

Basics of Theoretical Astronomy and Astrophysics – 3
Oct. 31, 2016

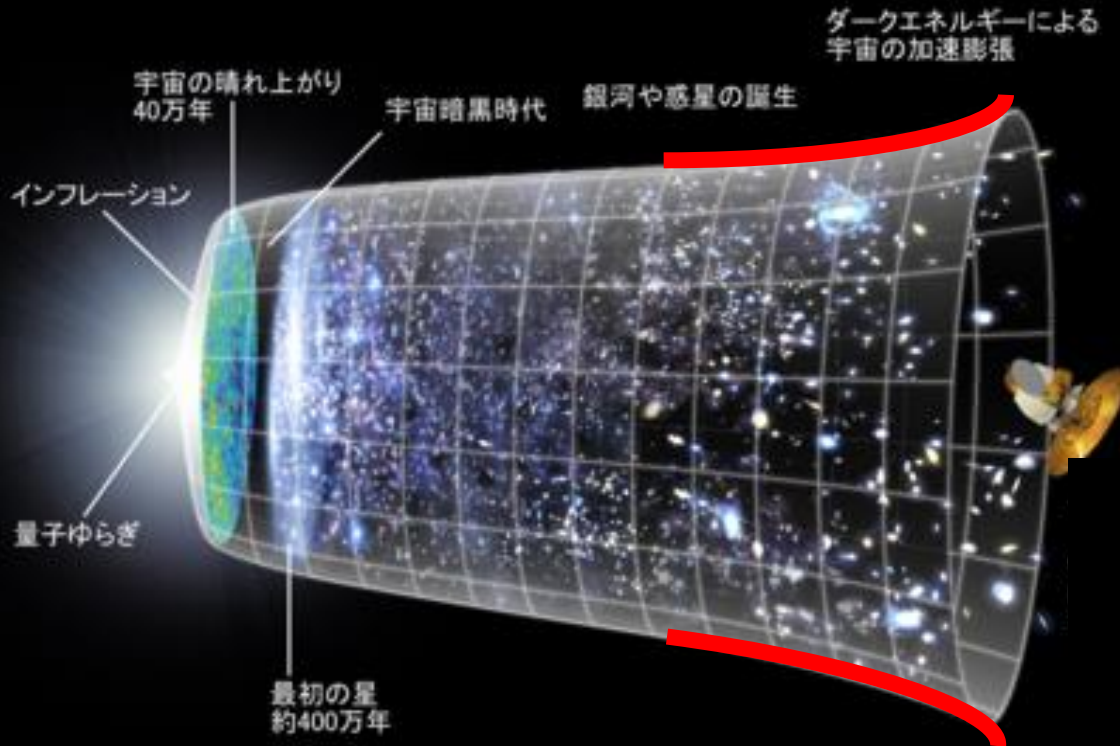
Applications to Observational Cosmology

Taka KAJINO

**National Astronomical Observatory of Japan, GUAS
The University of Tokyo**

kajino@nao.ac.jp, <http://th.nao.ac.jp/MEMBER/kajino/>

Accelerating Cosmic Expansion



Gravitational force is only attractive!

It tends to operate to stop the cosmic expansion.

Why is the expansion accelerating?

Cosmological constant Λ is an optional parameter to accelerate the cosmic expansion.

The biggest challenge is to reveal what is the nature of Λ !

ノーベル賞 物理学賞は米豪3氏 宇宙の膨張加速を発見

スウェーデンの王立科学アカデミーは4日、今年のノーベル物理学賞を米ローレンス・バークレー国立研究所のソール・パールマター博士、オーストラリア国立大のブライアン・シュミット博士、米ジョンズホプキンス大のアダム・リース博士の3氏に贈ると発表し

た。授賞理由は「遠距離の超新星観測を通じて宇宙の膨張加速の発見」。

パールマター氏は1988年、1a型超新星を目安にして宇宙の膨張を測るため、「超新星宇宙論計画」を始めた。数十億光年かなたにある50個以上の1a型超新星の地球からの距離と、速さから距離を正確に求め、宇宙の膨張速度が速まっているのを見つけた。従来は膨張速度が減速していると考えられていた。この加速は、宇宙のエネルギーの4分の3を占める「暗黒エネルギー」によって起きていると考えられているが、その正体はまだわかっていない。

94年には、シュミット氏とリース氏らと研究チームを組み、同様の観測を始めた。両研究チームは独自に観測や研究を重ね、パールマター氏らと同じ98年、同様の結論を公表した。

賞金は1千万スウェーデン(約1億1千万円)で、パールマター氏が半分、残りシュミット氏とリース氏で分ける。授賞式は12月10日、ストックホルムである。

「1a型」と呼ばれる超新星は、銀河に相当するほどの光を放し、その明るさは宇宙のどこにあってもほぼ同じなので、その超新星のある銀河までの距離がわかるほか、超新星の色からどれだけの速さで遠ざかっているのかもわかる。

ソール・パールマター氏 52歳。米国籍。86年米カリフォルニア大パークリー校で博士号。米ローレンスバークレー国立研究所・カリフォルニア大パークリー校教授で超新星宇宙論計画のリーダー。

ブライアン・シュミット氏 44歳。米国籍。93年米ハーバード大で博士号。オーストラリア国立大特待教授でハイゼッド超新星捜索チームのリーダー。

アダム・リース氏 41歳。米国籍。96年米ハーバード大で博士号。ジョンズホプキンス大・宇宙望遠鏡科学研究所の天文学と物理学教授。チームの主要メンバー。

宇宙の膨張は加速している。膨張を速める未知の力を「宇宙項」という。発案したアインシュタインが生前、自ら「最大の誤り」と悔いた存在だ。パールマター氏は、それが誤りではないことを証明し、名誉を回復した。

アインシュタインは自ら発表した一般相対性理論を使って宇宙の様子を表す方程式をつくった。だが、素直に式をつくったら、銀河や星々が互いの引力で引っ張りあって宇宙はつぶれてしまうことになり、具合が悪い。

アインシュタイン、間違ってたなかった

「宇宙項」の实在証明

宇宙の大きさは変化しないと考えていたアインシュタインは、引力と釣り合うように、未知の反発力「宇宙項」を付けて方程式を完成させた。

ところが1929年、米国のエドウィン・ハッブルは、銀河の観測をもとに、宇宙は風船が膨らむように膨張していることを発見。宇宙は止まっていないので、宇宙項は不要になったと考えたアインシュタインは、宇宙項を付け加えたことを悔いて撤回し、「生涯最大の誤り」と恥じた。

だが、膨張する宇宙は、銀河などの引力の影響で膨張速度が緩まるはずなのに、パールマター氏らの観測によって逆に加速しているとわかった。宇宙項はやはり存在していた。

米カリフォルニア大パークリー校で同氏と同僚の村山斉・東大数物連携宇宙研究機構長は「今までの宇宙論の考え方を完全に覆した大発見。今回の3人はいずれ受賞すると思っていた。受賞して当然だ」と話した。

(鍛冶信太郎、平井隆介リジュネーブ)

「生涯最大の過ち」と一旦取り下げる。(1929)

宇宙項



Saul Perlmutter



Brian P. Schmidt



Adam G. Riess

宇宙の膨張加速を発見 (1998)

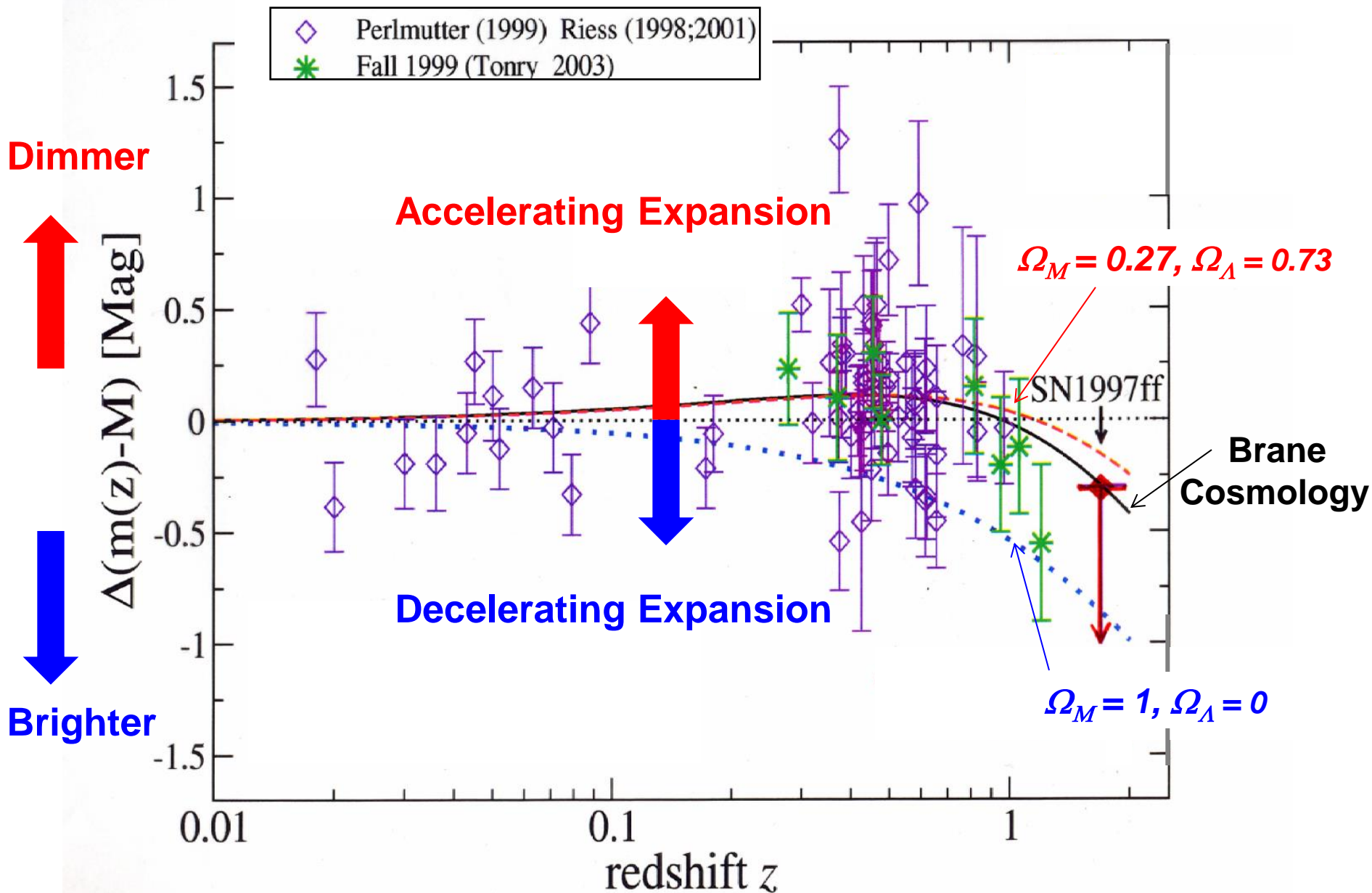
How to determine the cosmological parameters ($\Omega_i = \rho_i / \rho_c$) ?

- $\Omega_{\gamma\nu} < 0.01\%$ $\Omega_\gamma \rightarrow$ Temperature of CBR (Cosmic Background Radiation)
 $\Omega_\nu \rightarrow$ Upper limit from neutrino oscillation
 - $\Omega_\Lambda = 68\%$ **Ia Supernovae** **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
 - $\Omega_{\text{CDM}} = 27\%$ **Ia Supernovae** **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
Gravitational Lensing
 - $\Omega_B = 5\%$ **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
Big-Bang Nucleosynthesis
-

* $\Omega_{\gamma\nu} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_B + \Omega_\Lambda = 1$ From all above combination

* Cosmic Age **Ia Supernovae** + All above combination = 13.8 Gy

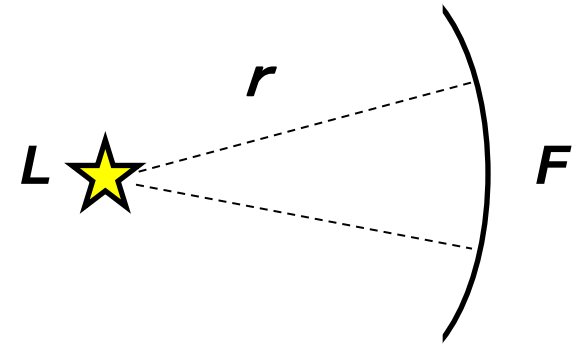
Type Ia Supernova Redshift-Magnitude Relation



Luminosity Distance

Energy Flux Density

$$F = L/4\pi r^2 \text{ [J/m}^2\text{/s]}$$



Apparent magnitude = m

$$m = -2.5 \log(F/F_0) \propto +5 \log r$$

$F_0 = 2.48 \times 10^{-8}$ [J/m²/s] (in Space outside of the atmosphere)

$$m = 0^m \quad \text{Vega}$$

Absolute magnitude = M (At the distance of $r = 10\text{pc}$)

$$M - m = -5 \log(r/10\text{pc})$$

Cosmology (At the distance of $r = 1\text{Mpc}$)

$$M - m = -5 \log(r/1\text{Mpc}) - 25$$

Exercise: Calculate cosmological parameter dependence of the redshift-magnitude relation!

apparent magnitude

Absolute Magnitude

$$m(z) - M = 5 \log D_L + 25 : D_L = \text{Luminosity Distance}$$

$$\Delta(m(z) - M) = 5 \log \frac{D_L(\Omega_\gamma, \Omega_M, \Omega_\Lambda, \Omega_k)}{D_L(0, 0, 0, \Omega_k = 1)}$$

$$D_L = (1+z) \frac{1}{\sqrt{|k|}} \begin{cases} \sin (k>0) \\ 1 (k=0) \\ \sinh (k<0) \end{cases} \sqrt{|k|} \int_0^z \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}}$$

$$\int_0^z \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = \frac{1}{H_0} \int_0^z dZ \left[\Omega_\gamma (1+Z)^4 + \Omega_M (1+Z)^3 + \Omega_k (1+Z)^2 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2}$$

$$\Omega_k = 1 - (\Omega_\gamma + \Omega_M + \Omega_\Lambda)$$

Exercise: When did the cosmic expansion turn over from deceleration to acceleration?

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left\{ \frac{\Omega_\gamma}{a^4} + \frac{\Omega_M}{a^3} + \frac{\Omega_R}{a^2} + \Omega_\Lambda \right\}$$

Deceleration parameter : $q \equiv -\left(\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}\right)$

$$q = -1 + \frac{\frac{2}{a^2} + \cancel{\left(\frac{4}{a^2} - \frac{2}{a^2}\right)\Omega_\gamma} + \left(\frac{3}{a^3} - \frac{2}{a^2}\right)\Omega_M - \frac{2}{a^2}\Omega_\Lambda}{2\left[\frac{1}{a^2} + \cancel{\left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2}\right)\Omega_\gamma} + \left(\frac{1}{a^3} - \frac{1}{a^2}\right)\Omega_M + \left(1 - \frac{1}{a^2}\right)\Omega_\Lambda\right]}$$

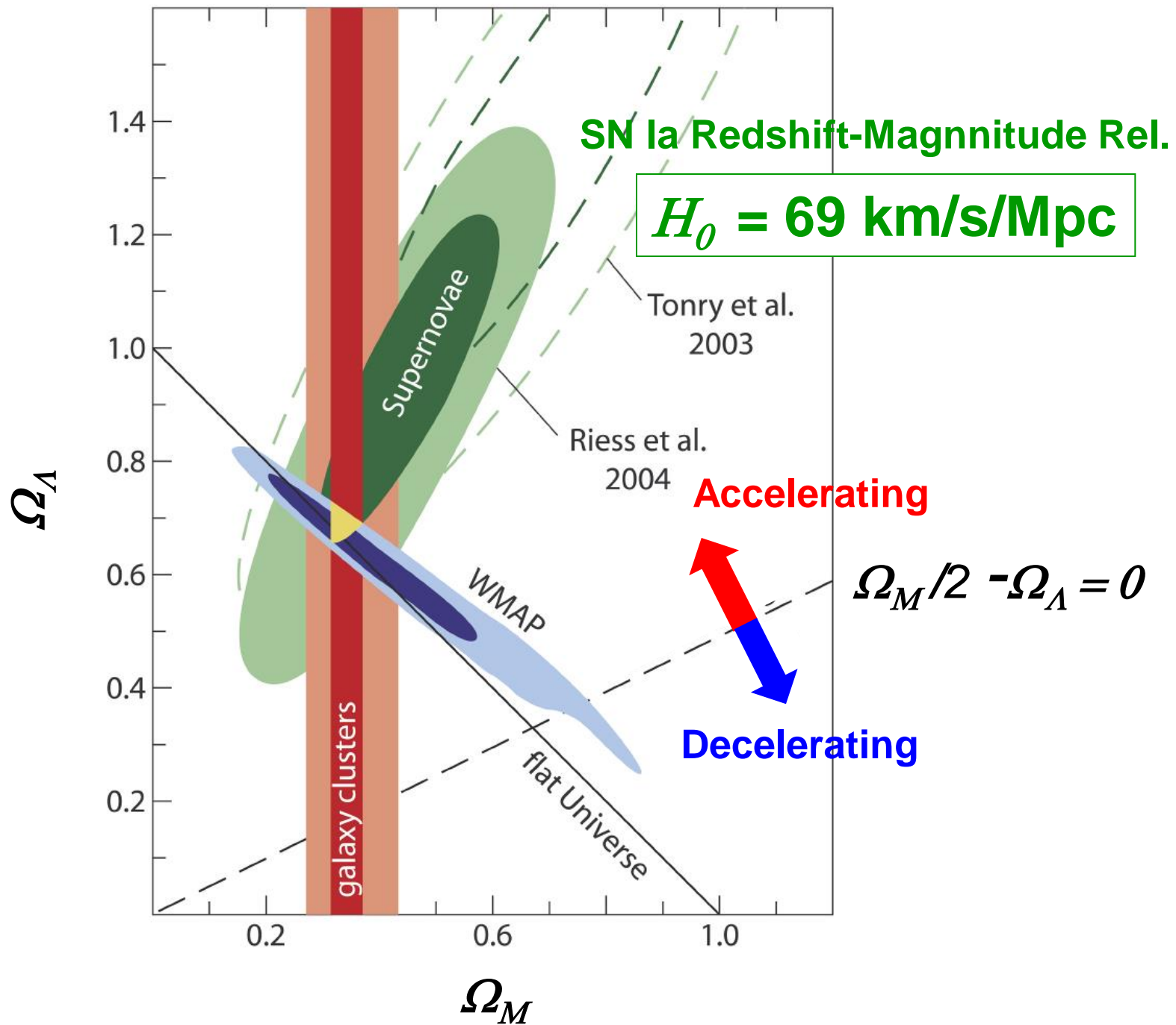
$\Omega_\gamma \ll \Omega_M = 0.27$, and $\Omega_\Lambda = 0.73$

$$\therefore q = 0 \rightarrow z \approx 0.8$$

$a \rightarrow a_0 = 1$

Exercise: How is the present expansion?

$$q_0 = -1 + \frac{2 + \cancel{2\Omega_\gamma} + \Omega_M - 2\Omega_\Lambda}{2} = \cancel{\Omega_\gamma} + \frac{\Omega_M}{2} - \Omega_\Lambda \stackrel{?}{=} 0 ?$$



Photon last scatter
 4×10^5 year

Accelerating expansion
Due to Dark Energy

Dark Age

Inflation

How old is the Universe?

Quantum
fluctuation

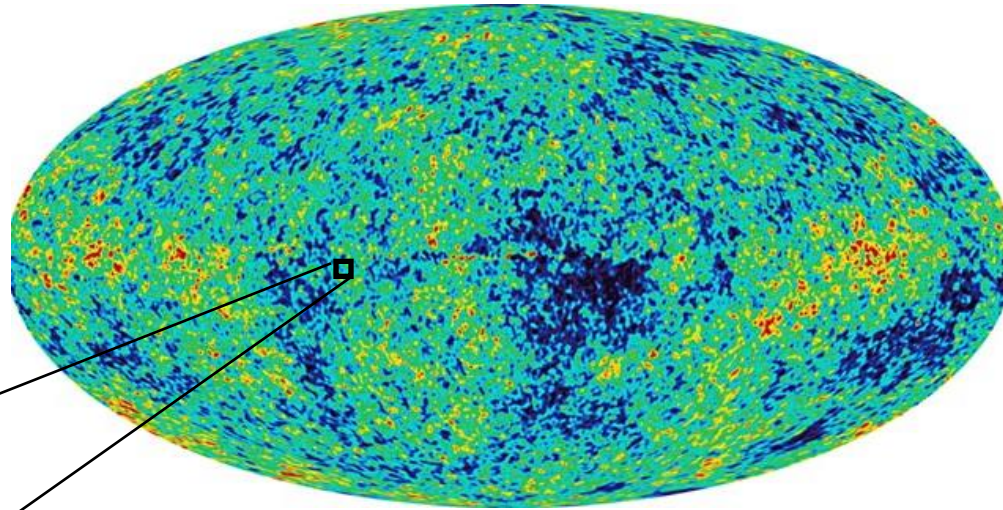
WMAP

1st star
4 million year

Birth of galaxies & stars



Primordial fluctuations in hot Big-Bang Universe was discovered by Smoot and Mathar in 1992.



(COBE Satellite)

$t = 3.8 \times 10^5 \text{ y}$



$3.8 \times 10^5 \text{ y}$



13.8 Gy

Assuming 68% dark energy (DE) and 27% dark matter (DM), computer simulation of cosmic structure formation best explains the observed structure!

What is the nature and origin of DE and DM ?

Exercise: Calculate the cosmic age!

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left\{ \frac{\Omega_Y}{a^4} + \frac{\Omega_M}{a^3} + \frac{\Omega_R}{a^2} + \Omega_\Lambda \right\}$$

Cosmic age = Expansion time

$$t_U = \int_0^{t_U} dt = \int_0^{a(t_U)} \underbrace{\left(\frac{dt}{da}\right)}_{\parallel \dot{a}^{-1}} da \quad \frac{a}{a_0} = \frac{1}{1+z}$$

Z = redshift

$$t_U = \frac{1}{H_0} \int_0^{z \rightarrow \infty} \frac{dz}{(1+z)^2 \sqrt{F(z)}}$$

$$F(z) = 1 + \cancel{\Omega_Y z(z+2)} + \Omega_M z - \Omega_\Lambda \left(1 - \frac{1}{(1+z)^2}\right)$$

Simplest case: $\Omega_Y \ll \Omega_M = 1$, and $\Omega_\Lambda = 0$

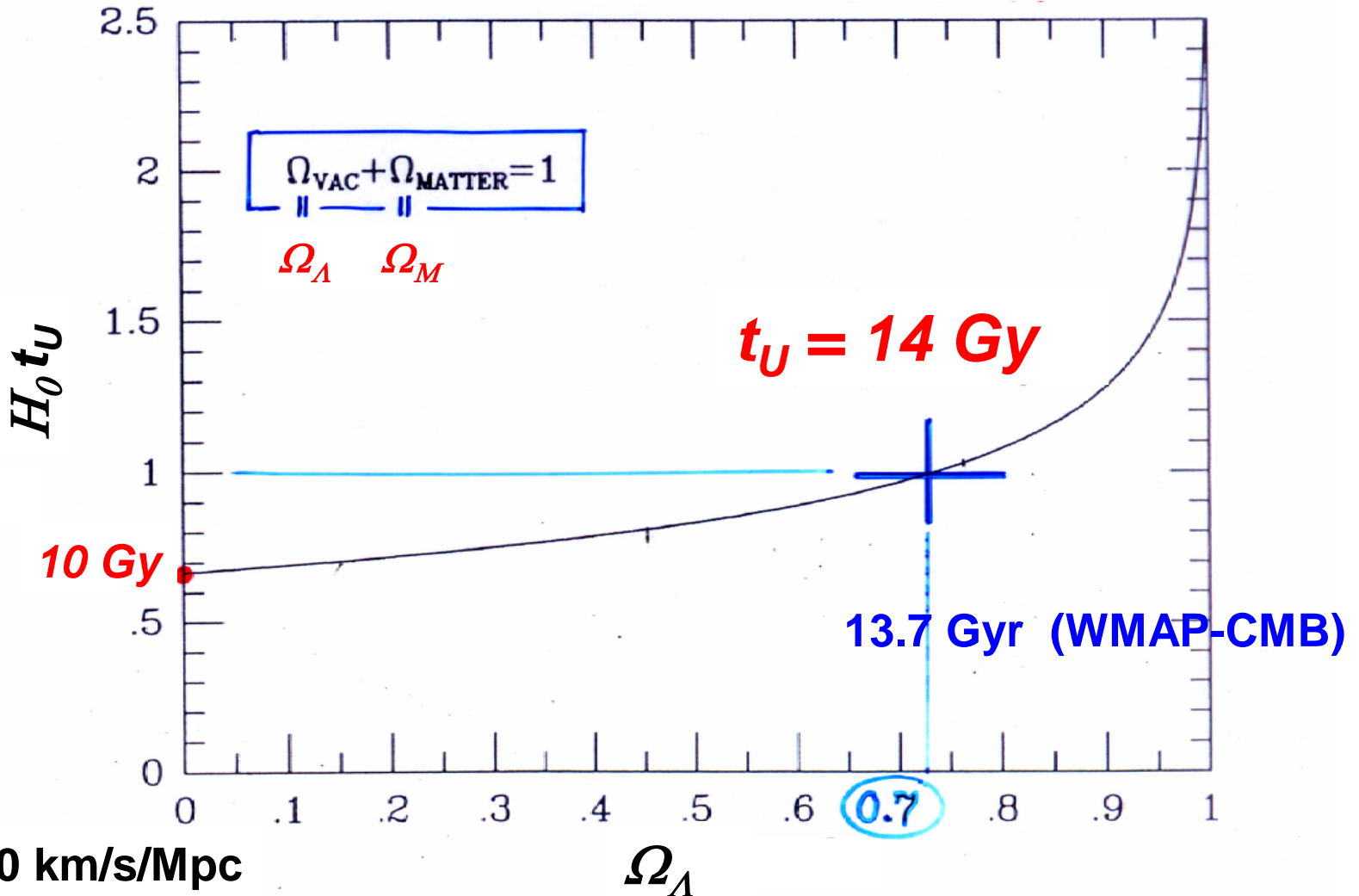
$H_0 = 70$ km/s/Mpc

$$t_U = \frac{1}{H_0} \int_0^\infty (1+z)^{-5/2} dz = \frac{2}{3} H_0^{-1} \longrightarrow \mathbf{10 \text{ Gy}}$$

$\Omega_\Lambda > 0$ can make cosmic age even LONGER!

$$\underline{H_0 t_U} = \int \frac{dz}{(1+z)^2 \sqrt{1 + \Omega_M z - \Omega_\Lambda \left(1 - \frac{1}{(1+z)^2}\right)}}$$

H_0^{-1} has dimension of time!



Photon last scatter
 4×10^5 year

Accelerating expansion
Due to Dark Energy

Dark Age

Inflation

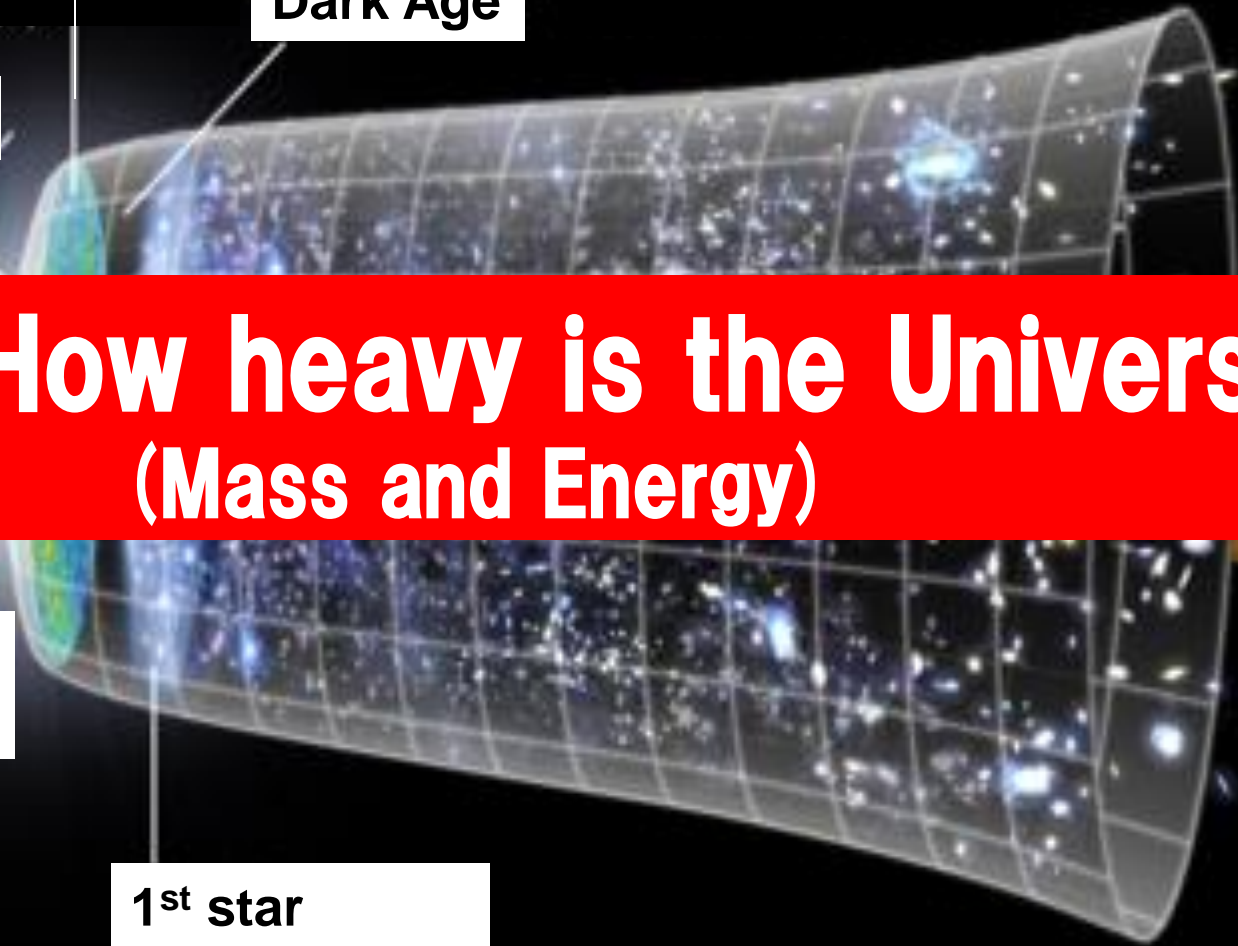
How heavy is the Universe? (Mass and Energy)

Quantum
fluctuation

WMAP

1st star
4 million year

Birth of galaxies & stars



What is DARK MATTER?

1 pc = 3.26 ly (light year)

“Mass of the galaxy”
Rotation Curve of the Stars

$$M_{\text{galaxy}} = (10^{11} - 10^{12})M_{\text{solar}}$$

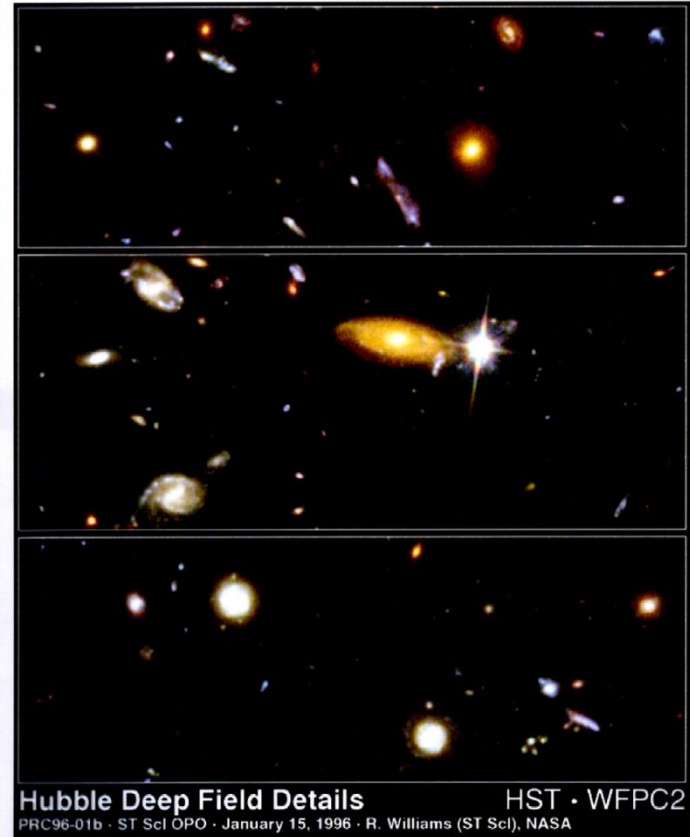
← 10 kpc →



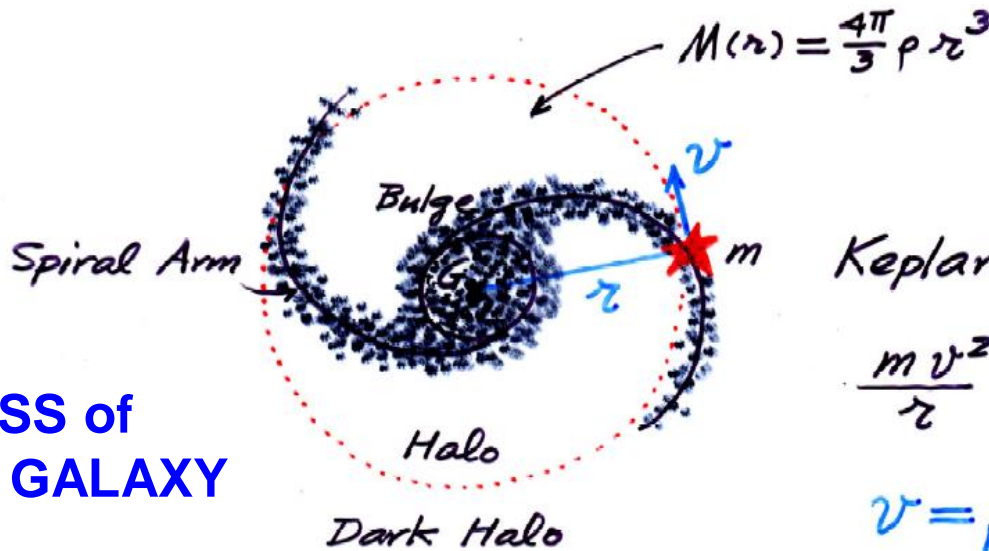
“Mass of the Cluster”

Cluster = (10 – 1000) galaxies

← 1 Mpc →



GALAXY



Keplarian Motion

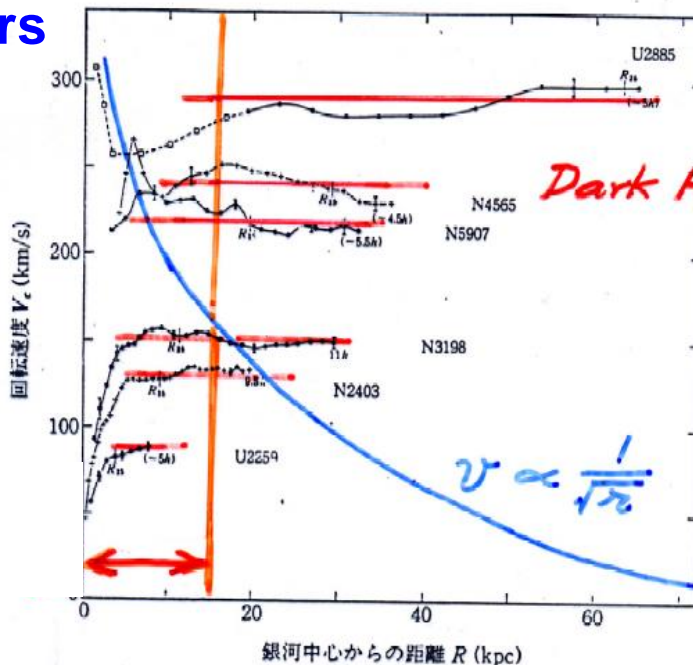
$$\frac{m v^2}{r} = \frac{m M(r) G}{r^2}$$

$$v = \sqrt{\frac{M(r) G}{r}}$$

vs. Escape velocity

MASS of the GALAXY

Galaxy = 10^{11} stars

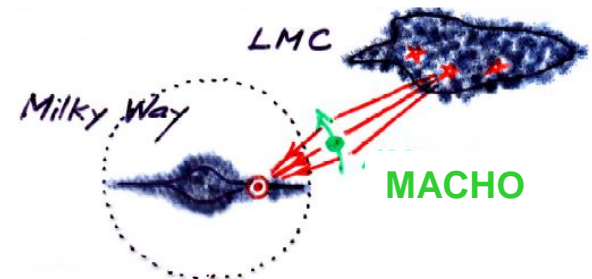


Dark Halo consists of DARK MATTER!

$$m \sim 0.5 M_{\odot}$$

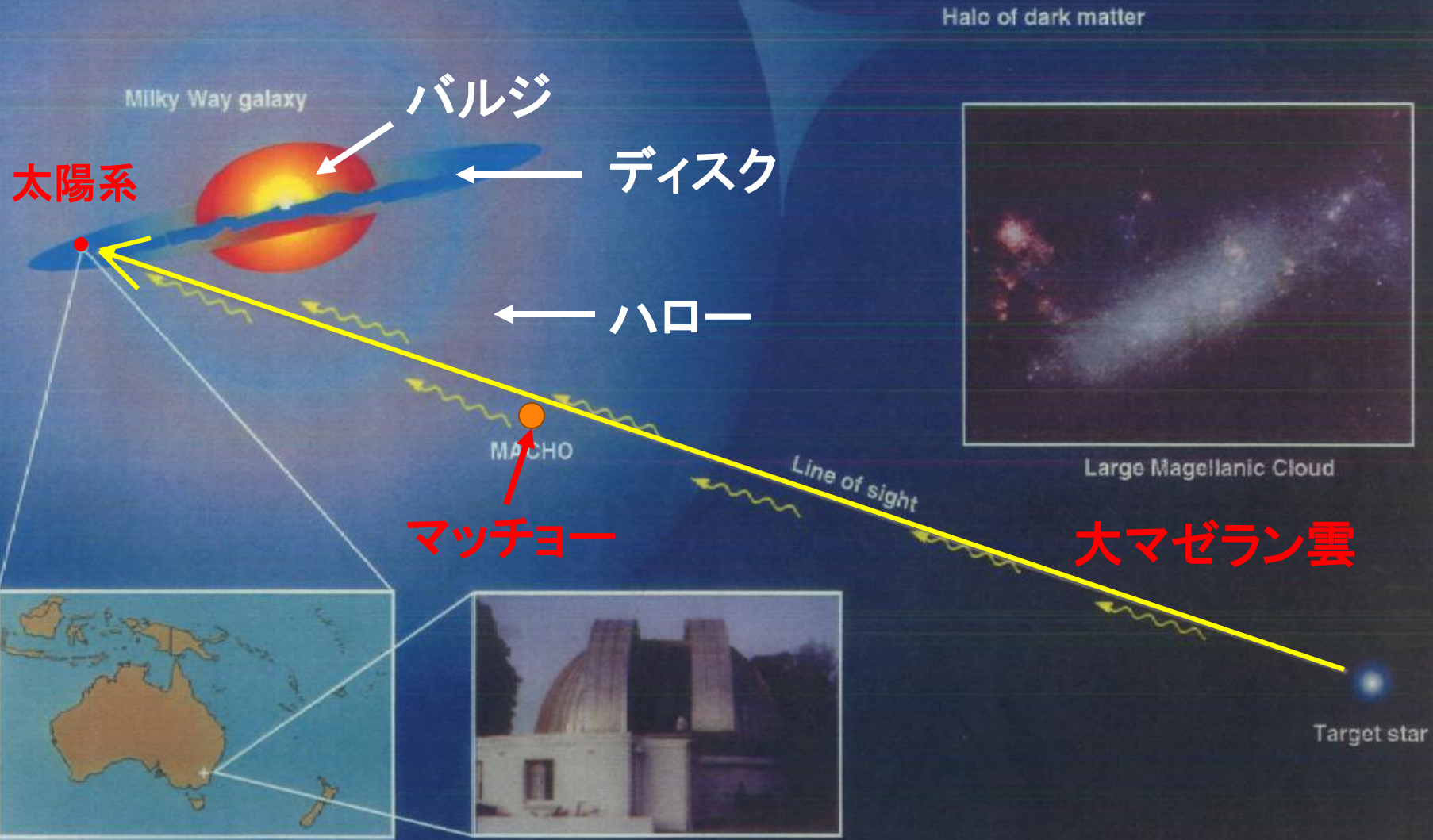
$$70\% \times M_{\text{HALO}} \approx M_{\text{MACHOS}}$$

MACHO = massive astronomical Compact halo objects

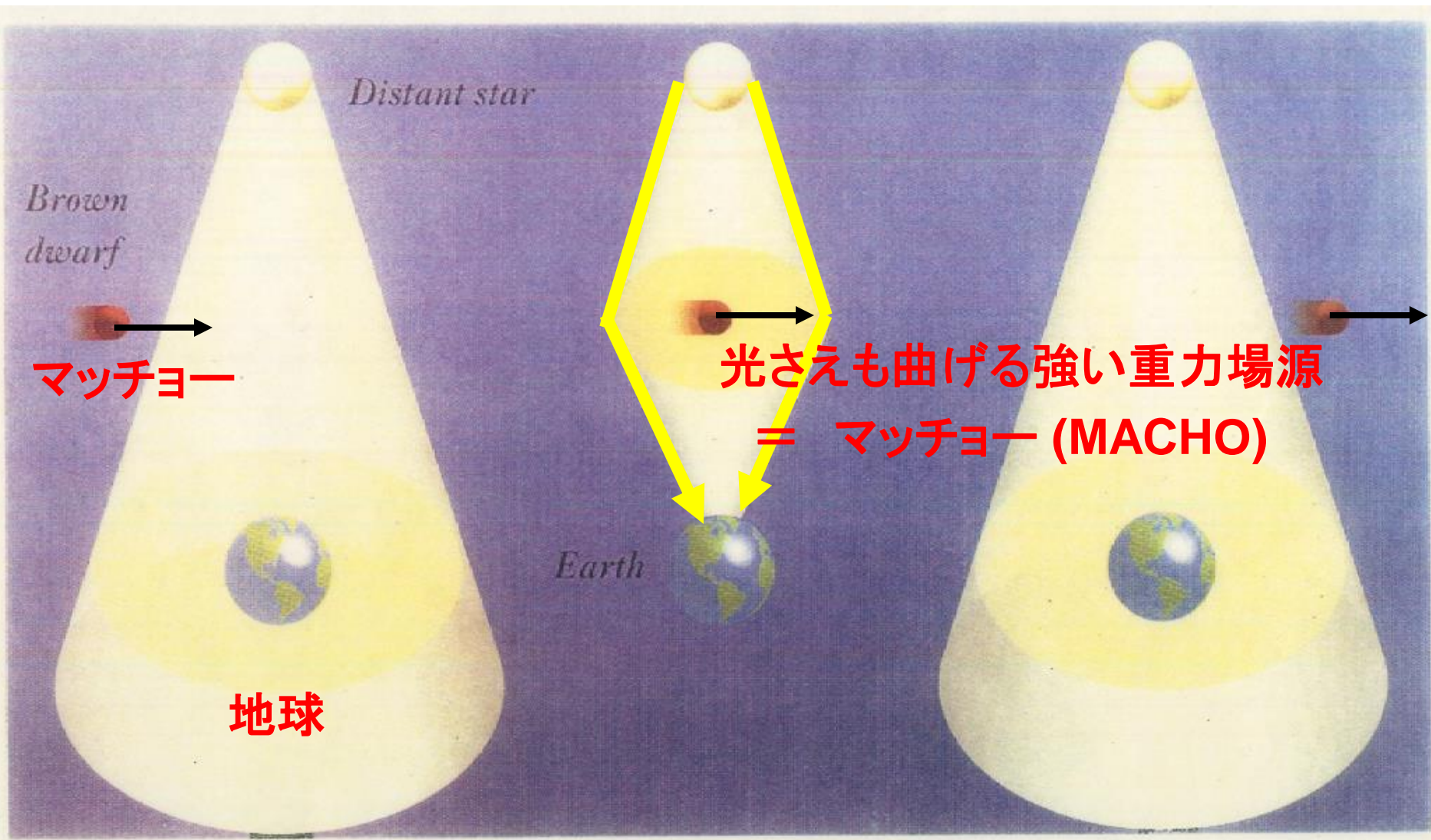


Almost ALL luminous stars

天の川（わが銀河）



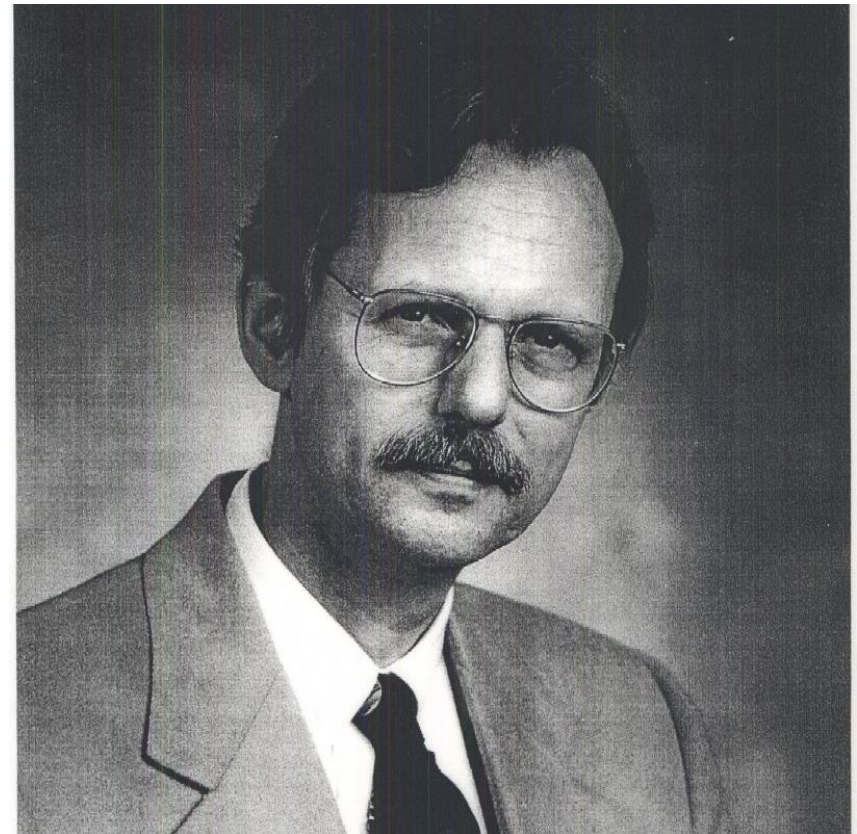
大マゼラン雲の星



マッチョを初めて見つけた科学者 チャールズ・アルコック

Charles R. Alcock

- ・オーストラリア
タスマニア島生まれ
- ・米国カリフォルニア工科大学卒
- ・MITで博士号取得
- ・MIT準教授への昇進に失敗
ローレンス・リバモア研究所へ
- ・マッチョを世界で初めて発見
- ・現在、ハーバード大学教授
スミソニアン研究所長



dark side of matter

THE MISSING UNIVERSE

BBN



$$\frac{\Omega_b}{\Omega_M}$$



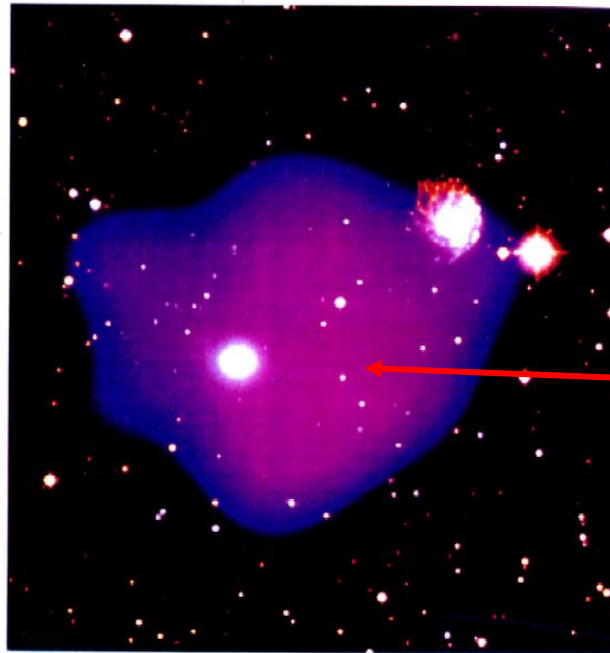
COSMOLOGY

?

X-RAY Satellites
ROSAT, ASCA

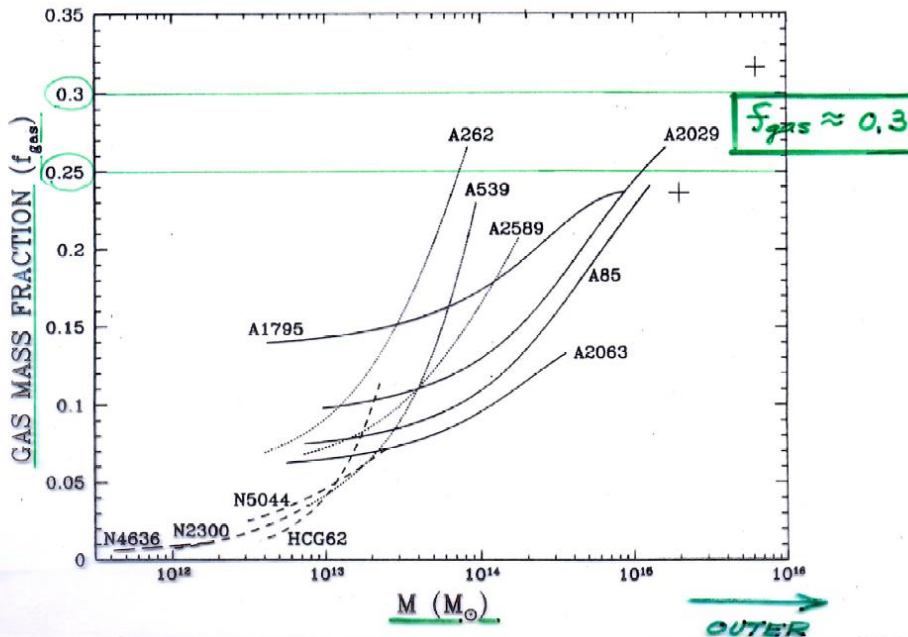


$$f_{gas} h_{50}^{-3/2}$$



CLUSTER

Hot X-Ray Gas



Asymptotic Value
= Universal Gas Fraction

$$f_U = \Omega_b / \Omega_M h_{50}^{3/2}$$

$$\Omega_b h_{70}^2 \sim 0.04 \text{ (WMAP)}$$

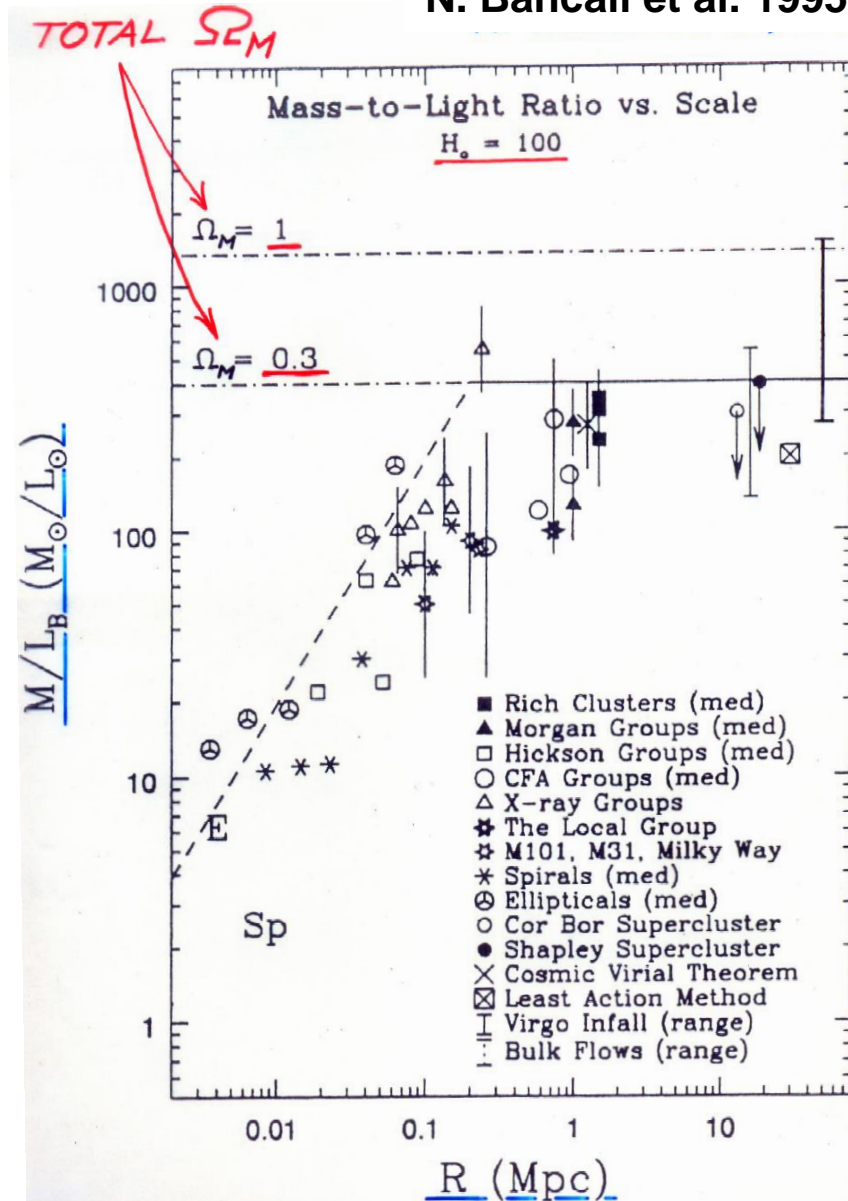
$$\Omega_M \sim 0.27 h_{70}^{-1/2}$$

RICH CLUSTER

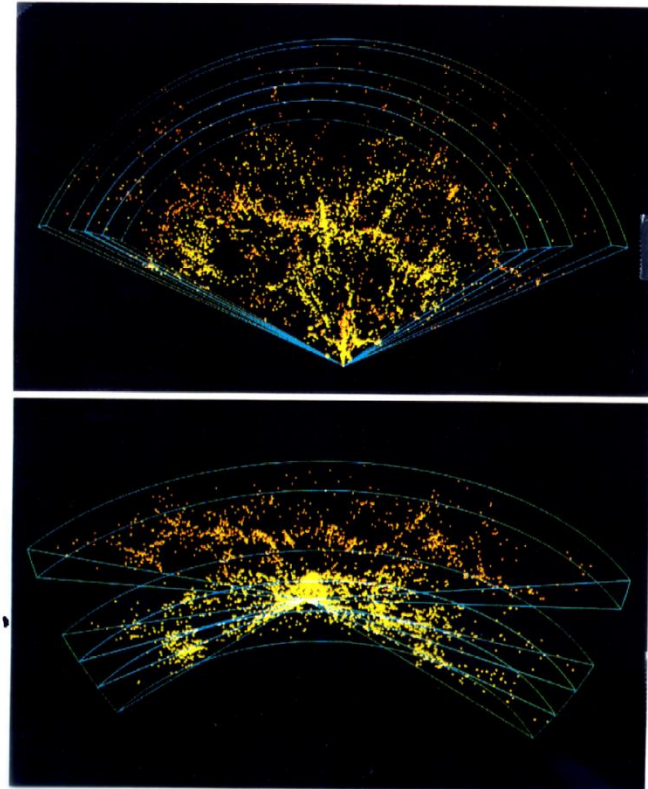
N. Bahcall et al. 1995

MASS of the Rich Clusters and the Cosmic Large Scale Structure

Asymptotically Universal Mass $\Omega_M \sim 0.3$



Cosmic Large Scale Structure



How massive is the UNIVERSE?

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM}$$

$$\Omega_B^{(DM)}$$

$$\Omega_{Non.B}^{(DM)}$$

- Stars
- Luminous Gas ($\lesssim 0.07$)

MACHOs
($0.07 \lesssim$)

- Black Holes
- Neutron Stars
- White Dwarfs
- Brown Dwarfs
- Planets

($0.1 - 0.3 h_{50}^{-2} \lesssim$) - Invisible Gas

(?)

- Primordial BHs
- SGMs

- Hot Dark Matter
 $m_{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau} \neq 0$?
- Cold Dark Matter
Axion
SUSY's

X WIMPs ; $45 \text{ GeV} < m$
RULED OUT!

How to determine the cosmological parameters ($\Omega_i = \rho_i / \rho_c$) ?

- $\Omega_{\gamma\nu} < 0.01\%$ $\Omega_{\gamma} \rightarrow$ Temperature of CBR (Cosmic Background Radiation)
 $\Omega_{\nu} \rightarrow$ Upper limit from neutrino oscillation
 - $\Omega_{\Lambda} = 68\%$ **Ia Supernovae** **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
 - $\Omega_{\text{CDM}} = 27\%$ **Ia Supernovae** **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
Gravitational Lensing
 - $\Omega_{\text{B}} = 5\%$ **CMB** (Cosmic Background Anisotropies)
Big-Bang Nucleosynthesis
-

* $\Omega_{\gamma\nu} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{B}} + \Omega_{\Lambda} = 1$ From all above combination

* Cosmic Age **Ia Supernovae** + All above combination = 13.8 Gy

Cosmic Microwave Background Anisotropies

Two-point (direction) Correlation
Function:

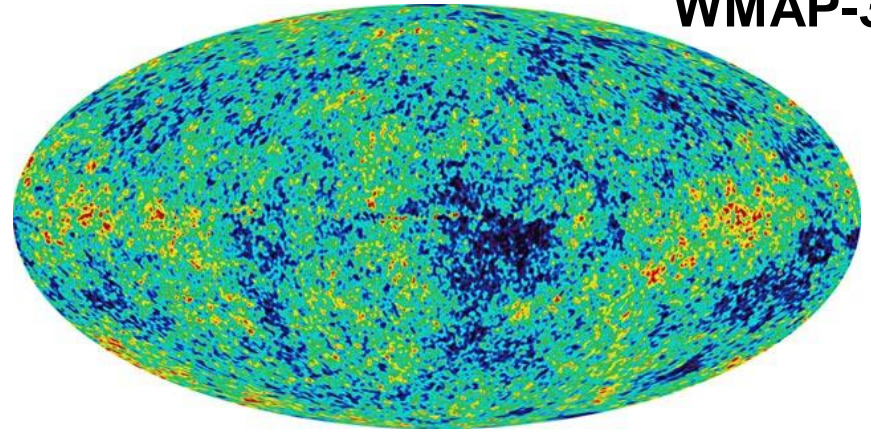
$$\xi = \langle \delta T/T(\mathbf{n}) \cdot \delta T/T(\mathbf{n} + \boldsymbol{\theta}) \rangle$$

Temperature Fluctuations, expanded
in terms of spherical harmonics:

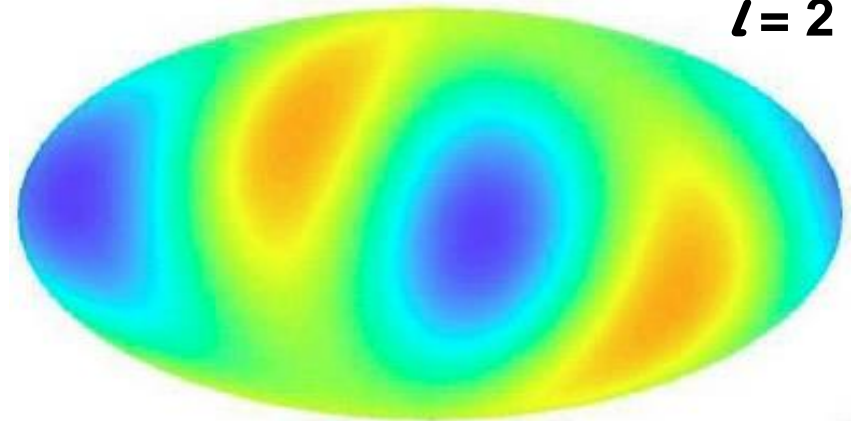
$$\frac{\delta T}{T} = \sum_l \sum_m a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$C_l \equiv \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$

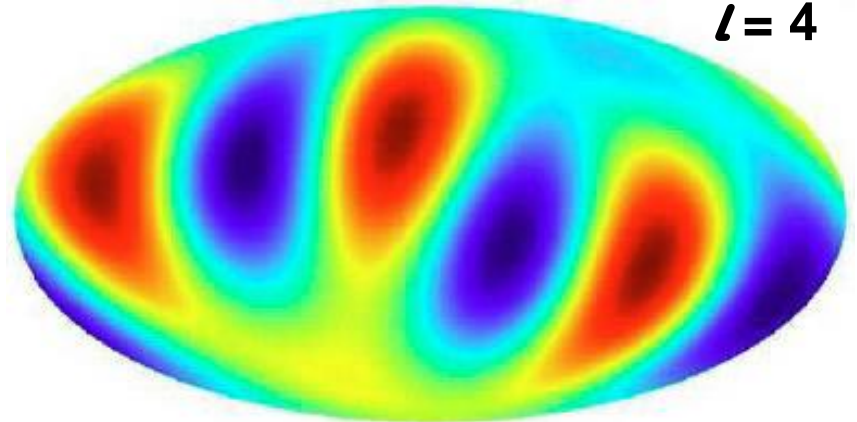
WMAP-3



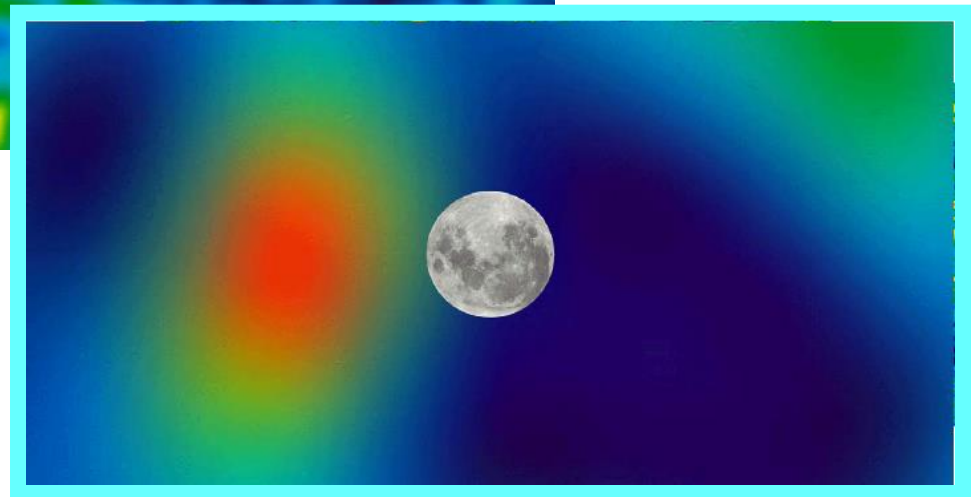
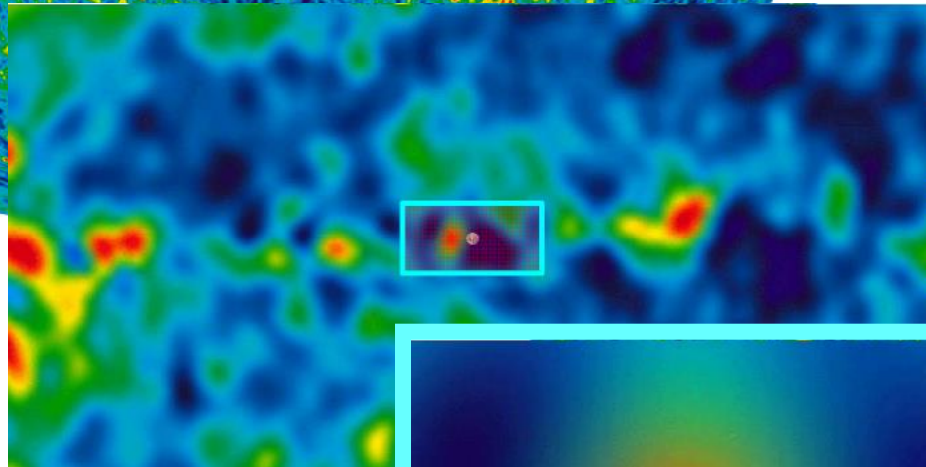
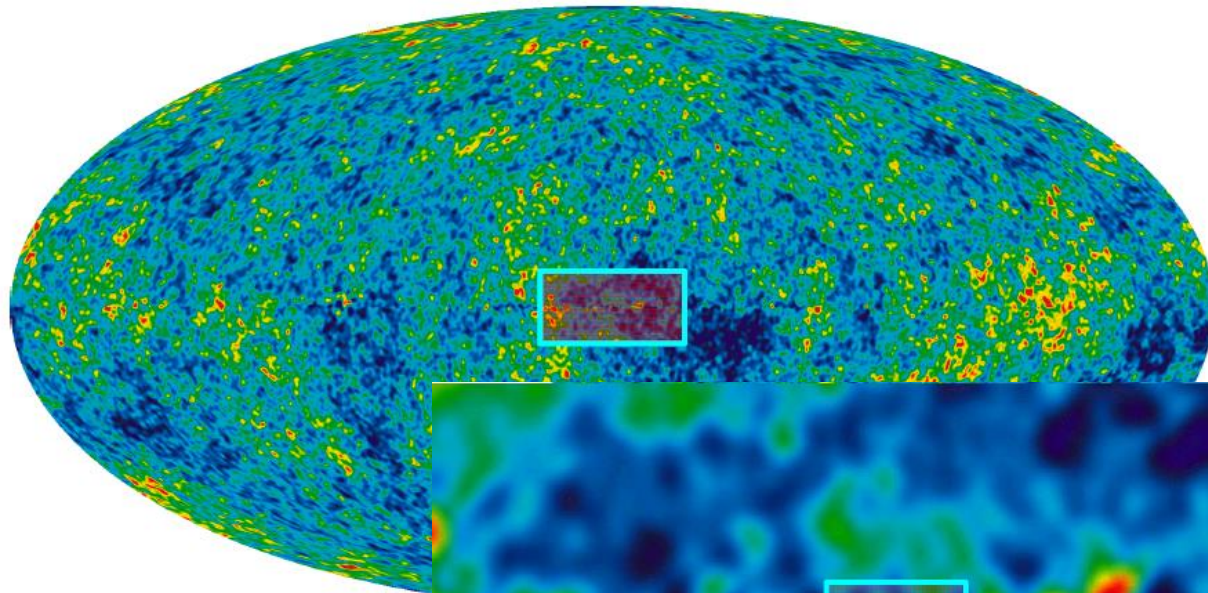
$l = 2$



$l = 4$



CMB Anisotropies of Temperature Fluctuations



Full Moon

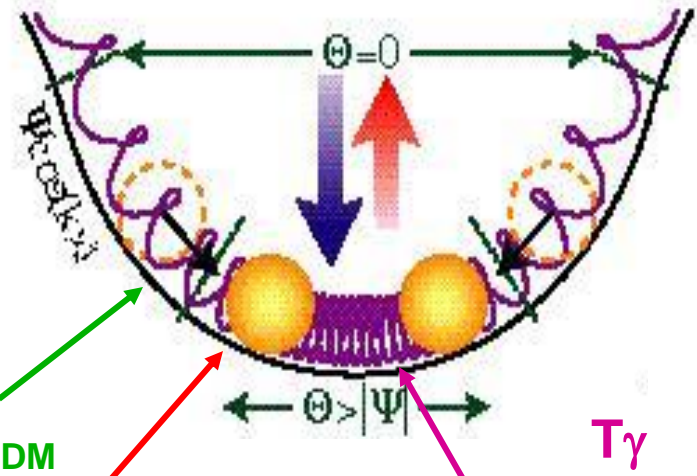
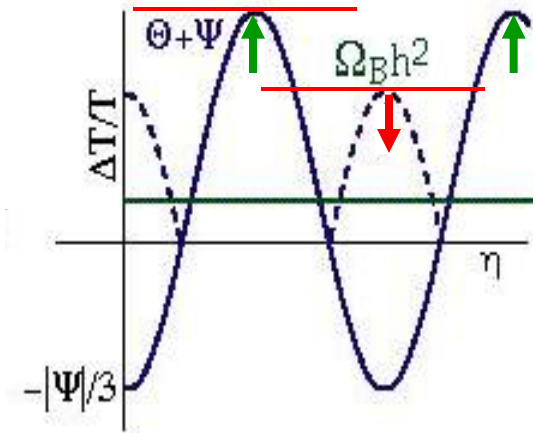
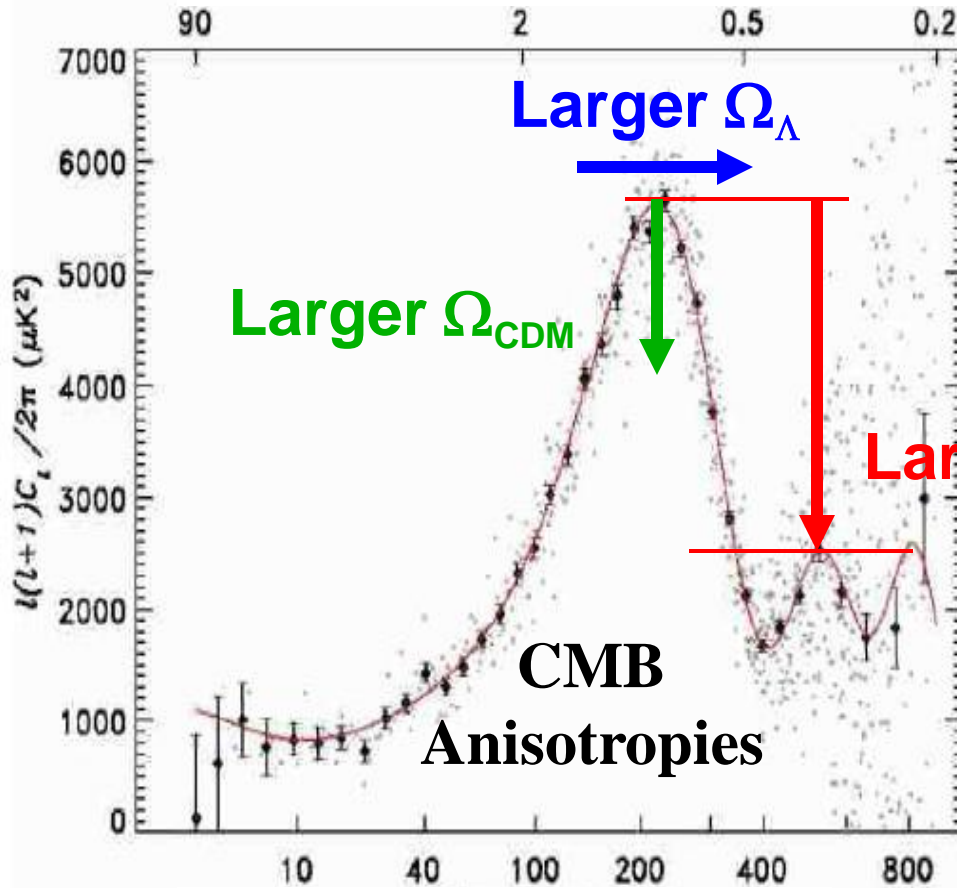
Solid Angle

~ 31 min

~ 0.52 deg

Cosmological Parameter Dependence

Angle (deg) $\theta \rightarrow$ smaller



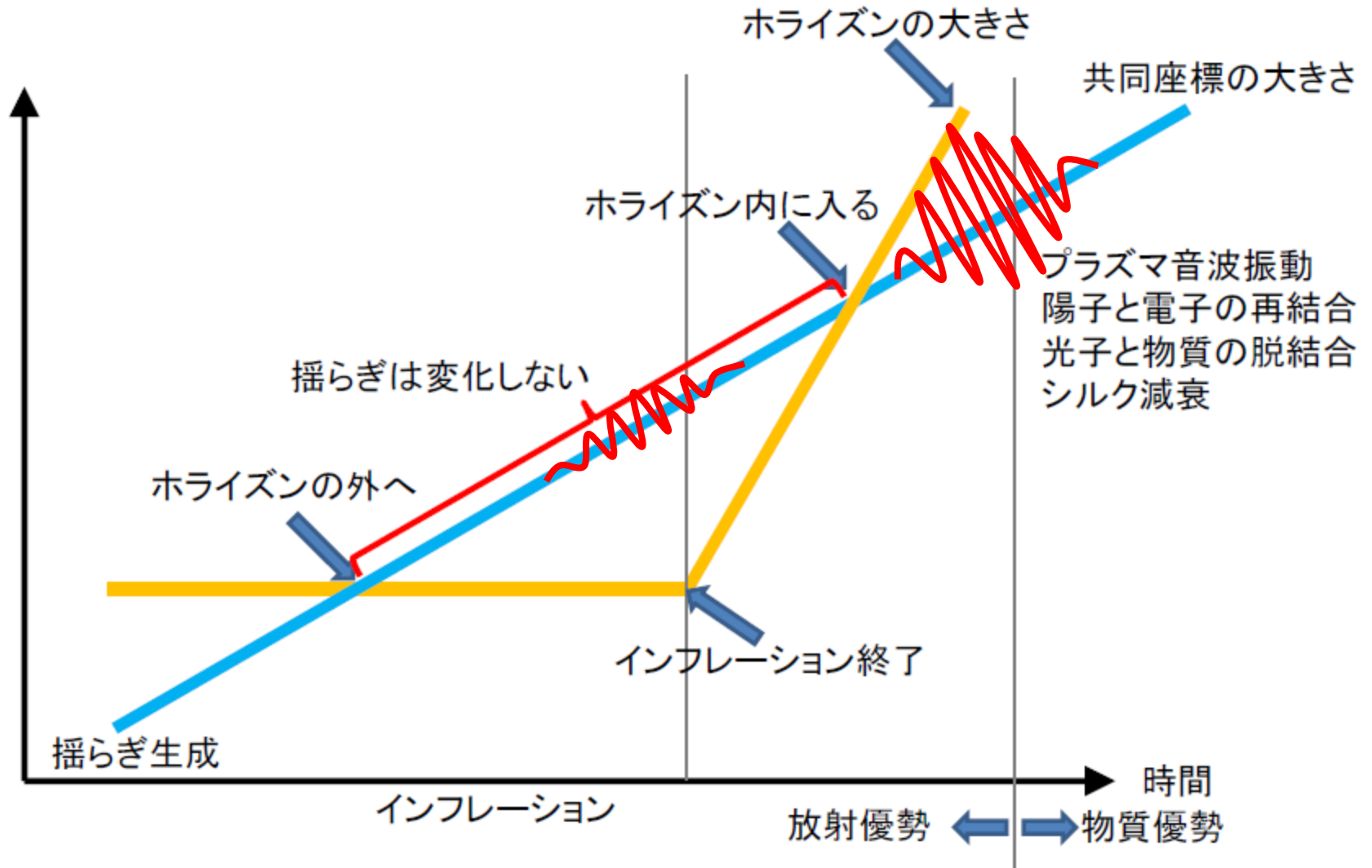
Dark Matter potential Ω_{CDM}

Baryon Mass Ω_B

Photon Pressure

宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの特徴

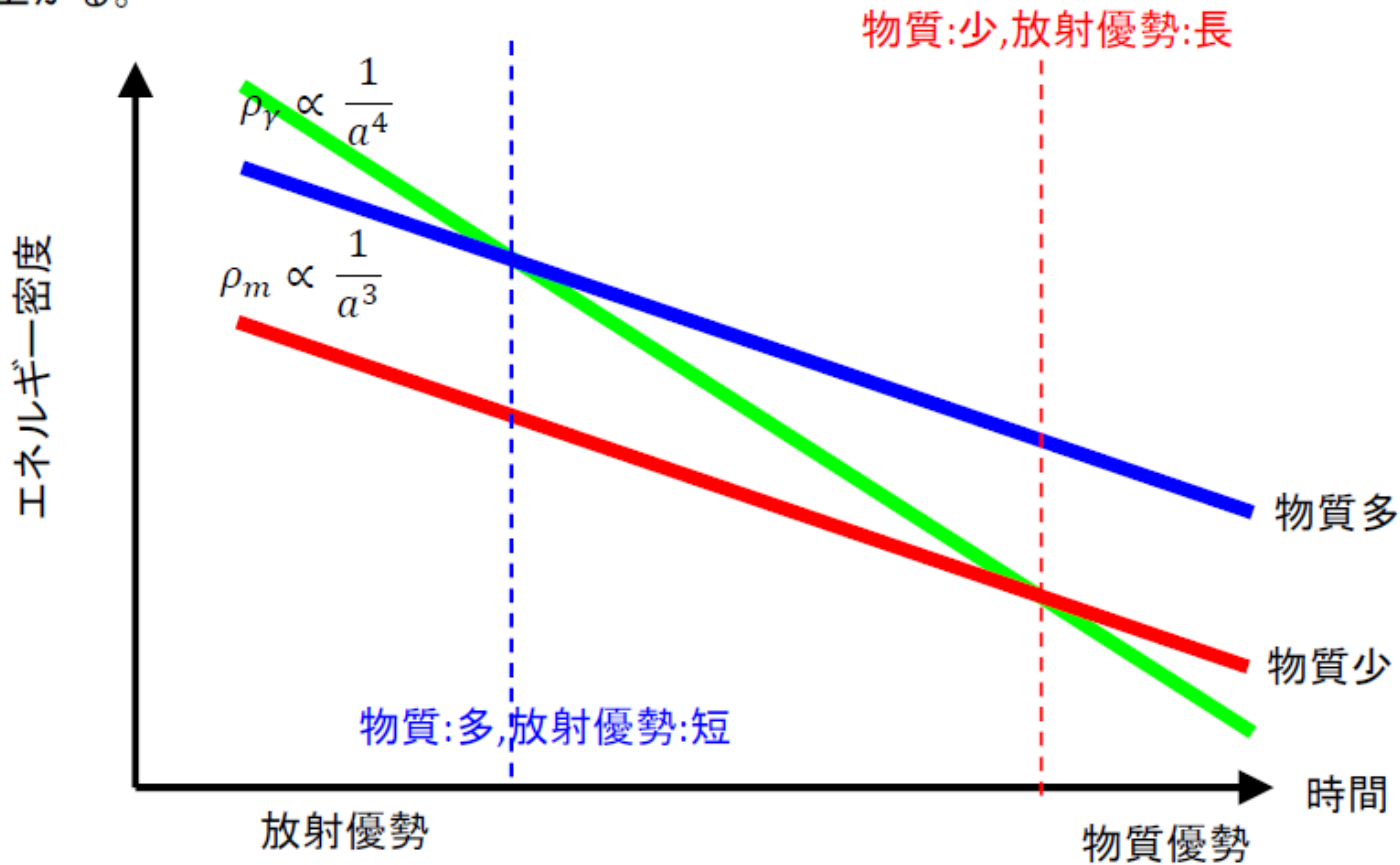
温度揺らぎの特徴は、陽子と電子の再結合前後のプラズマ音波振動で説明できる。

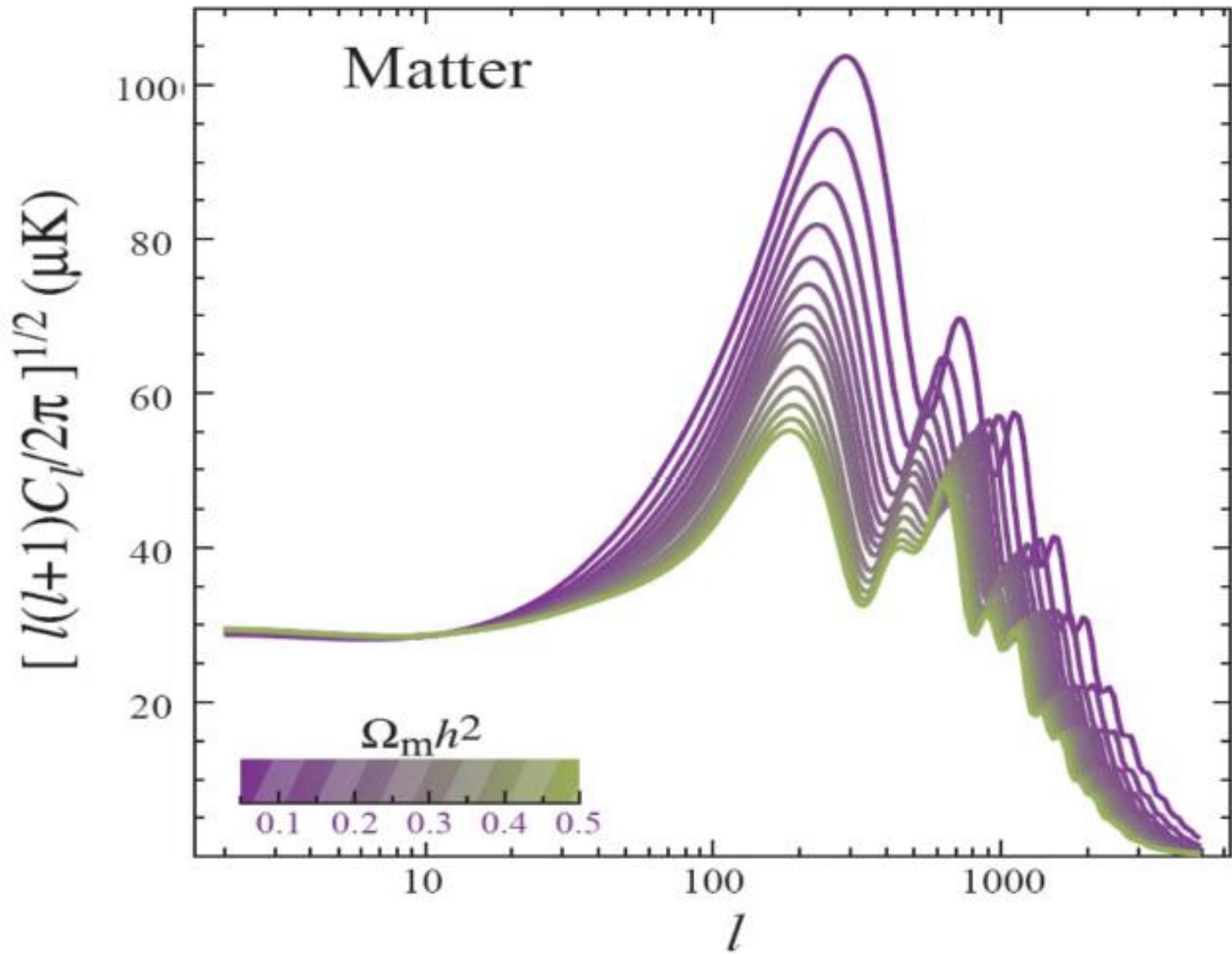


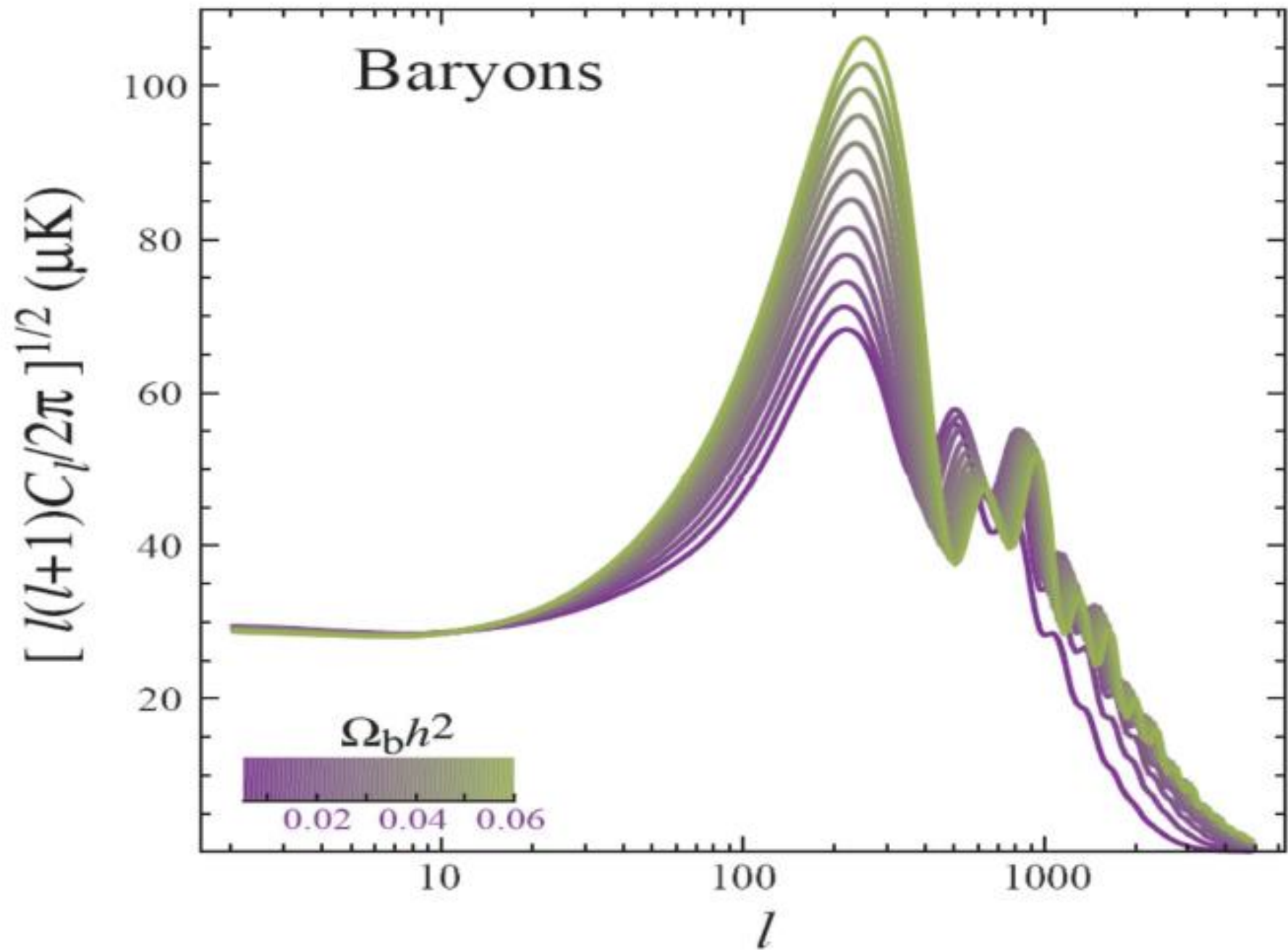
放射優勢時のポテンシャル崩壊

放射優勢時にホライズンに入ったスケールは、放射によるポテンシャルの崩壊が起こり振幅が増える。小さいスケールほどホライズンに入るのが早いため、小さいスケールほどポテンシャル崩壊の度合いが大きい。

放射優勢から物質優勢に変換する時期は、放射のエネルギー密度と物質の密度の比で決まる。物質の密度が小さいほど放射優勢の時代が長いため、ポテンシャル崩壊が進み、振幅が上がる。



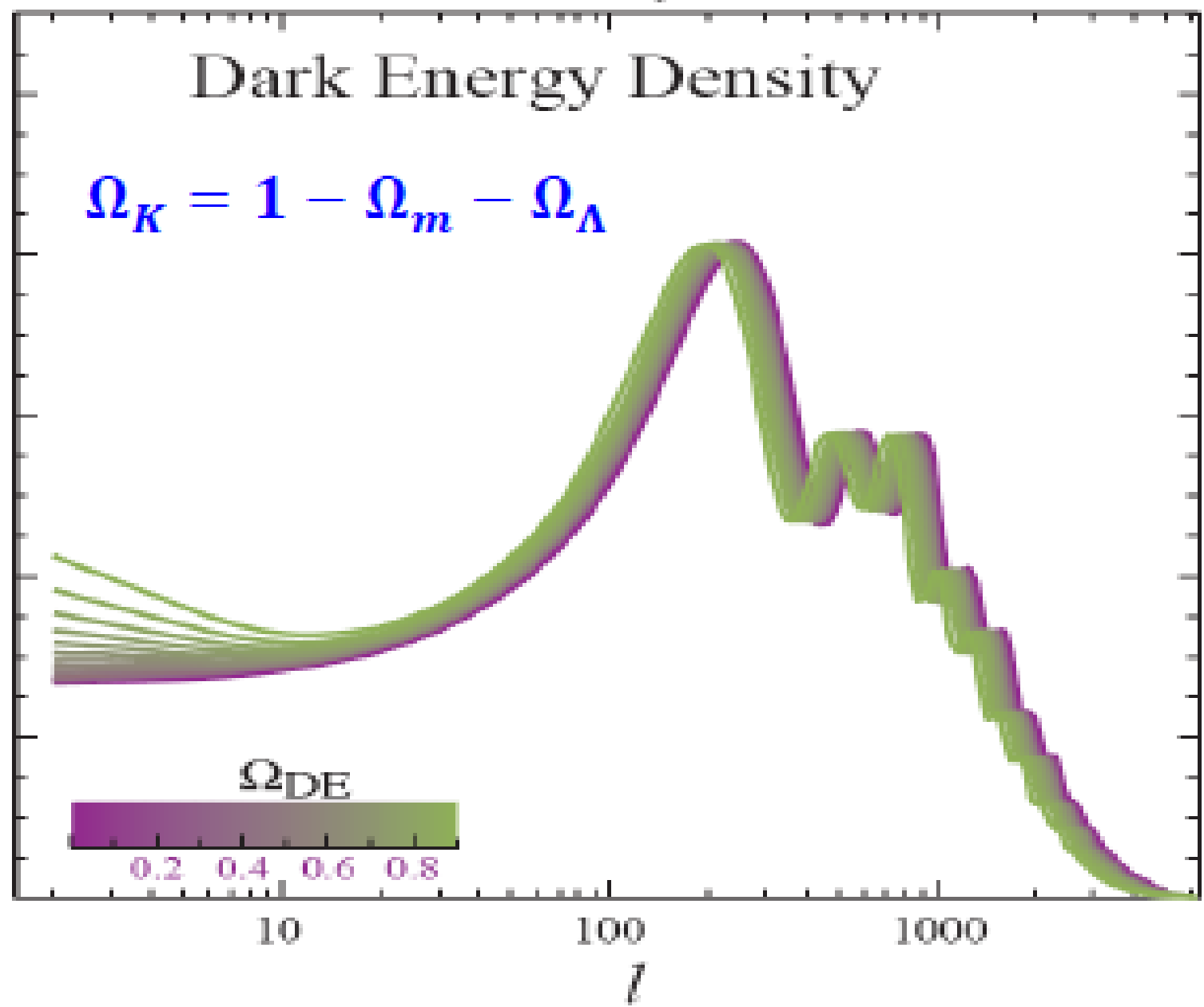


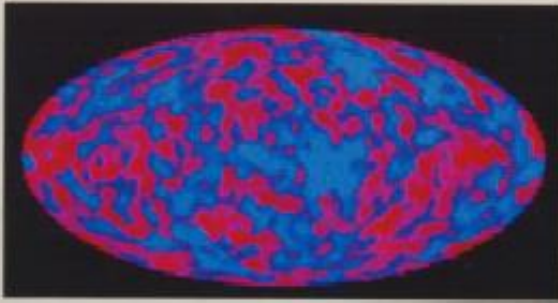


Dark Energy Density

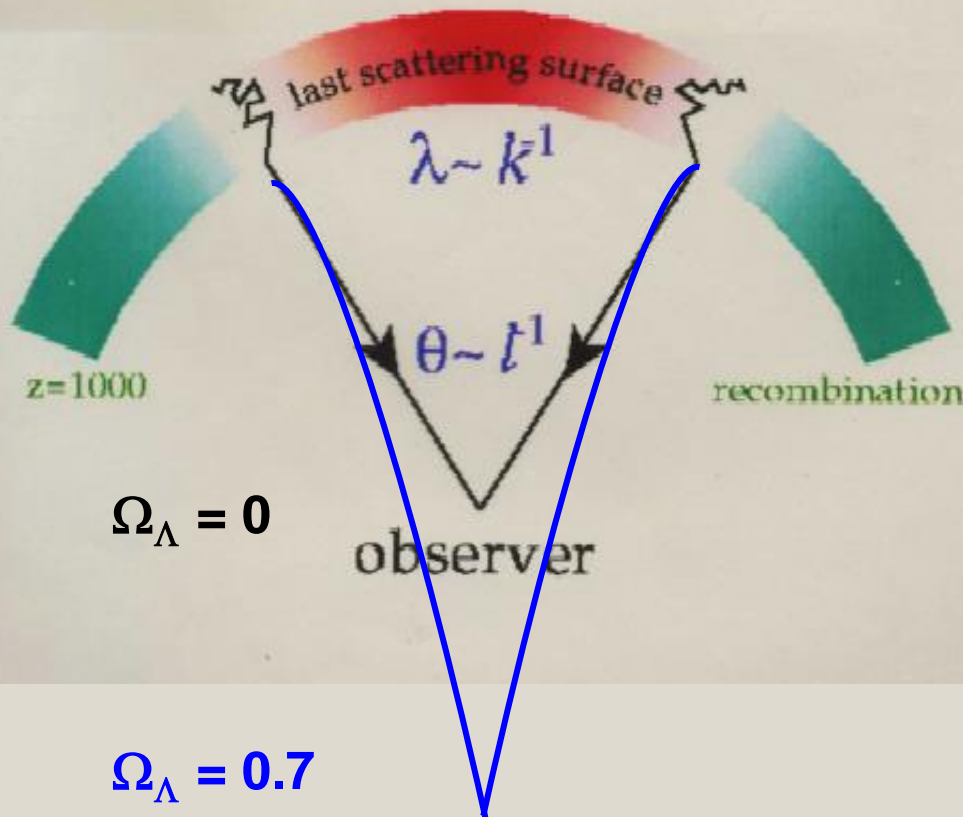
$$\Omega_K = 1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda$$

$[l(l+1)C_l/2\pi]^{1/2} (\mu\text{K})$





COBE Satellite



Larger Ω_{Λ}



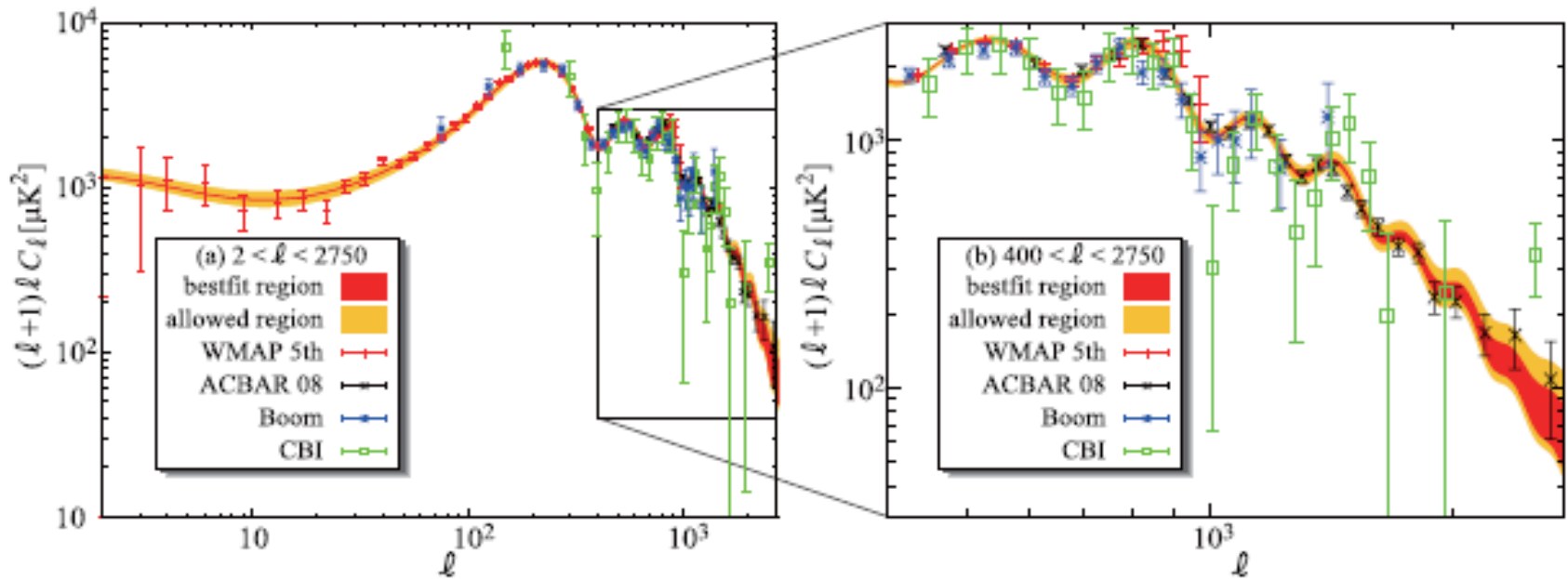
Universal expansion becomes faster !



Physical fluctuation length scale $\lambda \sim k^{-1}$ looks smaller in smaller angular scale $\theta \sim l^{-1}$ for observer !

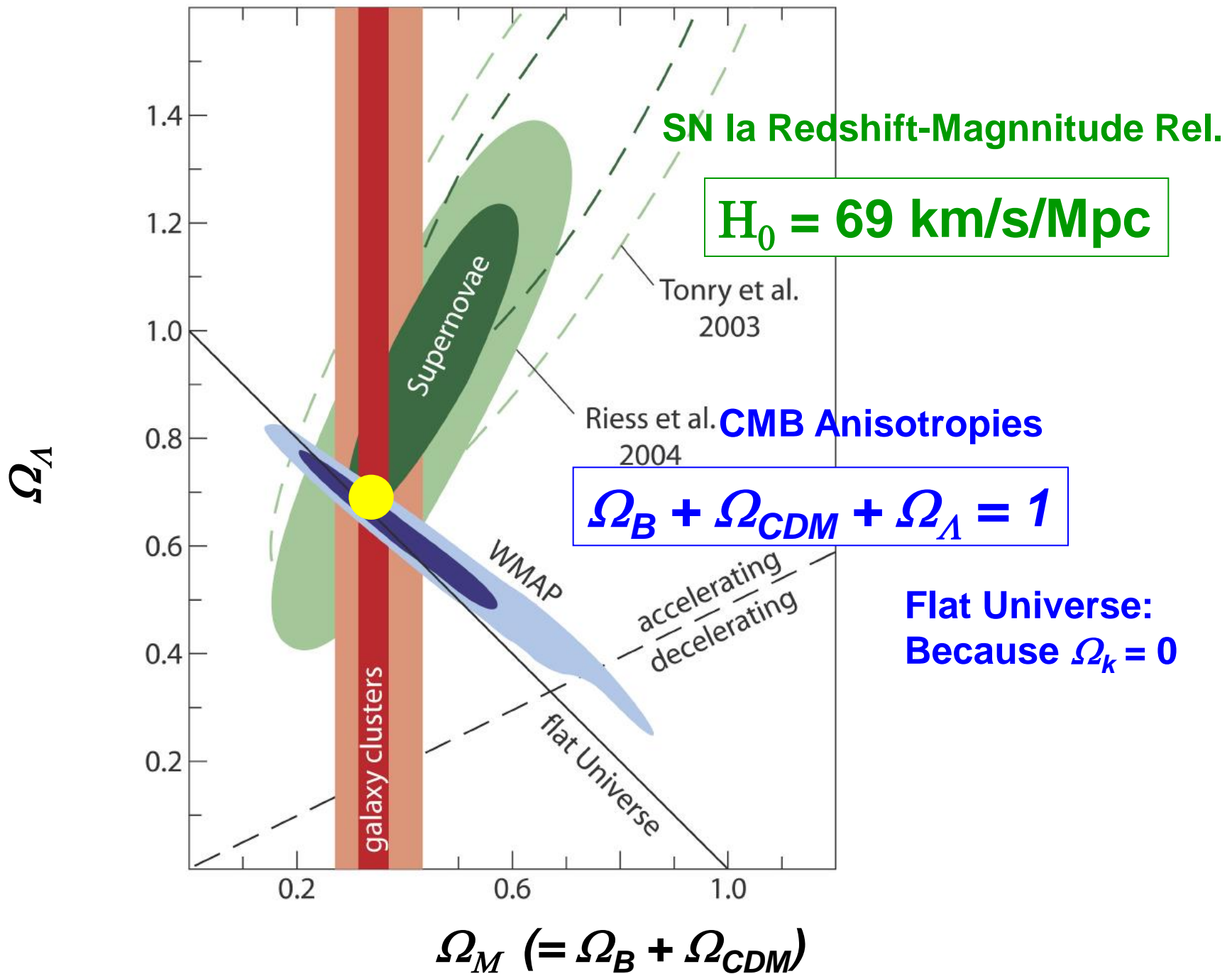
Fit to CMB-Temperature Fluctuation Anisotropies

D. Yamazaki, T. Kajino, G. J. Mathew & K. Ichiki, Phys. Rep. (2012), in press.



| Cosmological parameters | | |
|-------------------------|--|----------------|
| Parameter | Mean | Best fit |
| $\Omega_b h^2$ | 0.02320 ± 0.00059 | 0.02295 |
| $\Omega_c h^2$ | 0.1094 ± 0.0046 | 0.1093 |
| τ_c | 0.087 ± 0.017 | 0.082 |
| n_s | 0.977 ± 0.016 | 0.970 |
| $\ln(10^{10} A_s)$ | 3.07 ± 0.036 | 3.06 |
| A_r/A_s | $<0.170(68\text{CL}), <0.271(95\text{CL})$ | 0.0088 |
| $ B_\lambda $ (nG) | $<2.10(68\text{CL}), <2.98(95\text{CL})$ | 0.85 |
| n_B | $<-1.19(68\text{CL}), <-0.25(95\text{CL})$ | -2.37 |
| σ_8 | $0.812^{+0.028}_{-0.033}$ | 0.794 |
| H_0 | 73.3 ± 2.2 | 72.8 |
| z_{reion} | 10.9 ± 1.4 | 10.5 |
| Age (Gyr) | 13.57 ± 0.12 | 13.62 |

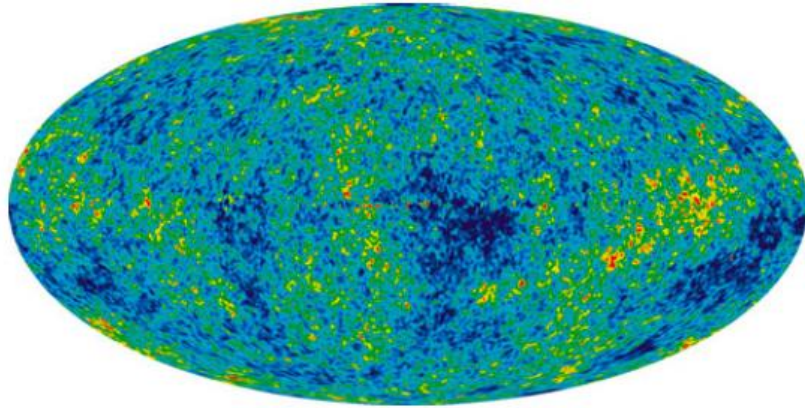
$$\Omega_b h^2 = 0.023$$



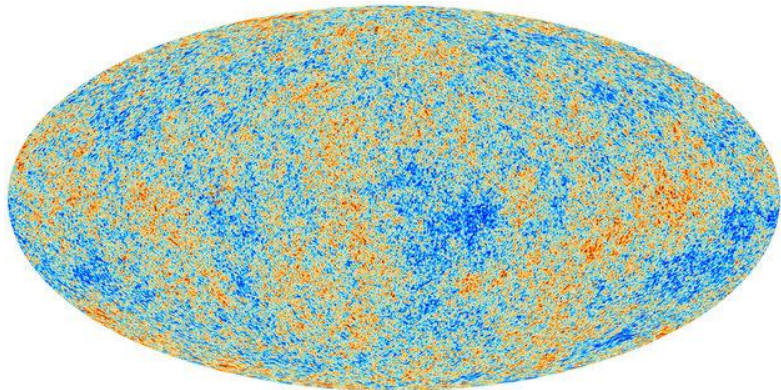
宇宙背景放射ゆらぎ

38万歳の頃のビッグバン火の玉宇宙の温度ゆらぎ

NASA(米国航空宇宙局)のWMAP衛星が映し出していた初期宇宙の姿



ESA(欧州宇宙機関)のPLANCK衛星が映し出した初期宇宙の姿 2013年3月21日



2012. 3. 31 → 2013. 4. 6

この1年間で本質的に新しい発見はあったか？

| | 宇宙年齢 | 暗黒物質 | 普通の物質 | 暗黒エネルギー |
|--------|---------|-------|-------|---------|
| WMAP | 137.7億年 | 22.7% | 4.5% | 72.8% |
| PLANCK | 138.2億年 | 26.8% | 4.9% | 68.3% |

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe