

2011.10.20

ノーベル物理学賞記念講演会

宇宙の加速膨張が意味すること —背後にある物理とは？—

数物科学系

末松大二郎

2011年度ノーベル物理学賞

遠方超新星による宇宙の加速膨張の発見 (1998)



Perlmutter

Supernova Cosmology Project
(SCP)



Schmidt

The high-z Supernova Search Team
(HST)



Riess

2つの独立した研究グループの共通した結論

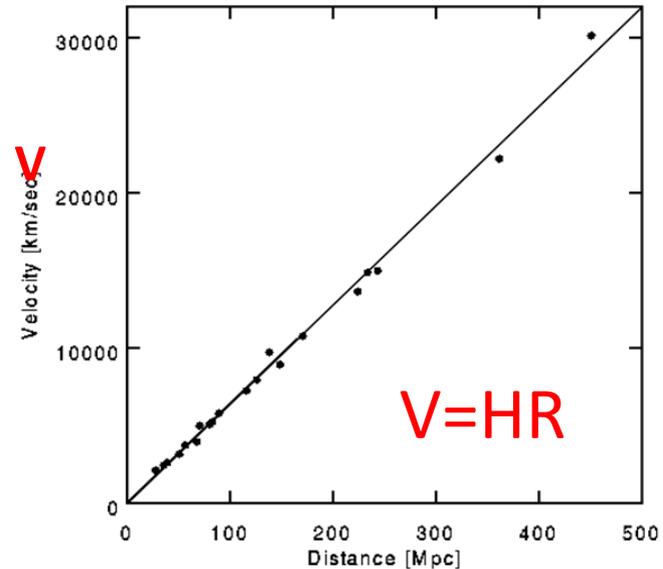
NHKコスミックフロントの中で、研究経過の興味深い解説

膨張する宇宙

- セファイド変光星による宇宙膨張の発見(1929)



Hubble

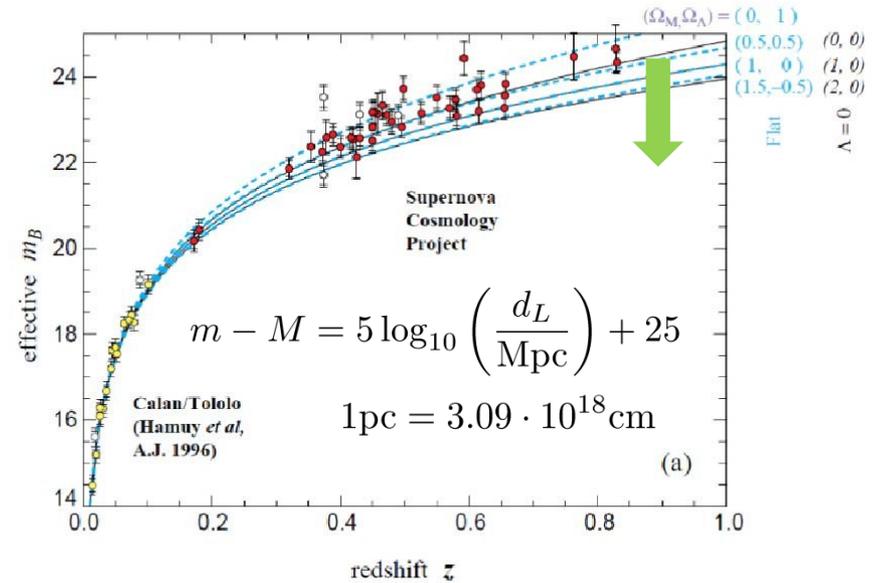
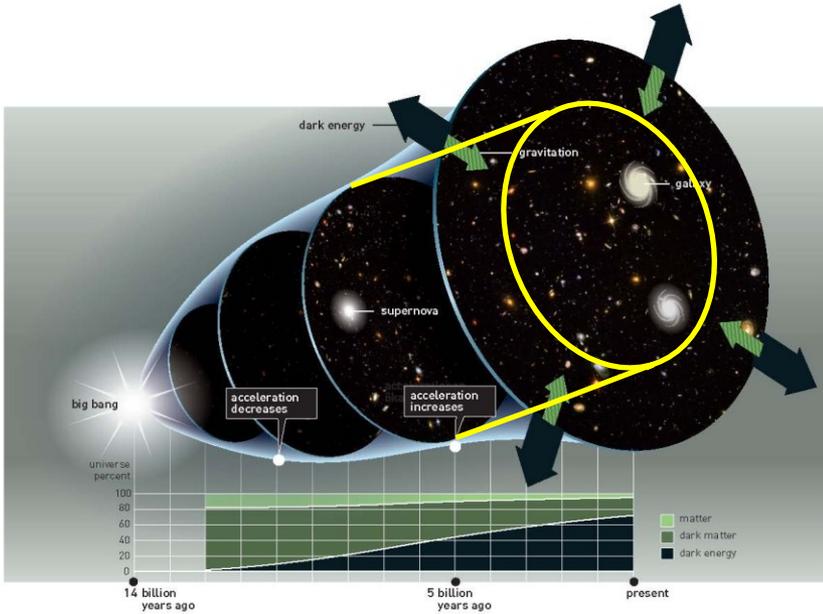


定常宇宙が信じられていた時代

- ビッグバン宇宙論へ
2.7K宇宙背景放射、宇宙の軽元素量の説明

予想宇宙膨張と観測結果

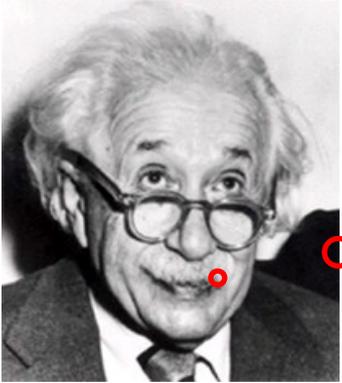
◆ 重力効果による**減速**膨張 $d_L(z) = \left(\frac{\mathcal{L}}{4\pi\mathcal{F}} \right)^{1/2}$



◆ 超新星観測は**加速**膨張を示した！

- この結果は驚くべきことなのか？
- 何が新たな物理への扉となるのか？

重力と時空の性質



重力は時空の歪みとして理解される

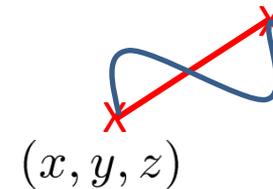
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

エネルギー

- 3次元空間における2点間の距離

$$(\Delta r)^2 = \underline{(\Delta x)^2} + \underline{(\Delta y)^2} + \underline{(\Delta z)^2}$$

$(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$



- 4次元時空における2点間の距離

$$(\Delta\tau)^2 = (c\Delta t)^2 - \underline{(\Delta x)^2} - \underline{(\Delta y)^2} - \underline{(\Delta z)^2}$$

曲がった空間では係数は各空間点ごとに異なる

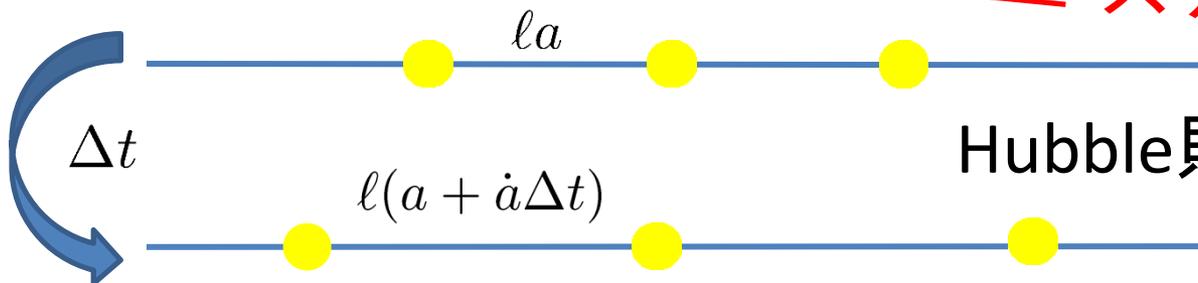
膨張宇宙はどう記述されるか

- 一様等方宇宙(時空)の2点間の距離

宇宙原理

$$(\Delta\tau)^2 = (c\Delta t)^2 - a(t)^2 \Delta r^2$$

スケール因子



Hubble則

$$\frac{V}{R} = \frac{n\ell\dot{a}}{n\ell a} = \frac{\dot{a}}{a}$$

赤方偏移

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} \Rightarrow z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_1)}{a(t_0)} - 1$$

- 宇宙膨張 = スケール因子の振る舞い

宇宙に存在するエネルギーの性質により決まる

宇宙膨張と形状を決めるもの

- 宇宙に存在するエネルギーの形態

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sqrt{(\vec{p}c)^2 + (mc^2)^2} \\ p = w\rho \end{array} \right. \quad \text{状態方程式 (} pV = nRT \text{)}$$

R : 放射 (光, ...) $\rho \propto a^{-4}, \quad p = \frac{1}{3}\rho$

M : 物質 (ダスト, ガス, ...) $\rho \propto a^{-3}, \quad p = 0$

- 宇宙に存在するエネルギーの総量

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \dots \quad \Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{cr}}}$$

宇宙の形状・膨張とエネルギー

● 宇宙の形状は Ω の値で決まる

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda \begin{cases} < 1 & \begin{array}{l} \text{Graph: A straight line with a positive slope.} \\ \text{Shape: A saddle-shaped surface curving upwards in one direction and downwards in the other.} \end{array} \\ = 1 & \begin{array}{l} \text{Graph: A curve that starts at the origin and increases with a decreasing slope, approaching a horizontal asymptote.} \\ \text{Shape: A flat, rectangular grid surface.} \end{array} \\ > 1 & \begin{array}{l} \text{Graph: A downward-opening parabola.} \\ \text{Shape: A dome-shaped surface curving downwards at the edges.} \end{array} \end{cases}$$

● 宇宙膨張の様子は、主要なエネルギー成分が何かによって異なってくる！ ($\Omega = 1$)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3}$$

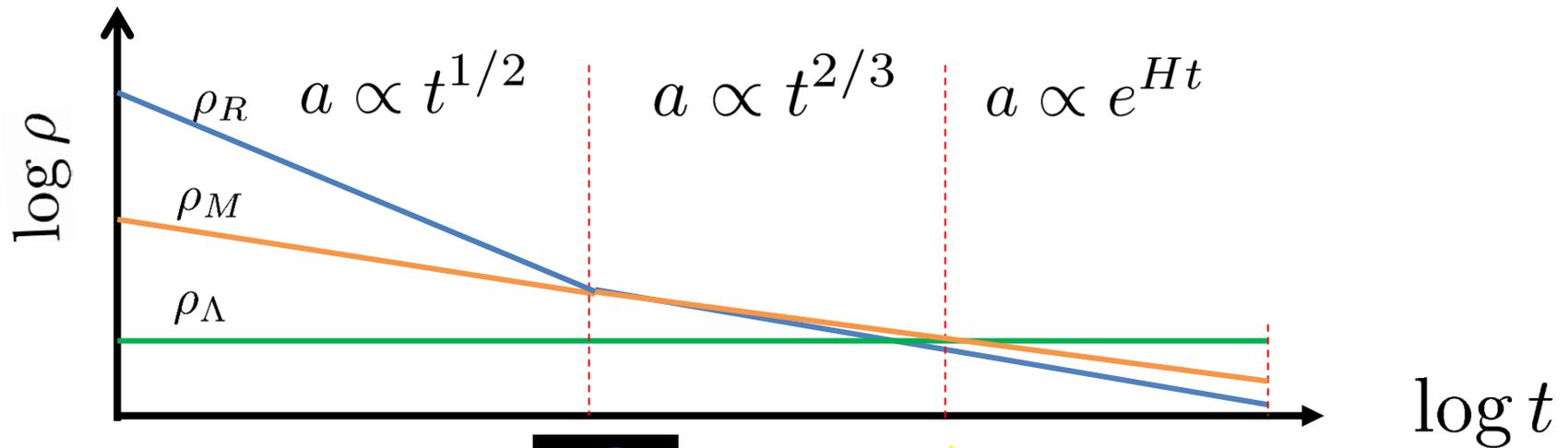
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

$w < -\frac{1}{3}$
加速に寄与

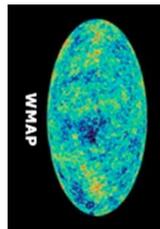
膨張により変化するエネルギー成分

- 放射優勢宇宙 $a(t) \propto t^{1/2}$
- 物質優勢宇宙 $a(t) \propto t^{2/3}$

放射 $\rho_R \propto a^{-4}$ 物質 $\rho_M \propto a^{-3}$

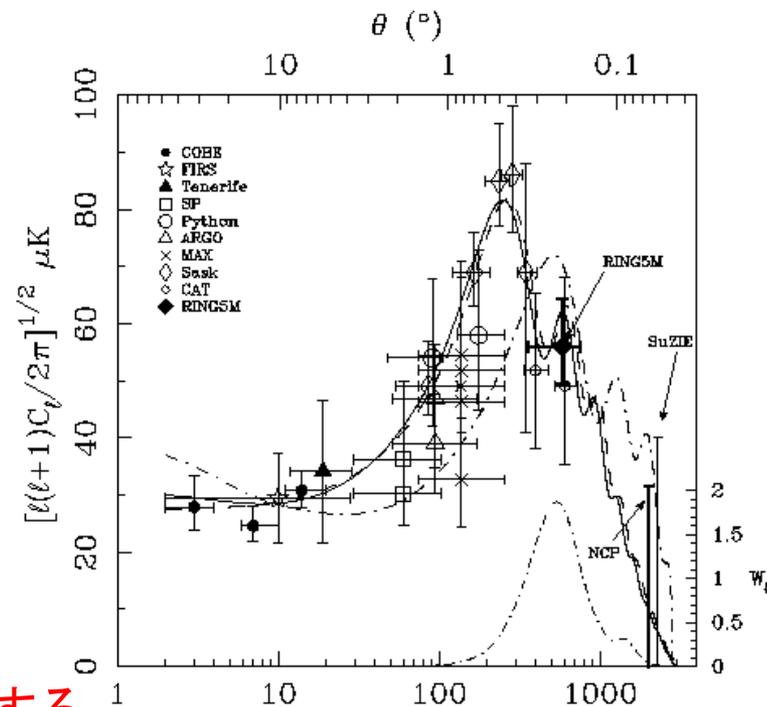
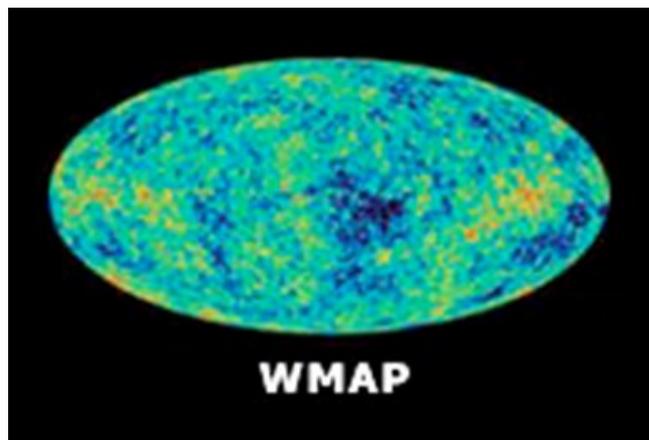


光は様々な膨張状態の宇宙を経験して我々に届く



観測から分かった宇宙の形状

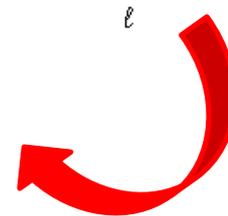
宇宙背景放射の揺らぎの観測 (COBE, WMAP)



宇宙背景放射は、宇宙年齢30万年の時期からの宇宙の進化の過程で生じる重力ポテンシャルを刻印されて現在に達する

$$\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\? = 1$$

$$\Omega_R \sim 0, \quad \Omega_M \sim 0.3 \Rightarrow \Omega_\? \sim 0.7$$

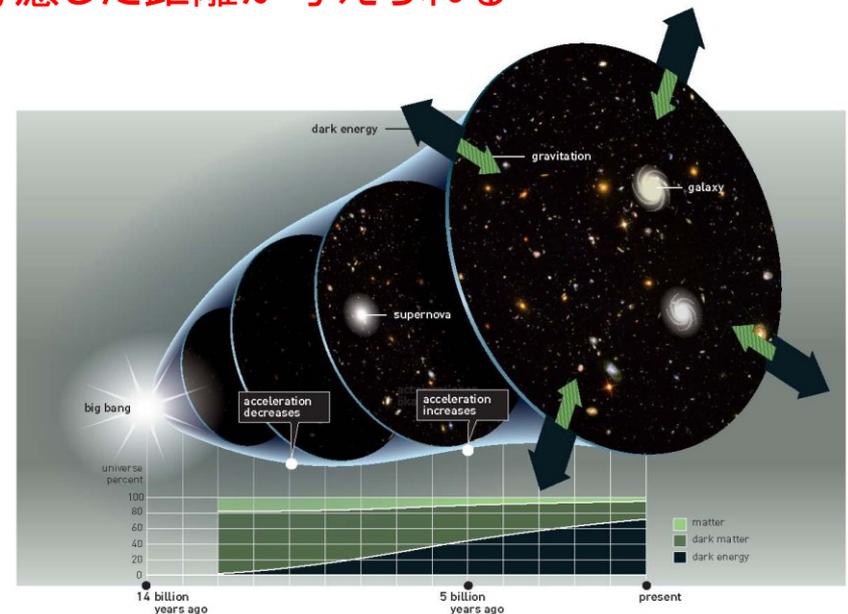
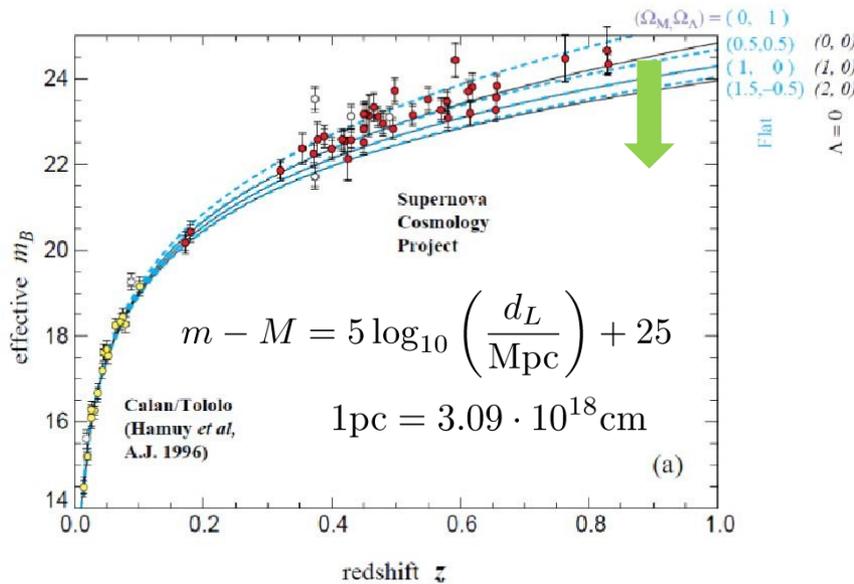


SNIaが示した加速膨張

◆ 絶対光度と見かけの光度の差

$$d_L = \left(\frac{\mathcal{L}}{4\pi\mathcal{F}} \right)^{1/2} = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

現在のエネルギー成分を与えれば期待される赤方偏移 z で特徴づけられる SNまでのエネルギー成分の変動を考慮した距離が与えられる



加速膨張を示している！

期待されたのは減速膨張

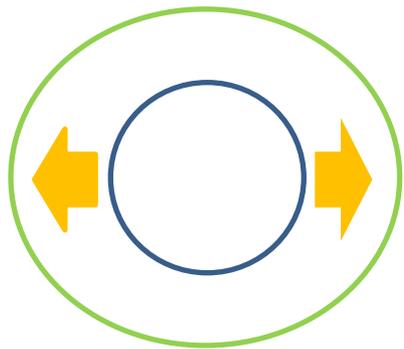
- 放射優勢宇宙 $w = \frac{1}{3}, \rho \propto a^{-4}$

$$a(t) \propto t^{1/2} \Rightarrow \ddot{a}(t) \propto -t^{-3/2} < 0$$

- 物質優勢宇宙 $w = 0, \rho \propto a^{-3}$

$$a(t) \propto t^{2/3} \Rightarrow \ddot{a}(t) \propto -t^{-4/3} < 0$$

加速膨張を実現するエネルギー $w < -\frac{1}{3} \Rightarrow p < 0$



$$\Delta Q = 0, \Delta V > 0$$

$$\Delta Q = \Delta U + p\Delta V$$

膨張とともにエネルギーは増大!

ダークエネルギー

このようなエネルギーは過去に
考えられたことはなかったのか？ 1

• アインシュタインの宇宙項

定常宇宙を実現するために導入

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

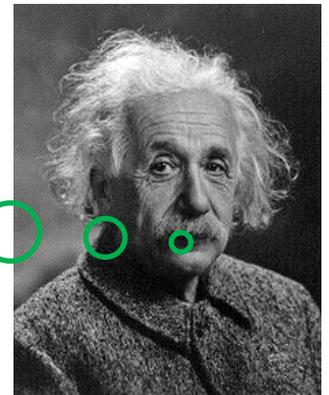
生涯最大の誤りだった！

(Eselei in German)

愚行

$$\rho_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{8\pi G} = -p_{\Lambda} \Rightarrow w_{\Lambda} = -1$$

ダークエネルギーの有力な候補



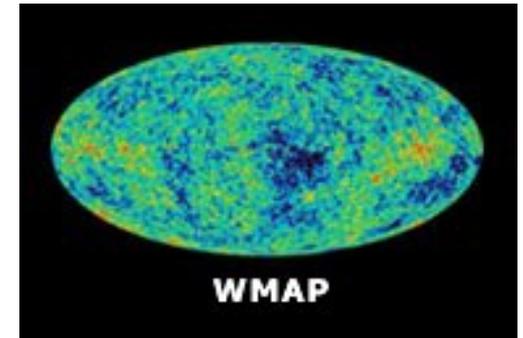
このようなエネルギーは過去に考えられたことはなかったのか？ 2

・ 真空のエネルギー

- 量子効果として出現
- 初期宇宙における急激な加速膨張（インフレーション）の実現



- 膨張宇宙の問題点を解決
- 宇宙背景放射の揺らぎの特徴を説明



ただし、これらは今回の加速膨張の説明に必要なエネルギーの大きさとはそのスケールが大きく異なる

ダークエネルギーは存在する！

複数の宇宙観測がその存在を示唆

➤ 超新星 (SNe) 観測

$$d_L = \left(\frac{\mathcal{L}}{4\pi\mathcal{F}} \right)^{1/2} = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

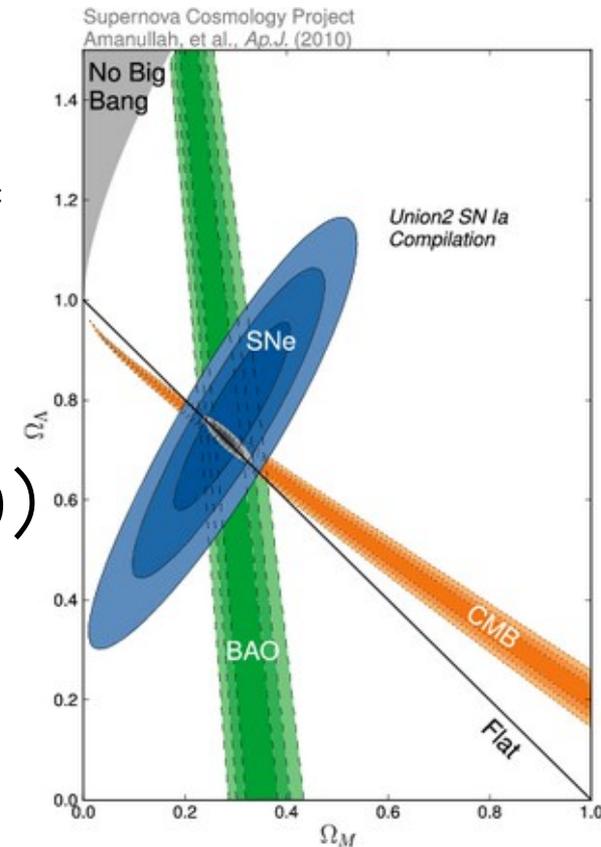
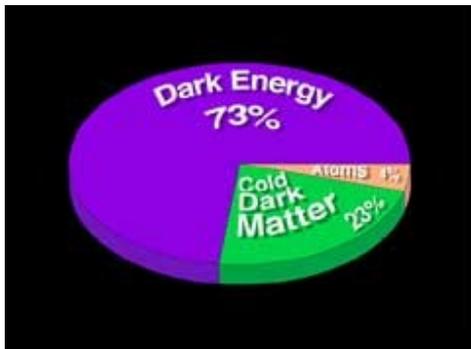
➤ 宇宙背景放射 (CMB) の観測

$$\Omega = \Omega_M + \Omega_{DE} = 1, \quad \Omega_M \sim 0.3$$

➤ 銀河分布の大規模構造 (BAO)

暗黒物質の量

➤ 銀河団の数、重力レンズ効果



我々が知っているのは
たったの4%！

ダークエネルギーの謎

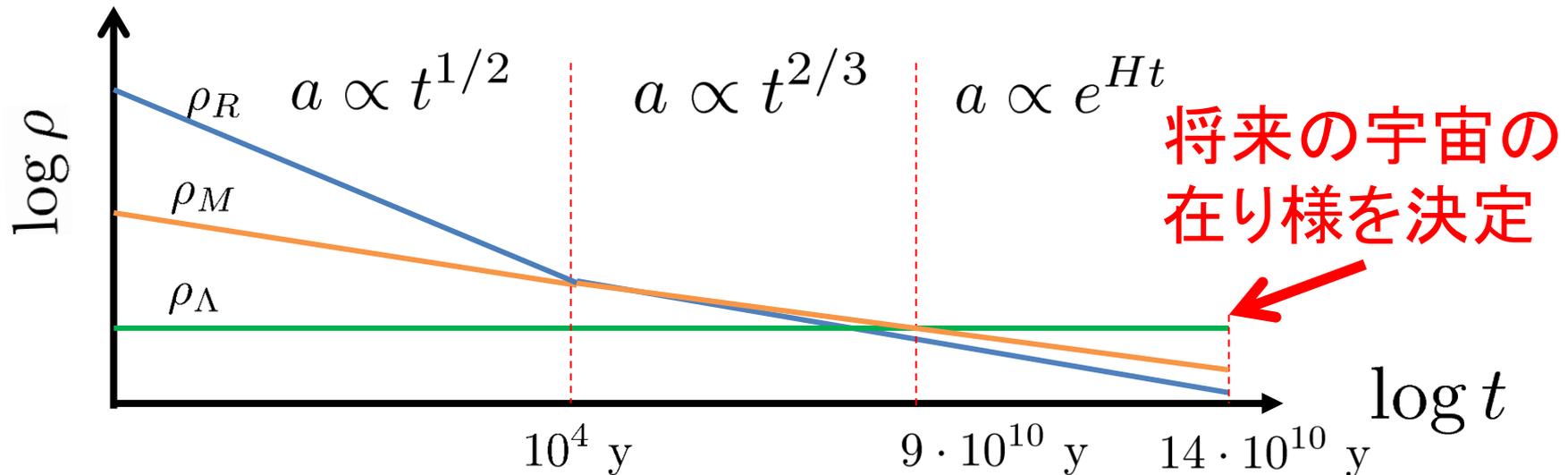
- その正体は？ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(1+w)}$

⇒ w の値は $w = -1$? 変化するのか?

- 極端に小さな ρ の理由は?

$$\rho_{cr0} \sim 0.5 \times 10^{-5} \text{ GeV/cm}^3 \ll \rho_{\Lambda} \sim 10^{118} \text{ GeV/cm}^3$$

- なぜ、現在 $\Omega_M \simeq \Omega_{DE}$ なのか?



ダークエネルギー—今後の課題

➤ w の値の特定 $q_0 = \frac{1}{2} \sum_i (1 + 3w_i) \Omega_i$ 減速パラメータ

観測の精度の向上による誤差の削減

SNe1a 探索 → $d_L(z, q_0) = \frac{1}{H_0} \left[z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + \dots \right]$
CMBの揺らぎの精密測定 (Planck)

正体の解明

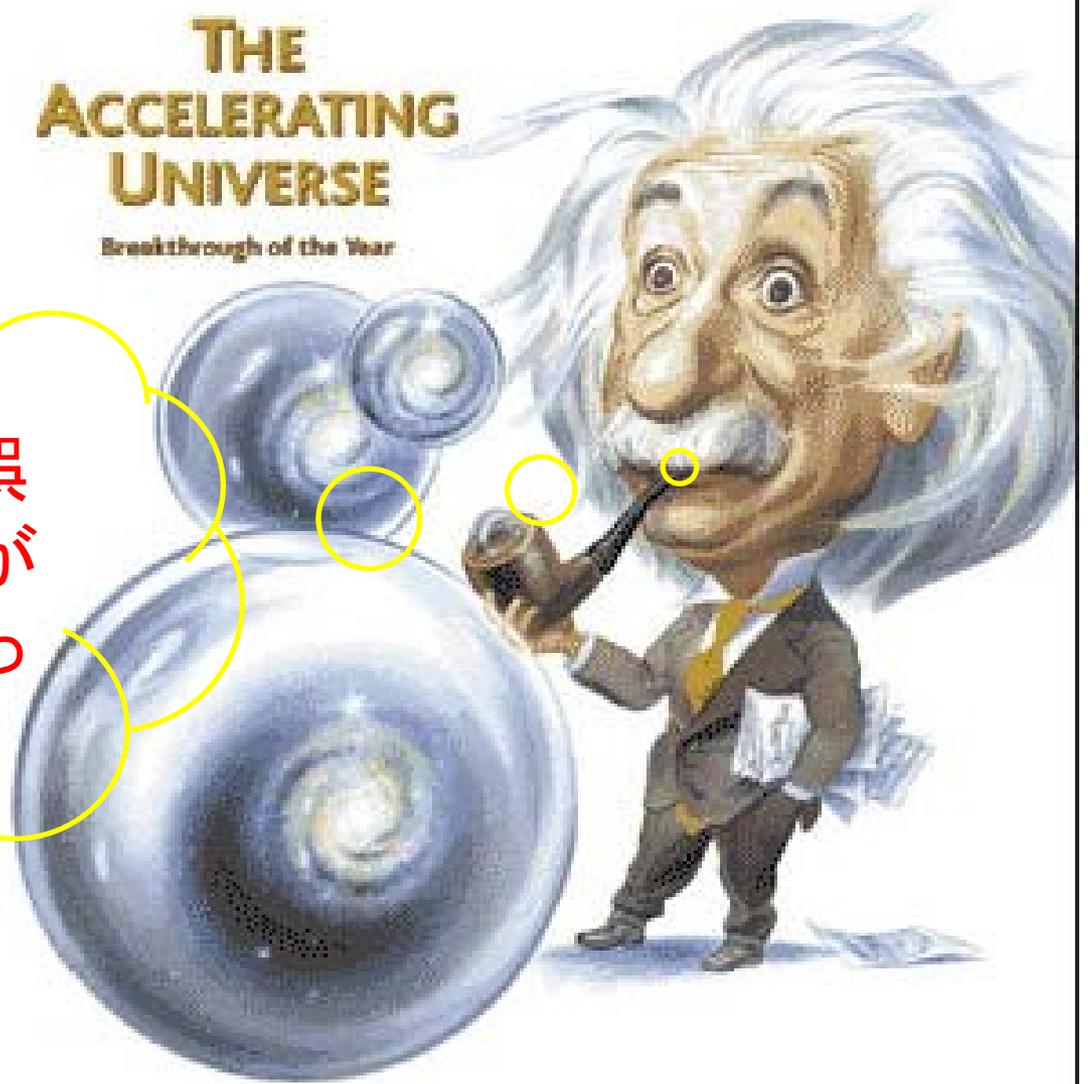
宇宙項
クインテッセンス (スカラー場)
マルチバース、重力理論の修正...

素粒子と宇宙に関わる今世紀最大？の問題

THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year

「生涯最大の誤り」と言ったのが
最大の誤りだったのかも？



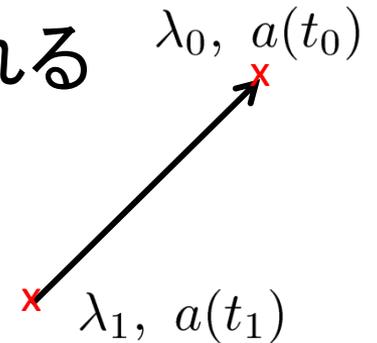
終わり

いくつかの補足 1

➤ 赤方偏移の大きさ z とは

⇒空間が膨張するとそれに伴いもたらされる
光の波長の伸び率

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} \Rightarrow z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{a(t_1)}{a(t_0)} - 1$$



➤ エネルギー密度の時間変化

放射優勢 $a \propto t^{1/2} \Rightarrow \rho_R \propto t^{-2}, \rho_M \propto t^{-3/2}$

物質優勢 $a \propto t^{2/3} \Rightarrow \rho_R \propto t^{-8/3}, \rho_M \propto t^{-2}$

真空優勢 $a \propto e^{Ht} \Rightarrow \rho_R \propto e^{-4Ht}, \rho_M \propto e^{-3Ht}$

いくつかの補足 2

- Luminosity distance $d_L = \left(\frac{\mathcal{L}}{4\pi\mathcal{F}} \right)^{1/2}$

$$\mathcal{L}(1+z)^{-2} = 4\pi a(t_0)^2 r_1^2 \mathcal{F}$$

$$d_L = a(t_0)(1+z) \int_{t_1}^{t_0} \frac{dt'}{a(t')}$$



$$\frac{dt}{a(t)} = \frac{-dz}{a(t_0)H(t)}, \quad H(t) = H_0 \sqrt{\Omega_{M0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda}}$$

$$d_L(z, \Omega_{M0}, \Omega_{\Lambda0}) = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_{M0}(1+z')^3 + \Omega_{\Lambda0}}}$$

$(t_0, 0; \lambda_0; \delta t_0)$

$\lambda_0 = (1+z)\lambda_1$

$\delta t_0 = (1+z)\delta t_1$

$(t_1, r_1; \lambda_1; \delta t_1)$

いくつかの補足 3

- Luminosity distance と deceleration parameter

$$q \equiv -\frac{\ddot{a}(t)a(t)}{\dot{a}(t)^2} = -\frac{\ddot{a}(t)}{H(t)^2 a(t)}$$



$$\frac{\ddot{a}(t_0)}{a(t_0)} = -\frac{4\pi G \sum_i (1 + 3w_i)\Omega_i \rho_{\text{cr}}}{3}, \quad H_0^2 = \frac{8\pi G \rho_{\text{cr}}}{3}$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \sum_i (1 + 3w_i)\Omega_i$$

$$d_L(z, q_0) = \frac{1}{H_0} \left[z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 + \dots \right]$$