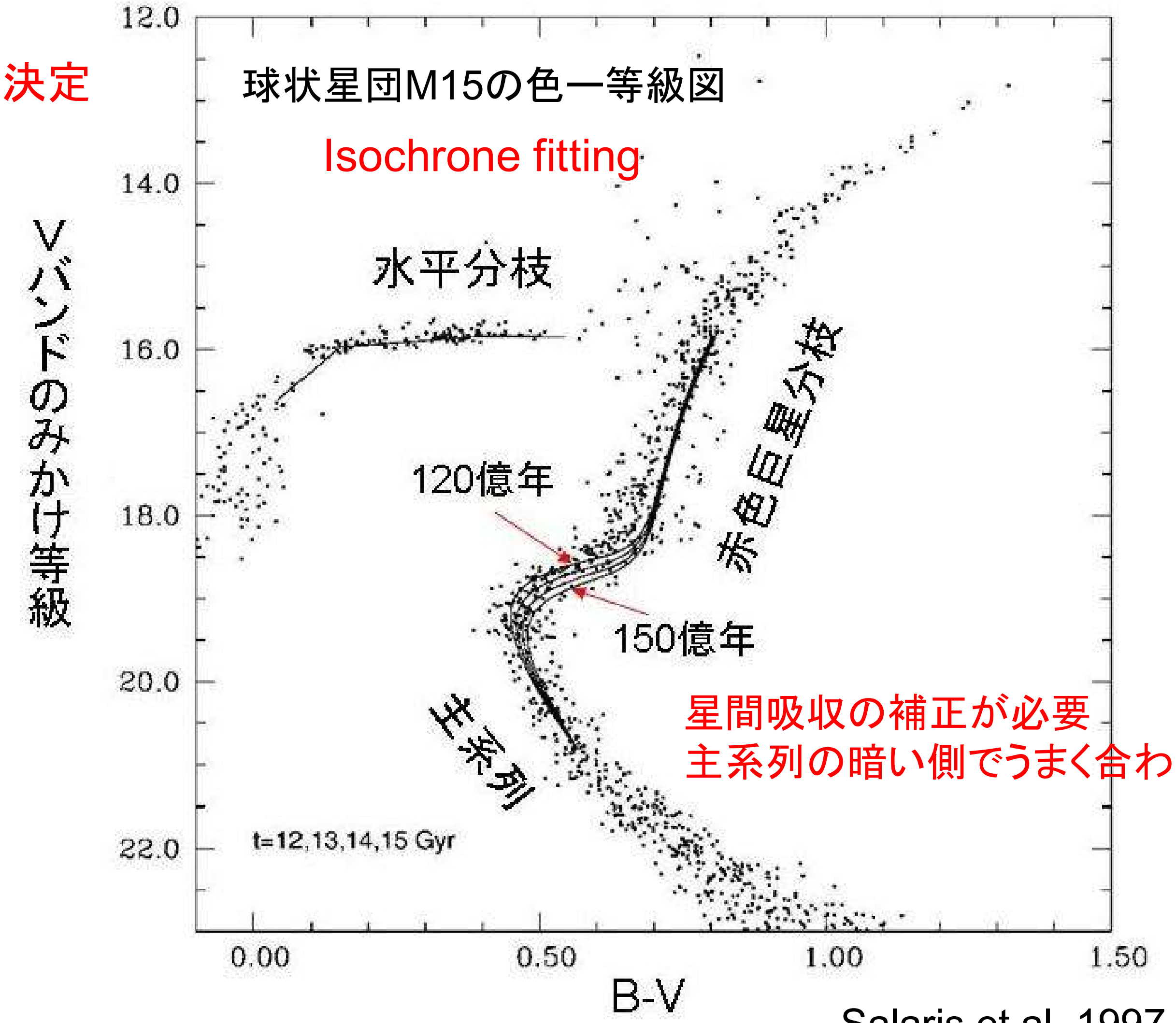
Chapter 2. 銀河の年代学と観測的宇宙論

球状星団の年齢決定



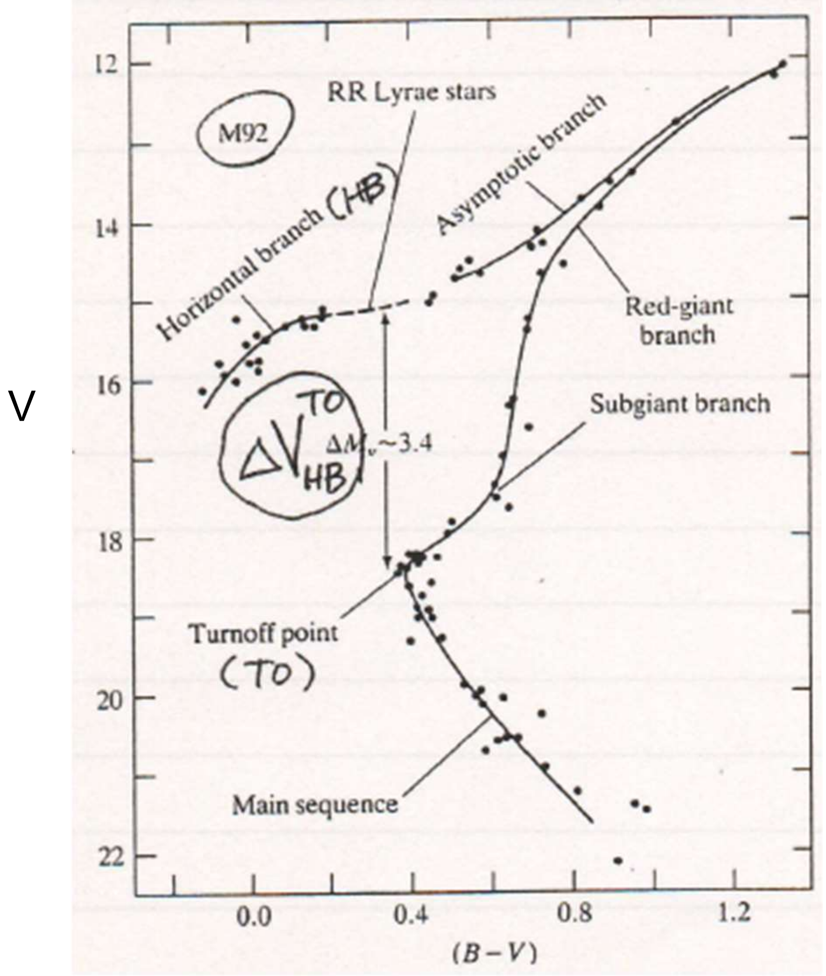
Isochrone fitting

星間吸収の補正が必要
主系列の暗い側でうまく合わない

Salaris et al. 1997

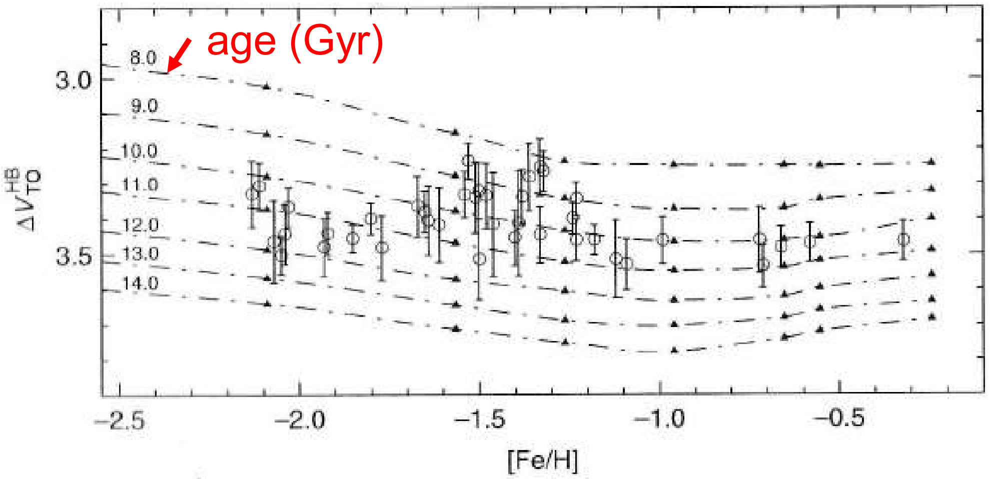
ΔV_{HB}^{TO}による年齢決定

M92の色等級図

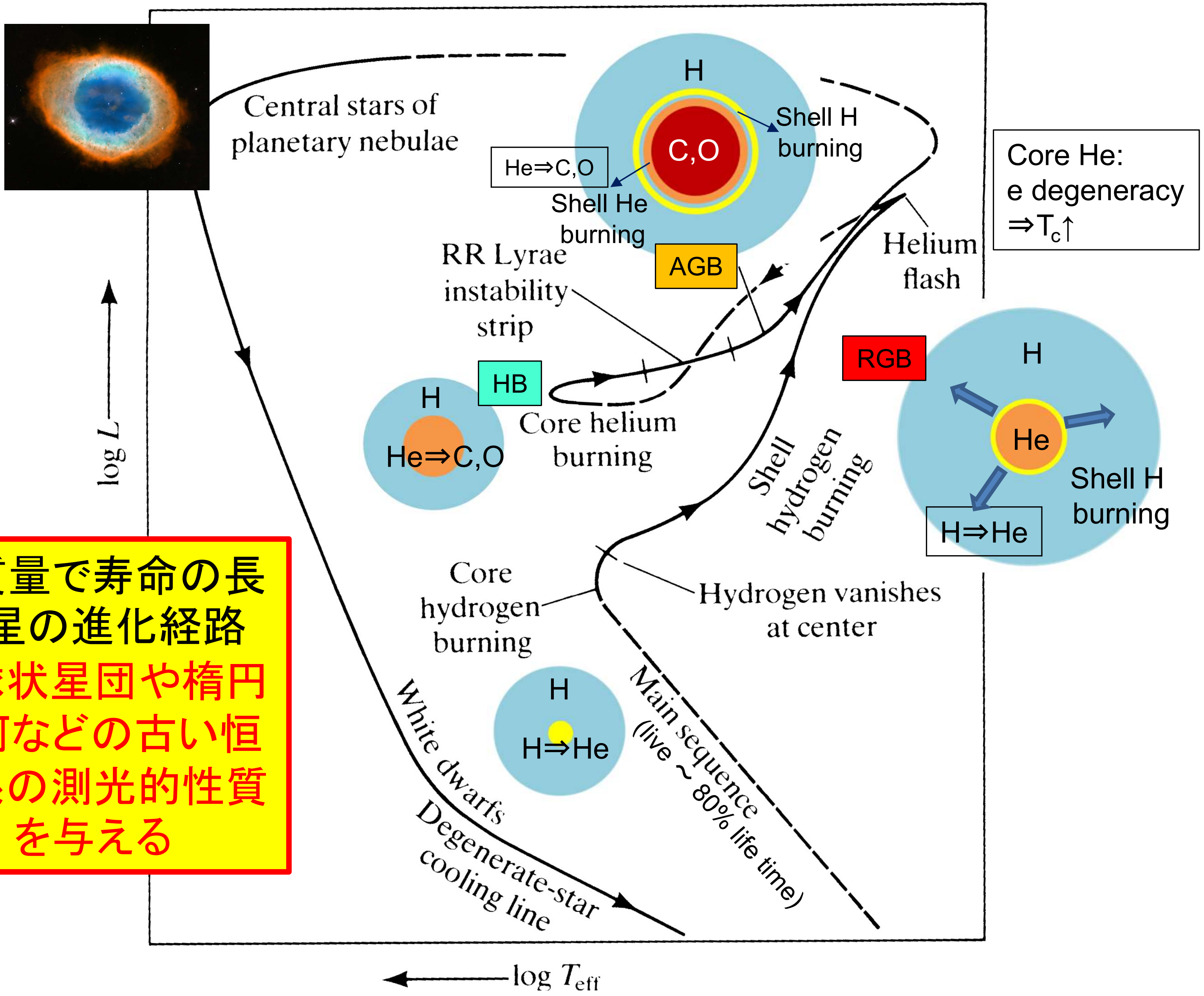


$M_V(TO)(t_{age}, [Fe/H])$
$M_V(RR)([Fe/H])$

⇨ $\Delta V_{HB}^{TO}(t_{age}, [Fe/H])$



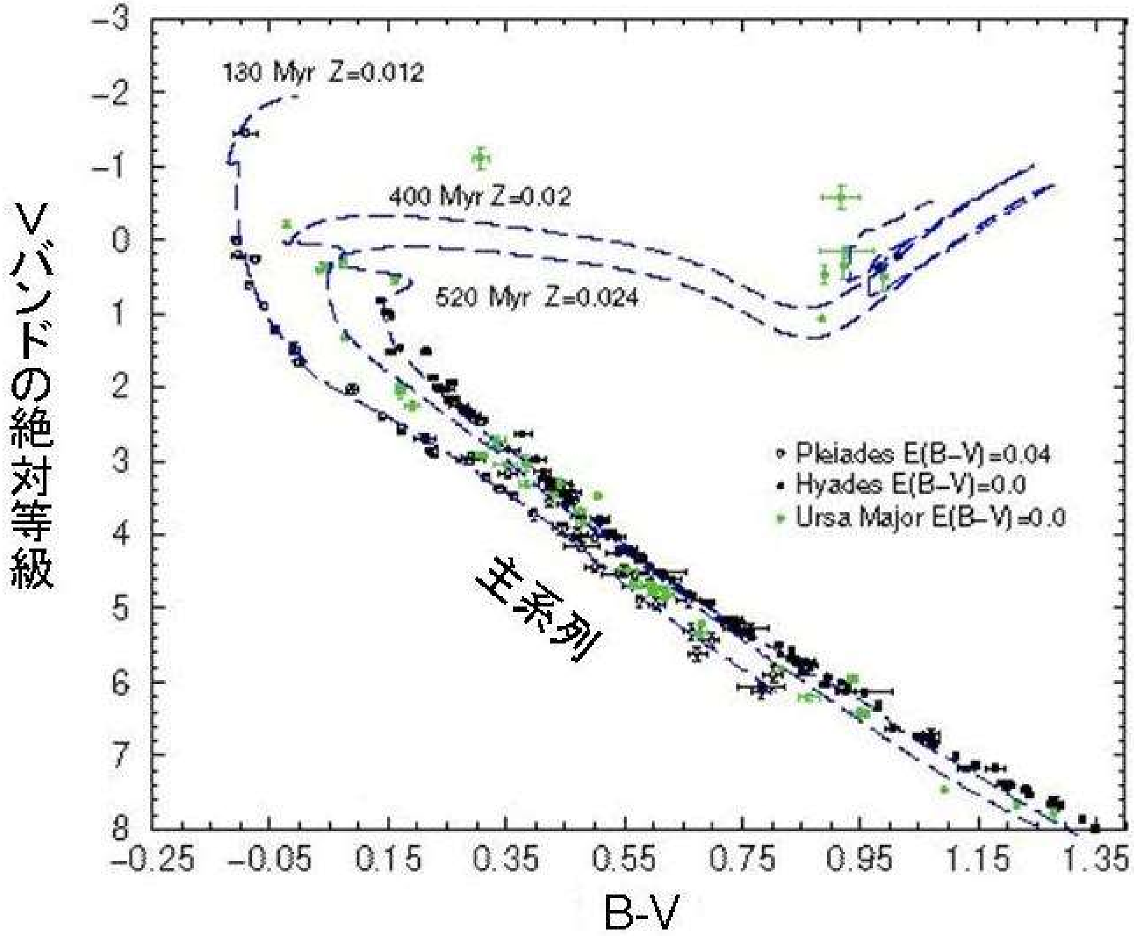
Given [Fe/H]
0.1 mag variation in ΔV: Δage ~1 Gyr
(insensitive to Δ[Fe/H])



小質量で寿命の長い星の進化経路

⇒球状星団や楕円銀河などの古い恒星系の測光的性質を与える

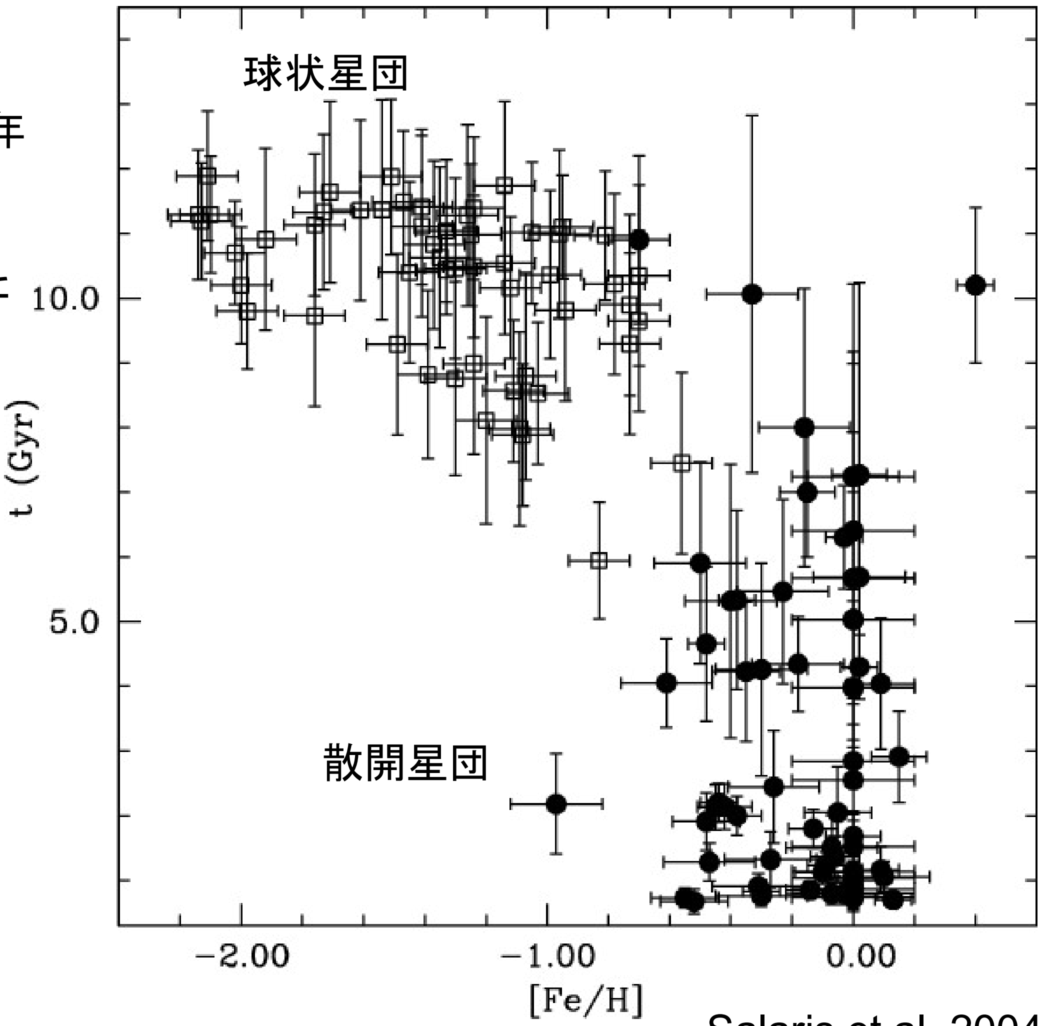
散開星団（プレアデス星団、ヒアデス星団、大熊座星団）の色一級図



Tordiglione, V. et al. 2003

散開星団と球状星団の金属量と年齢の関係

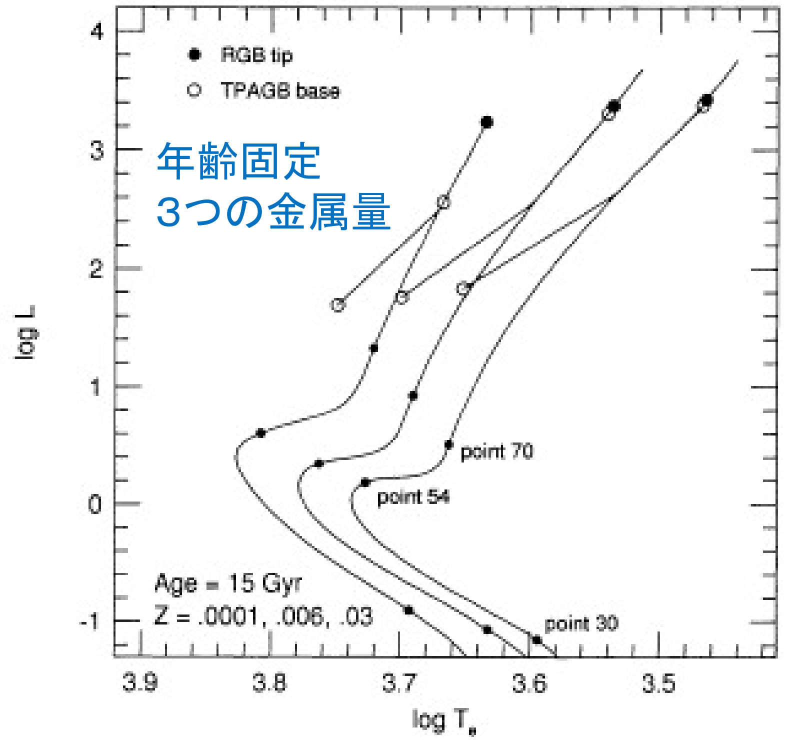
球状星団
古い上に数10億年
以上のばらつき
⇒銀河系初期に
一気に形成された
のではない

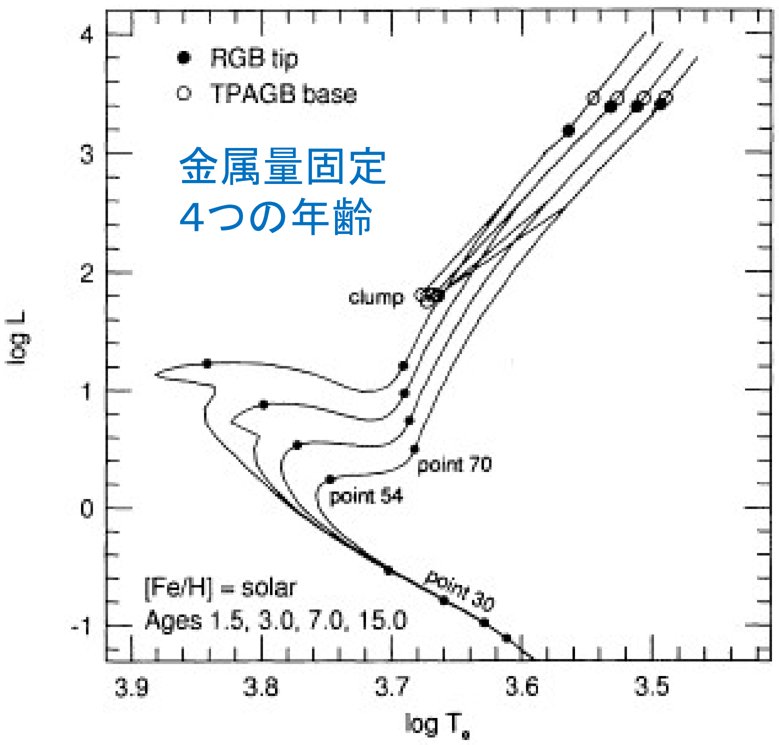


Salaris et al. 2004

散開星団
若く金属量多い

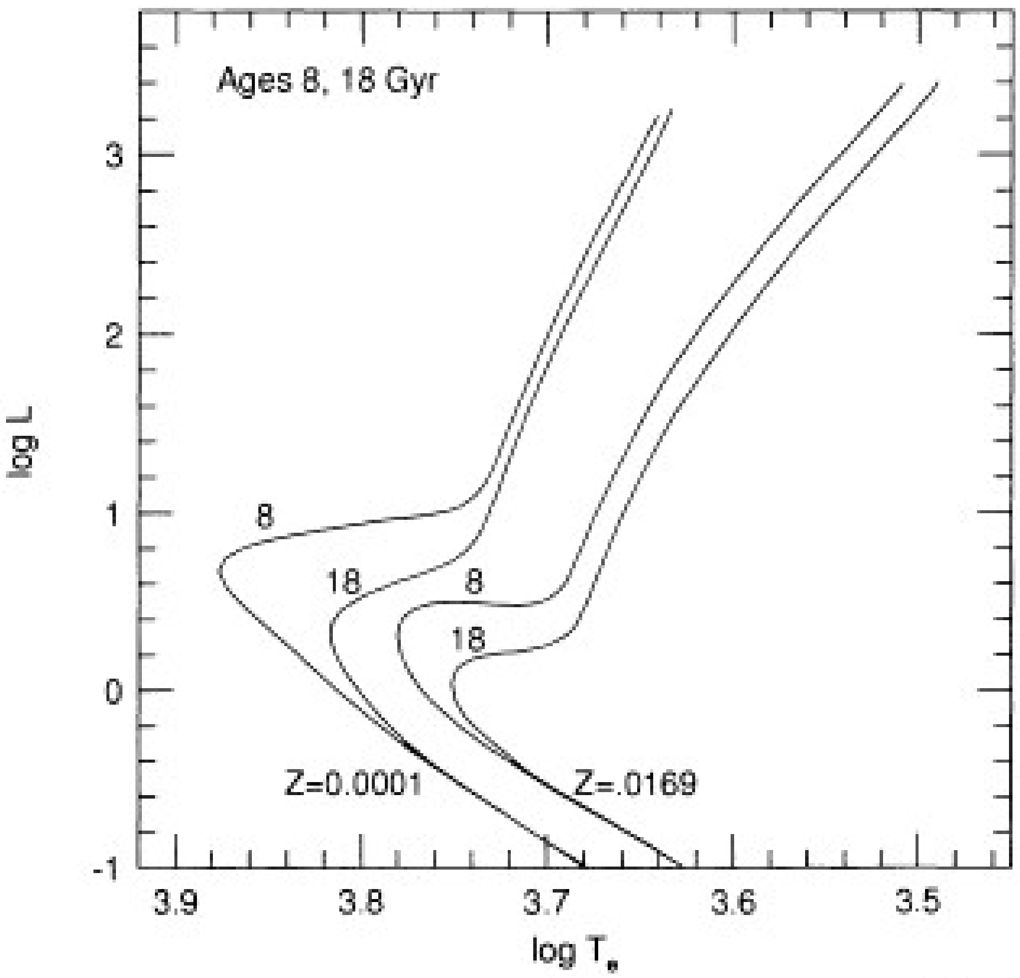
モデル結果


年齢固定
3つの金属量


金属量固定
4つの年齢

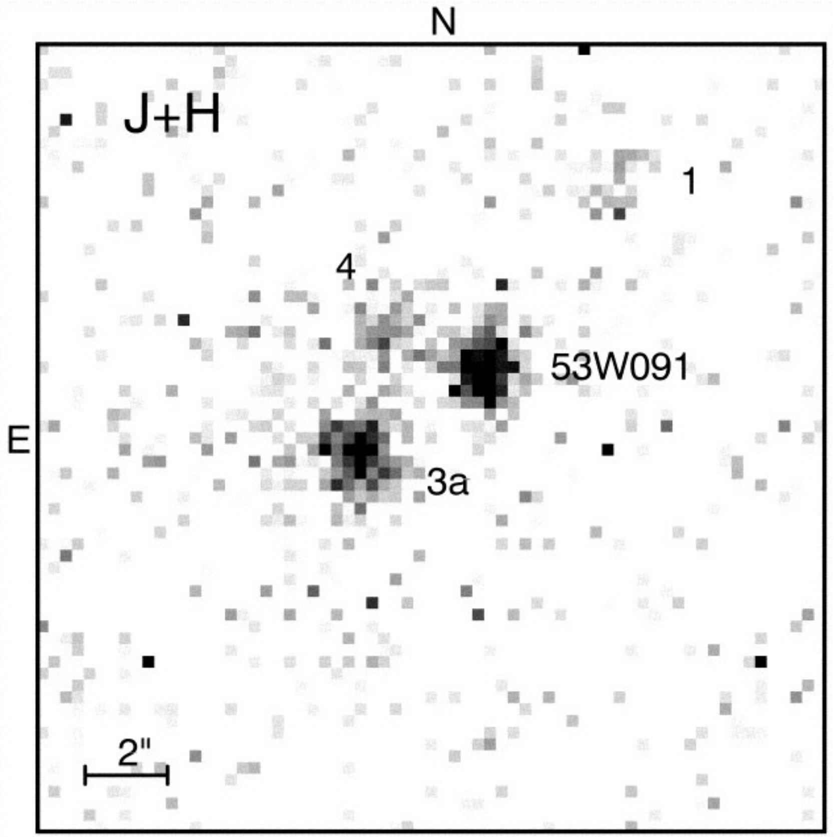
Worthey 1994

Age-metallicity degeneracy



Worthey 1994

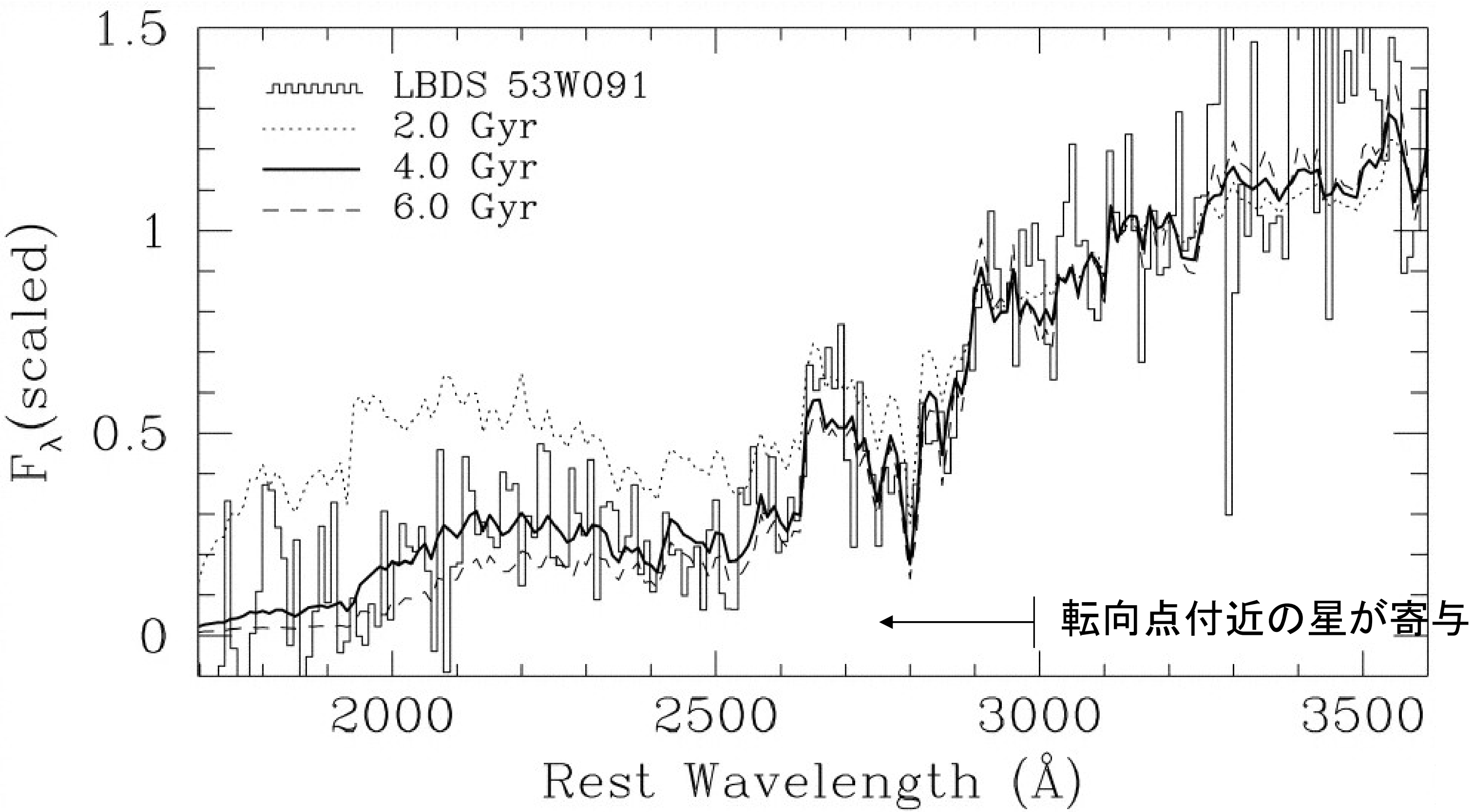
LBDS 53W091 at z = 1.552



R band (*blue*), *J* band (*green*), and *H* band (*red*)

Dunlop et al. 1996
Spinrad et al. 1997

LBDS 53W091のスペクトルとモデルの比較
（最初に星形成してその後恒星進化でスペクトルが変化）



年齢 ≥ 3.5 Gyr @ z=1.552

Dunlop et al. 1996
Spinrad et al. 1997

楕円銀河の進化モデル
(Worthey 1994)

年齢固定

金属量固定

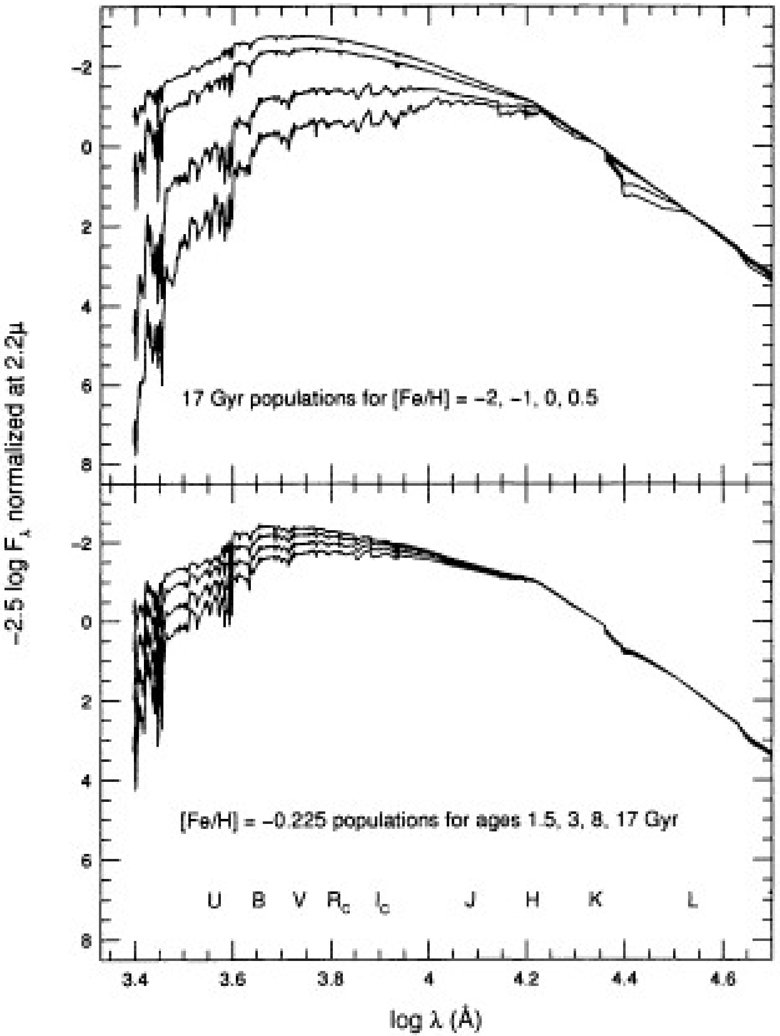
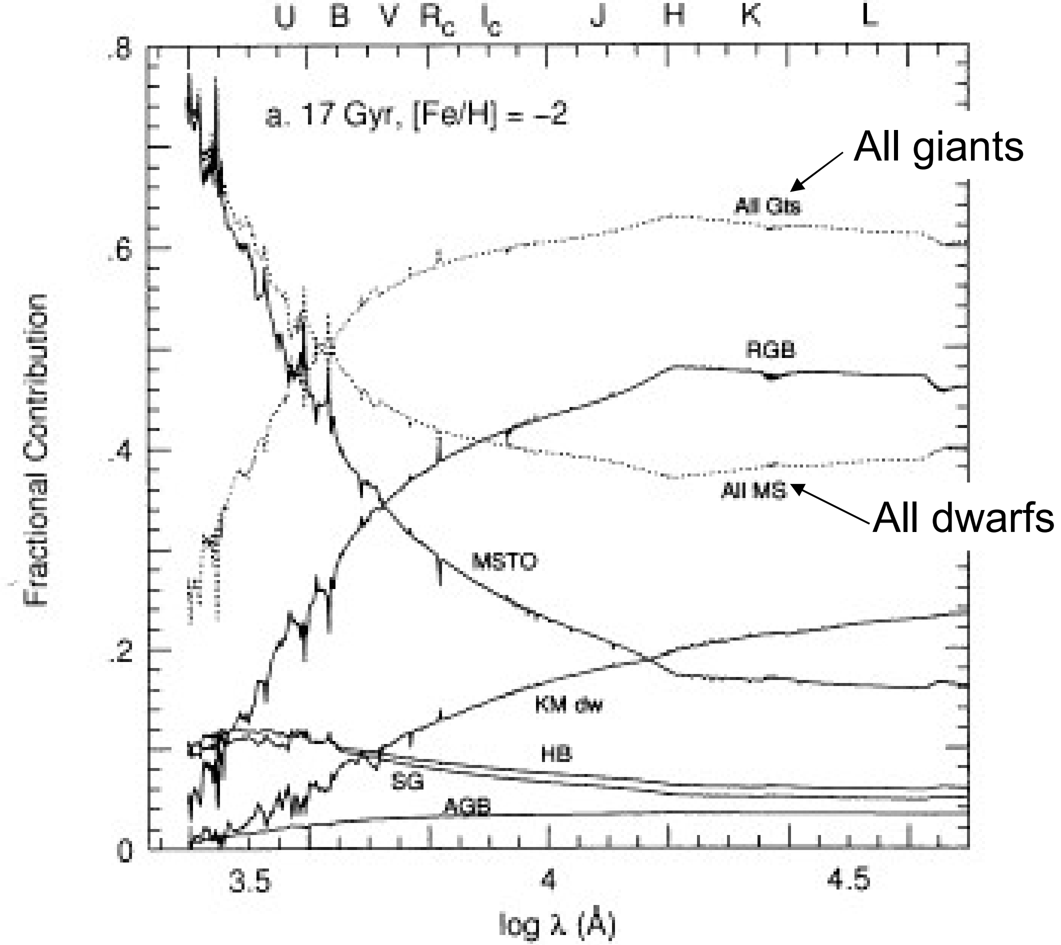


FIG. 38.—(*a*) Spectral energy distributions (SEDs) for 17 Gyr populations of [Fe/H] = −2, −1, 0, and 0.5 dex. Note that the presence of M stars leaves a strong signature in the optical red. (*b*) SEDs for [Fe/H] = −0.225 populations of ages 1.5, 3, 8, and 17 Gyr. The vertical scale is in magnitudes of F_λ, normalized to zero at 2.2 μm. Approximate locations of broadband filters are marked in (*b*).

スペクトルに対する恒星種類の寄与

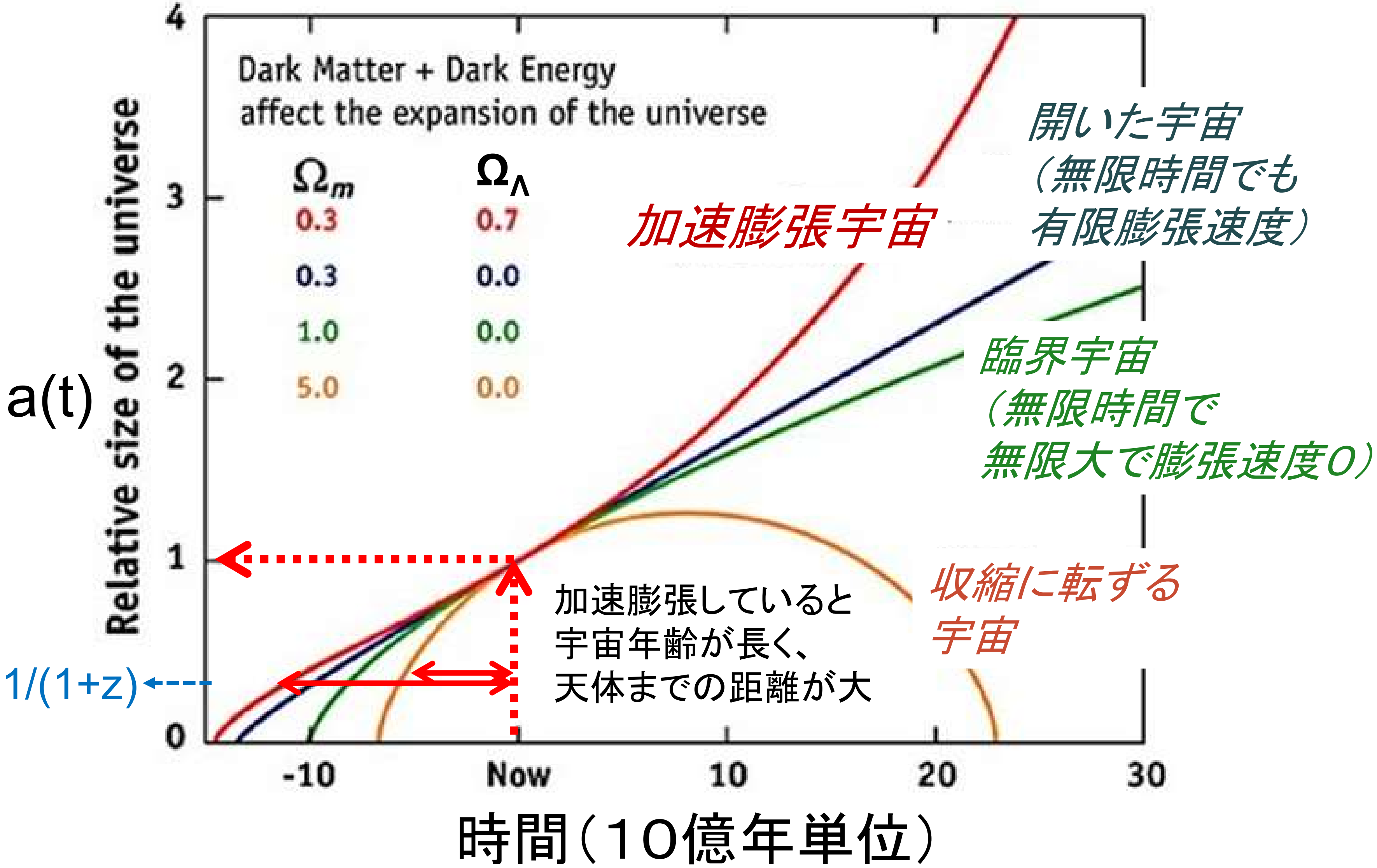


All giants

All dwarfs

Worthey 1994

宇宙膨張の過去・未来



加速膨張宇宙

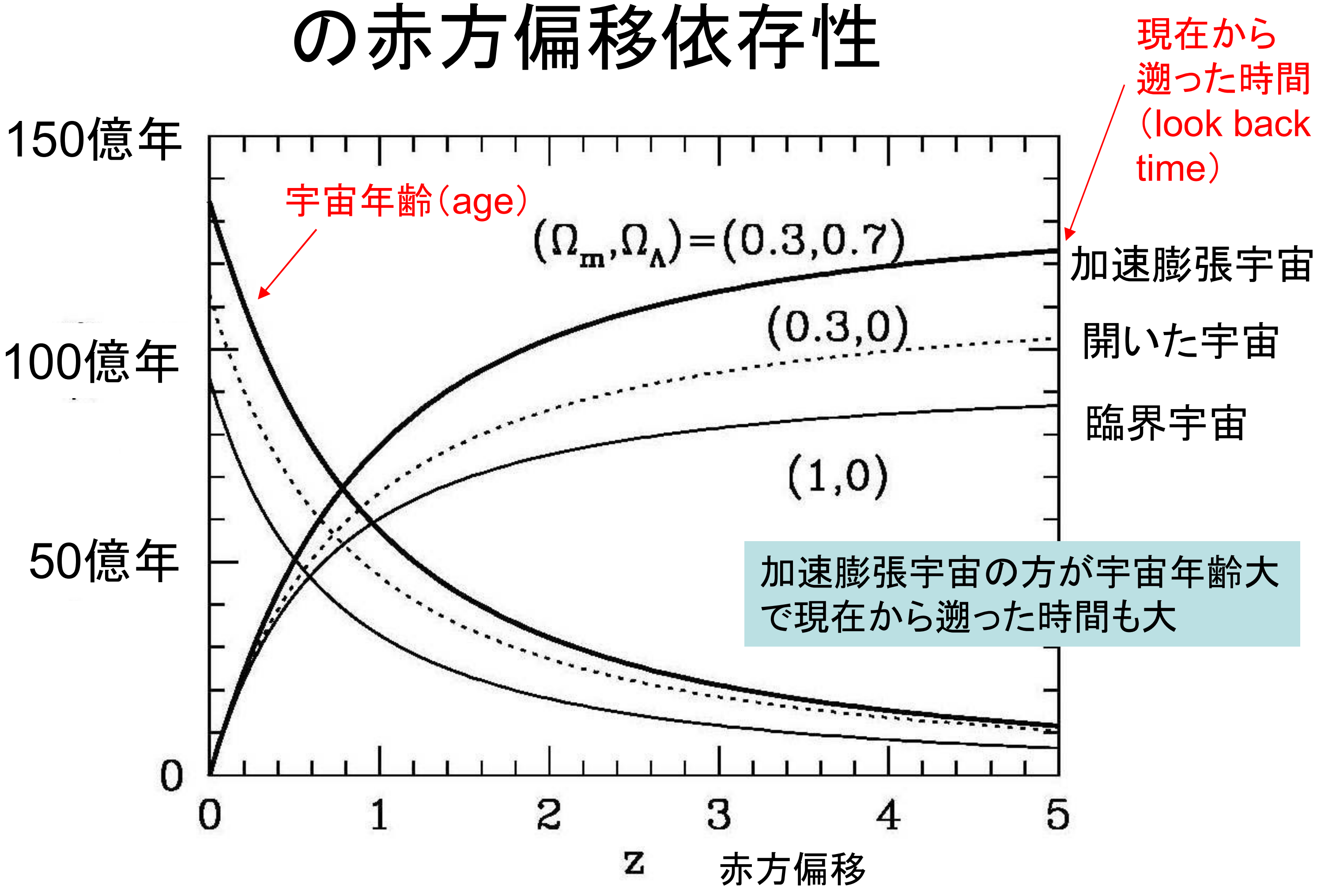
開いた宇宙
（無限時間でも
有限膨張速度）

臨界宇宙
（無限時間で
無限大で膨張速度0）

収縮に転ずる
宇宙

加速膨張していると
宇宙年齢が長く、
天体までの距離が大

宇宙年齢と現在から遡った時間の赤方偏移依存性



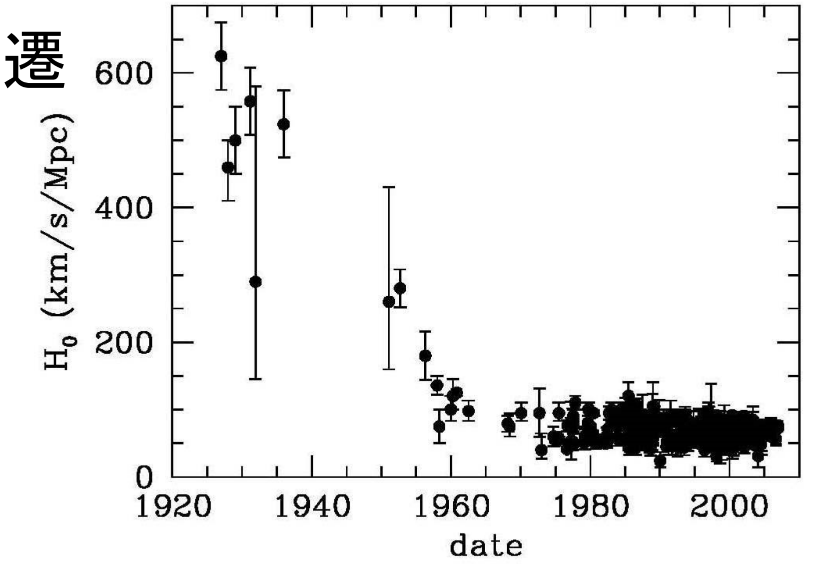
宇宙年齢（age）

現在から
遡った時間
（look back
time）

加速膨張宇宙の方が宇宙年齢大
で現在から遡った時間も大

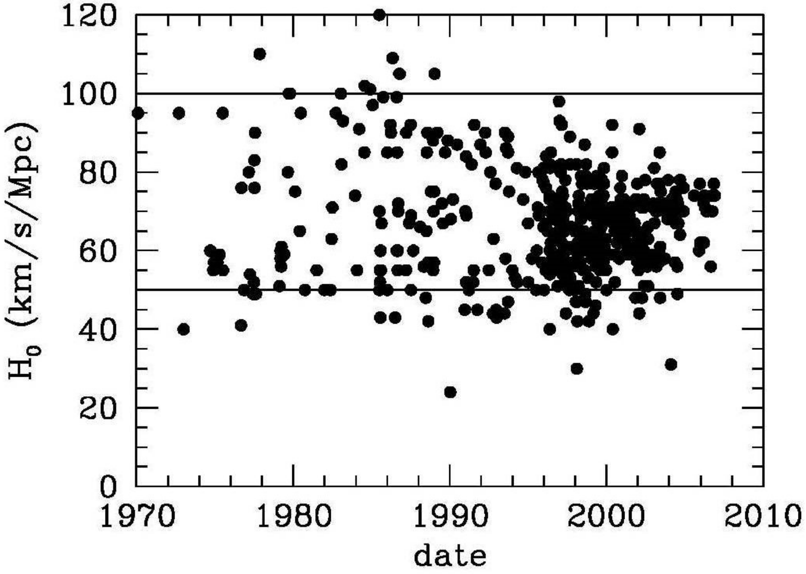
For H_0 = 70 km/s/Mpc

H_0決定の変遷



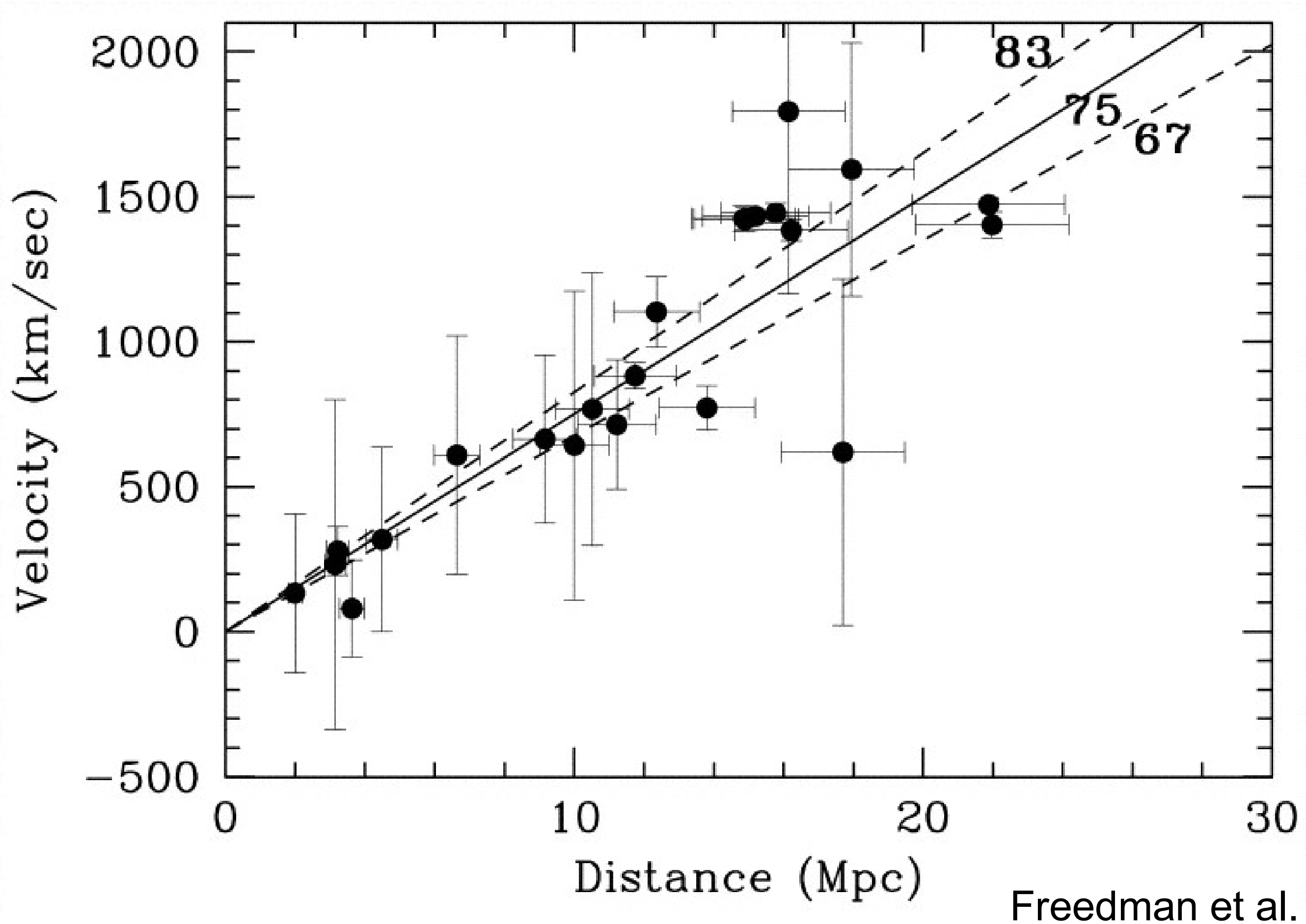
$$V = H_0R$$

H_0の不定性：
距離R決定の
不定性が反映

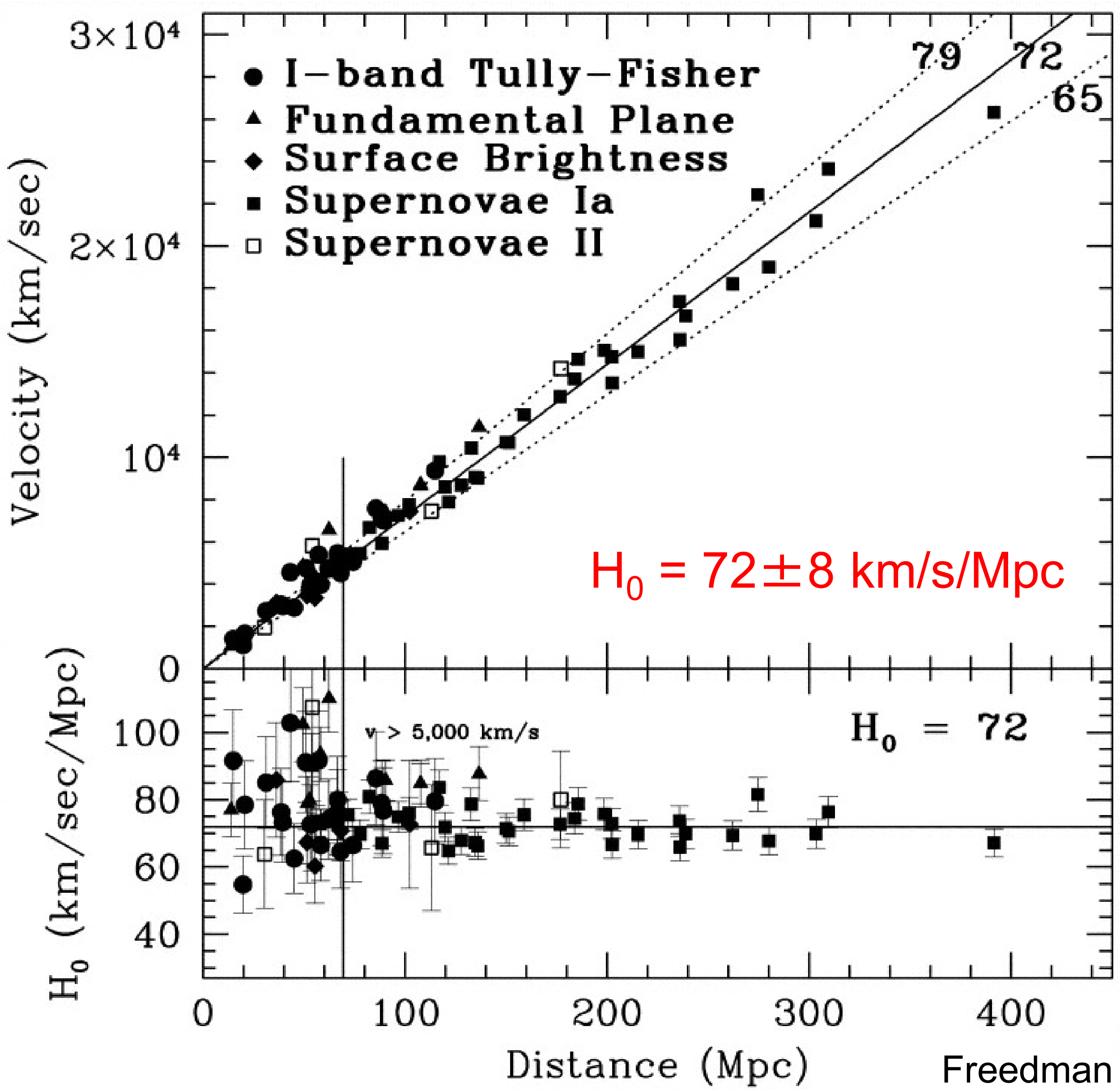


かつては50か100か
の論争があったが、
最近では70付近に
収束しつつある。
しかし、現在もまだ
問題あり（後述）。

HST Key Project
近傍銀河のセファイド変光星による距離と後退速度



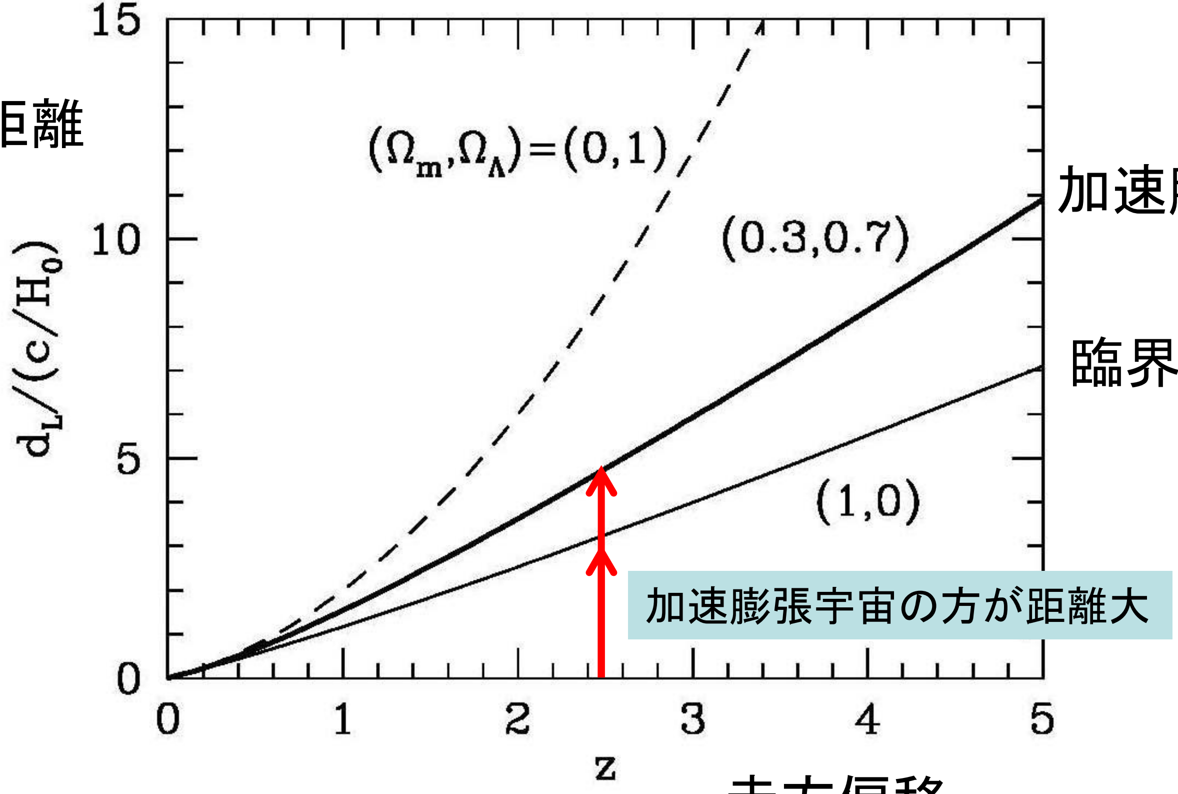
Freedman et al. 2001



H_0 = 72±8 km/s/Mpc

Freedman et al. 2001

標準光源までの距離（光度距離）



加速膨張宇宙

光度距離

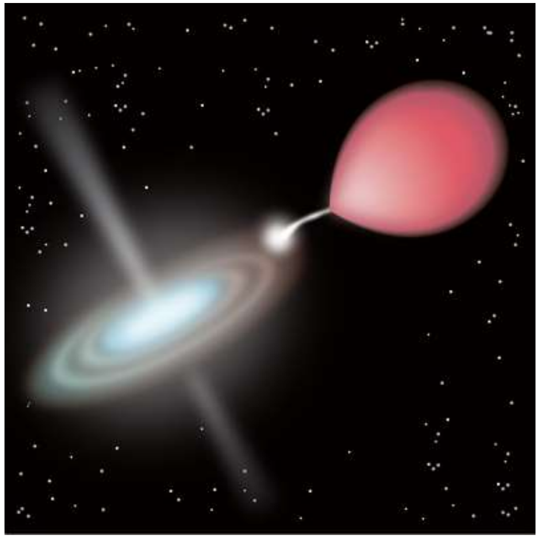
加速膨張宇宙

臨界宇宙

加速膨張宇宙の方が距離大

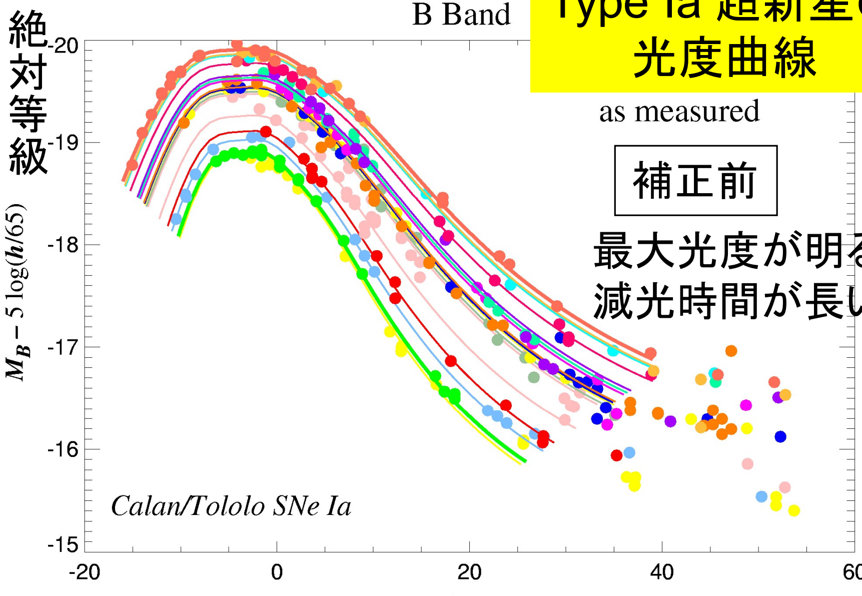
赤方偏移

$M < 8\ M_{sun}$の星の最後
Ia型超新星爆発
(残った白色矮星に伴星からガスが降着して爆発)



補正した光度曲線から絶対等級を求め、見かけ等級と比べて距離を決定

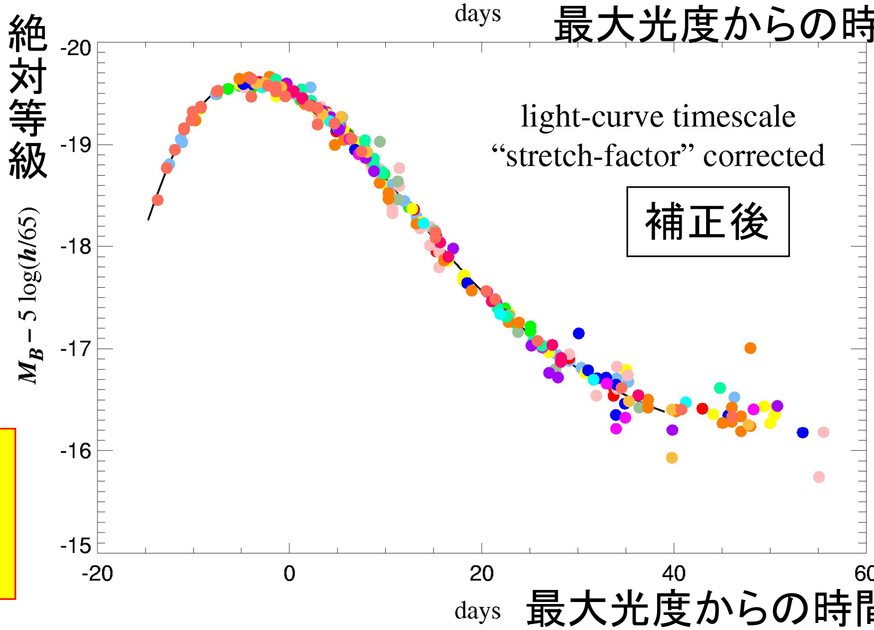
Type Ia 超新星の光度曲線



補正前

最大光度が明るいほど減光時間が長い

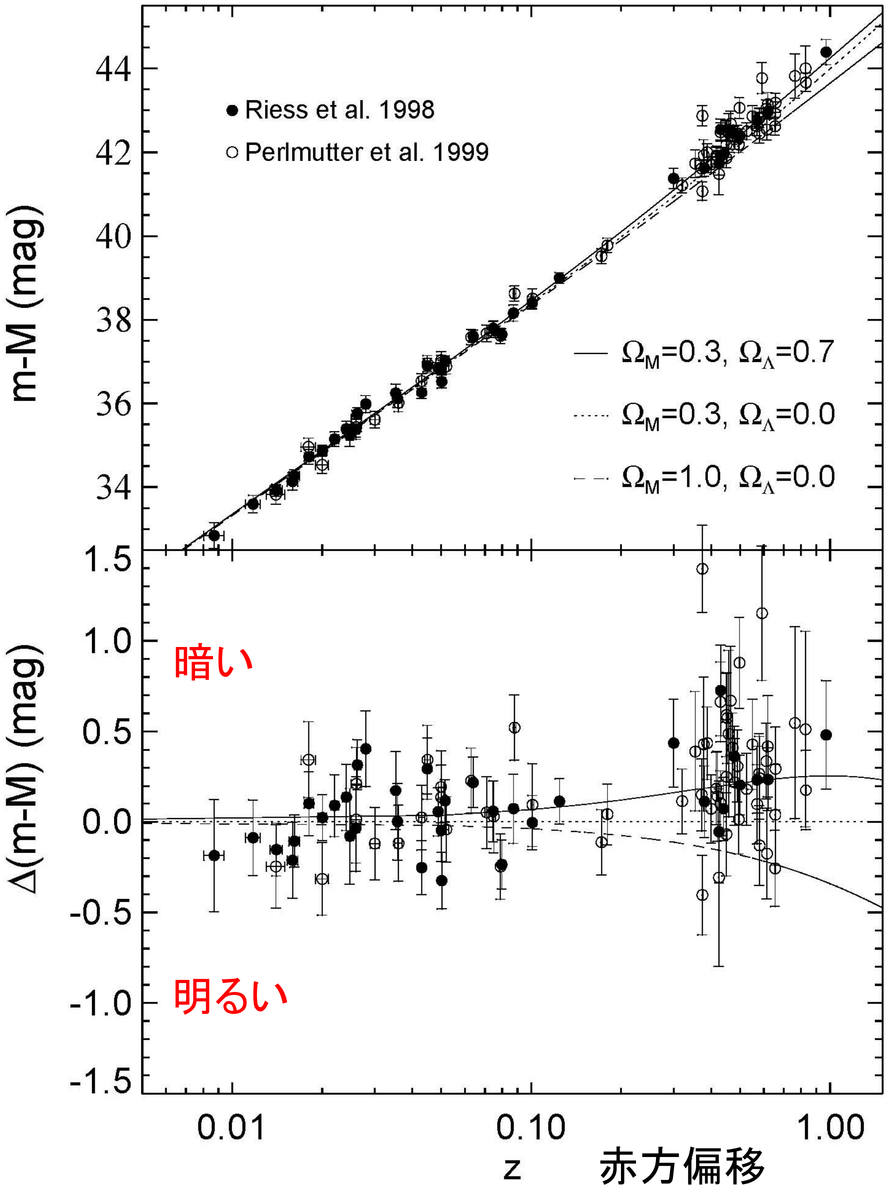
最大光度からの時間（日）



補正後

最大光度からの時間（日）

Ia型超新星までの距離（距離指数）



加速膨張宇宙

開いた宇宙

臨界宇宙

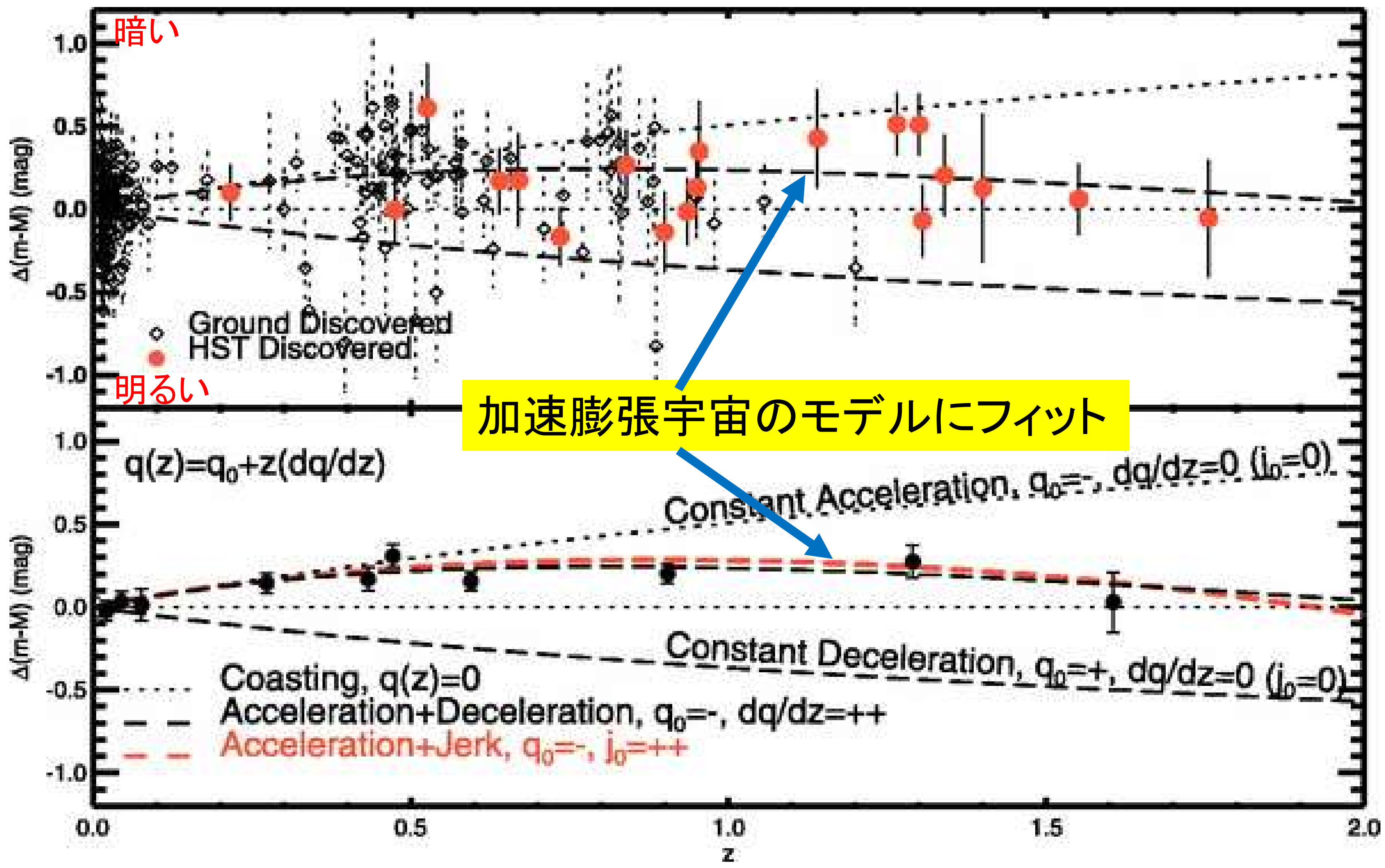
開いた宇宙の場合からの差

加速膨張宇宙

開いた宇宙

臨界宇宙

Riess et al.2000

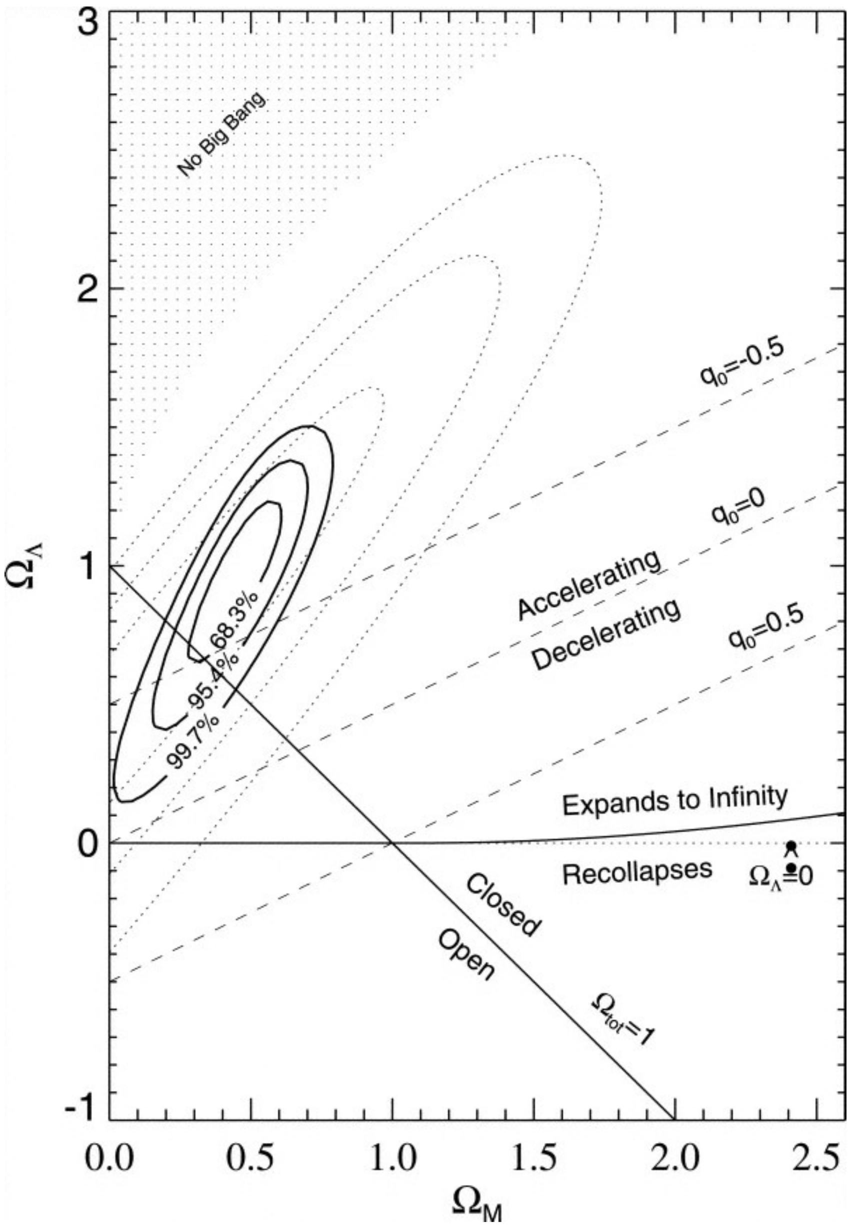


暗い

明るい

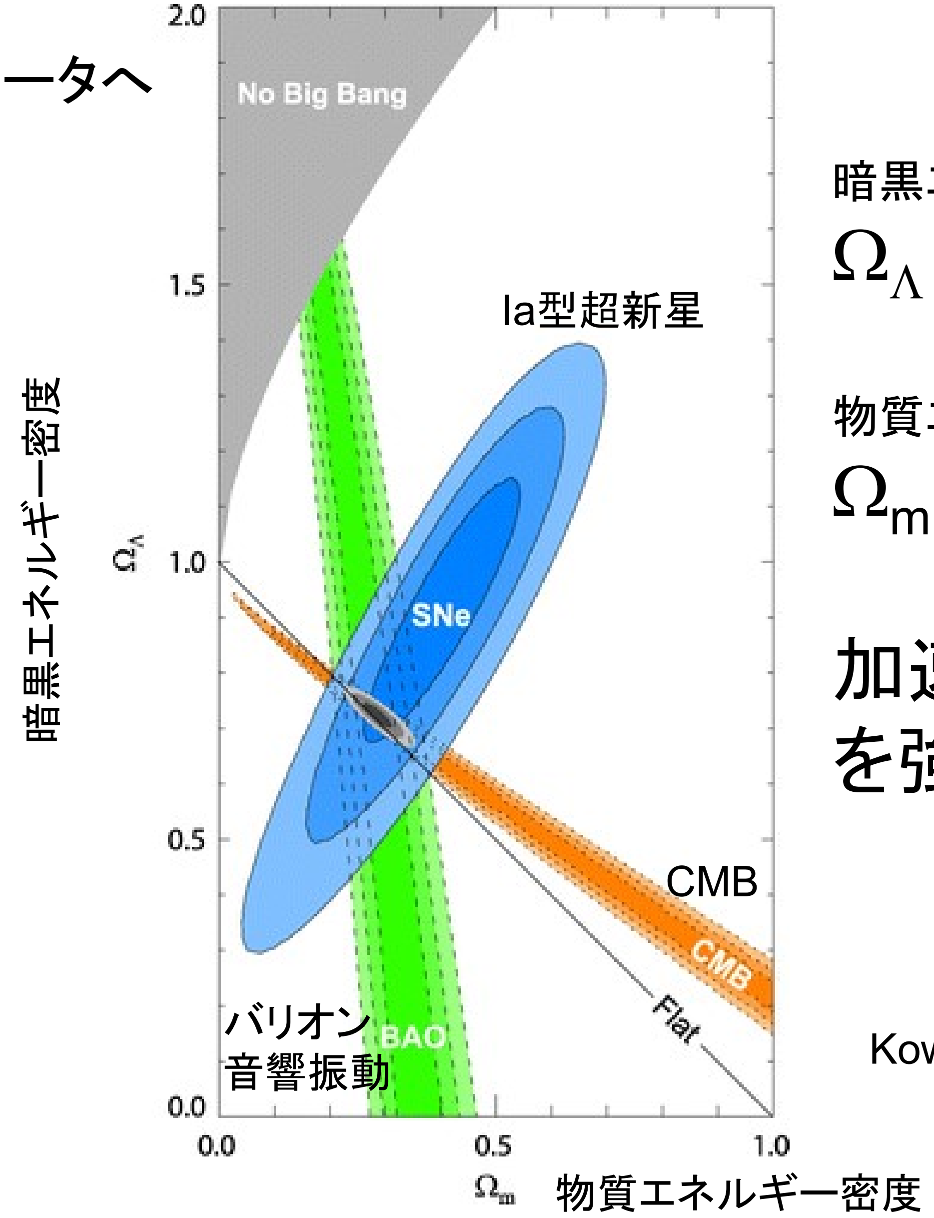
加速膨張宇宙のモデルにフィット

Riess et al 2004



Riess et al 2004

宇宙論パラメータへの制限



暗黒エネルギー密度

$\Omega_\Lambda \sim 0.7$

物質エネルギー密度

$\Omega_m \sim 0.3$

加速膨張宇宙
を強く示唆

Kowalski et al. 2008

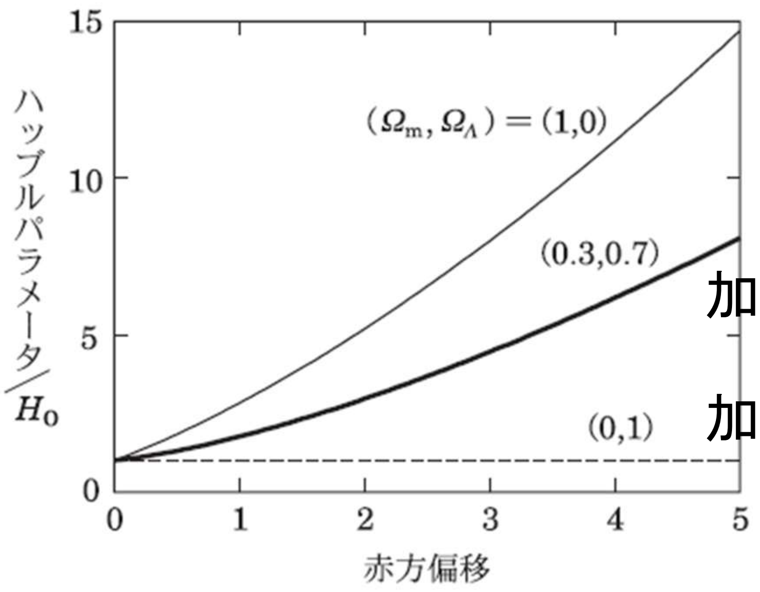
ハッブル定数

$$H_0 = \frac{\dot{a}}{a}\text{（現在）}$$

(a: 宇宙のスケール長
$\dot{a} := da/dt$)

ハッブルパラメータ
（任意時刻）

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$



臨界宇宙

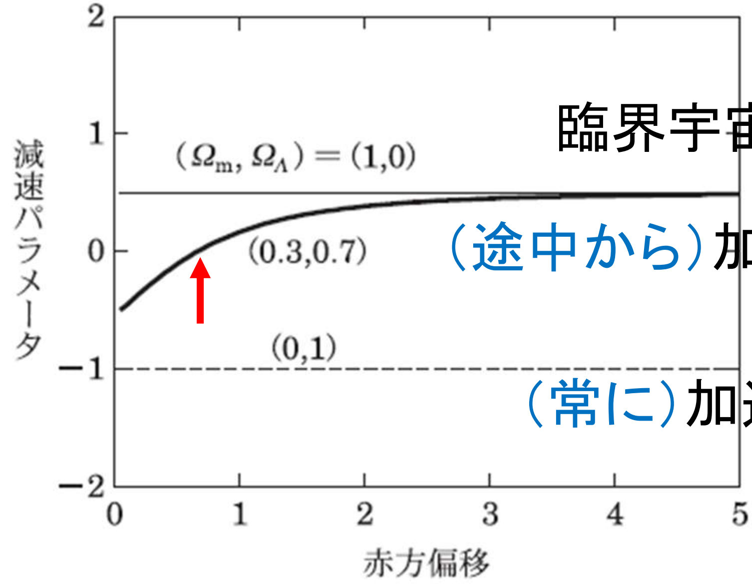
加速膨張宇宙

加速膨張宇宙

減速パラメータ

$$q = -\frac{a\,\ddot{a}}{\dot{a}^2}$$

$q > 0$: 減速
$q < 0$: 加速

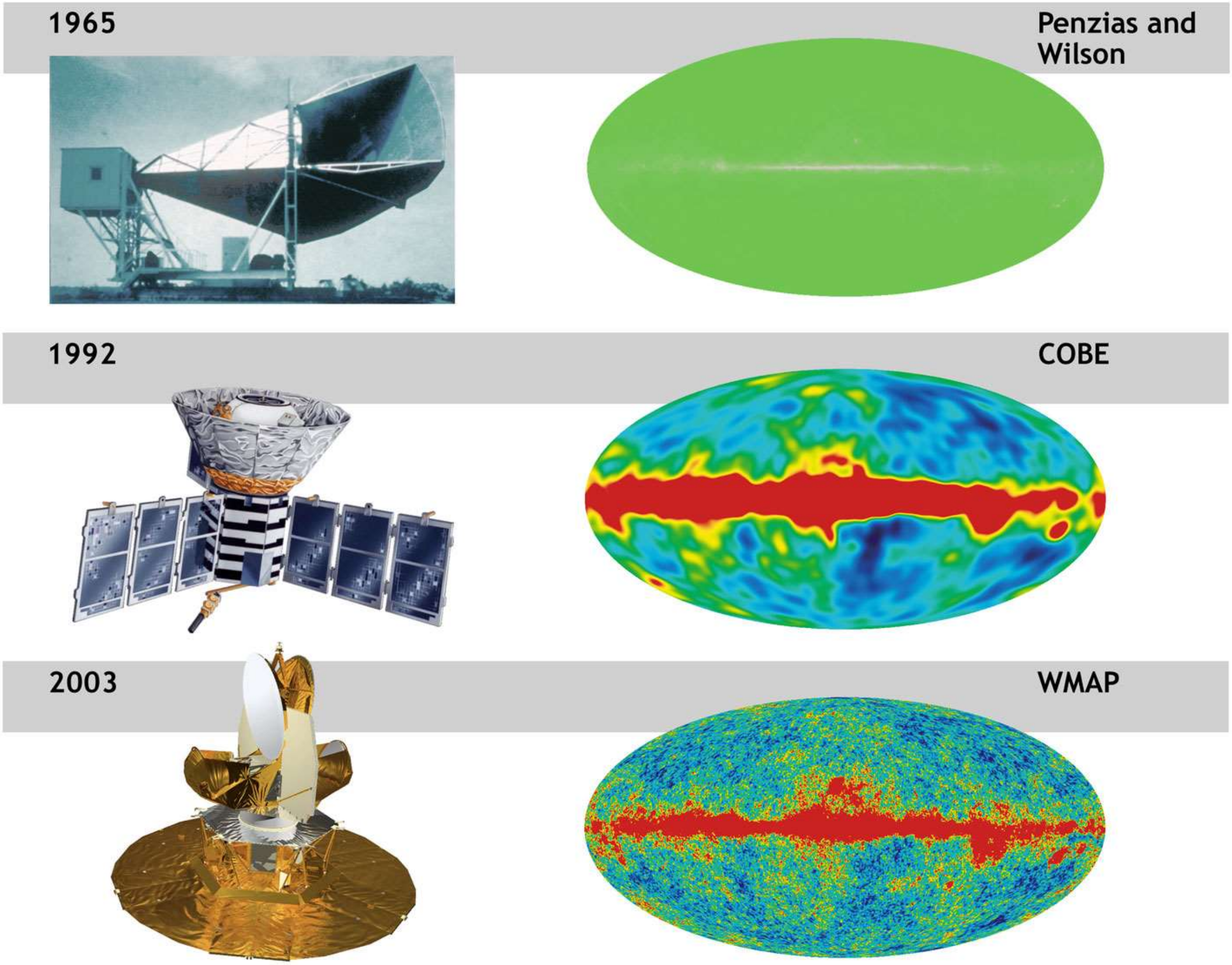


臨界宇宙

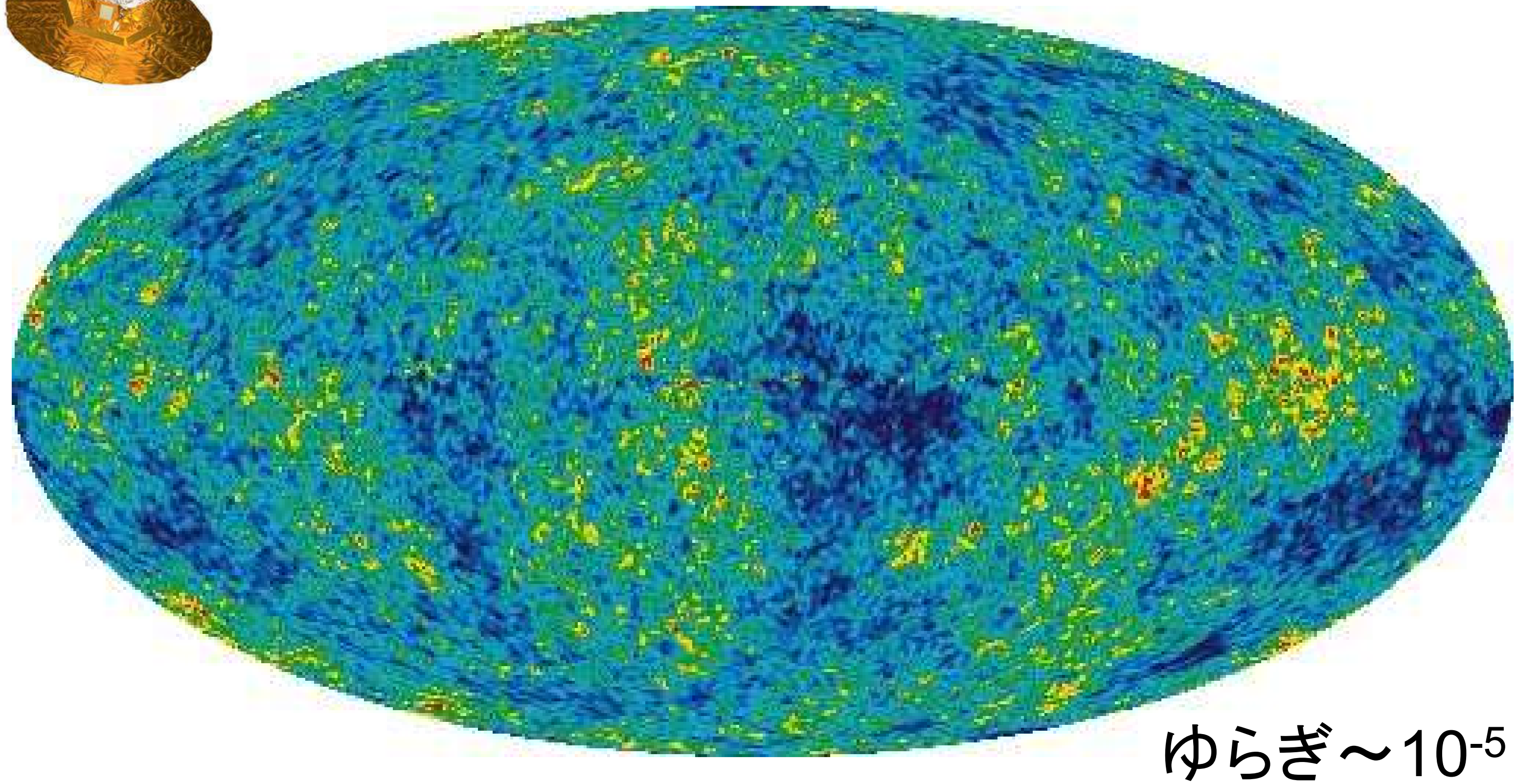
（途中から）加速膨張宇宙

（常に）加速膨張宇宙

宇宙背景輻射（CMB: Cosmic Microwave Background）の測定の歴史

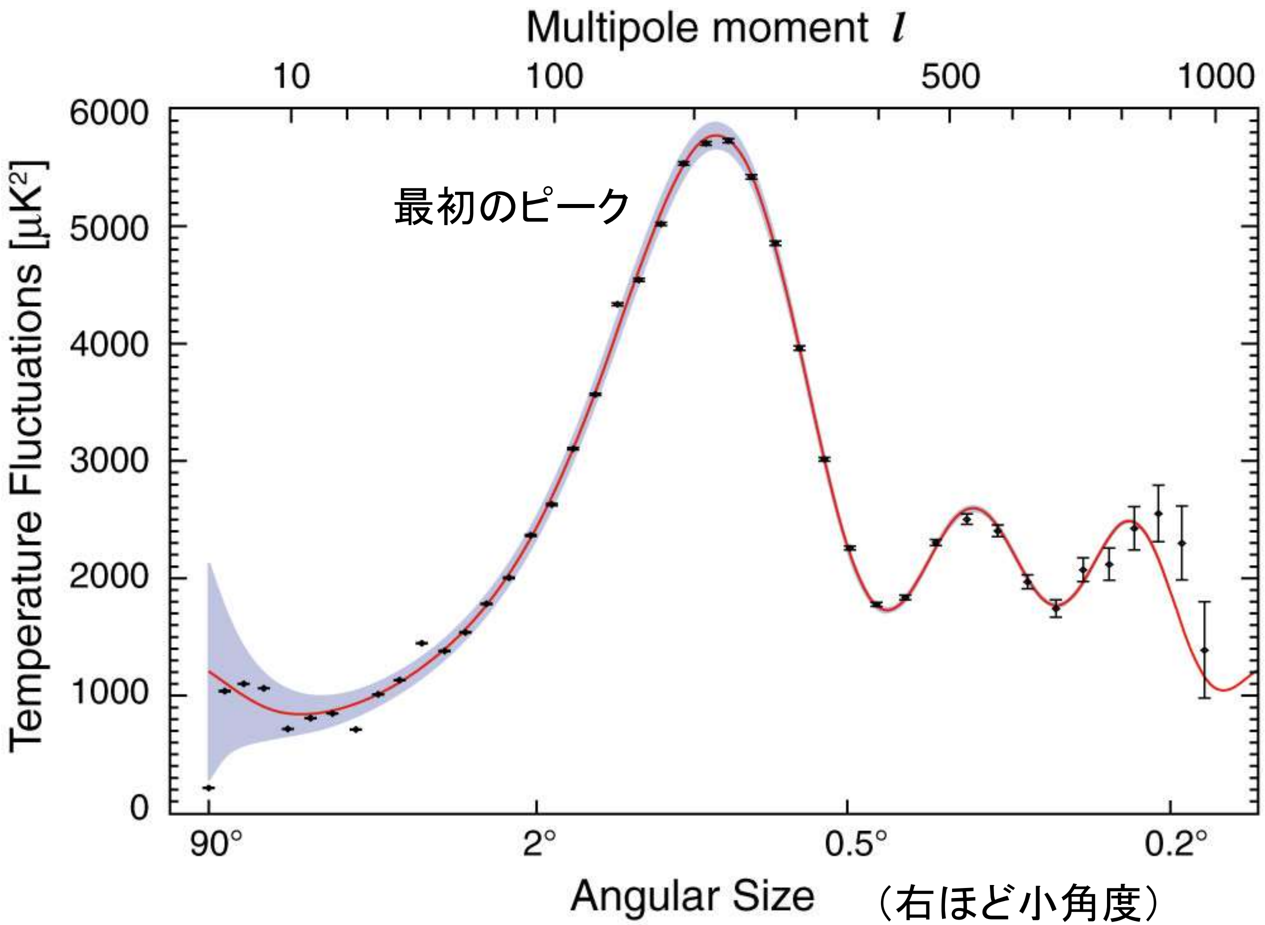


Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)
(2001～2010)
宇宙背景輻射の温度パターン



ゆらぎ～10^{-5}

CMBの温度揺らぎのスペクトラム



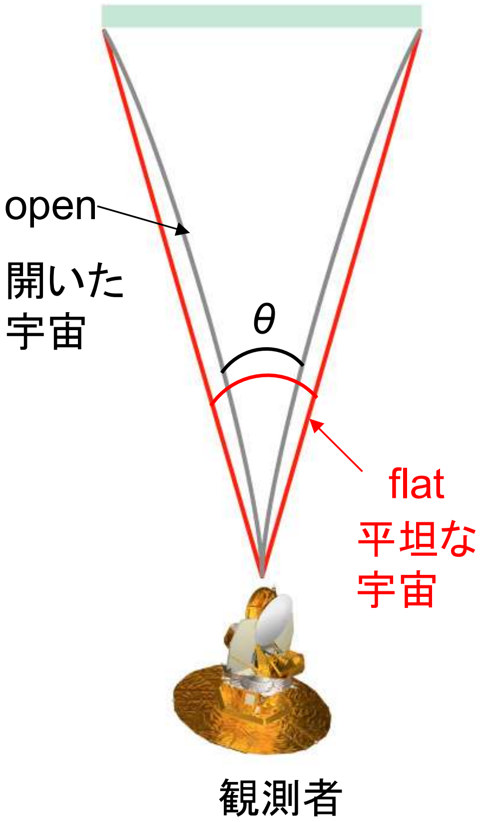
最初のピーク

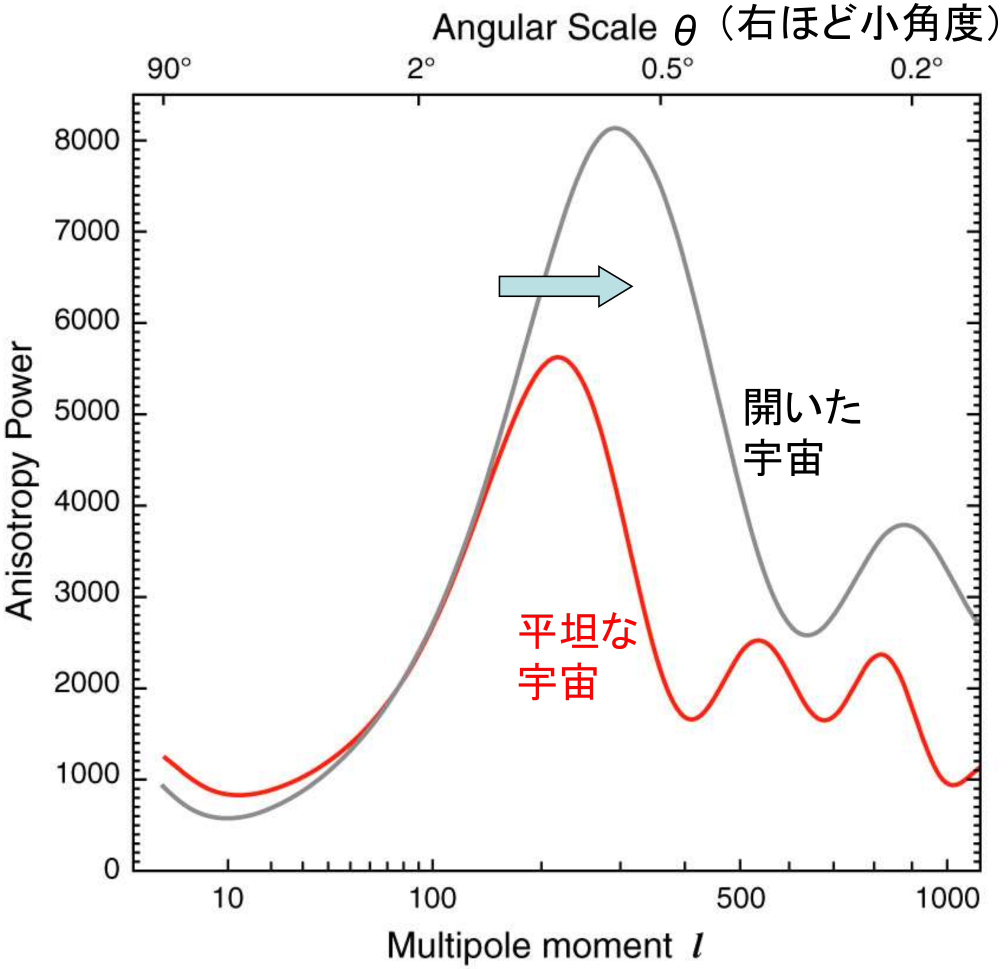
（右ほど小角度）

角度スケール

最初のピークを与える
物理的長さ

Standard Ruler:
1° arc measurement of
dominant energy spike

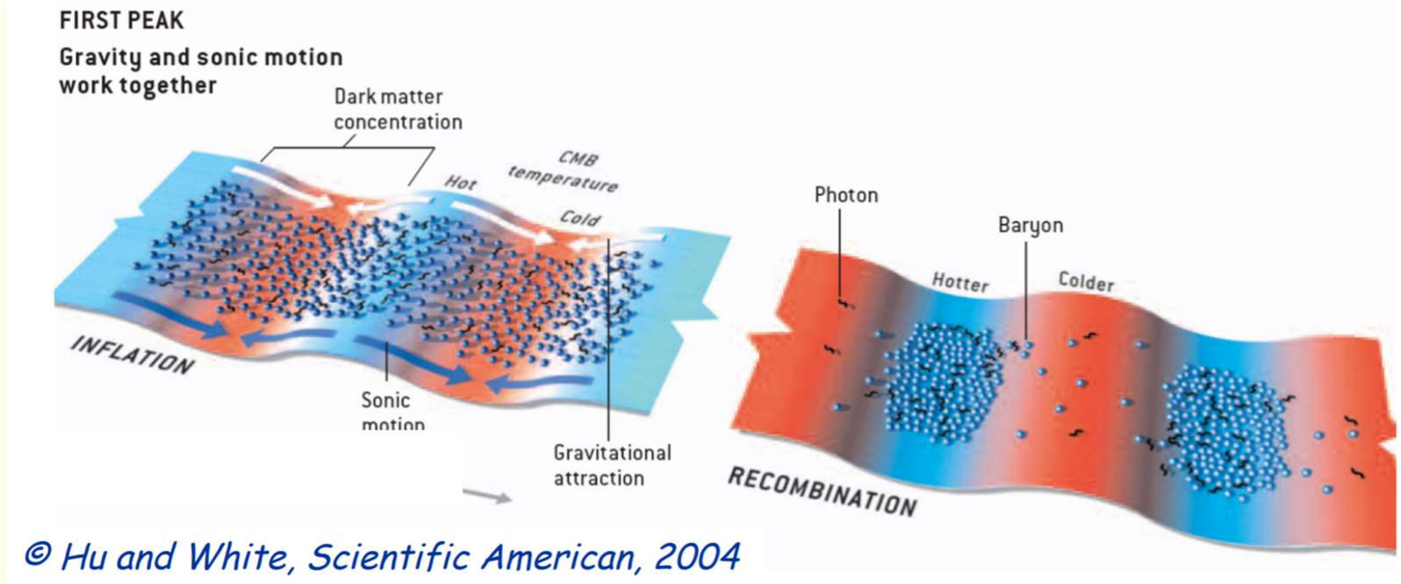




前頁の最初のピーク位置と比べると、
平坦な宇宙がいいことがわかる。

バリオン音響振動
Baryon Acoustic Oscillation (BAO)

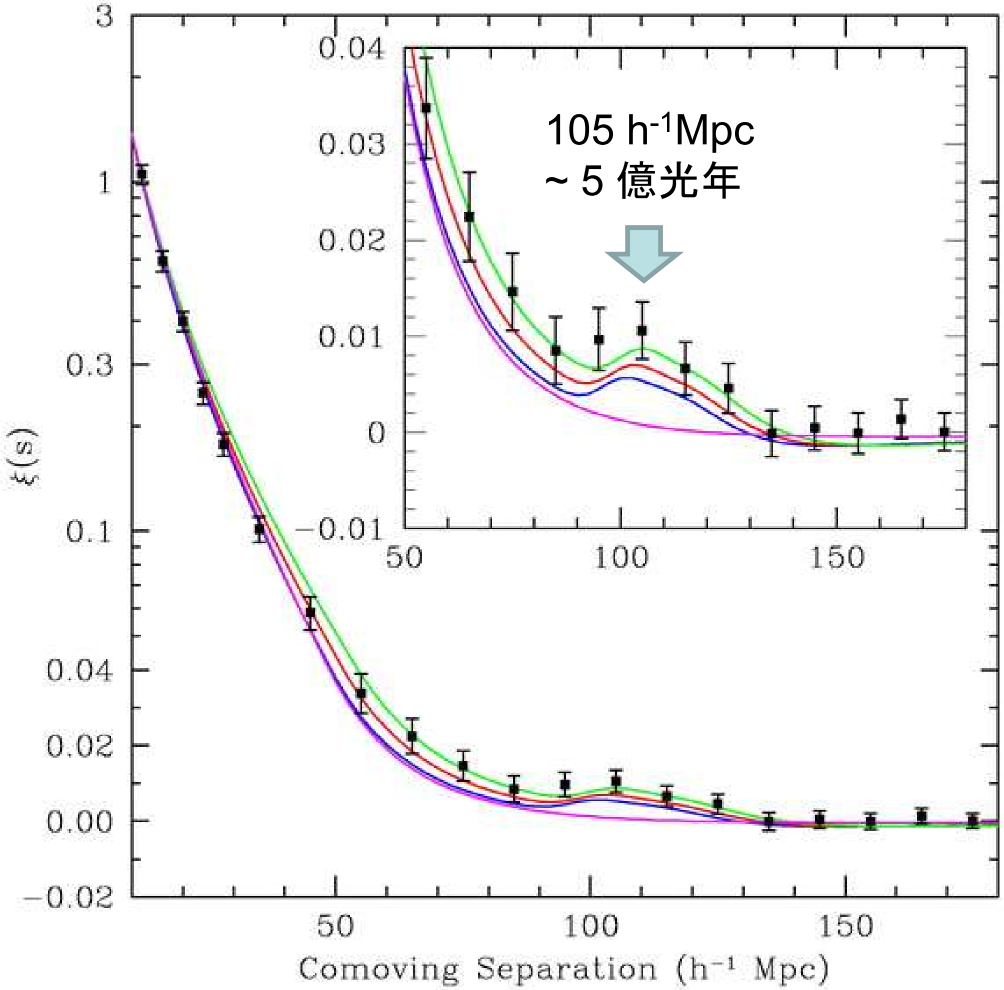
- 宇宙初期において光子とバリオンが強く結合
- 圧力を持つ流体・音波振動
- 晴れ上がりにより結合が切れるまで振動が続き、その後は位相が固定



© Hu and White, Scientific American, 2004

銀河分布（相関関数）におけるバリオン音響振動
(BAO: Baryon Acoustic Oscillation)

Eisenstein et al. 2005, ApJ, 633, 560



晴れ上がり時に
固定された振動
位相は現在の
銀河分布に
特徴的なスケール
を与える
“standard ruler”
⇒どのスケールで
起こるかは
膨張宇宙パラメータ
に依存

銀河分布（相関関数）におけるバリオン音響振動
(BAO: Baryon Acoustic Oscillation)

Eisenstein et al. 2005, ApJ, 633, 560

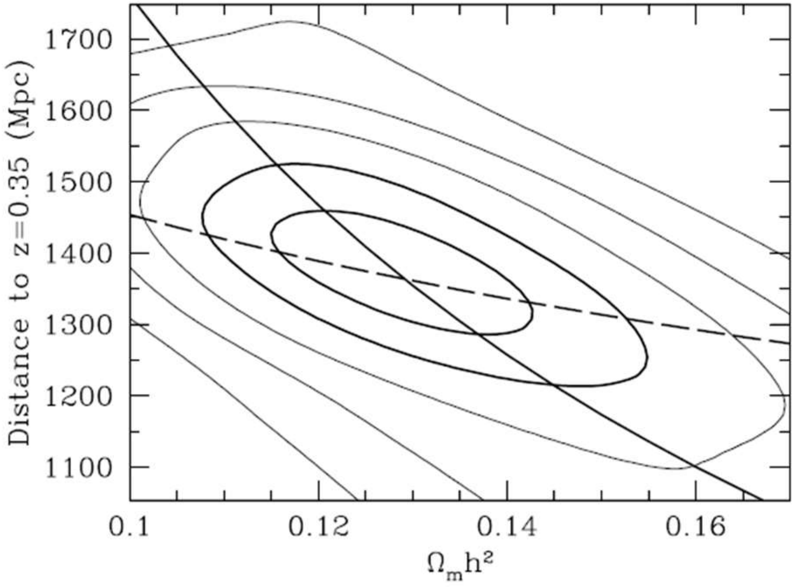
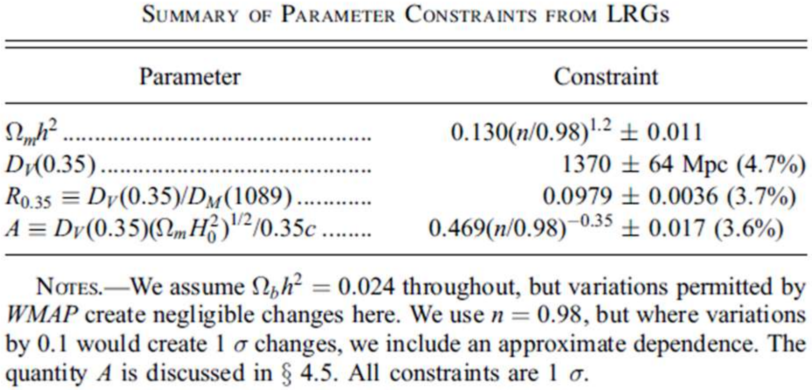


FIG. 7.—Likelihood contours of CDM models as a function of $\Omega_m h^2$ and $D_V(0.35)$. The likelihood has been taken to be proportional to $\exp(-\chi^2/2)$, and contours corresponding to 1 through 5 σ for a two-dimensional Gaussian have been plotted. The one-dimensional marginalized values are $\Omega_m h^2 = 0.130 \pm 0.010$ and $D_V(0.35) = 1370 \pm 64$ Mpc. We overplot lines depicting the two major degeneracy directions. The solid line is a line of constant $\Omega_m h^2 D_V(0.35)$, which would be the degeneracy direction for a pure CDM model. The dashed line is a line of constant sound horizon, holding $\Omega_b h^2 = 0.024$. The contours clearly deviate from the pure CDM degeneracy, implying that the peak at 100 h^{-1} Mpc is constraining the fits. [*See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.*]

Angular diameter distance D(z)



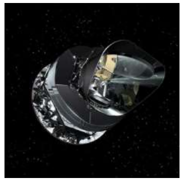
SUMMARY OF PARAMETER CONSTRAINTS FROM LRGS

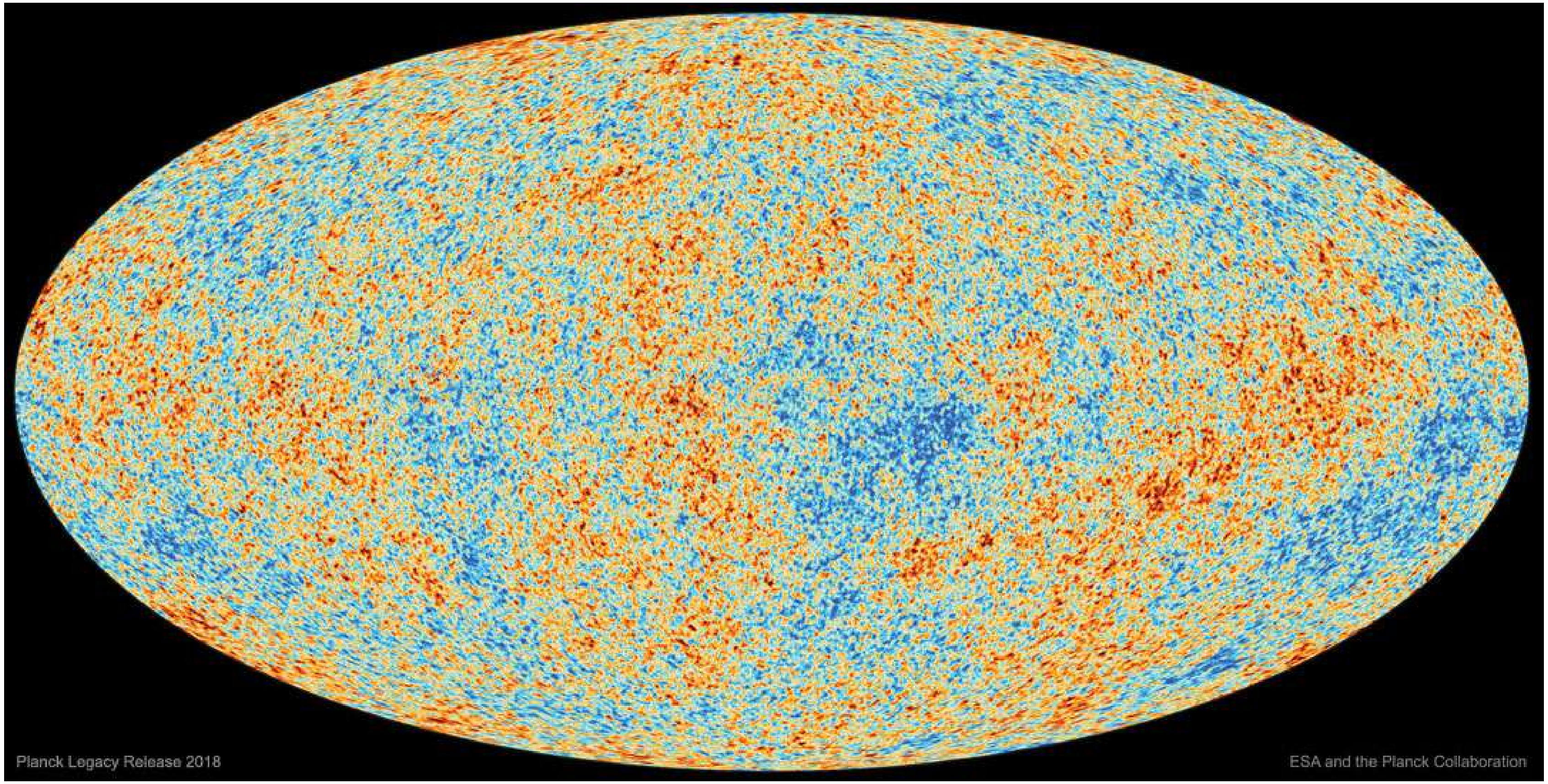
Parameter	Constraint
$\Omega_m h^2$	$0.130(n/0.98)^{1.2} \pm 0.011$
$D_V(0.35)$	1370 ± 64 Mpc (4.7%)
$R_{0.35} \equiv D_V(0.35)/D_M(1089)$	0.0979 ± 0.0036 (3.7%)
$A \equiv D_V(0.35)(\Omega_m H_0^2)^{1/2}/0.35c$	$0.469(n/0.98)^{-0.35} \pm 0.017$ (3.6%)

NOTES.—We assume $\Omega_b h^2 = 0.024$ throughout, but variations permitted by *WMAP* create negligible changes here. We use $n = 0.98$, but where variations by 0.1 would create 1 σ changes, we include an approximate dependence. The quantity A is discussed in § 4.5. All constraints are 1 σ.

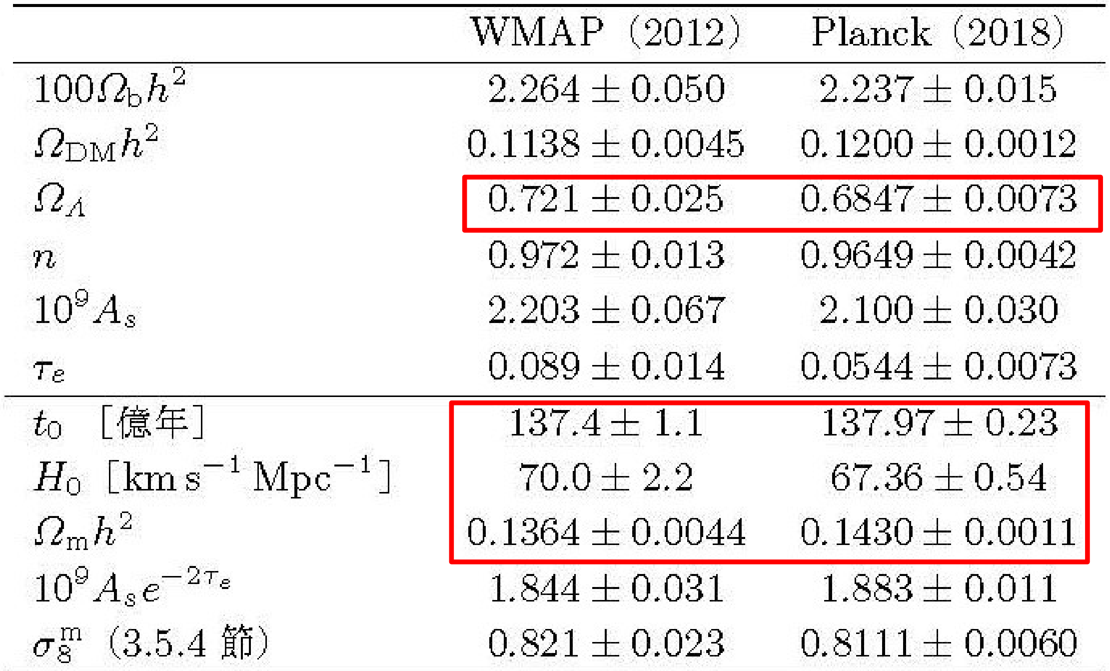
Planck衛星による宇宙背景放射の地図

(2009～2013)





WMAPとPlanckの結果の比較

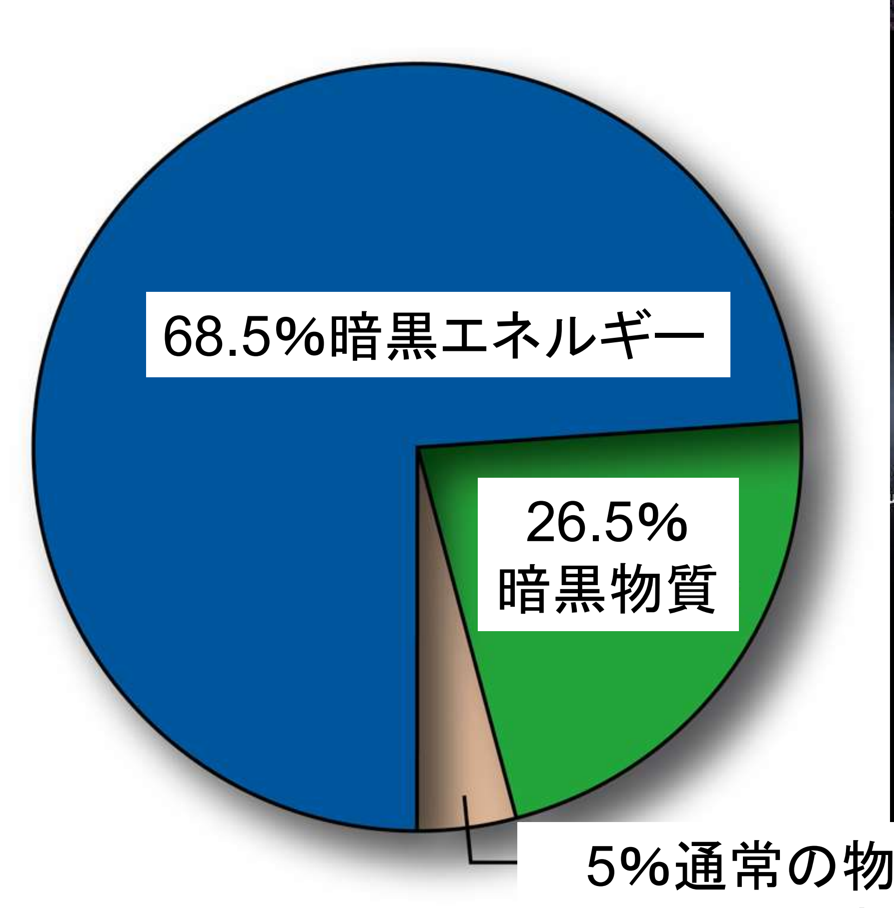


	WMAP（2012）	Planck（2018）
$100\Omega_\mathrm{b}h^2$	2.264 ± 0.050	2.237 ± 0.015
$\Omega_\mathrm{DM}h^2$	0.1138 ± 0.0045	0.1200 ± 0.0012
Ω_Λ	0.721 ± 0.025	0.6847 ± 0.0073
n	0.972 ± 0.013	0.9649 ± 0.0042
$10^9 A_s$	2.203 ± 0.067	2.100 ± 0.030
τ_e	0.089 ± 0.014	0.0544 ± 0.0073
t_0 ［億年］	137.4 ± 1.1	137.97 ± 0.23
H_0 [$\mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$]	70.0 ± 2.2	67.36 ± 0.54
$\Omega_\mathrm{m}h^2$	0.1364 ± 0.0044	0.1430 ± 0.0011
$10^9 A_s e^{-2\tau_e}$	1.844 ± 0.031	1.883 ± 0.011
σ_8^m（3.5.4 節）	0.821 ± 0.023	0.8111 ± 0.0060

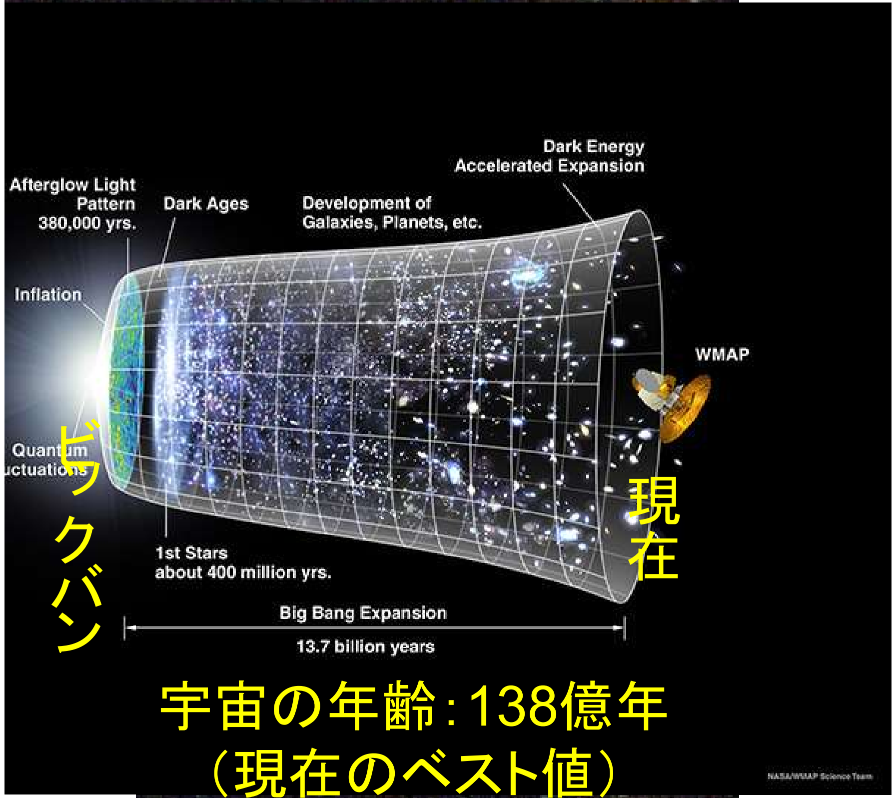
Ω_m 0.278 0.315

138億年

宇宙のエネルギーの内訳（現在のベスト値）



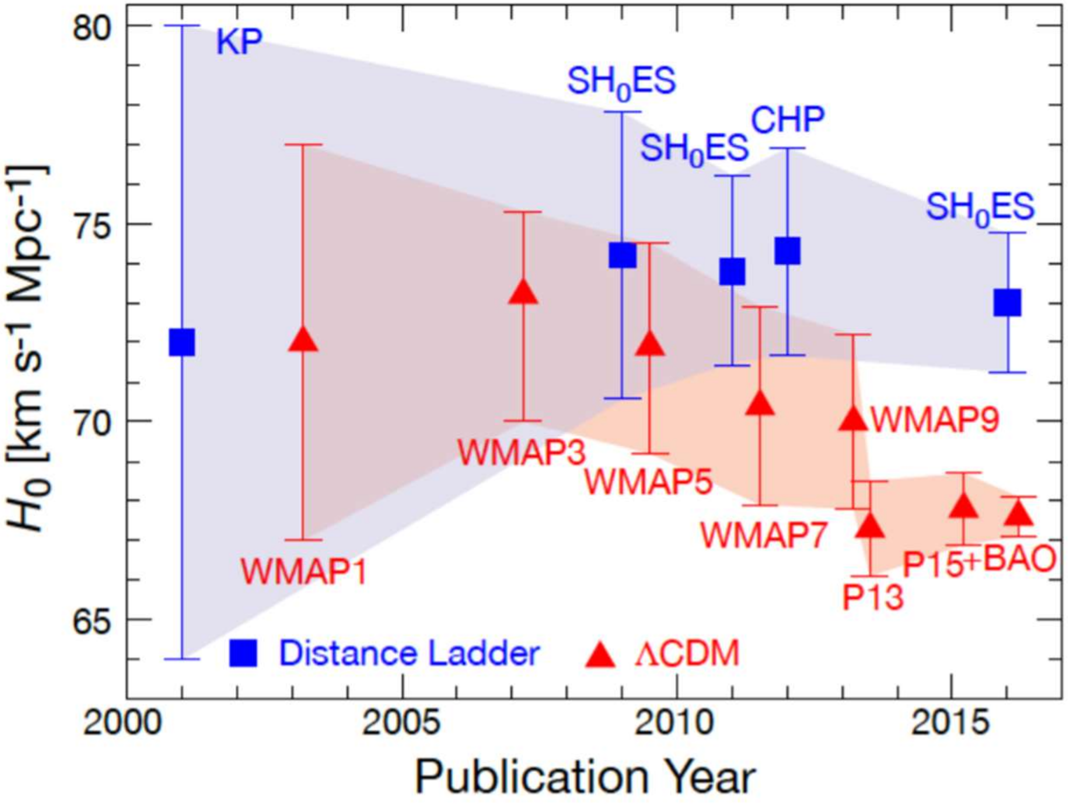
5%通常の物質
（光で見える部分）



宇宙の年齢：138億年
（現在のベスト値）

現在の問題
The Hubble Tension

Freedman 2017



近傍宇宙から
決定したH_0
(72-73 km/s/Mpc)

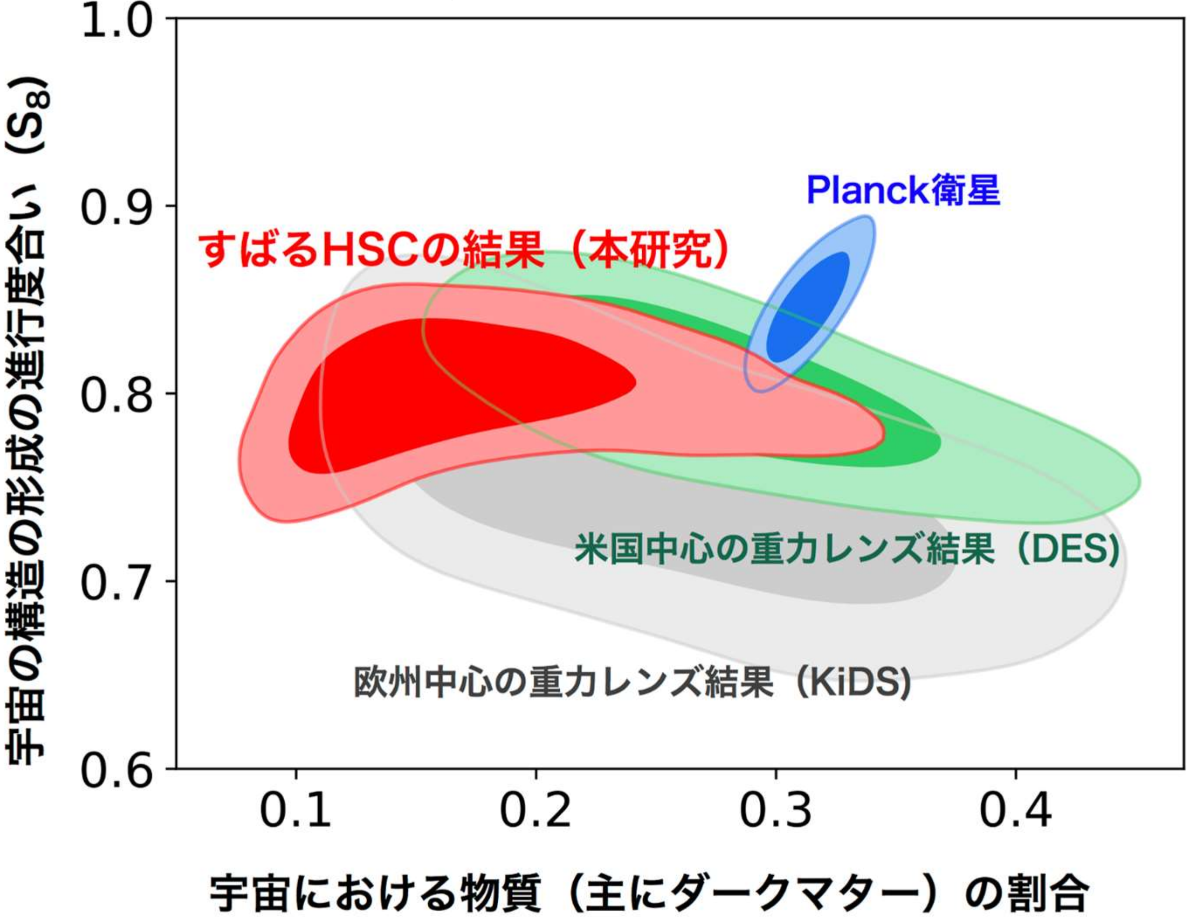
合わない！

CMB（遠方宇宙）
から決定したH_0
(67.4±0.5 km/s/Mpc)

様々な観点から解決策が議論されている最中

Subaru/HSCの結果

Hikage et al. 2019, PASJ, 71, 43



$S_8=\sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.45}$

Ω_m