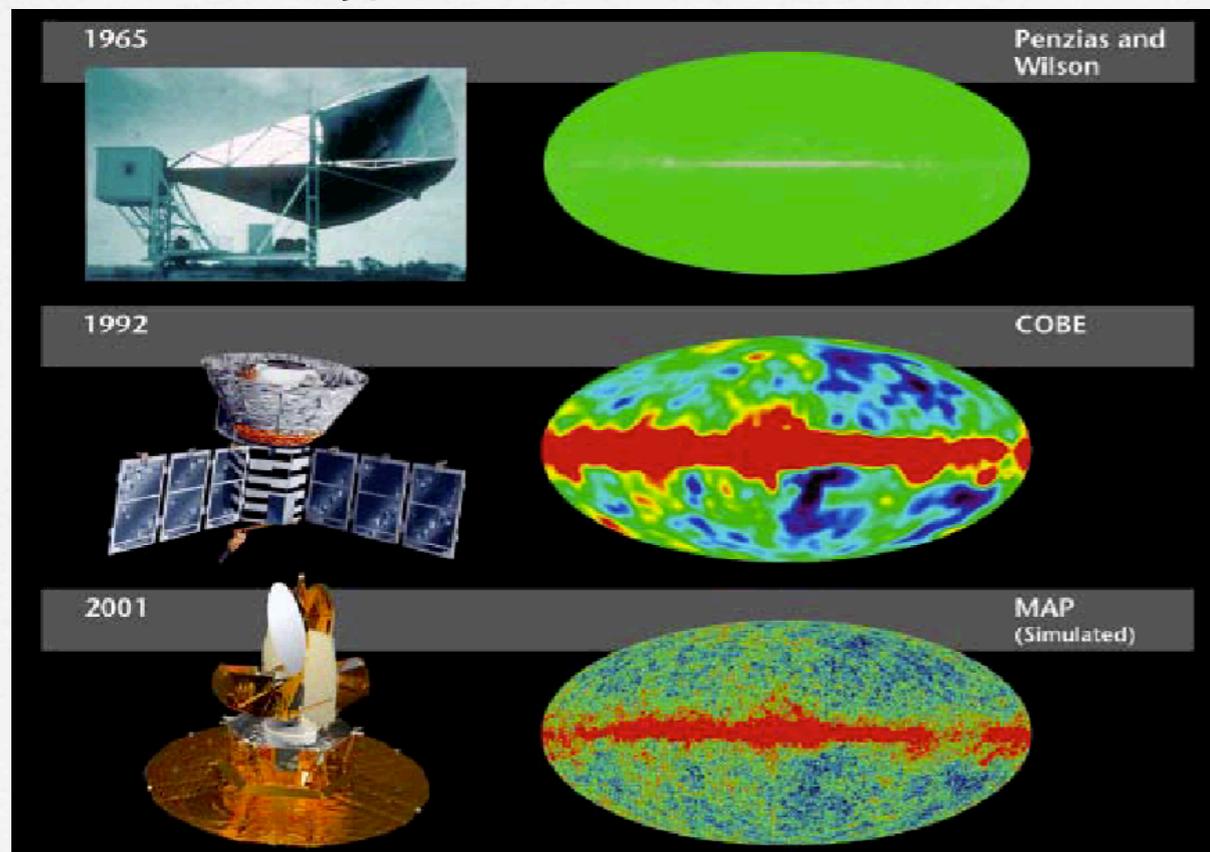
開いた宇宙



観測事実とは？

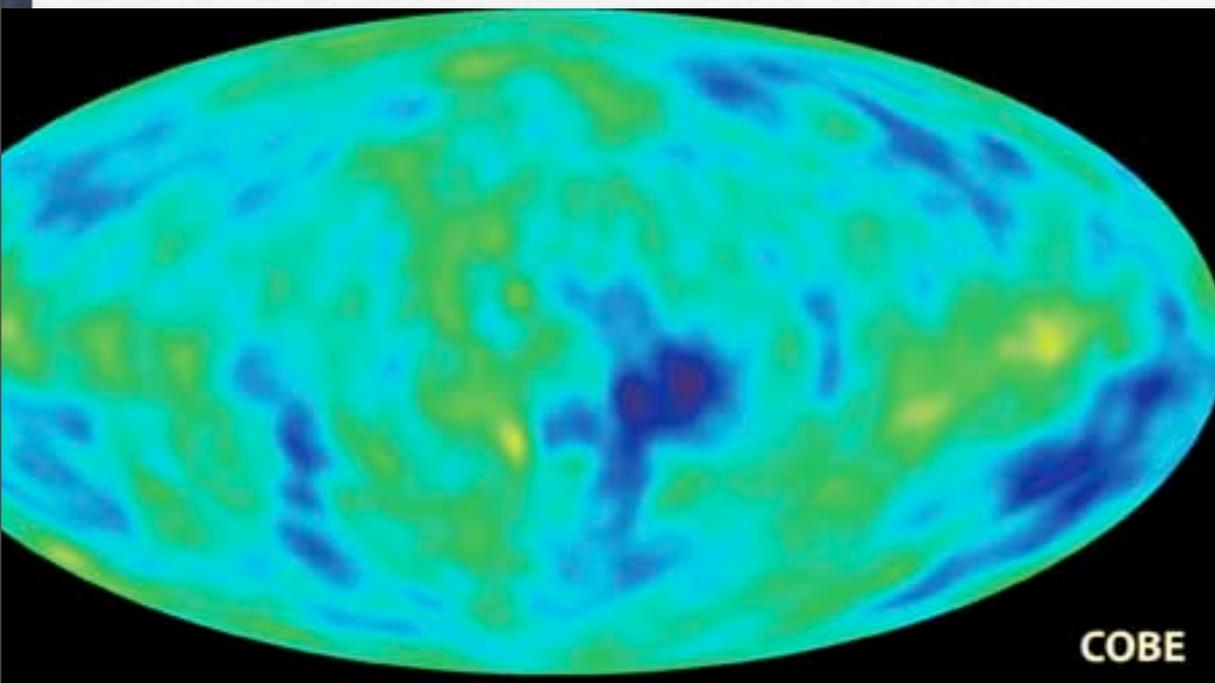
Hubble則の精密測定

3 K揺らぎの測定



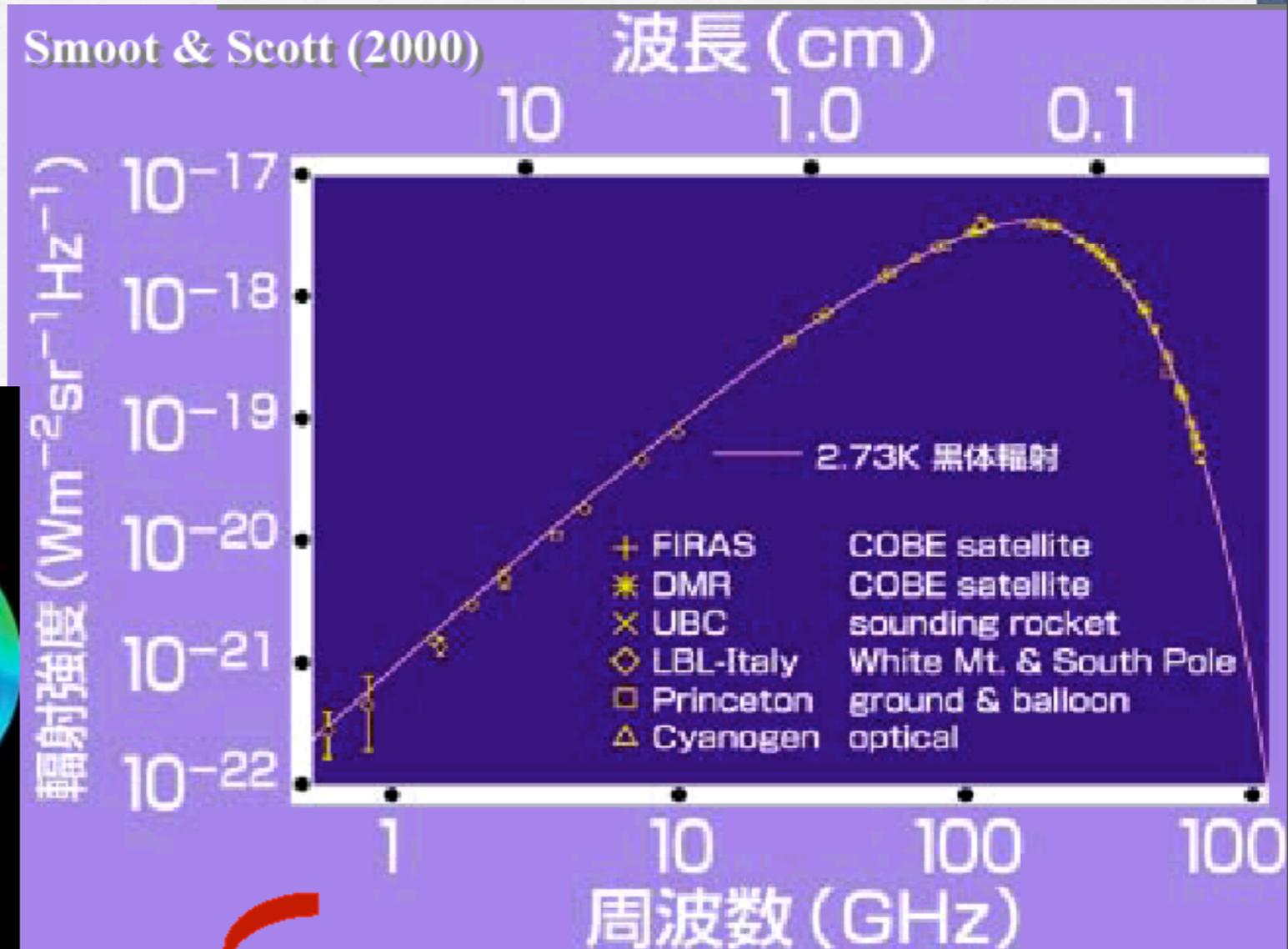
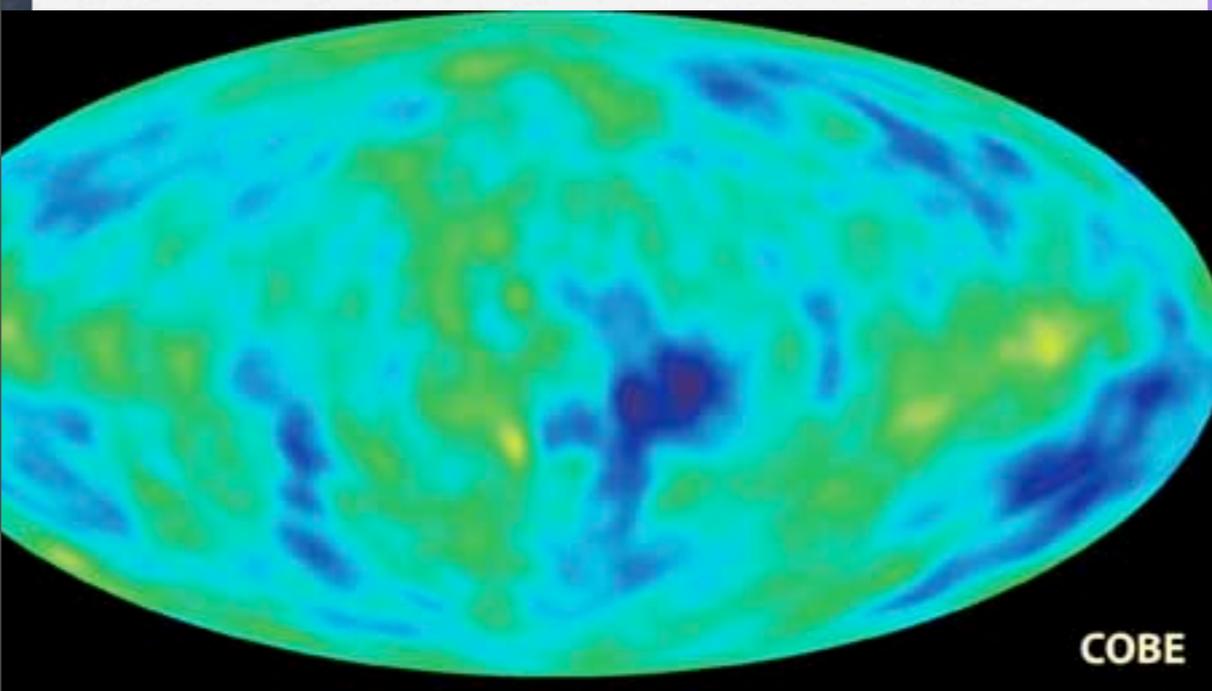
CMB: 3K放射

- Cosmic Microwave Background
- 宇宙のあらゆる方向から等方的
- 等強度の光
- Plank分布



CMB: 3K放射

- Cosmic Microwave Background
- 宇宙のあらゆる方向から等方的
- 等強度の光
- Plank分布



光子の温度

$$\square E_\gamma = h\nu = hc/\lambda = kT$$

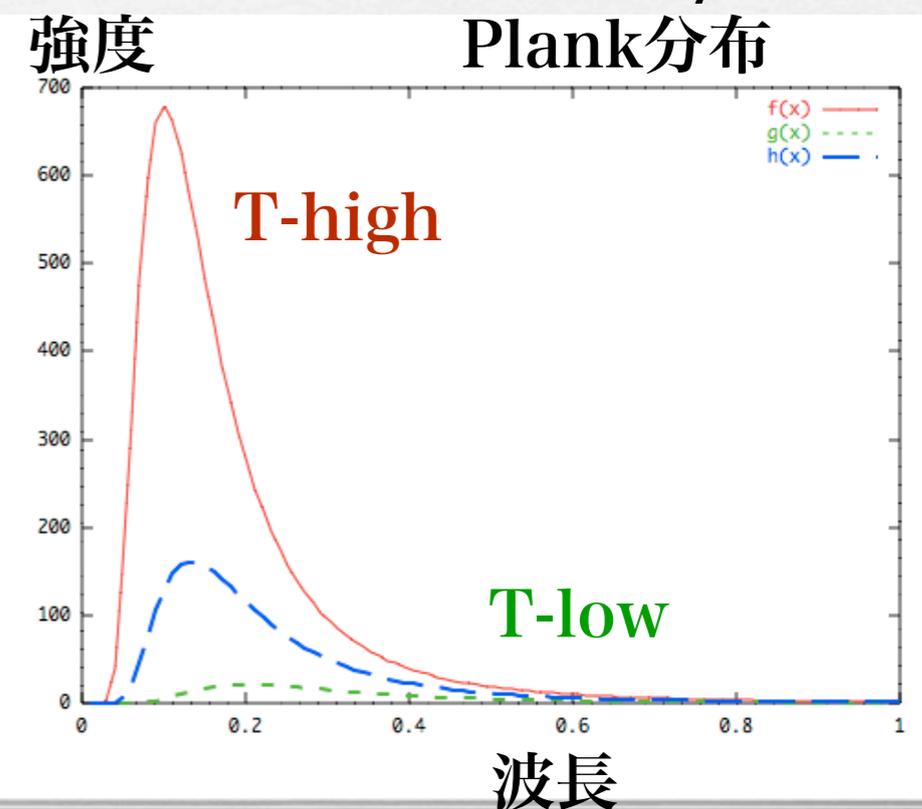
□ 光子のエネルギーの平均値みたいなもの

□ 分布する：プランク分布

□ $E=kT$: k Boltzmann 定数 $8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

□ 高温： T 大、 E 大、短波長

□ 低温： T 小、 E 小、長波長



CMB測定

□ Penzias & Wilson

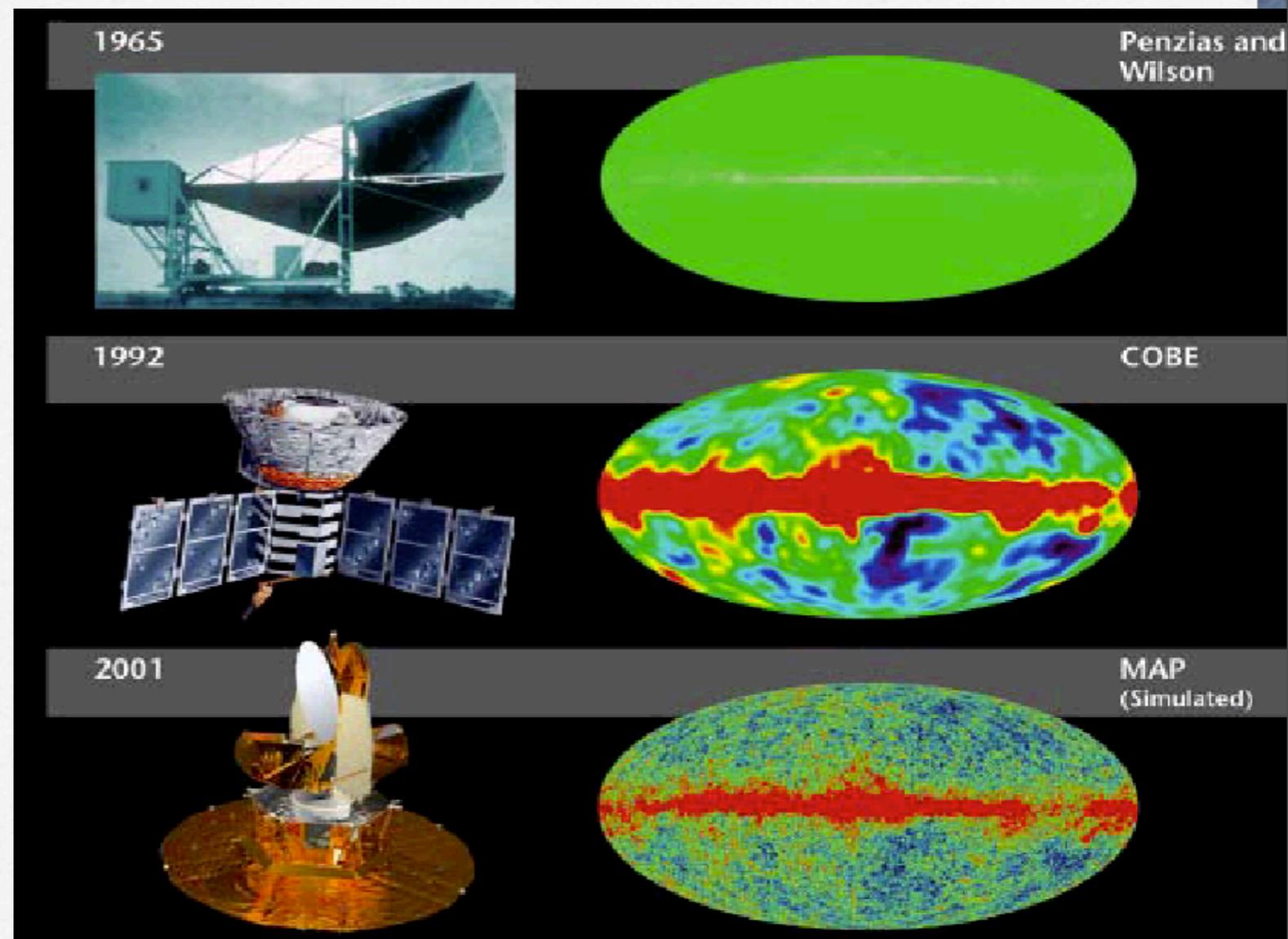
□ CMB 発見

□ COBE

□ 10^{-4} 精度

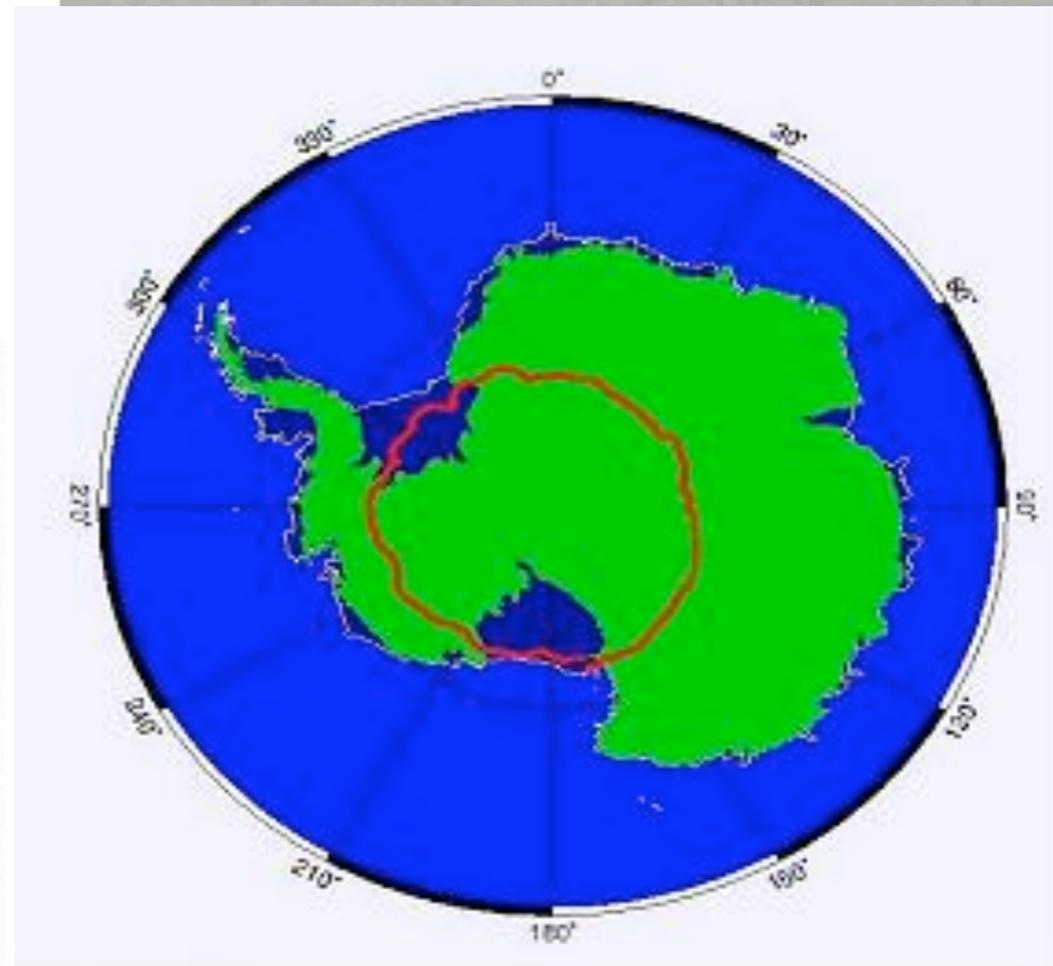
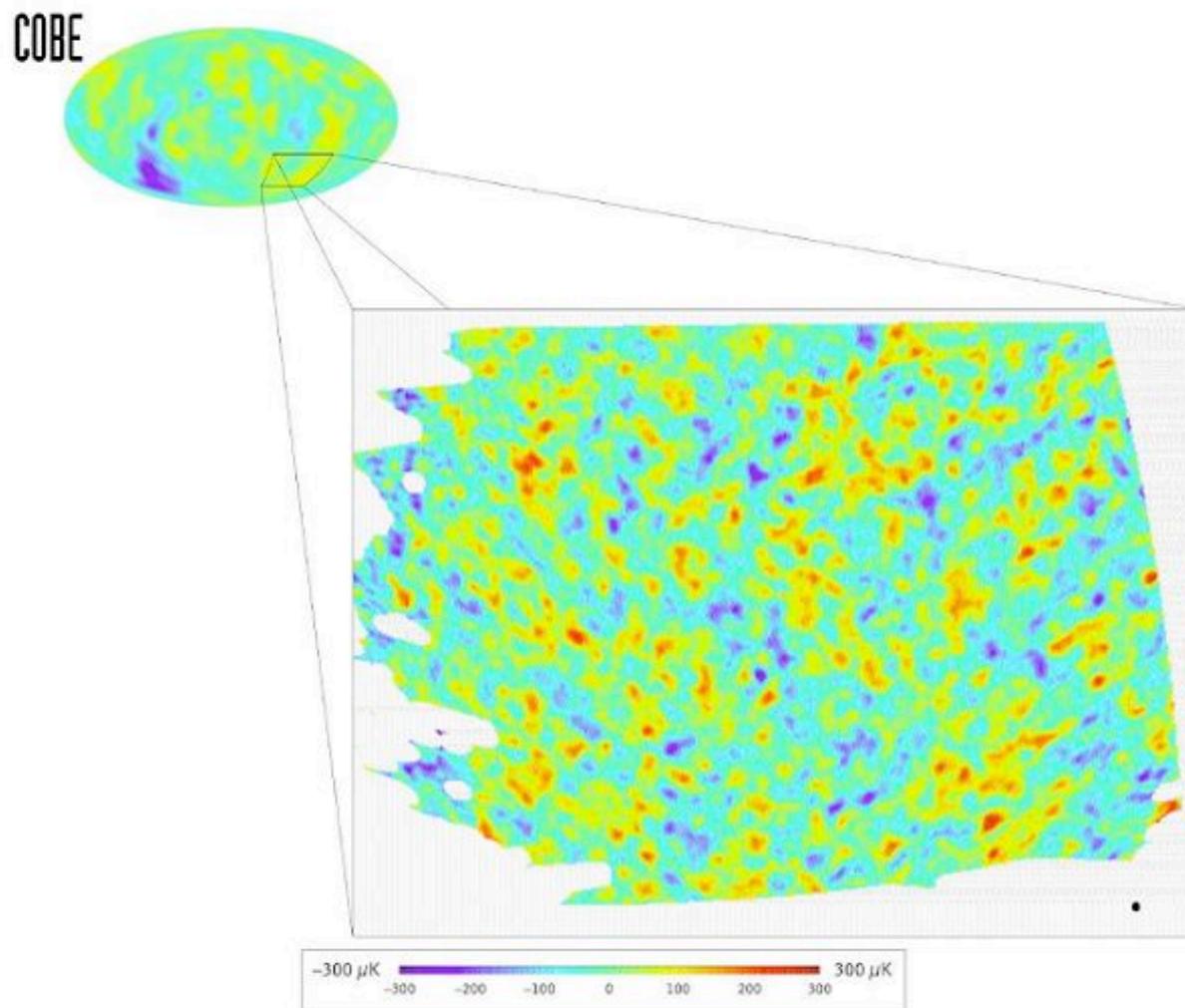
□ (W)MAP

□ 場所依存



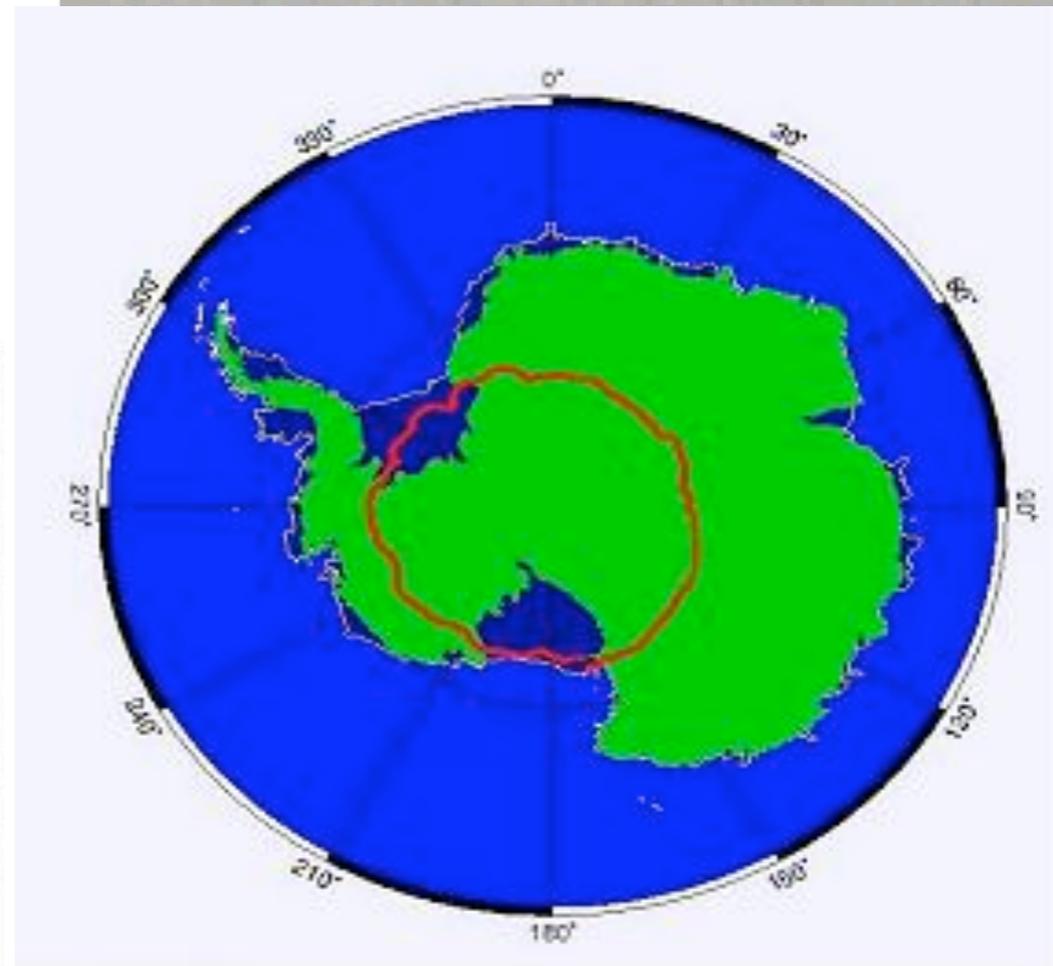
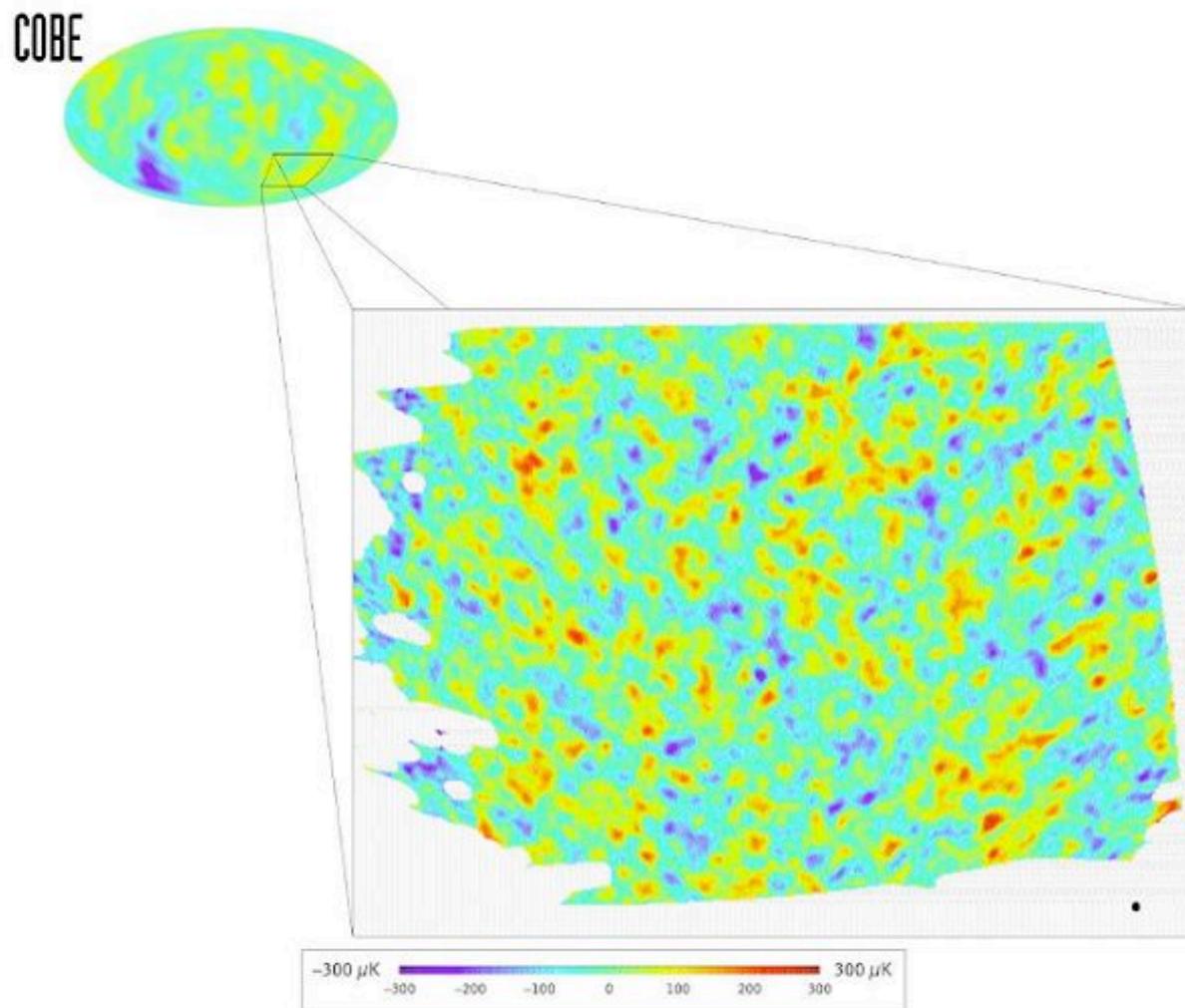
Ω の観測

- Boomerang
- 南極
- バルーン実験



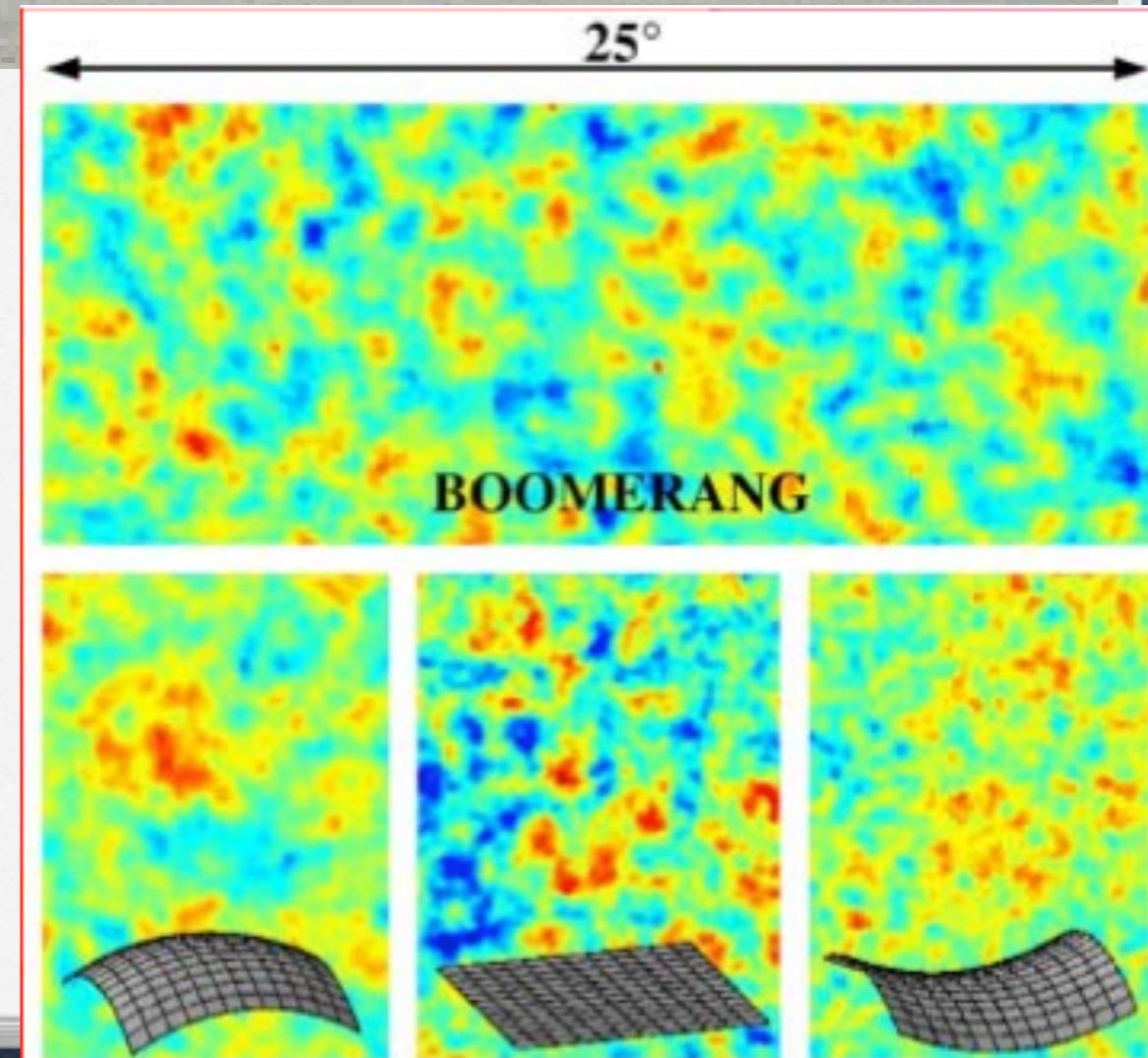
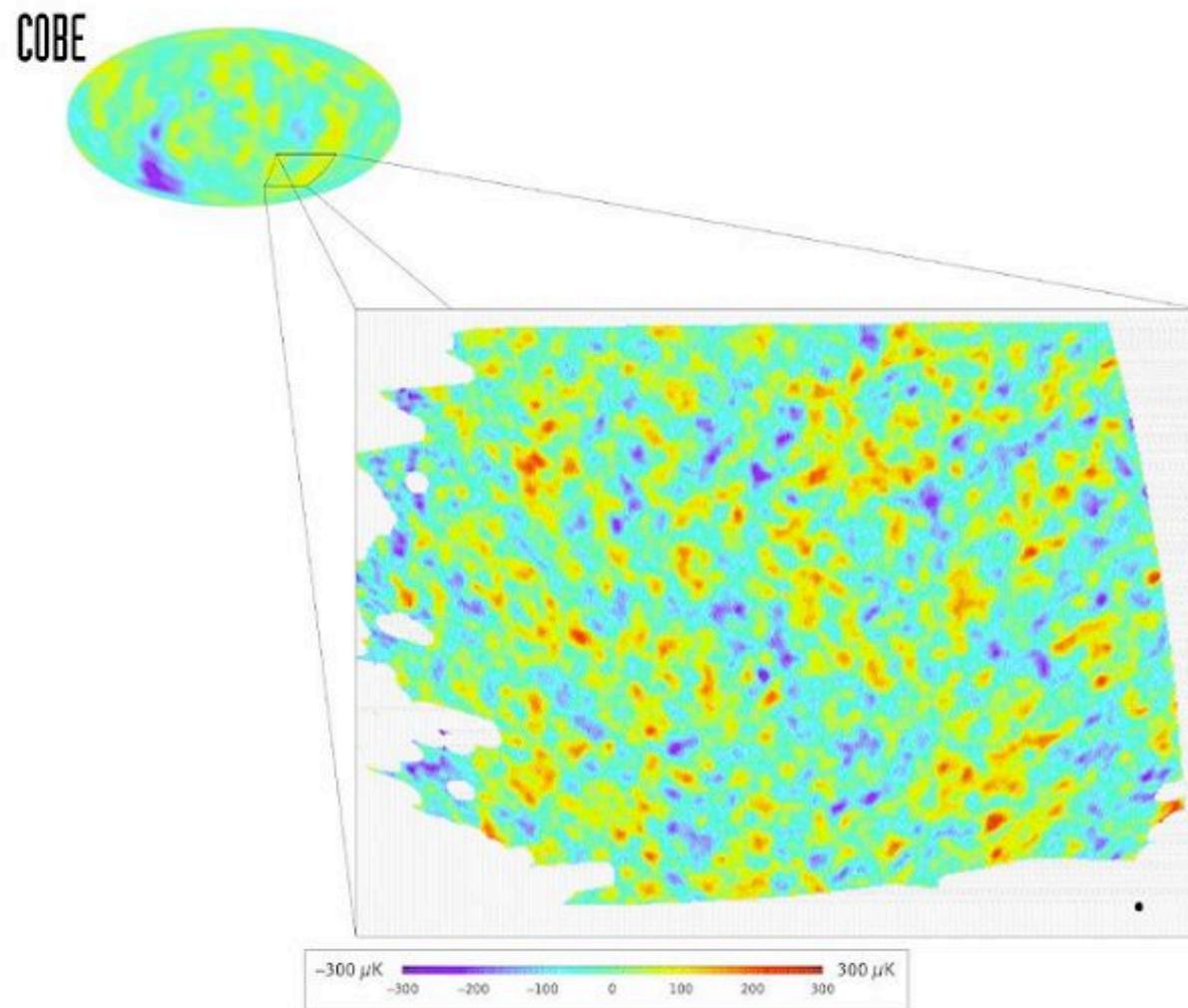
Ω の観測

- Boomerang
- 南極
- バルーン実験



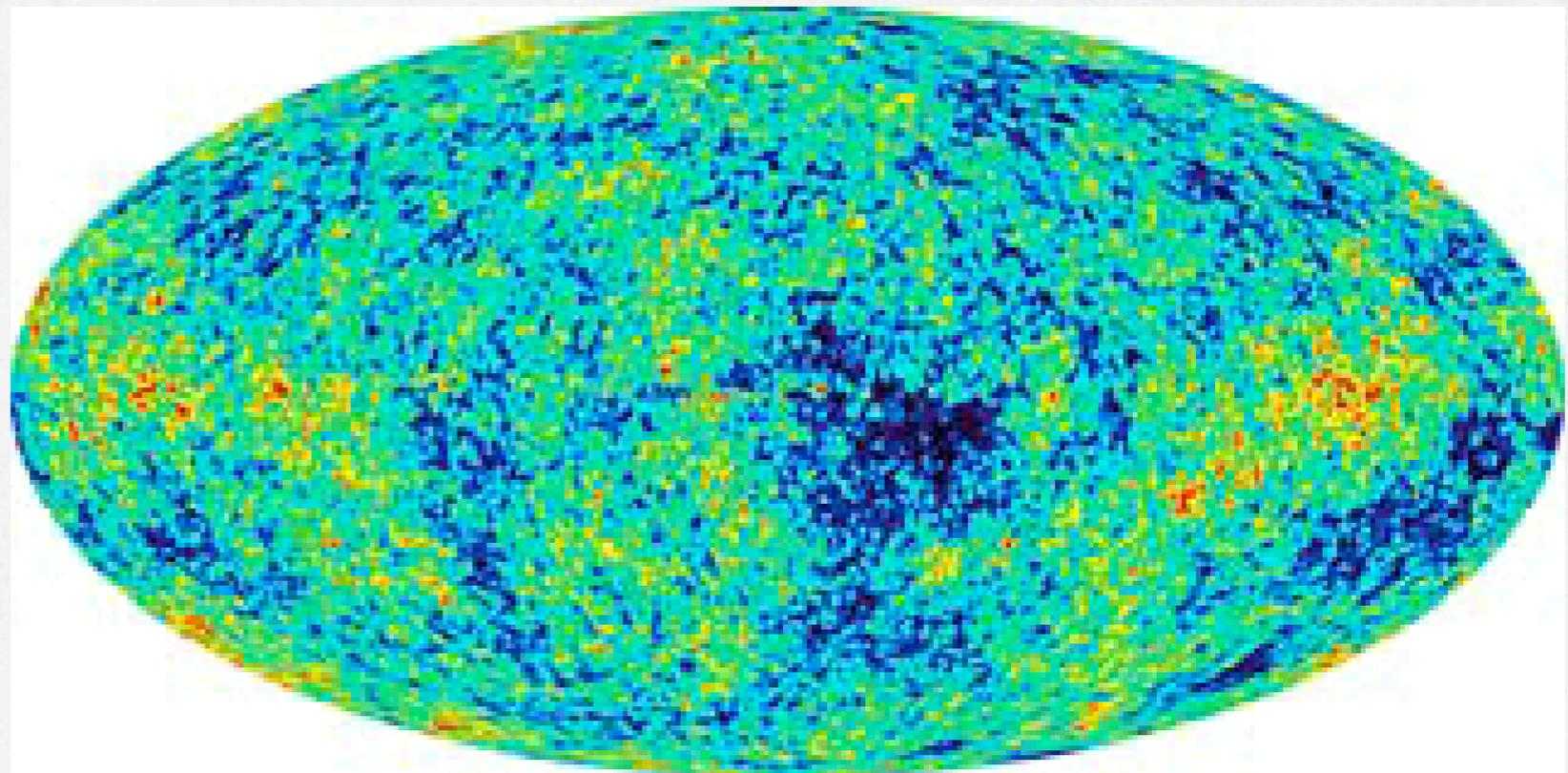
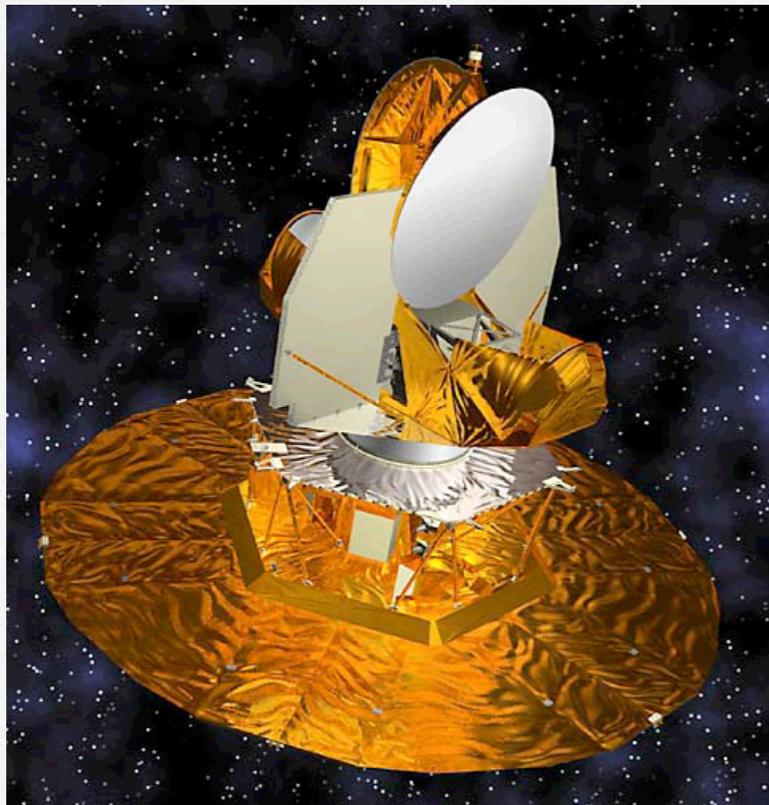
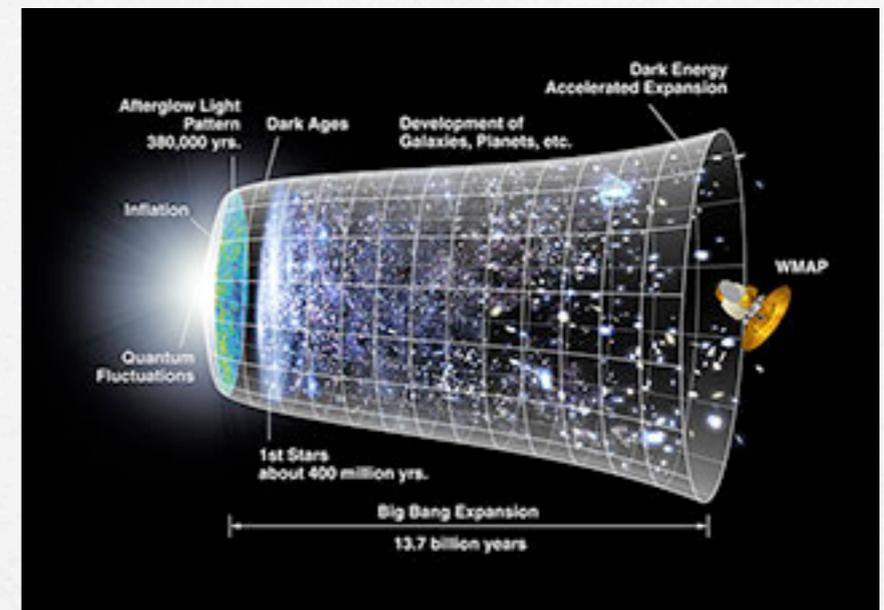
Ω の観測

- Boomerang
- 南極
- バルーン実験



Ω の観測 WMAP

- 全天の温度揺らぎ観測
- 宇宙開闢 38万年の世界
- 銀河の種
- 高精度角度分解能

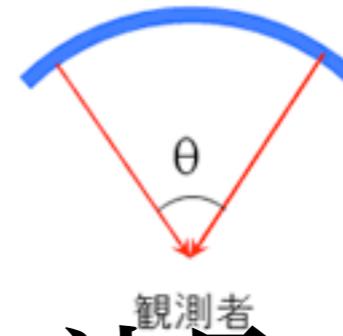


WMAP

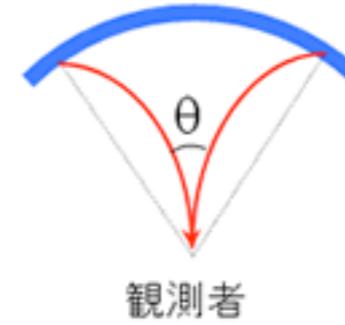
<http://www.astroarts.jp/news/2008/03/17wmap/spectr>

宇宙の晴れ上がり定在波の波長

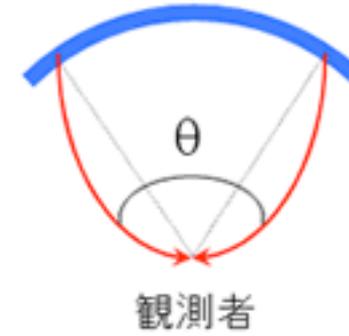
平坦な宇宙
三角形の内角の和180度
晴れ上がりの時期



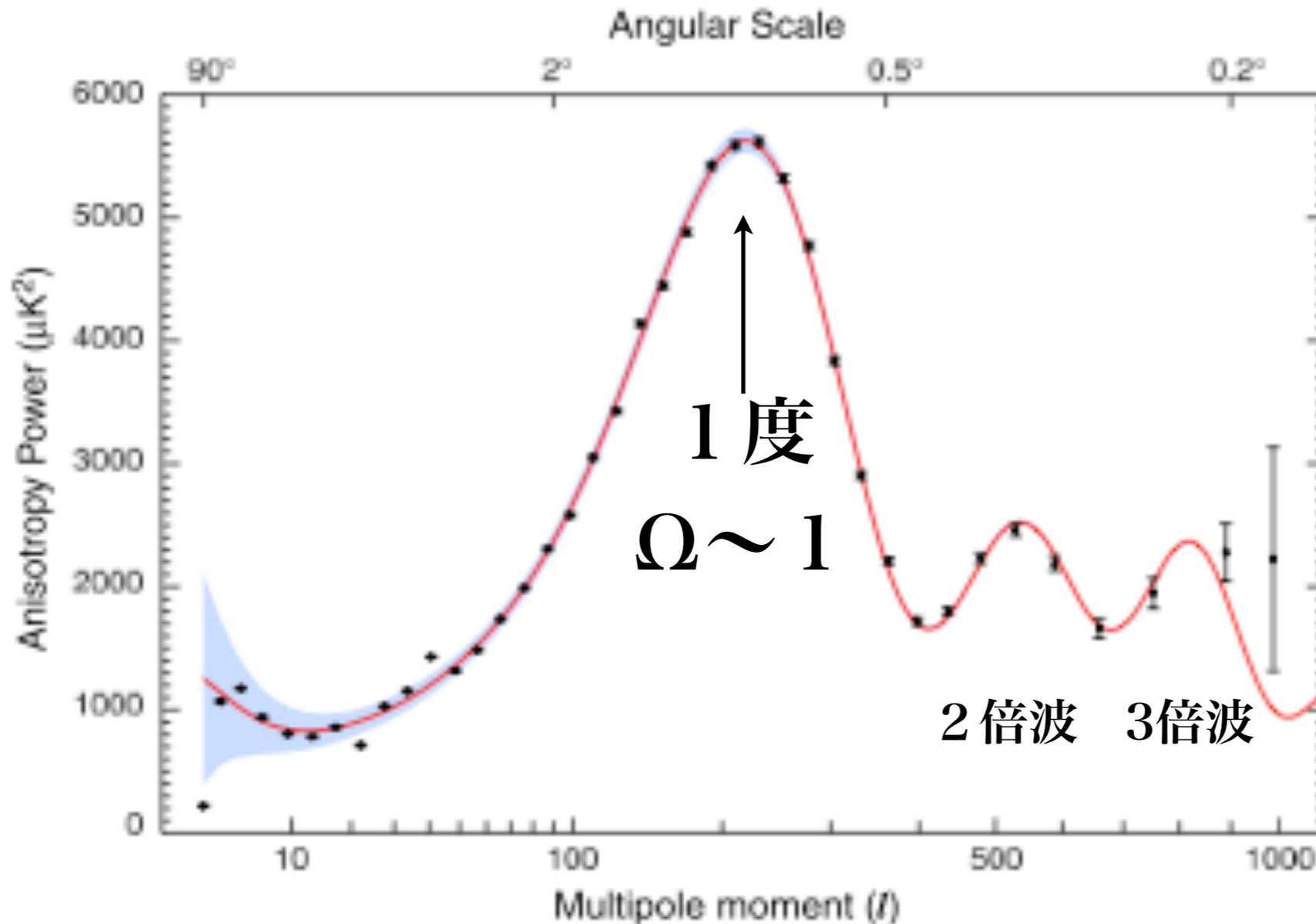
開いた宇宙
内角の和 < 180度



閉じた宇宙
内角の和 > 180度



$l \propto 1/\theta$



宇宙項 λ

$$\Omega \sim 1$$

$$\Omega = \Omega_B + \Omega_\lambda$$

$$\begin{aligned} \Omega_B &\sim \Omega_{DM} + \Omega_M \\ &= 0.23 + 0.04 \end{aligned}$$

$$\Omega_\lambda = 1 - \Omega_B = 0.73$$

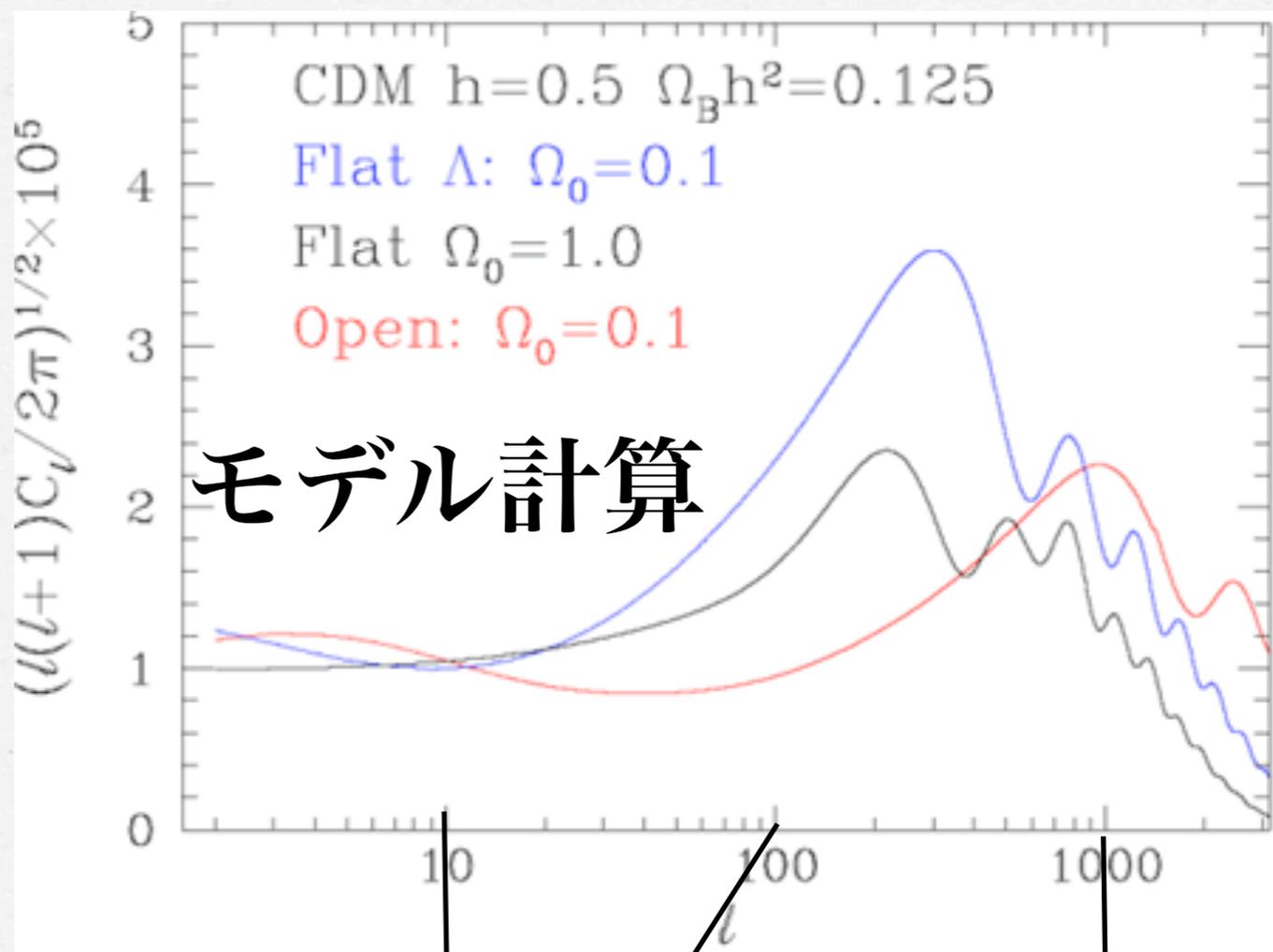
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

空間の曲り成分

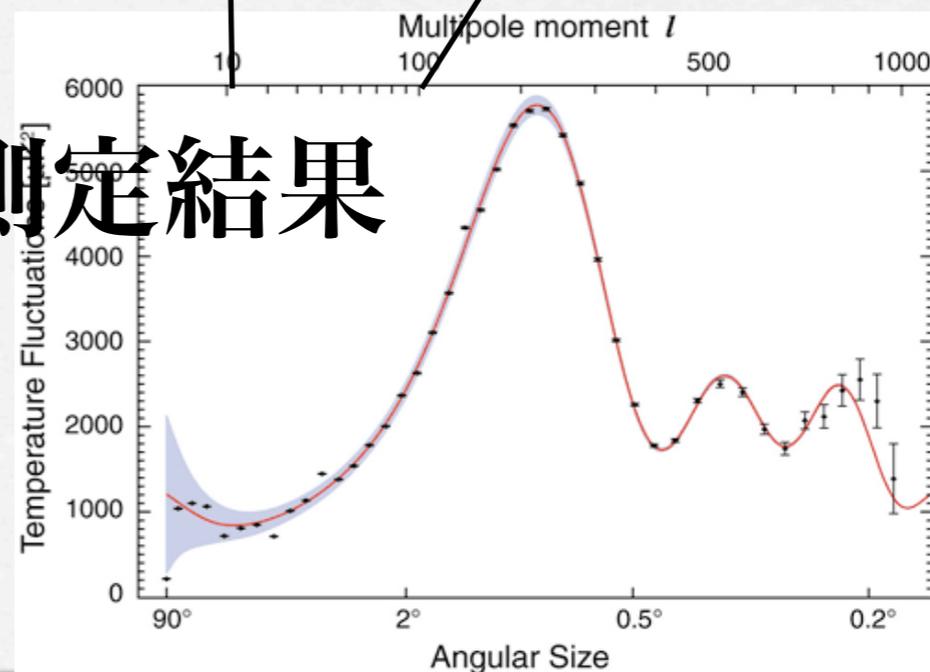
空間の曲率

宇宙項

エネルギー運動量



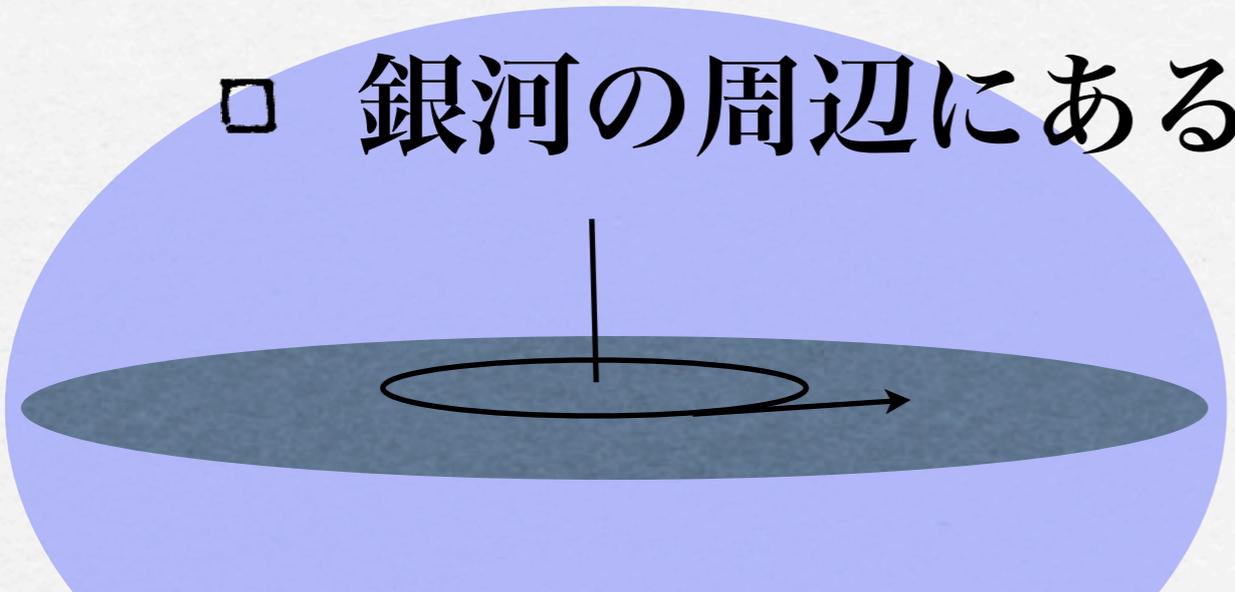
測定結果



ダークマター： $\Omega \sim 0.23$

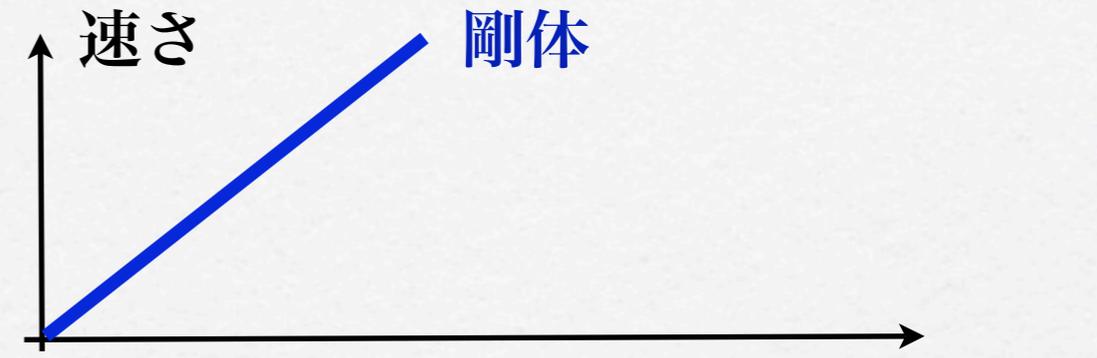
□ 重力を感じる：質量

□ 銀河の周辺にある

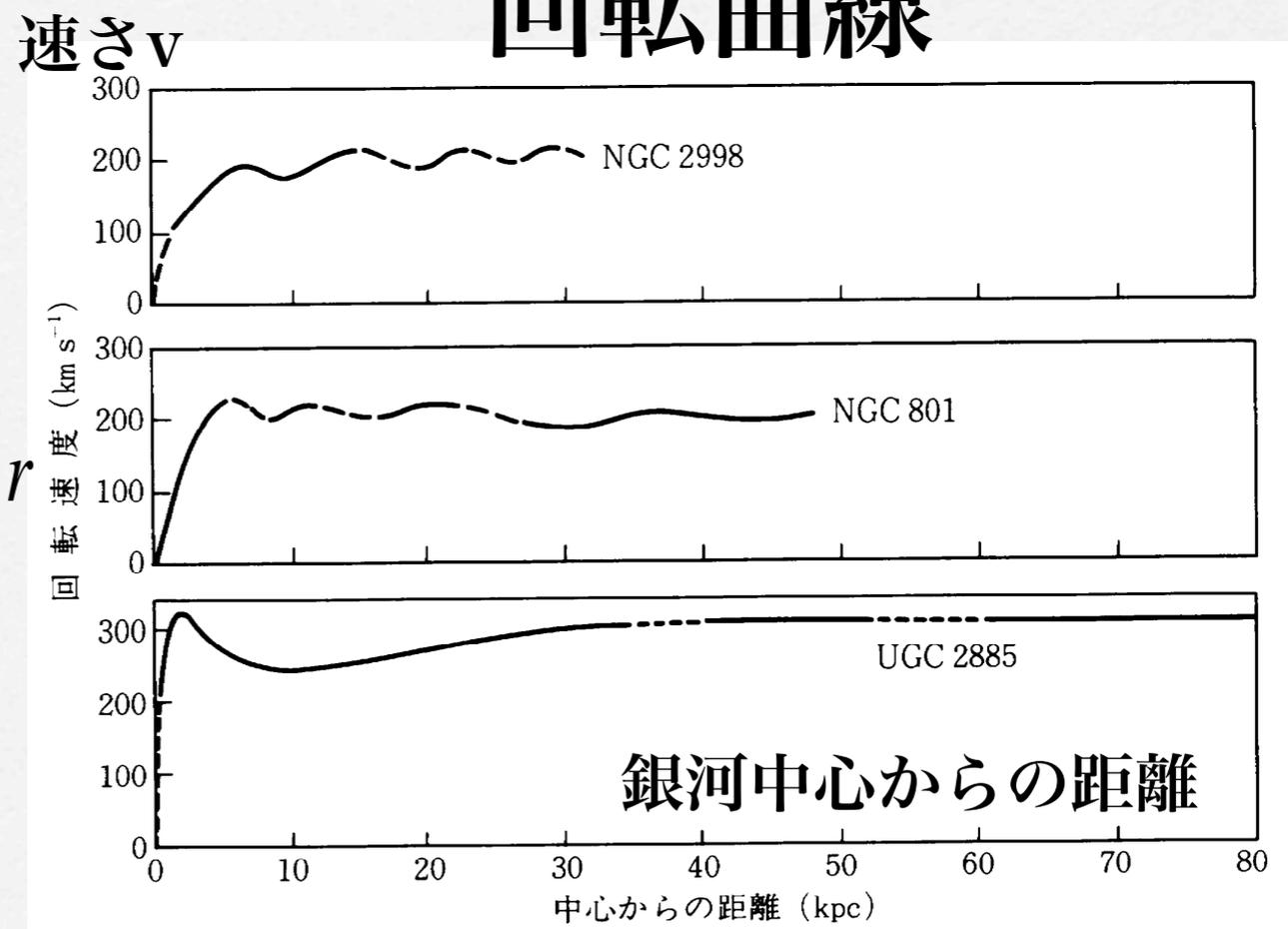


$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \Rightarrow M(r) \propto r$$

Machoではない



回転曲線 中心からの距離

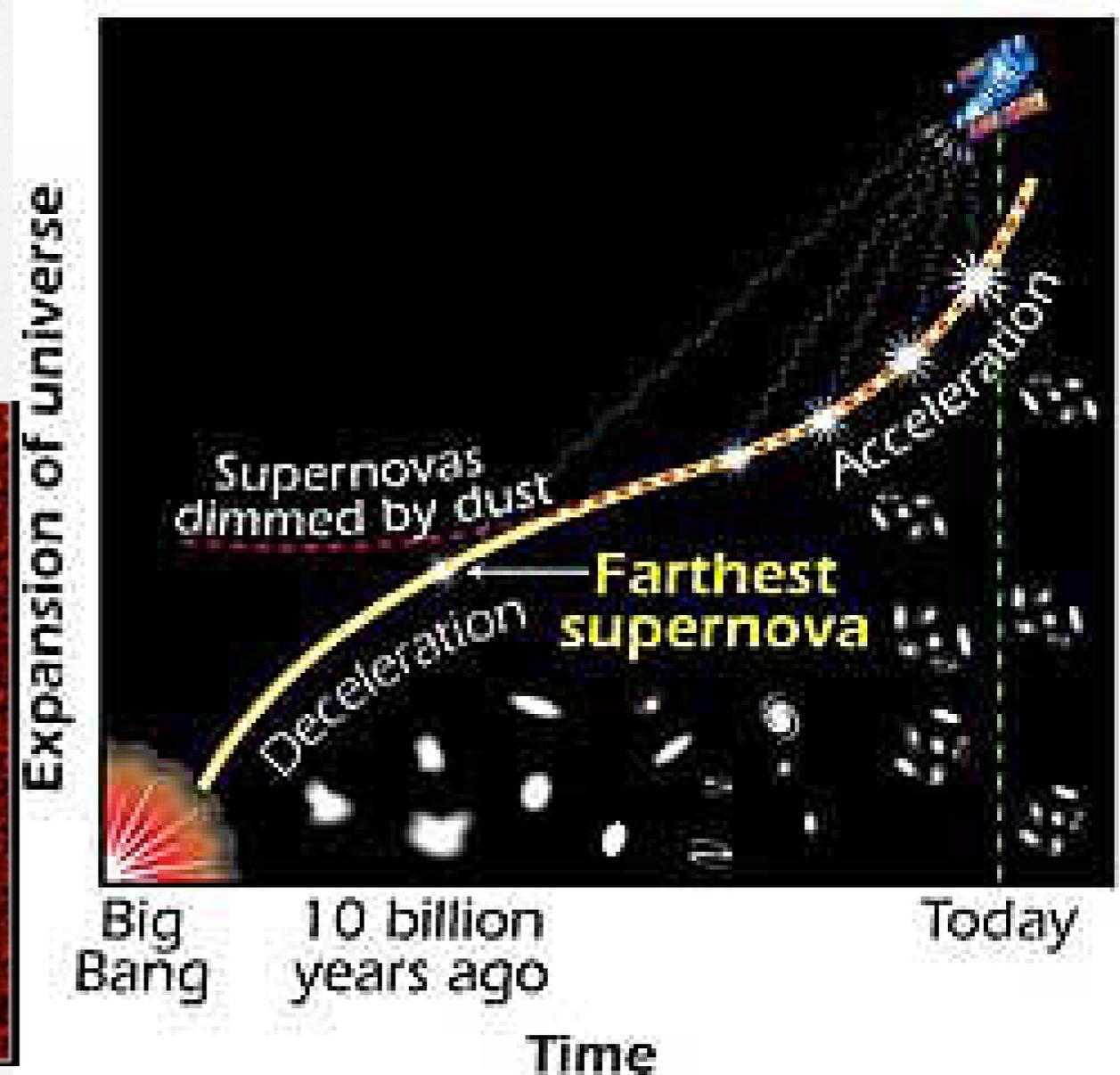
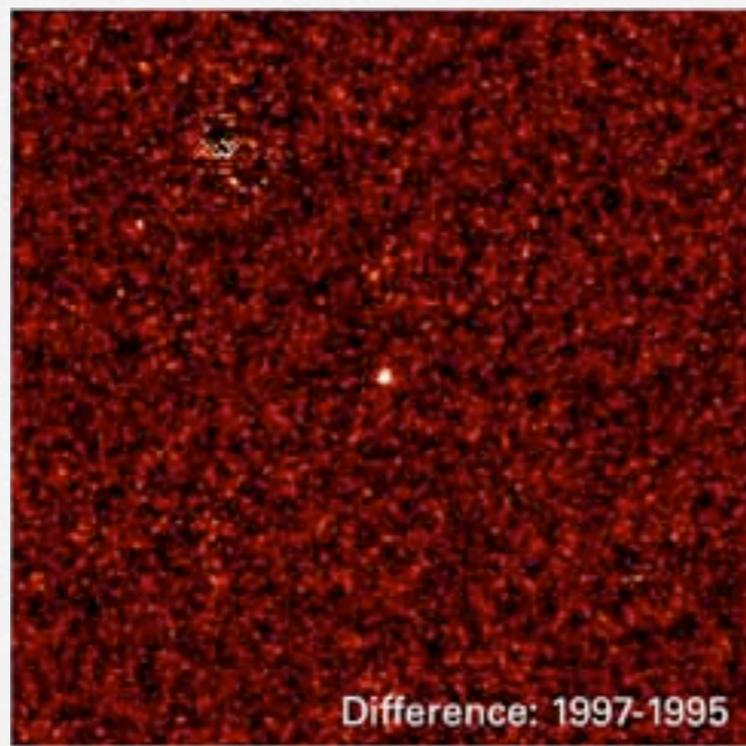


2-2 図 回転曲線 (NGC, UGCはカタログの名前)

ダークエネルギー $\Omega \sim 0.72$

- アインシュタインの宇宙項に相当
- 斥力の原因
- 質量は引力

宇宙項



ダークマター候補

$$\Omega_{DM} \sim 0.23$$

□ 星屑：X MACHO

$$\Omega_{MACHO} \lesssim 0.1 \sim 0.05$$

□ ニュートリノ：

$$\sum \Omega_{\nu} \sim 0.01$$

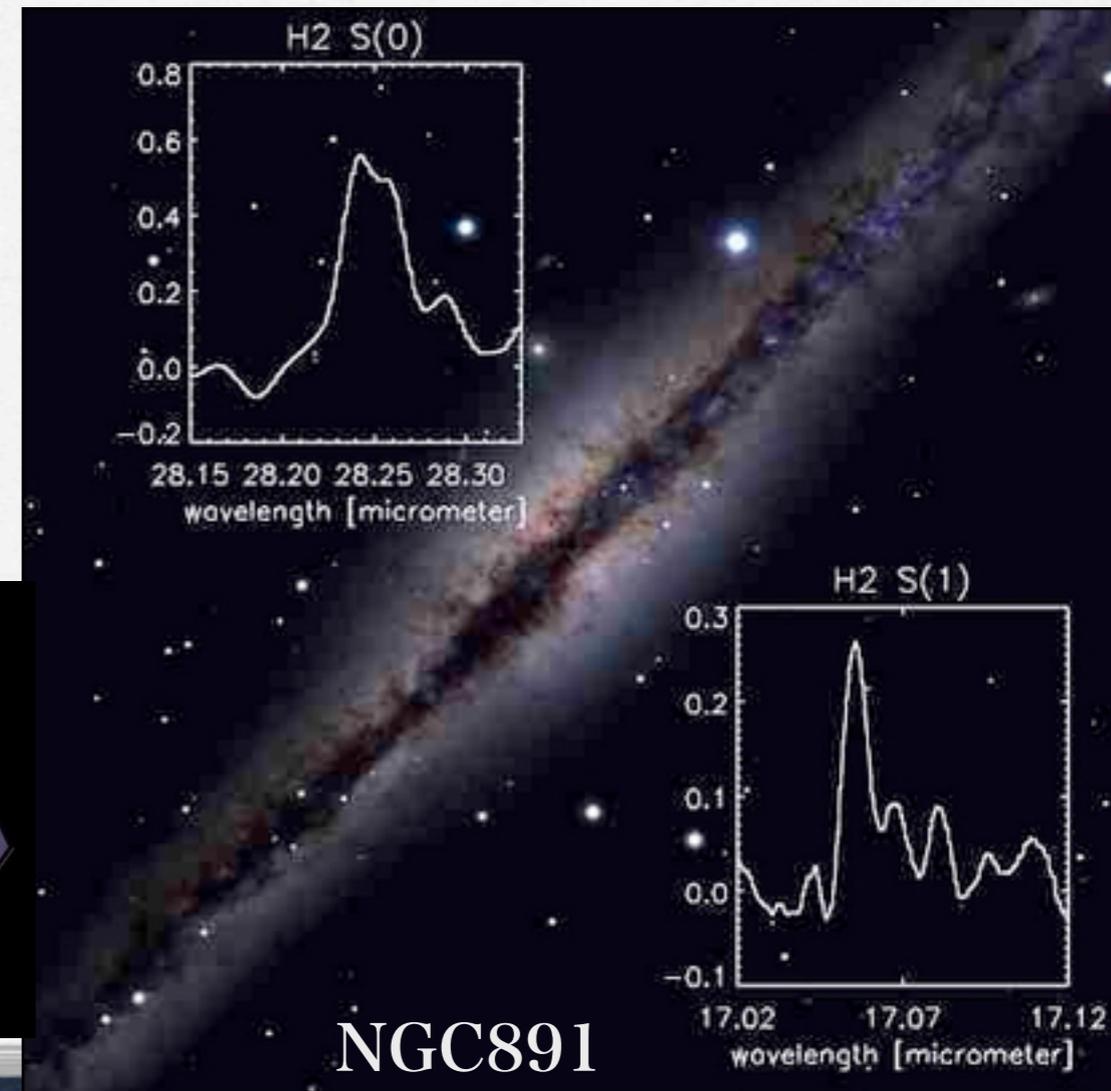
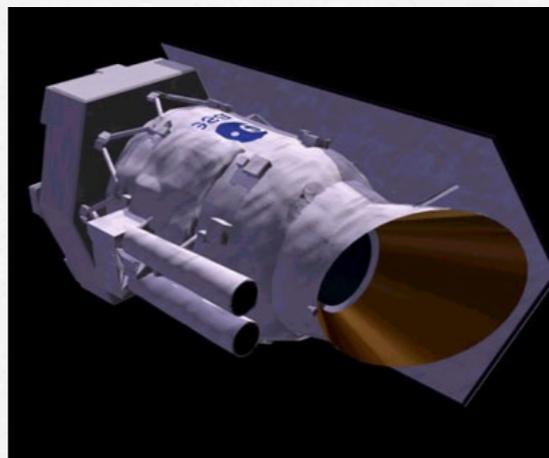
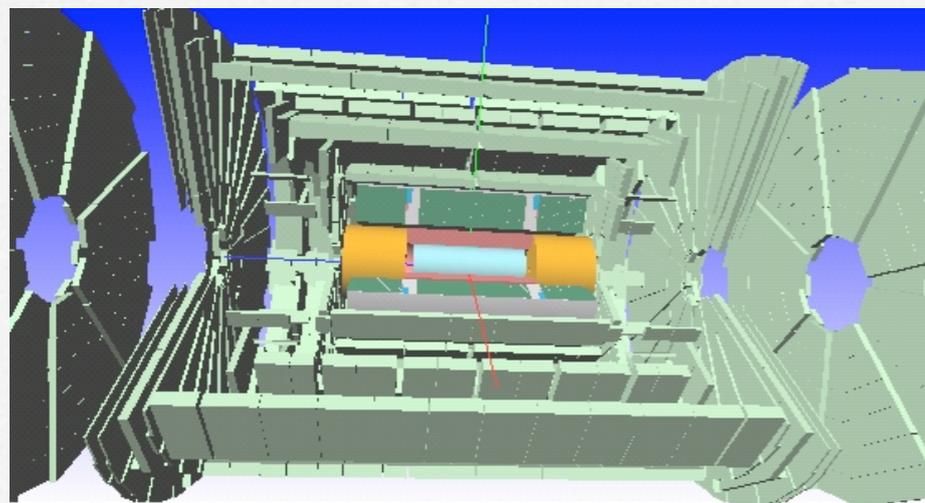
□ 水素原子：ISO

Infrared Space Observatory

$$\Omega_{H_2} = ???$$

□ SUSY-particle

□ LHC実験

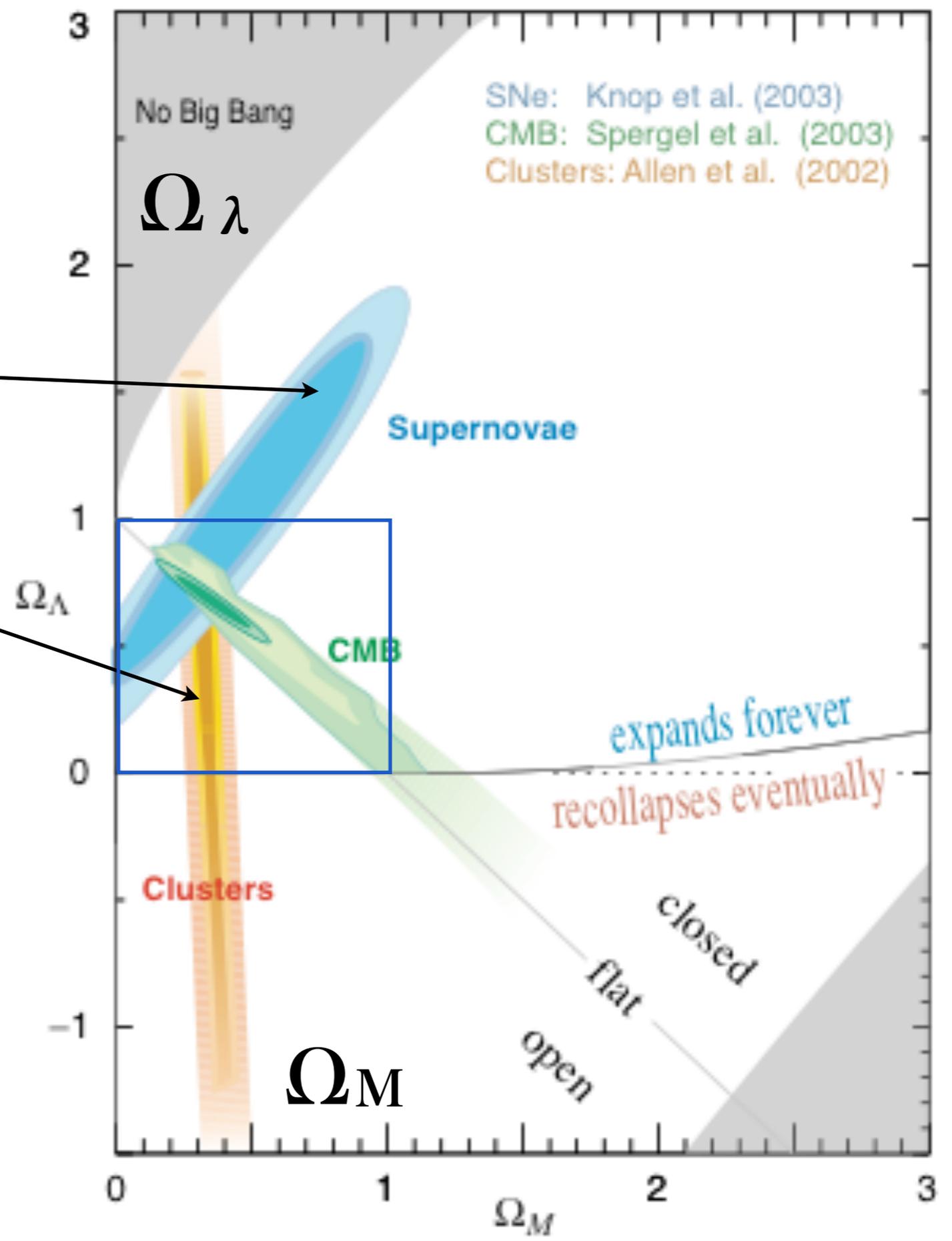
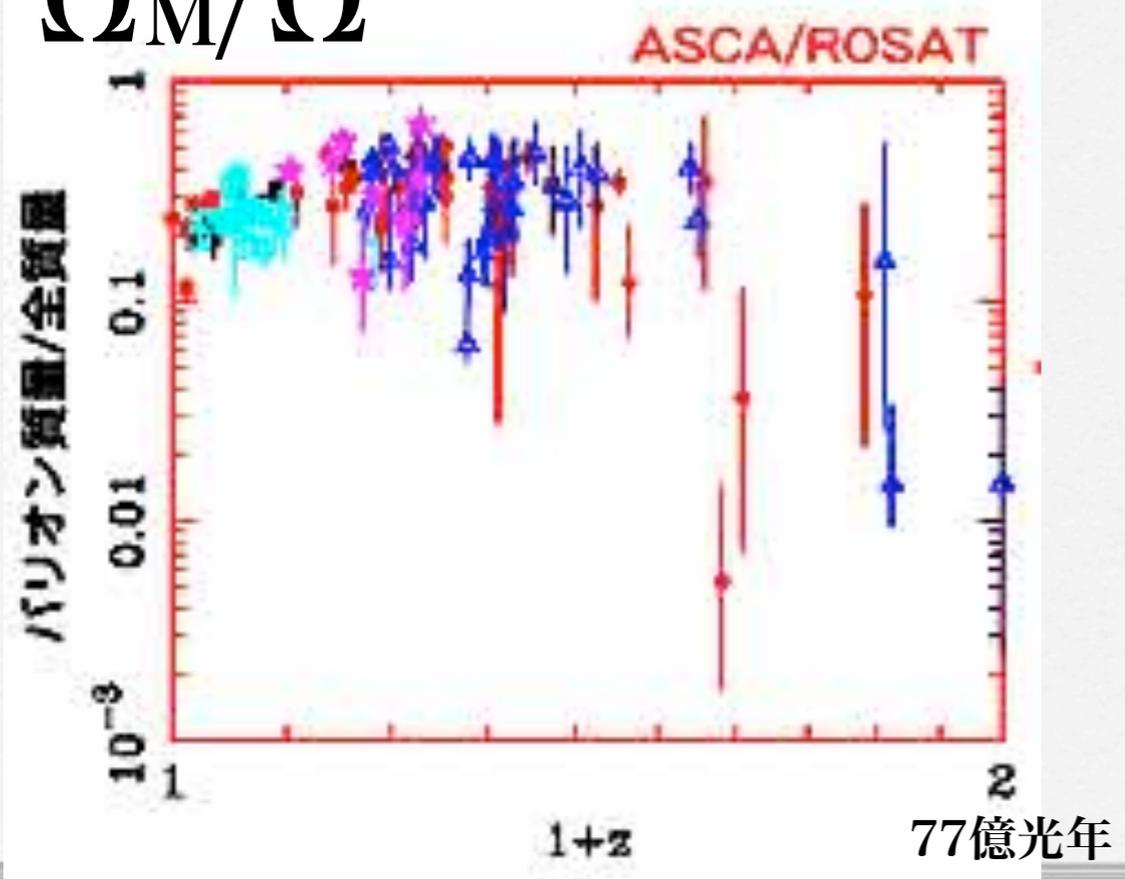


NGC891

$$\Omega = \Omega_\lambda + \Omega_M$$

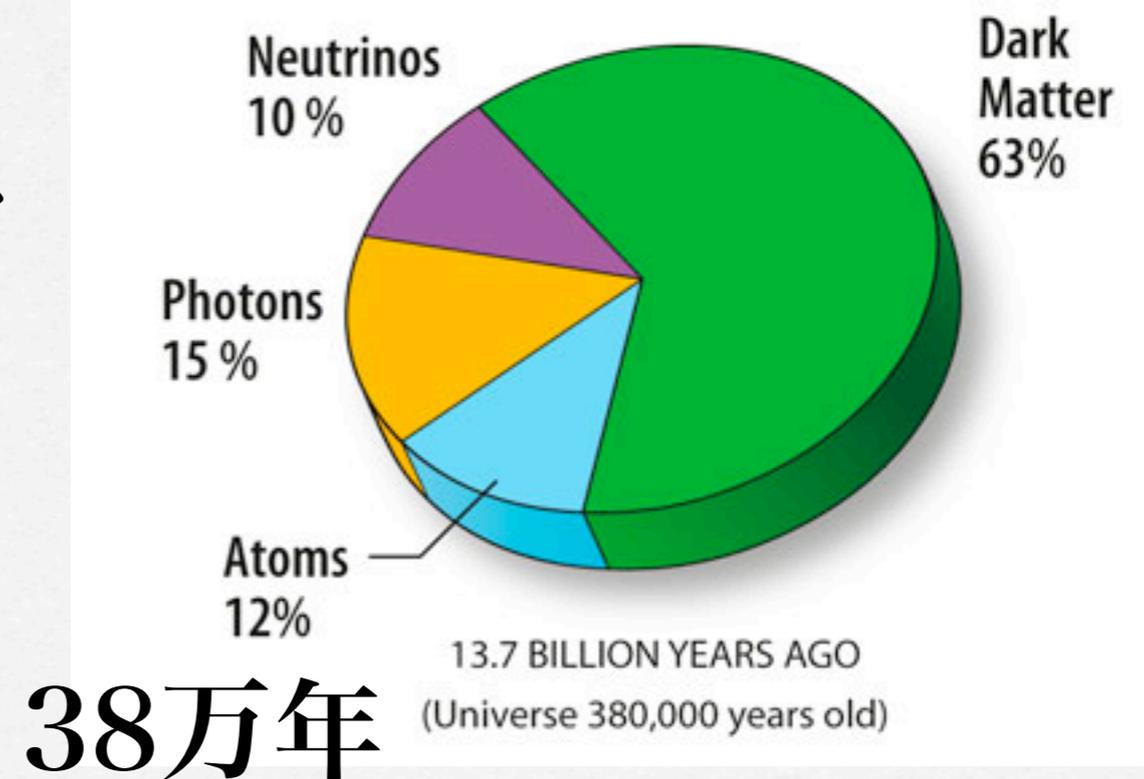
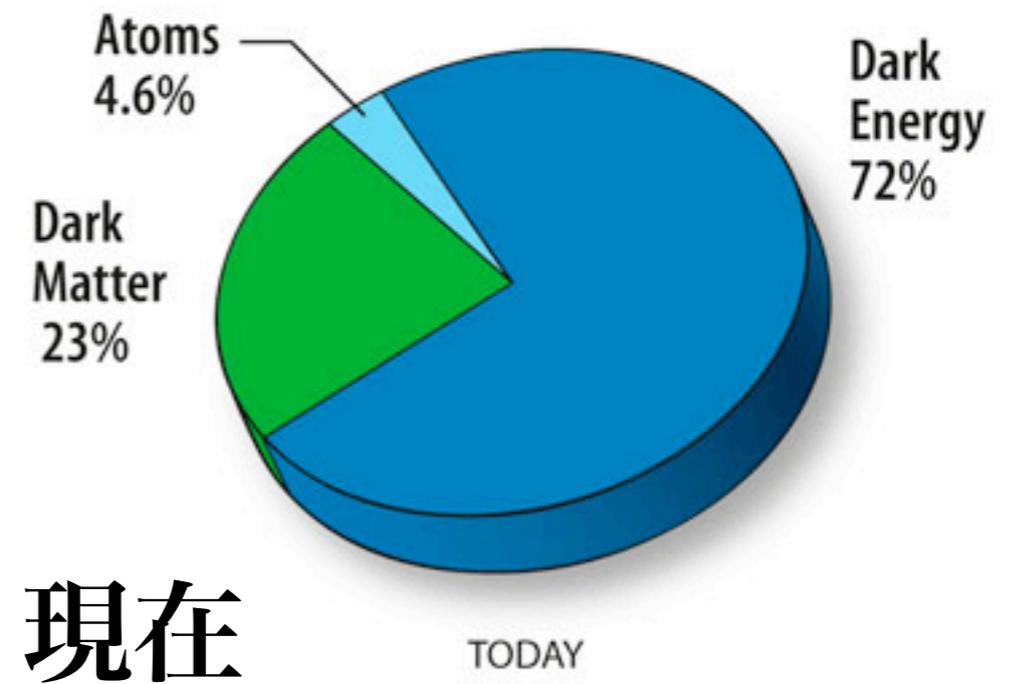
- 加速膨張？
- 超新星データ
- あすか

$$\Omega_M / \Omega$$



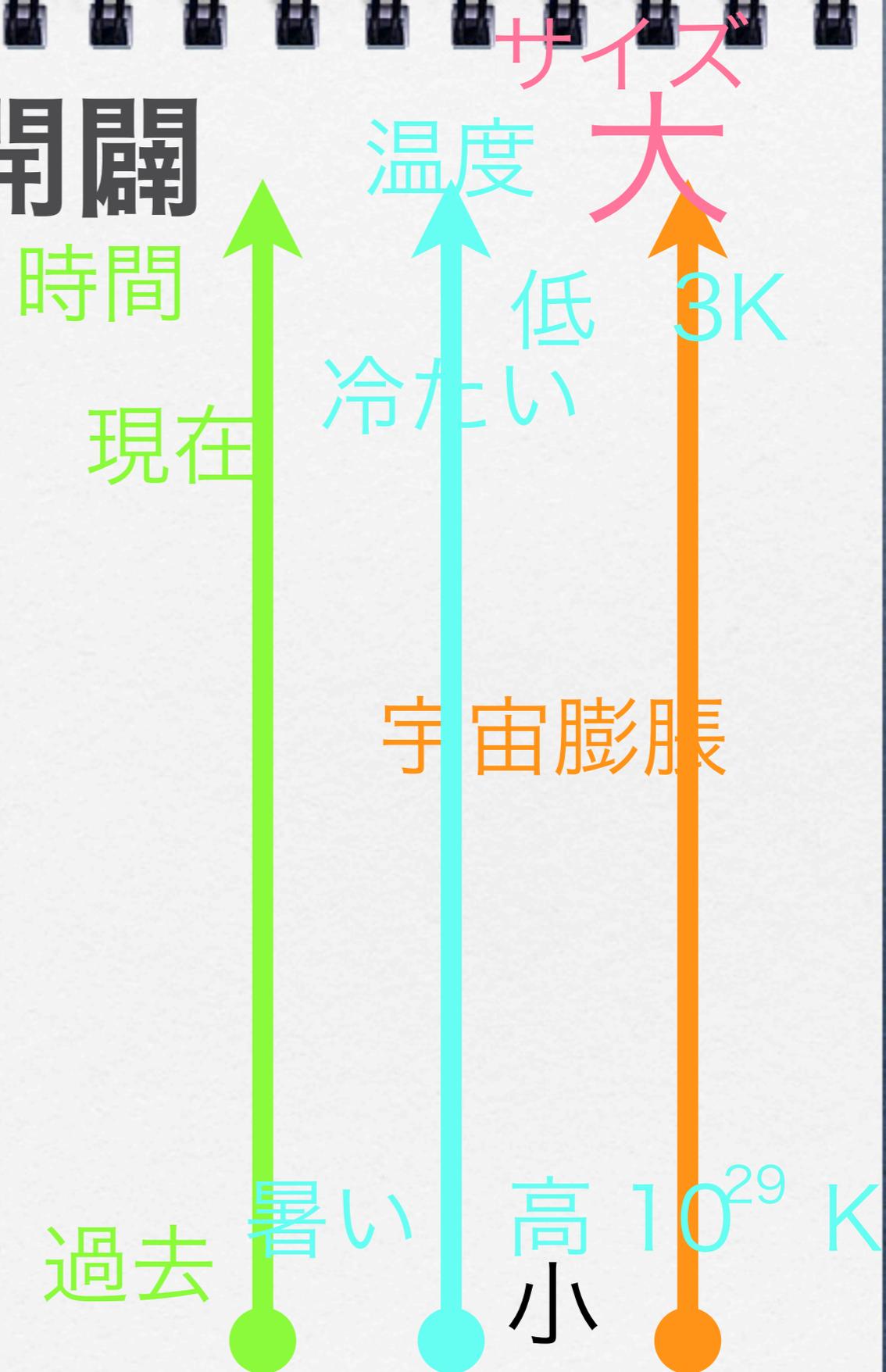
宇宙の組成変化

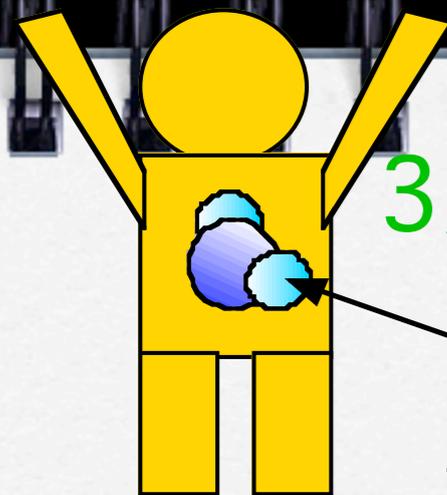
- Dark Matter (ダークマター)
- Dark Energy (ダークエネルギー～宇宙項)



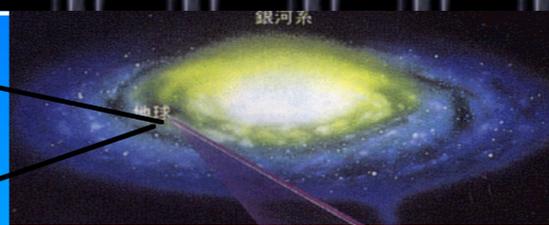
宇宙膨張 < > 宇宙開闢

- 現在から時間を逆まわし
- 膨張 < > 収縮：最後は点
- 宇宙は点から始まった！
- BigBangと呼ぶ
- 始まり：高温、高圧
- 今のすべての宇宙が1点





3度



宇宙の歴史

10¹⁰年
時間

γ

ν

ν

γ

γ

e p

ν

γ

10¹²

10⁺⁴年

10⁴度

↑
温度冷える

γ

e

p

q q

10⁴

e

10⁻⁴秒

10¹³度

ν

γ

γ

ν

γ

q

γ

q

γ

ν

\bar{q}

e

ν

e

γ

10³⁶

\bar{q}

10²⁹度

e

ν

q

ν

\bar{q}

ν

\bar{q}

\bar{e}

\bar{q}

ν

e

q

γ

bh

\bar{q}

\bar{e}

\bar{q}

ν

ν

q

γ

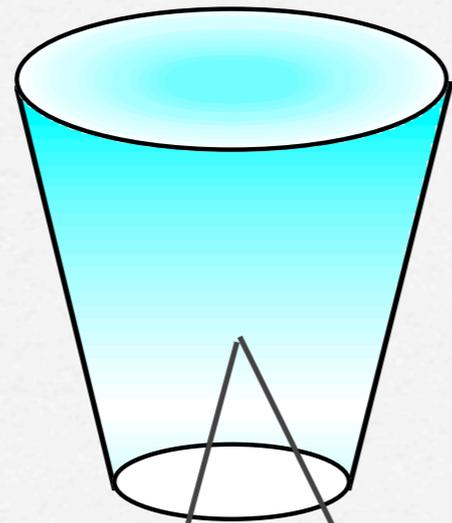
ビッグバン

過去

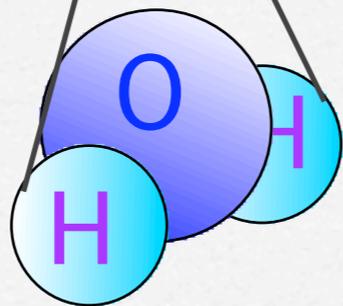
温度は状態を表す

温度
冷たい

運動エネルギー $\sim kT$

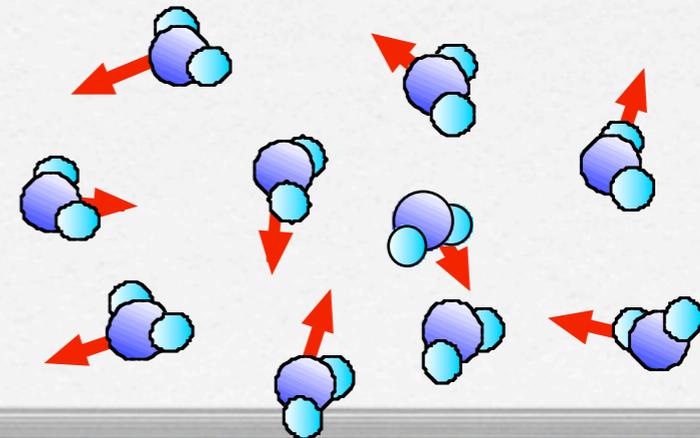
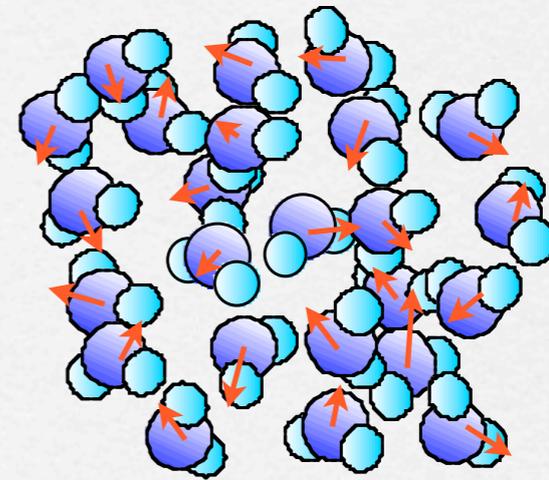
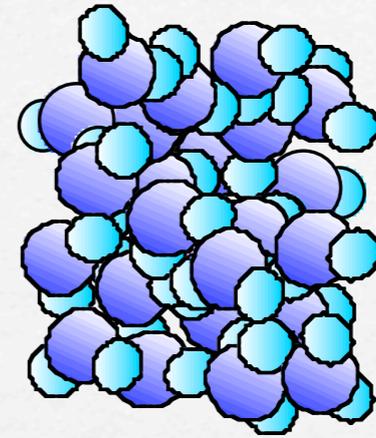


水



水分子

水蒸気



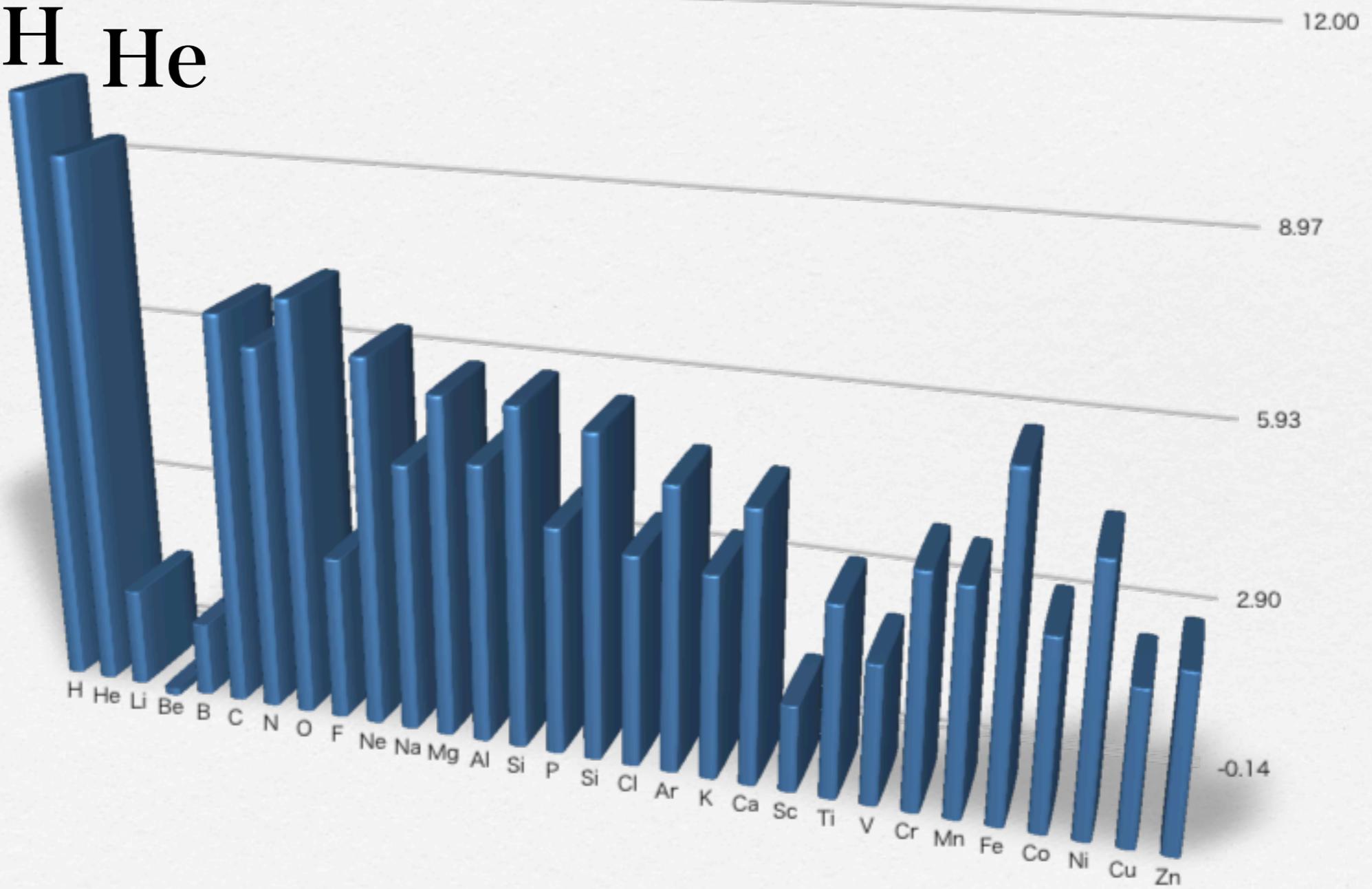
暑い



宇宙の元素組成

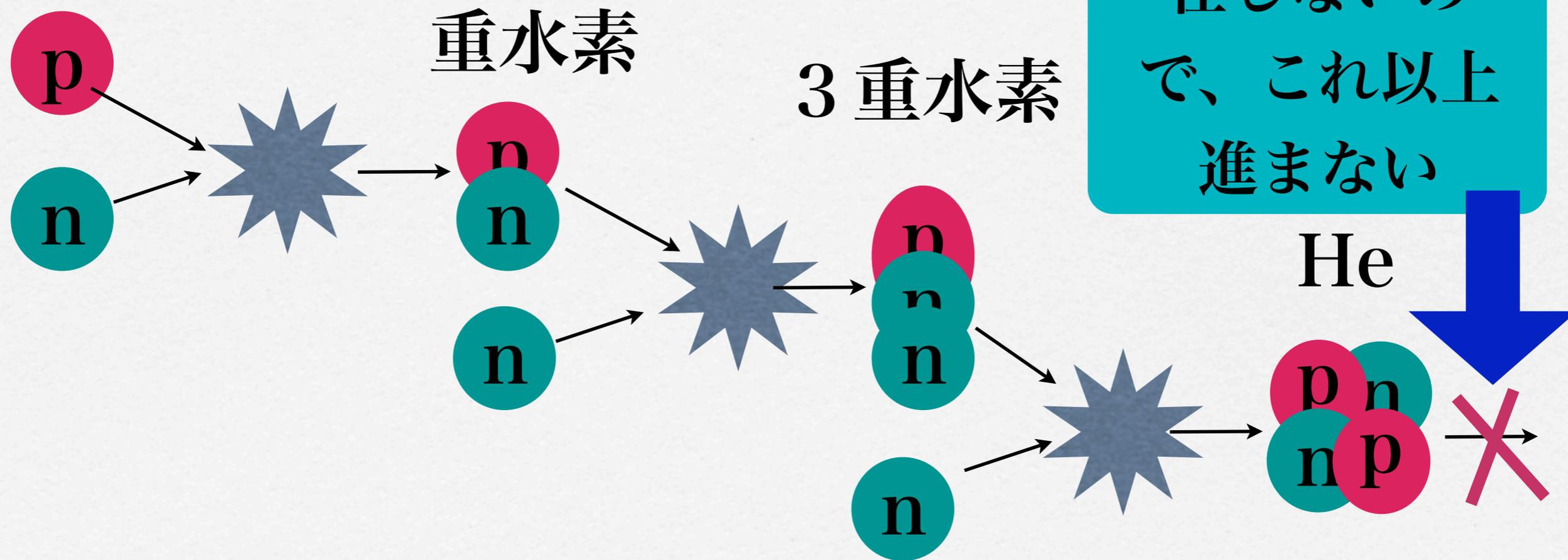
□ He25%

H He



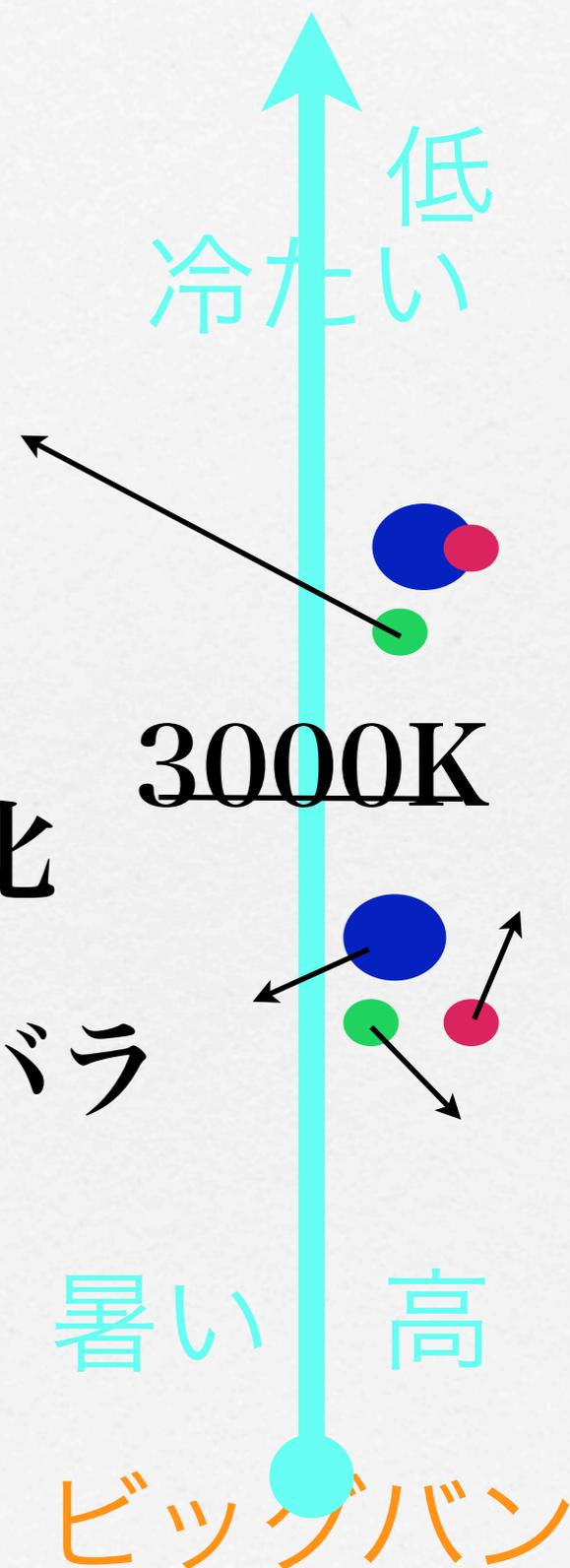
ビッグバン元素合成

ビッグバン 3分以内



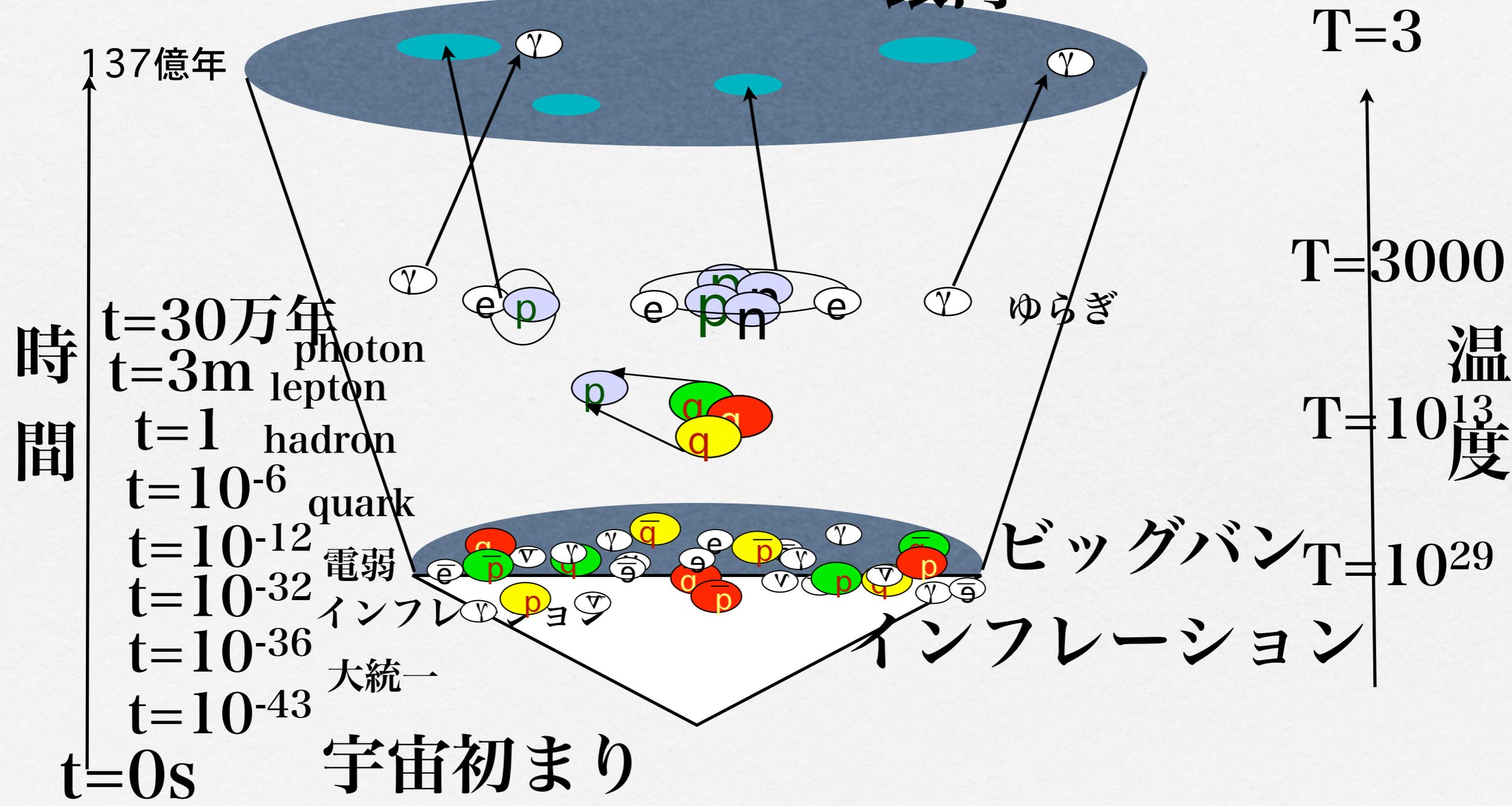
宇宙の進化

- 3000K 宇宙の晴れ渡り
- 陽子と電子の再結合
- 宇宙膨張は低温化、低エネルギー化
- 陽子と電子と光子は高温ではバラバラ
- 低温では水素原子を作って安定化



物質宇宙の進化

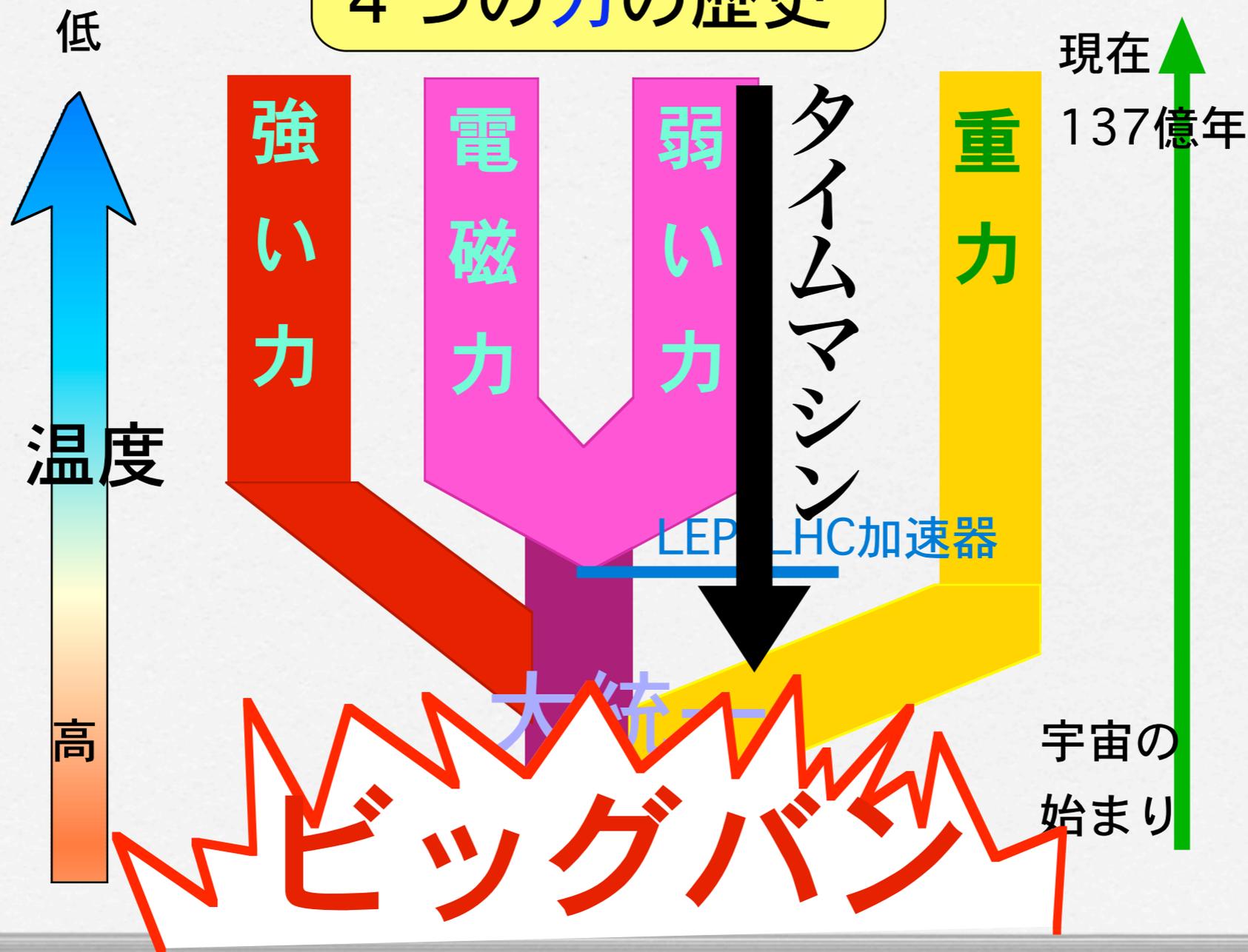
銀河



宇宙の進展と力

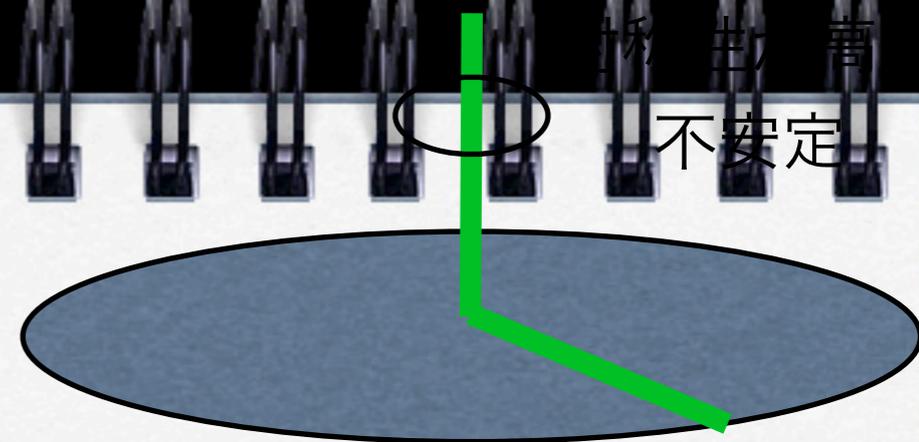
加速器による研究

4つの力の歴史

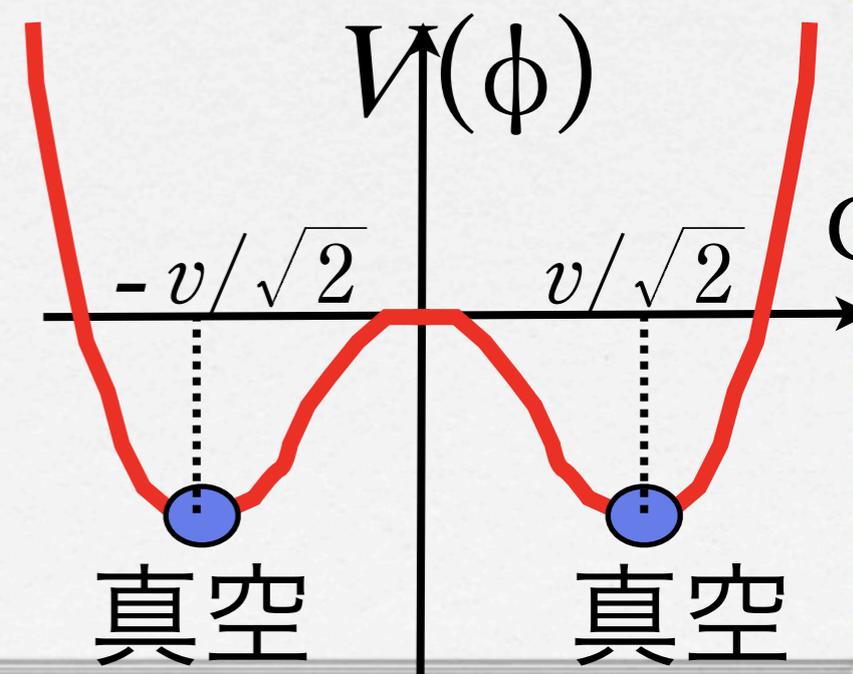
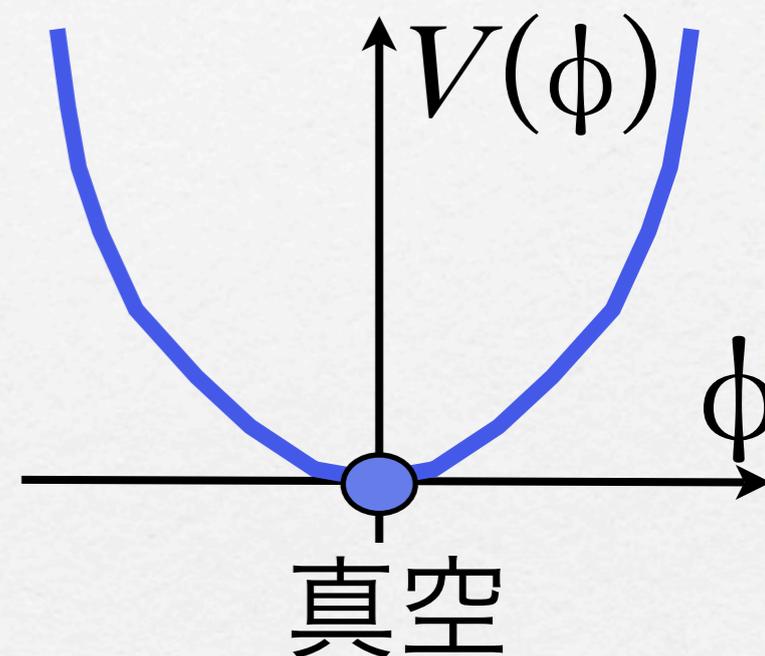


ヒッグス粒子

- 南部陽一郎の理論
- 自発的対称性の破れ
- 宇宙は初期に対称性が破れて
- 対称性の低いポテンシャル
- 真空は空っぽじゃない！
- エネルギーが詰まっている。



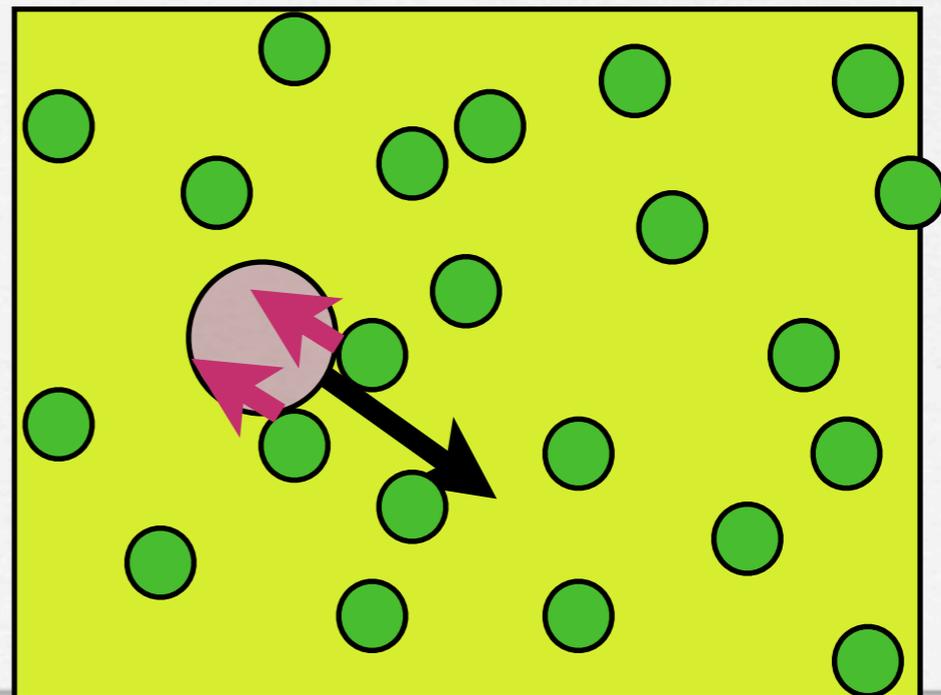
安定だが非対称



ヒッグス粒子

- 。真空に詰まっている粒子
- 。質量は、動き回る時の抵抗
- 。抵抗を与えるのがヒッグス
- 。質量の起源

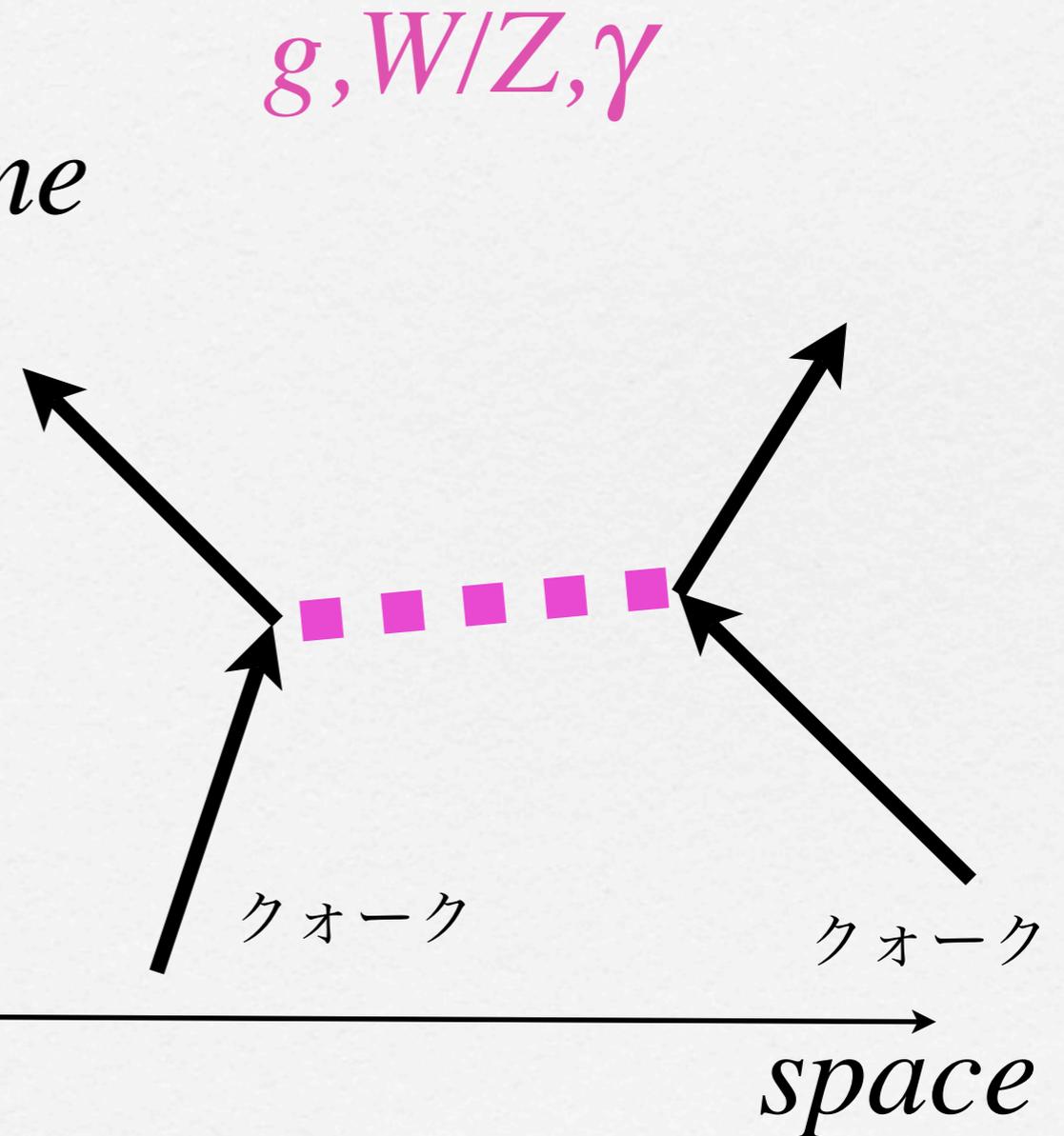
$$\vec{F} = m \vec{a}$$



素粒子相互作用

	クォーク	レプトン
第1世代	u, d	ν_e, e
第2世代	c, s	ν_μ, μ
第3世代	t, b	ν_τ, τ

time

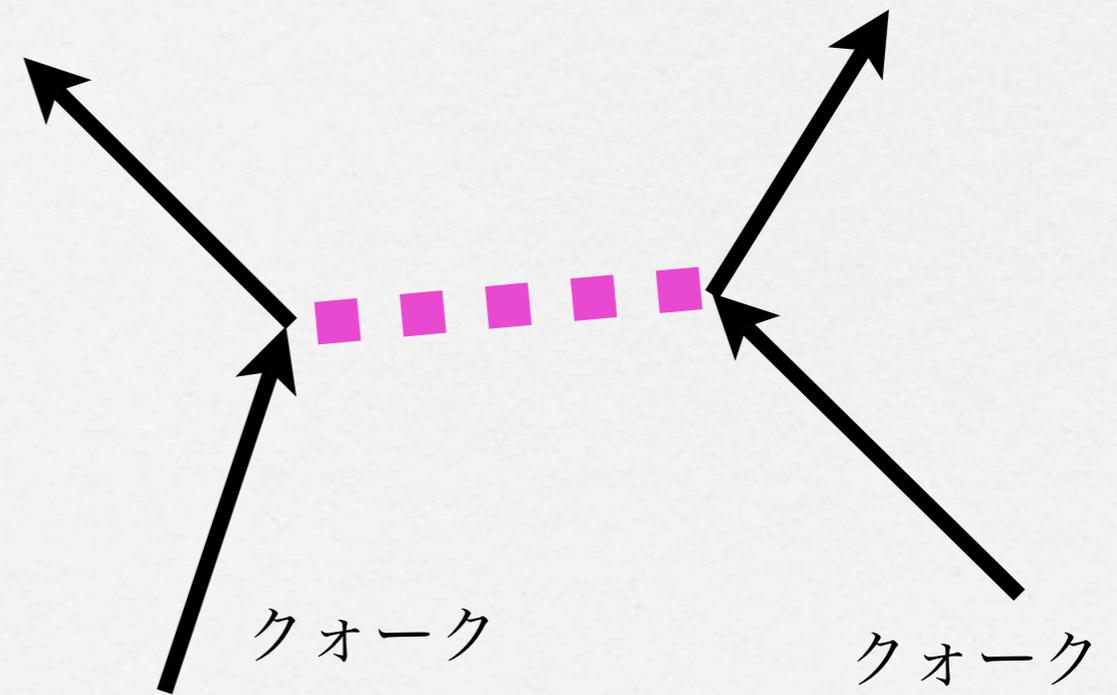


素粒子相互作用

	クォーク	レプトン
第1世代	u, d	ν_e, e
第2世代	c, s	ν_μ, μ
第3世代	t, b	ν_τ, τ

ゲージボソン
 $g, W/Z, \gamma$

time



space

素粒子相互作用

	クォーク	レプトン
第1世代	u, d	ν_e, e
第2世代	c, s	ν_μ, μ
第3世代	t, b	ν_τ, τ

ゲージボソン

$g, W/Z, \gamma$

力の粒子

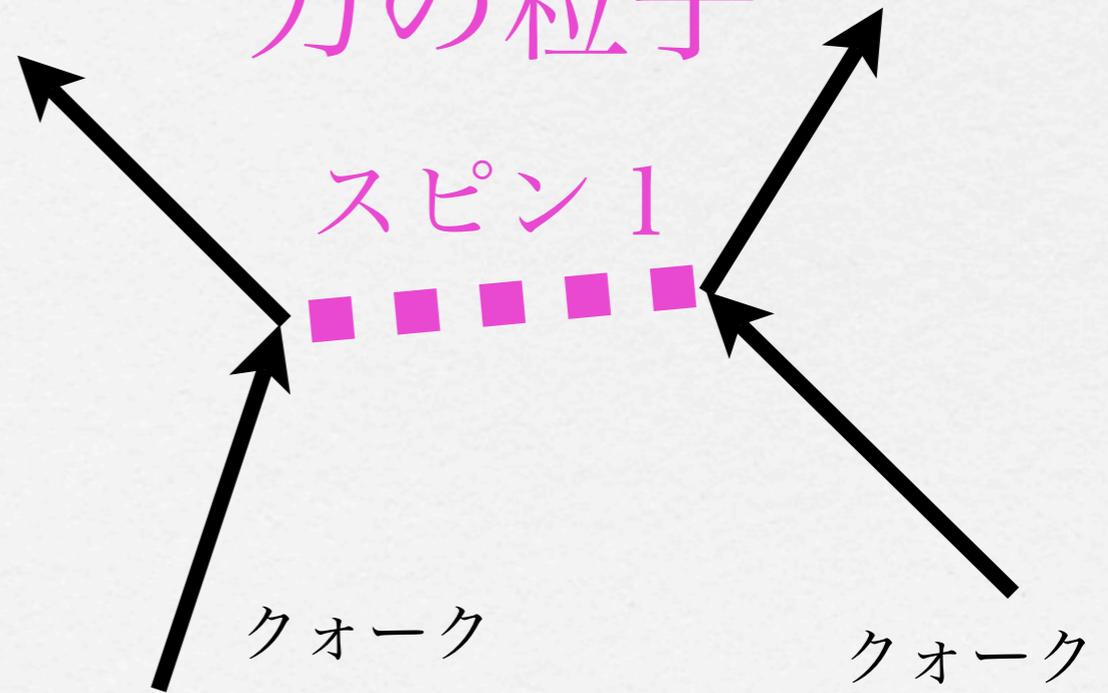
スピン 1

クォーク

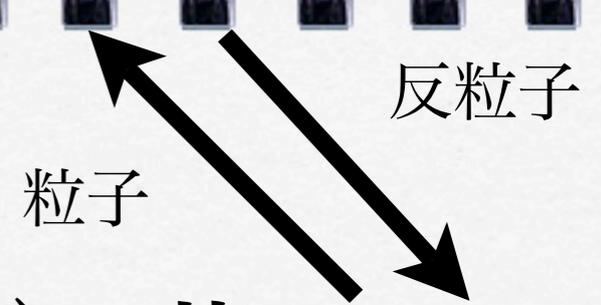
クォーク

time

space



反粒子



- 。全ての粒子（クォークとレプトン）荷は反粒子が存在する
- 。電荷の符号が反対：時間と反対に走る
- 。質量、スピンその他同じ

	クォーク	レプト		反クォーク	反レプ
第1世	u,d	ν_e, e	第1世	\bar{u}, \bar{d}	$\bar{\nu}_e, \bar{e}$
第2世	c,s	ν_μ, μ	第2世	\bar{c}, \bar{s}	$\bar{\nu}_\mu, \bar{\mu}$
第3世	t,b	ν_τ, τ	第3世	\bar{t}, \bar{b}	$\bar{\nu}_\tau, \bar{\tau}$

基本粒子とは

- 基本粒子数は反粒子のおかげで**倍**
- 多数の粒子が宇宙のバラエティーをつくる
- 宇宙誕生時は、全粒子数=0だったはずだ
- **粒子数 + (-反粒子数) = 0**
- ところが粒子と反粒子が厳密には対象じゃない!
- これが**小林益川理論**
-

宇宙は物質だらけ

反物質＝反粒子はBigBangの宇宙誕生直後
粒子と同数あった

小林益川：粒子と反粒子はちょっと違う

粒子がたくさん残った

これが今の物質だけの宇宙を作っている

宇宙の未来

□ $\Omega=1$ として（膨張は永遠に続く）

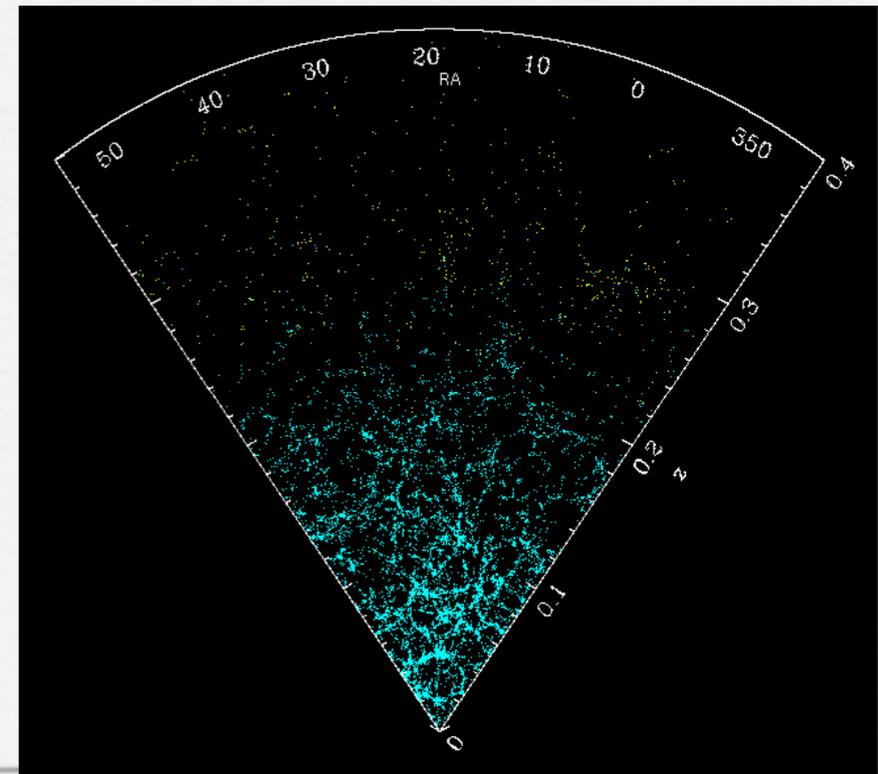
10^{14} 年：恒星が燃え尽きる：宇宙真っ暗

10^{20} 年：宇宙全体が引き合う：1つの Black Hole

$10^{3?}$ 年：陽子崩壊：電子＋陽電子のみ

BH蒸発

10^{100} 年：光子のみ

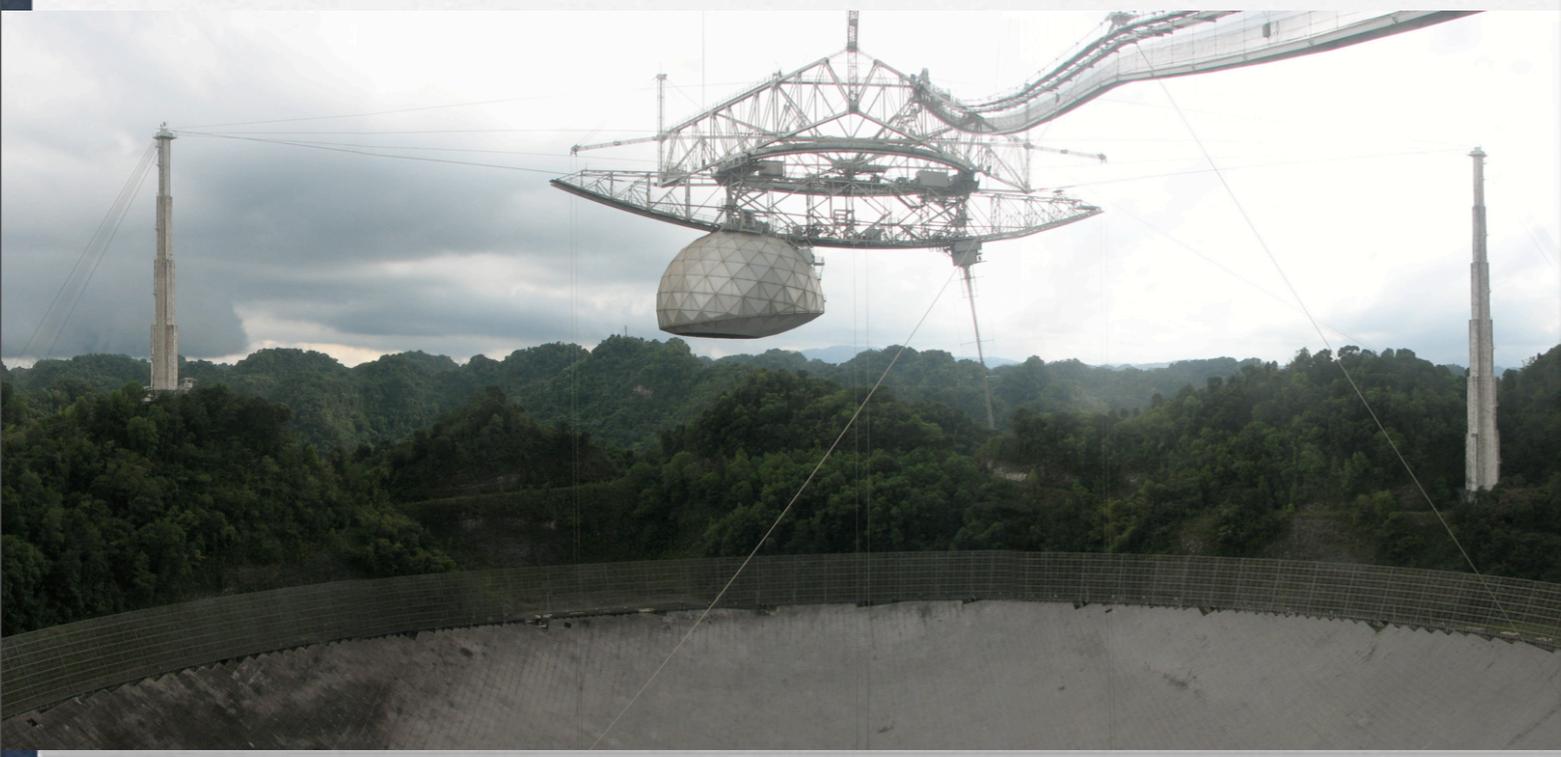


ETI

- Extra Terrestrial Intelligence 地球外知能
- 知能は電波をだすはずだ：ドレイクの式

$N_{ETI} \sim R_{\text{星}} * P_{\text{惑星}} * P_{\text{地球型}} * P_{\text{生命}} * P_{\text{電波}} * L_{\text{電波時間}}$

007/GoldenEyes



SETI : Search for ETI

銀河中に

$$N_{\text{ETI}} \sim R_{\text{星}} * P_{\text{惑星}} * P_{\text{地球型}} * P_{\text{生命}} * P_{\text{電波}} * L_{\text{電波時間}}$$

$$R_{\text{星}} \sim 10/\text{年} = 1000\text{億}/100\text{億年}$$

$$P_{\text{惑星}} \sim 0.5$$

$$P_{\text{惑星}} \sim 0.01$$

$$P_{\text{地球型}} \sim 1$$

$$P_{\text{生命}} \sim 1$$

$$P_{\text{生命}} \sim 0.01$$

$$P_{\text{電波}} \sim 0.1$$

$$P_{\text{電波}} = 0.01$$

$$L_{\text{電波時間}} = 100\text{年}$$

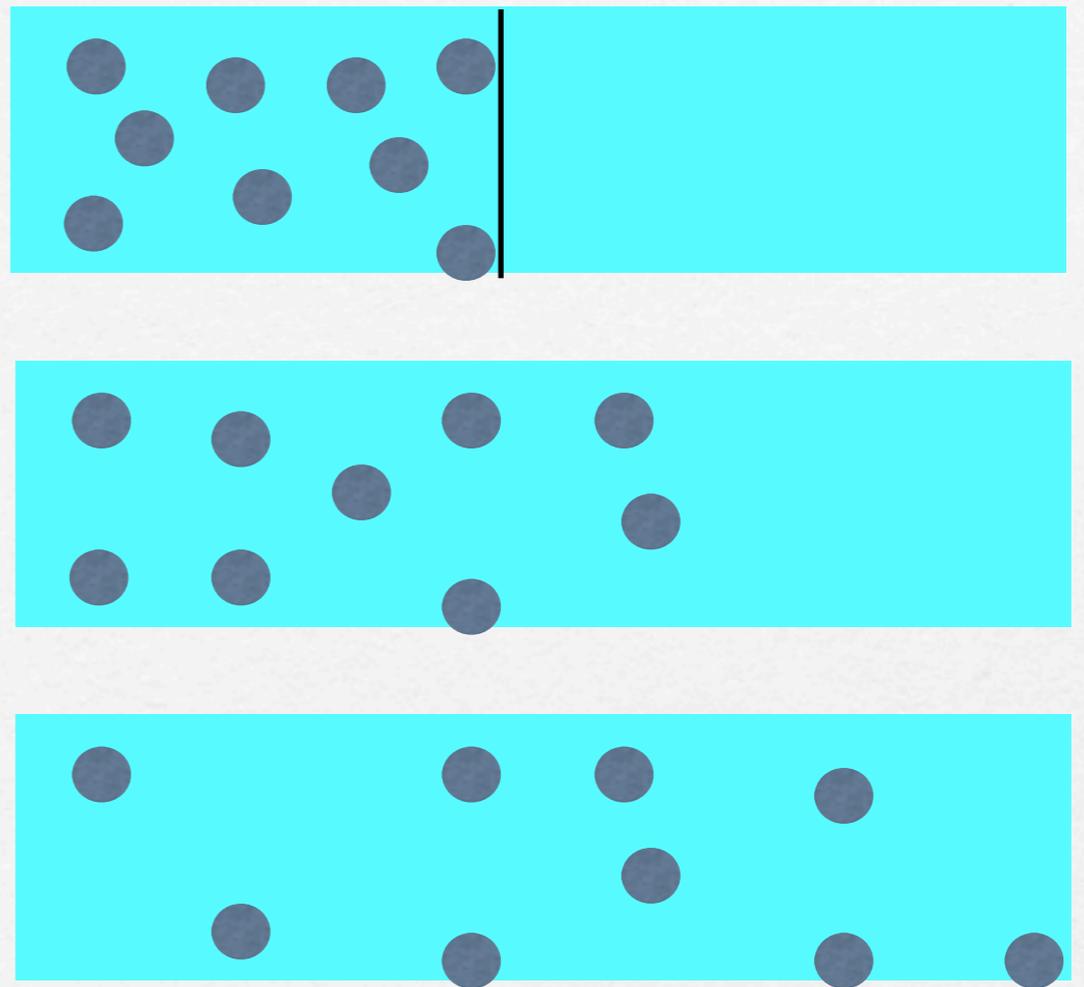
$$N_{\text{ETI}} = 50$$

$$N_{\text{ETI}} = 0.001$$

時間とは？

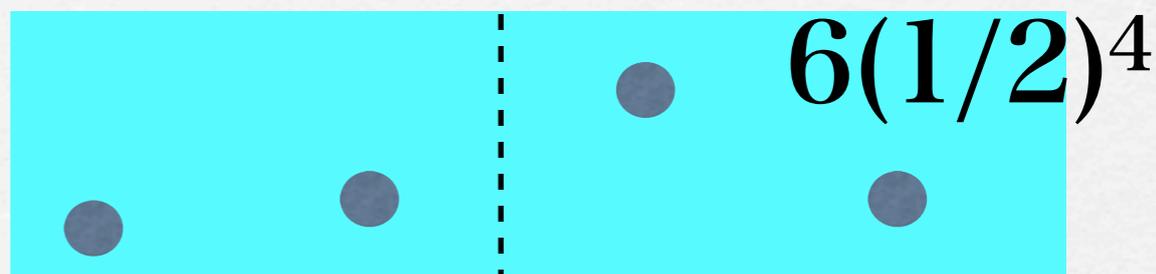
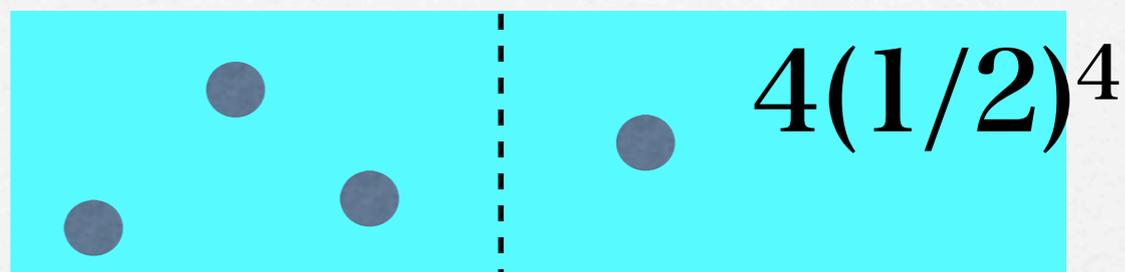
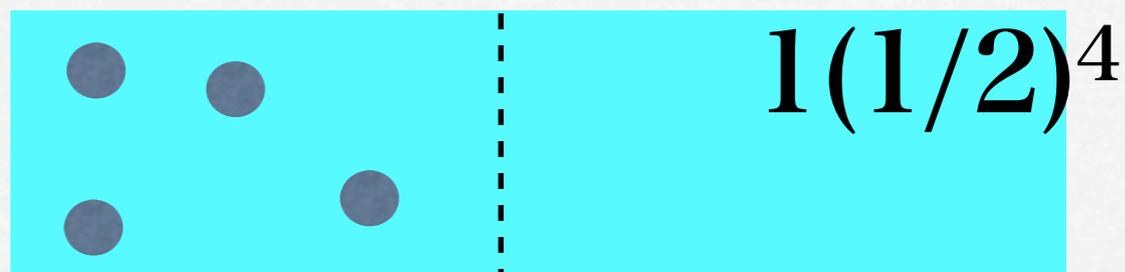
- 1 粒子は時間可逆
- 複数粒子は不可逆
- 覆水盆に帰らず

時間

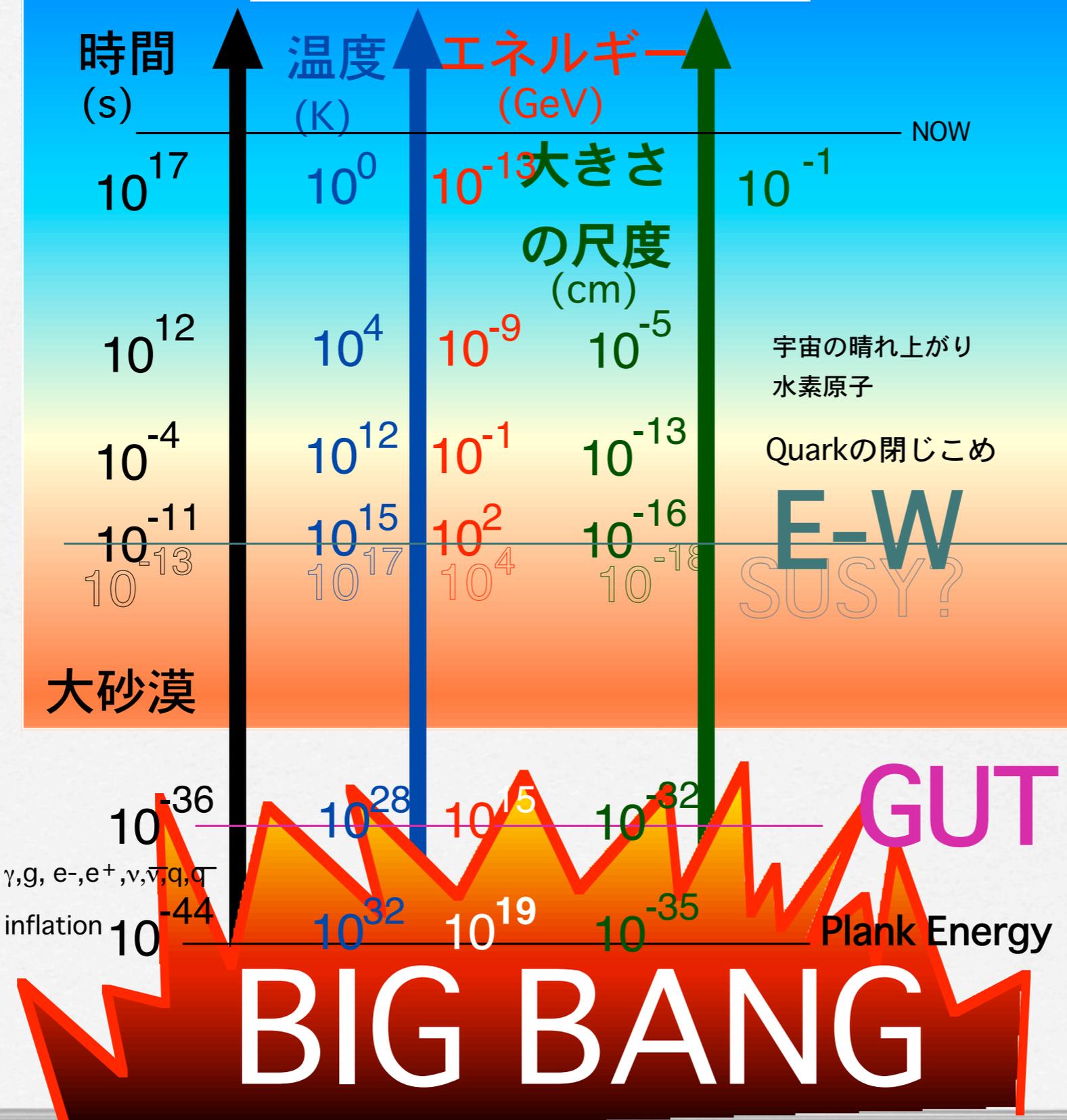


エントロピー

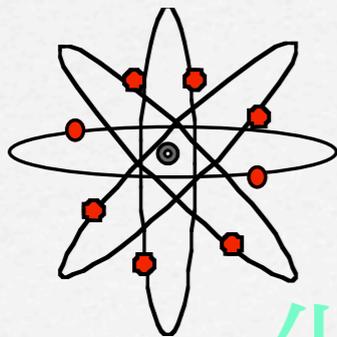
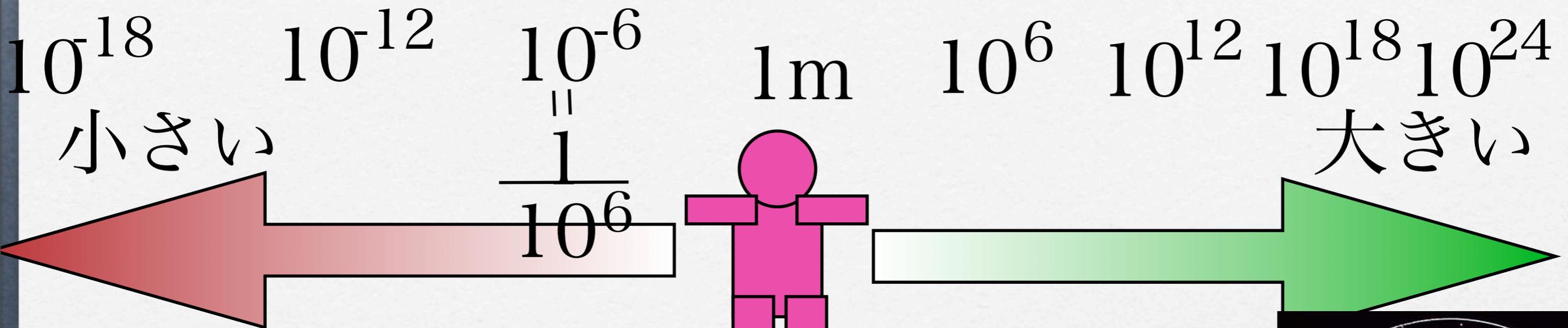
- 状態の無秩序さを表す量
- 4の分子
- 1個が左にある確率1/2
- 粒子を区別しなければ
- 左右同数の確率が最大
- これが実現される



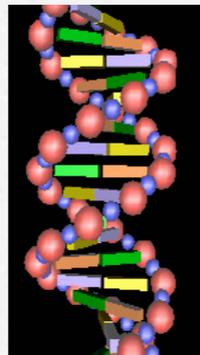
宇宙創生からの歴史



2つの極限



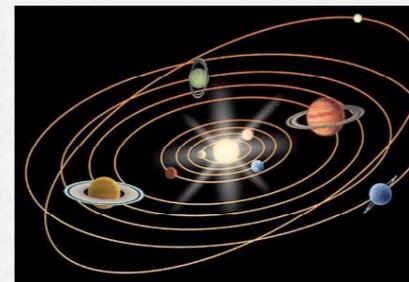
化学



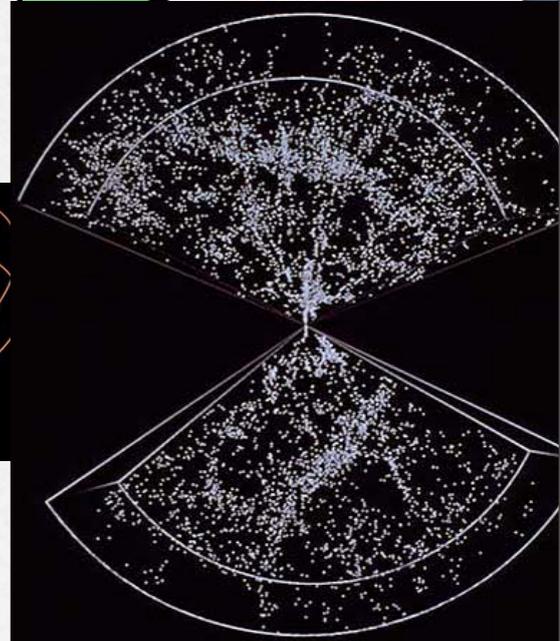
生物学



地学



天文学



宇宙物理

素粒子物理

物理学

物理学

宇宙の始まりと素粒子

素粒子

宇宙

extra dim. black hole

超対称性

ダークマター

小さい極限

大きい極限

原子

太陽

DNA

地球

- 物質
- ダークマター
- ダークエネルギー

宇宙の始まりと素粒子

素粒子

宇宙

extra dim. black hole

超対称性

ダークマター

小さい極限

大きい極限

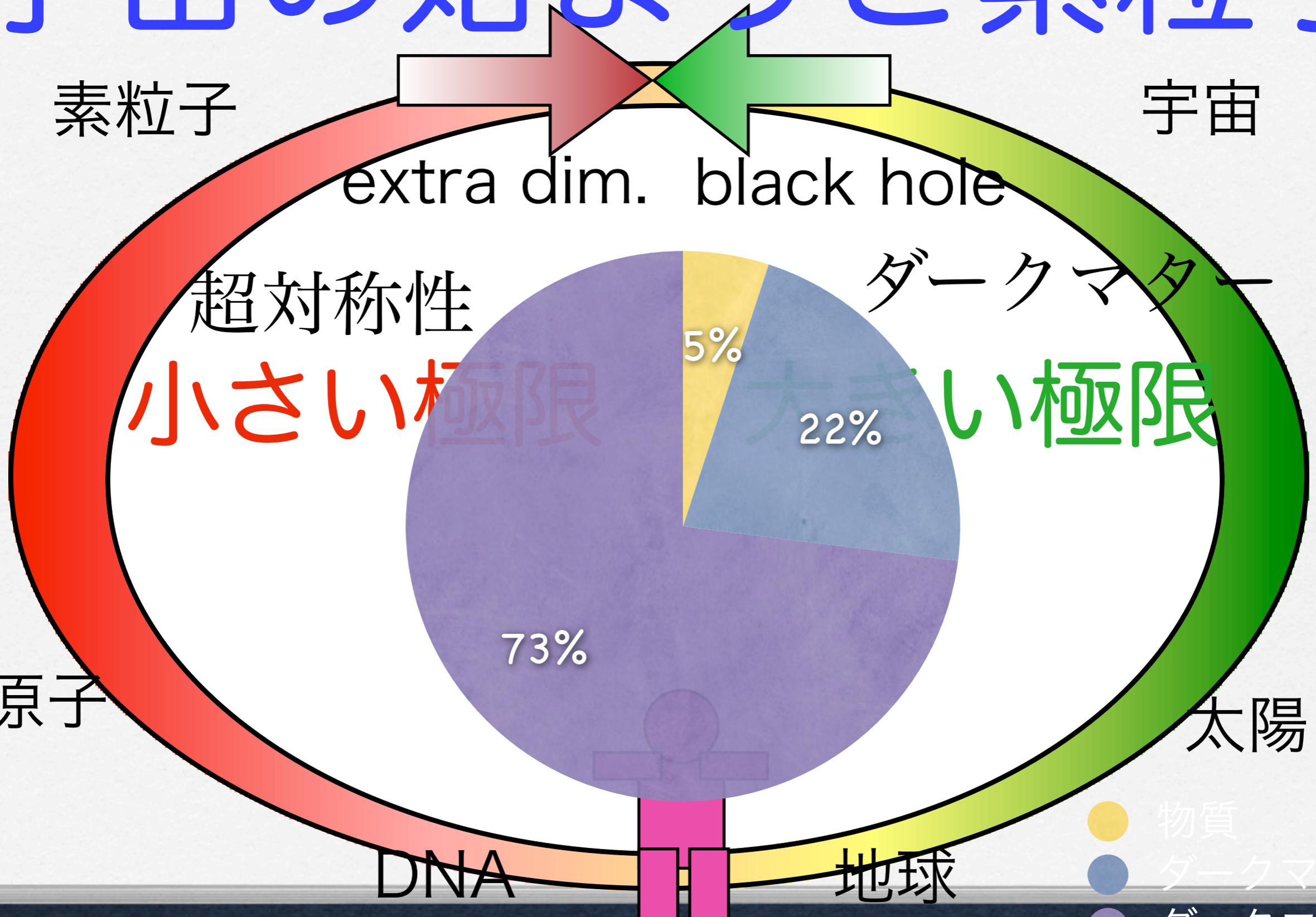
原子

太陽

DNA

地球

- 物質
- ダークマター
- ダークエネルギー



宇宙創成とは？

- 宇宙創成？
- そもそもエネルギーはどこから来た？
- 量子ゆらぎ！
- 10^{-36}m ゆらぎ
- 10^{21}GeV ゆらぎ

