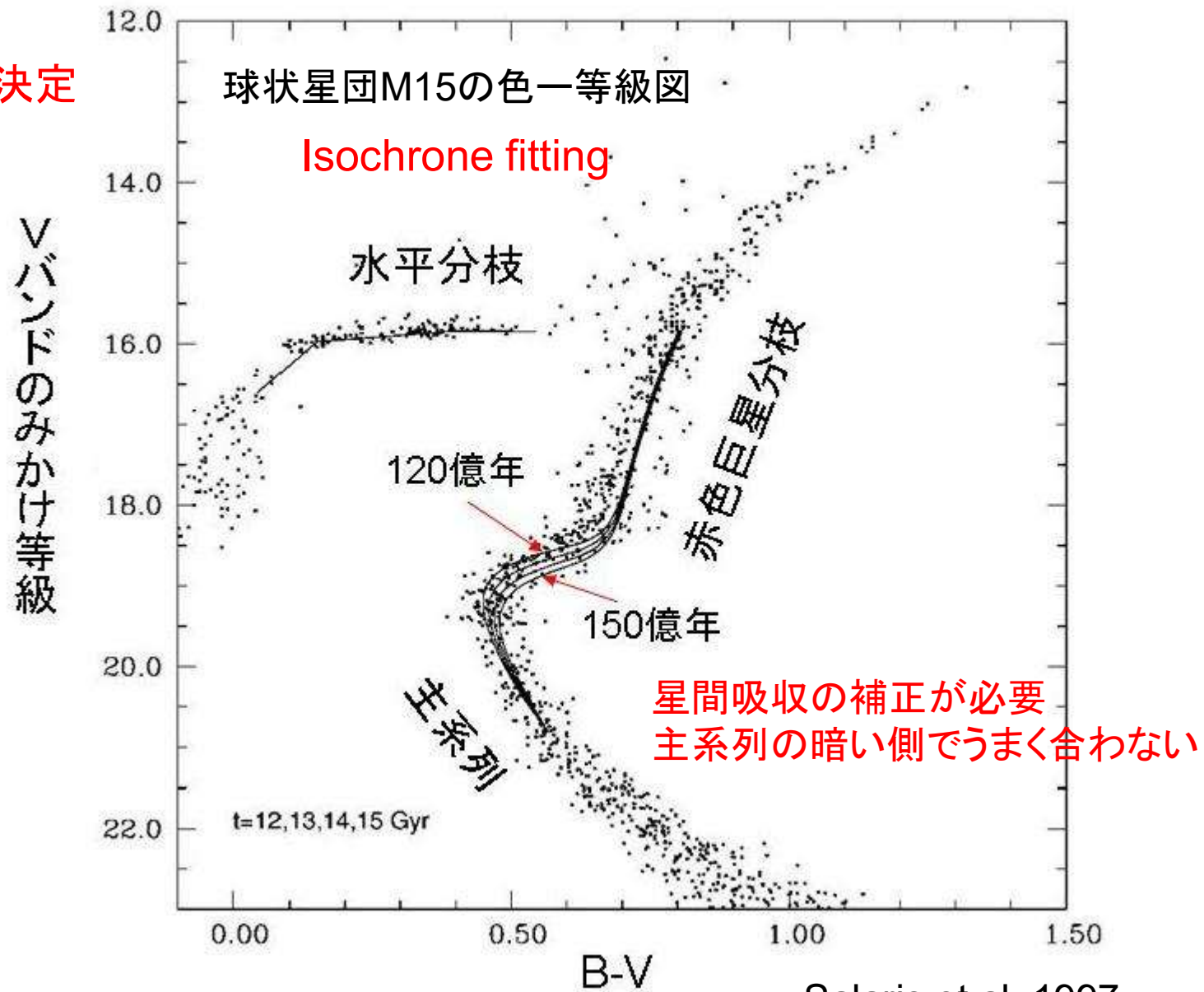


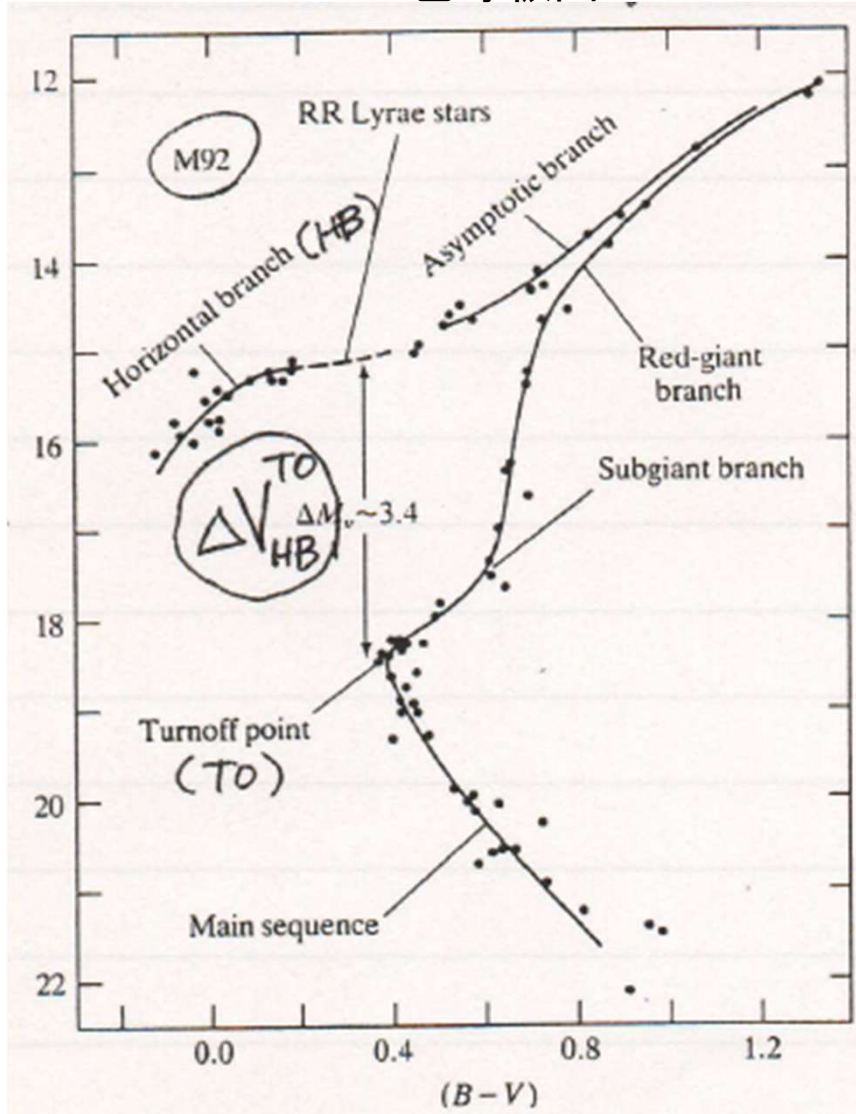
Chapter 2. 銀河の年代学と観測的宇宙論

球状星団の年齢決定



ΔV_{HB}^{TO} による年齢決定

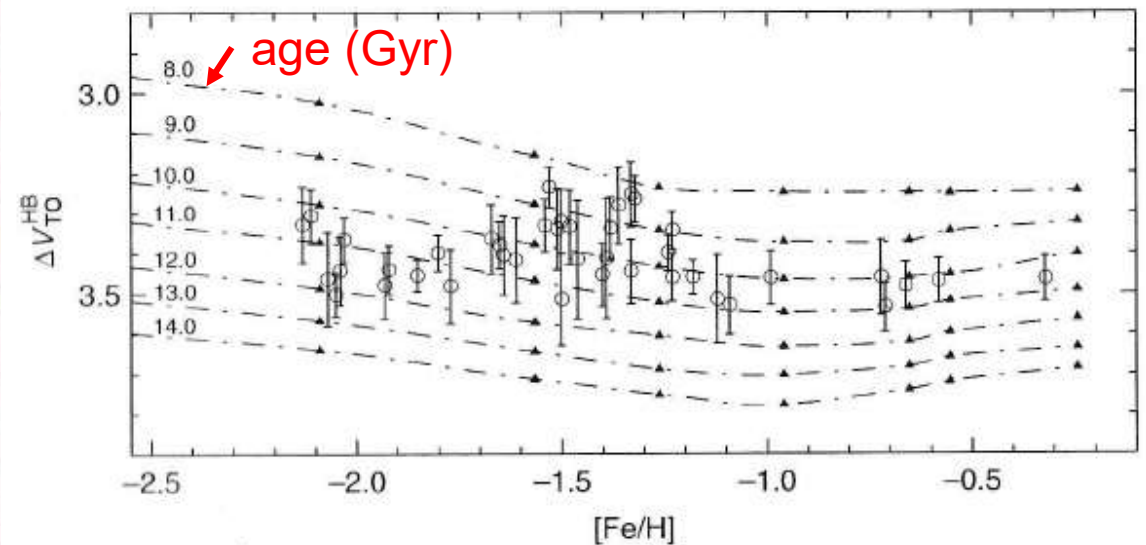
M92の色等級図



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

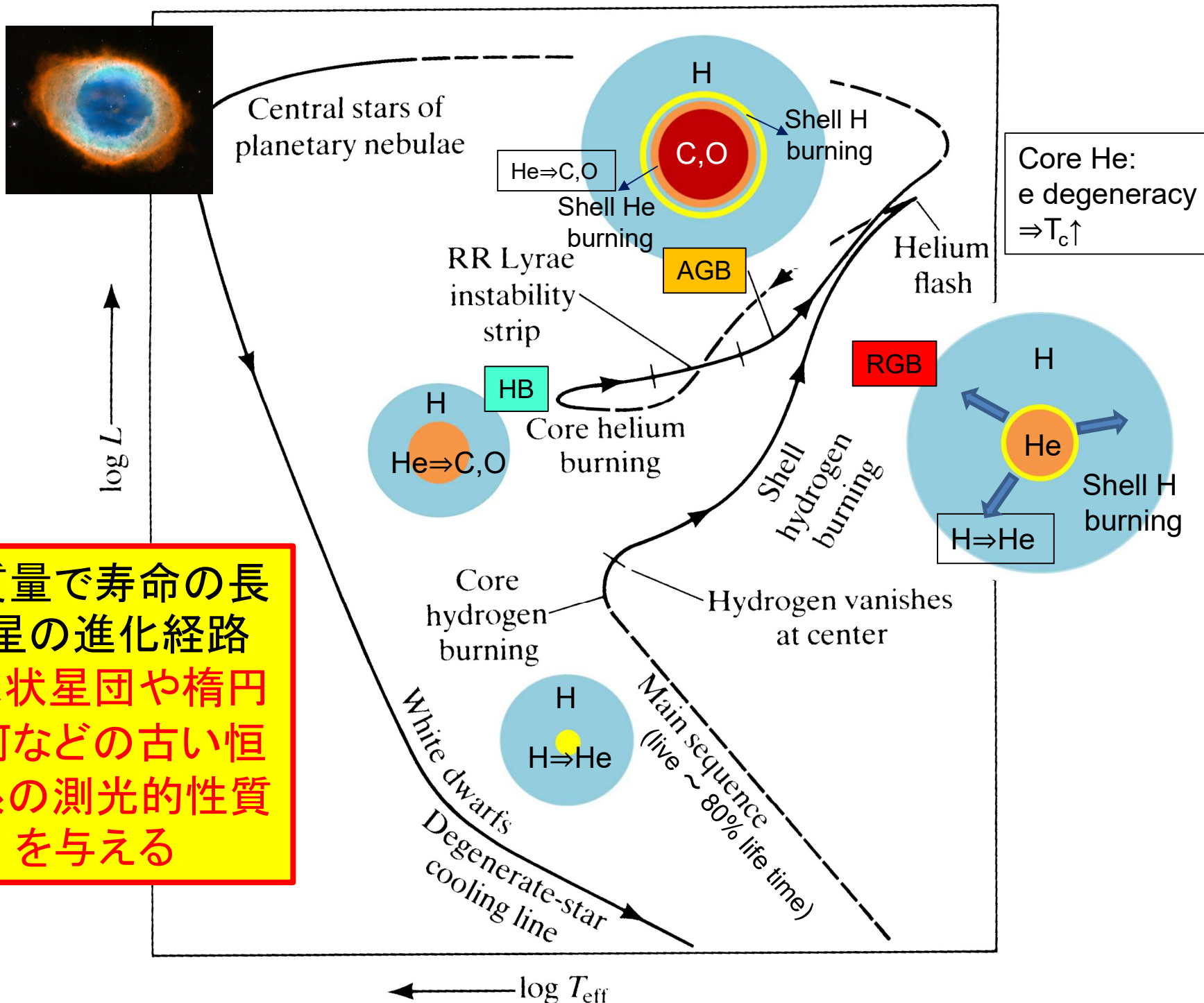


$$\Delta V_{HB}^{TO}(t_{age}, [Fe/H])$$



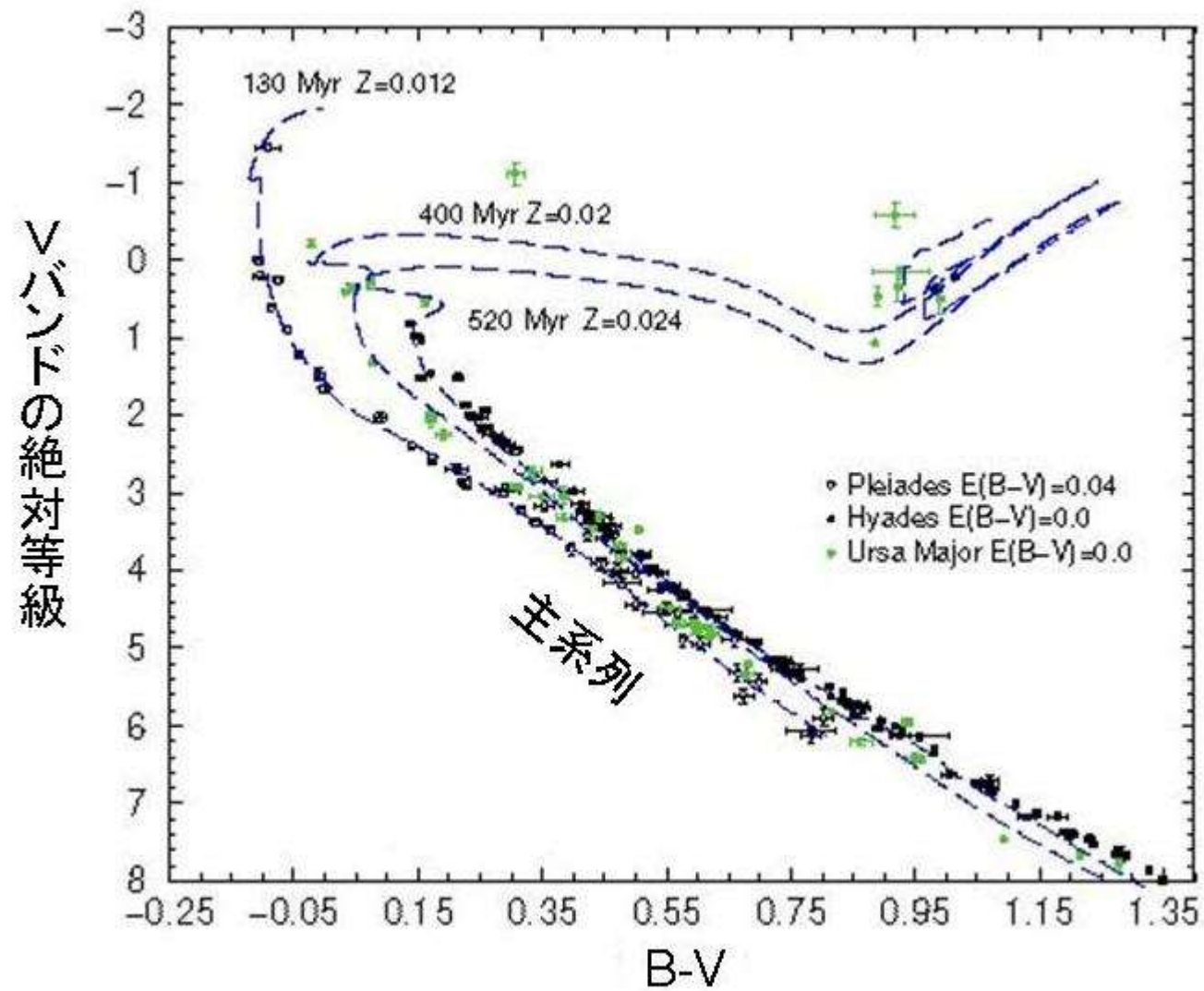
Given $[Fe/H]$

0.1 mag variation in ΔV : $\Delta \text{age} \sim 1$ Gyr
(insensitive to $\Delta[Fe/H]$)



小質量で寿命の長い星の進化経路
 $\Rightarrow$ 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

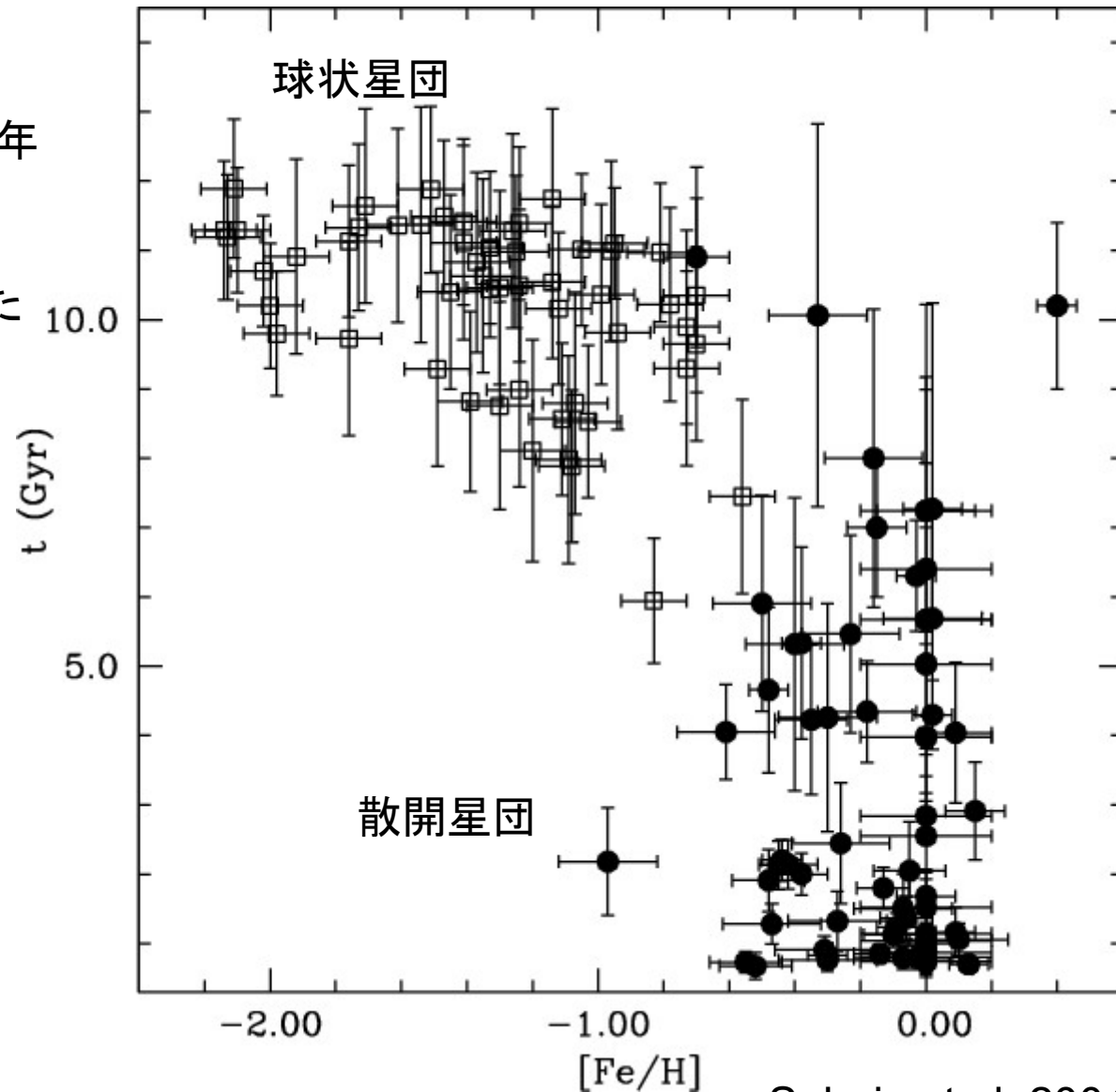


Tordiglione, V. et al. 2003

散開星団と球状星団の金属量と年齢の関係

球状星団

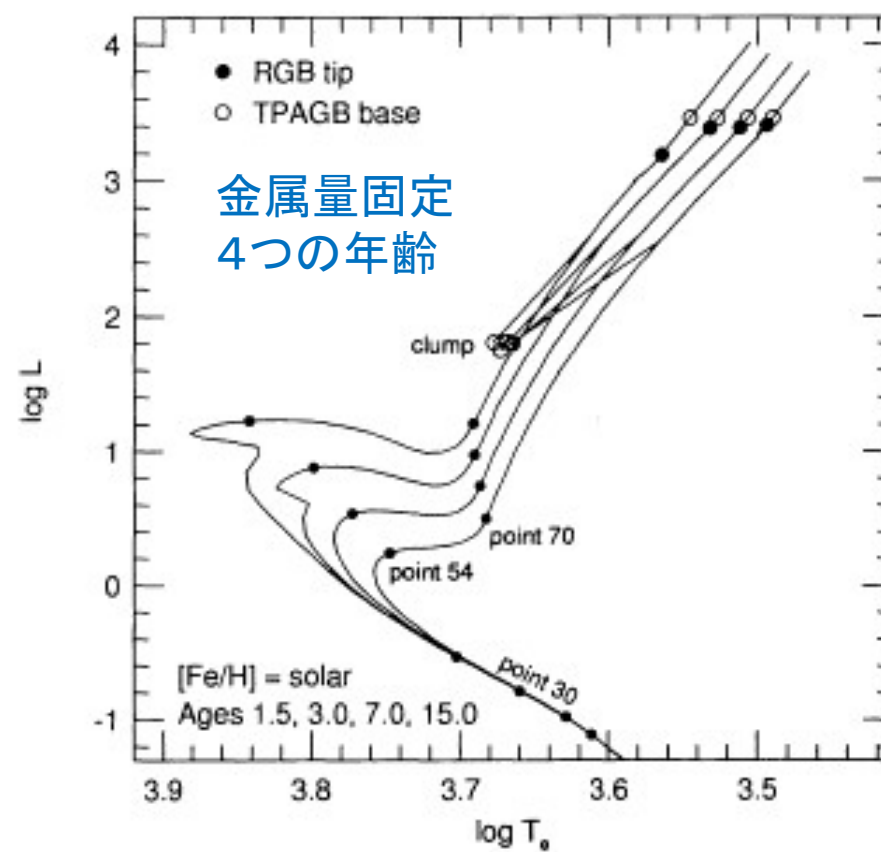
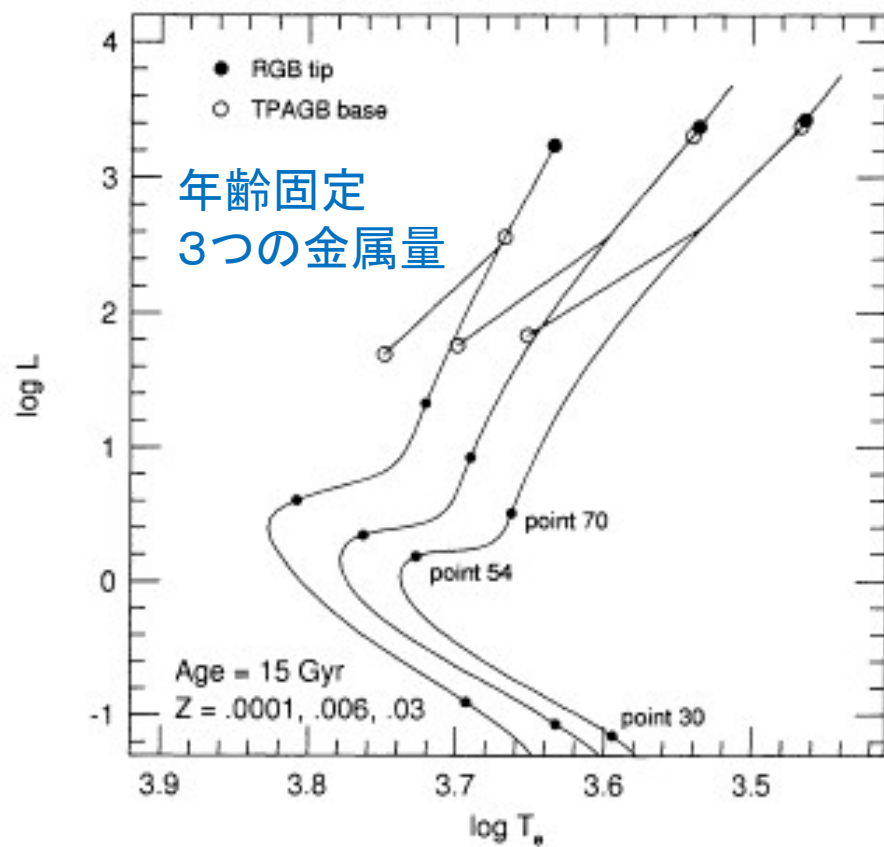
古い上に数10億年
以上のばらつき
⇒銀河系初期に
一気に形成された
のではない



散開星団

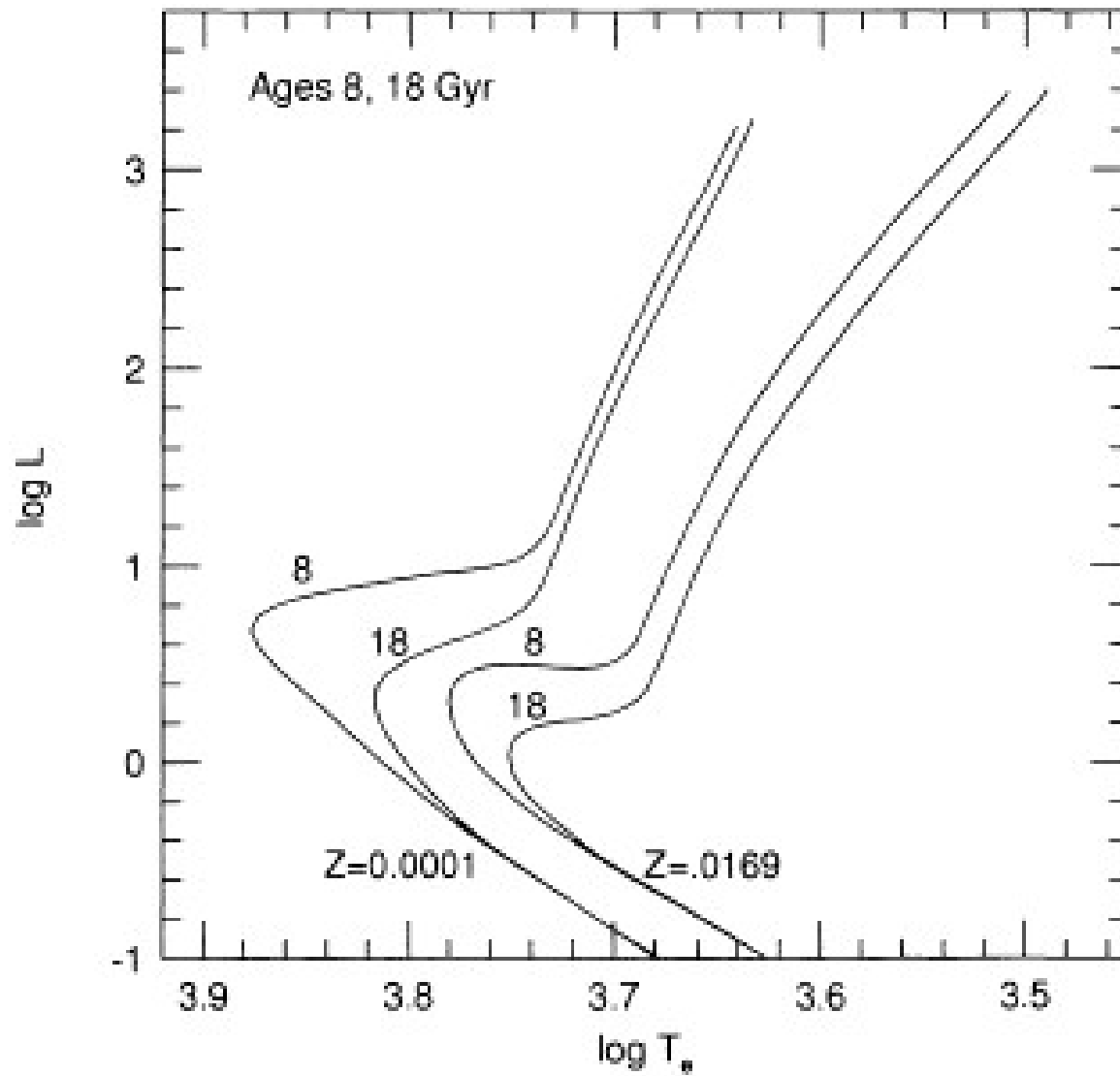
若く金属量多い

モデル結果



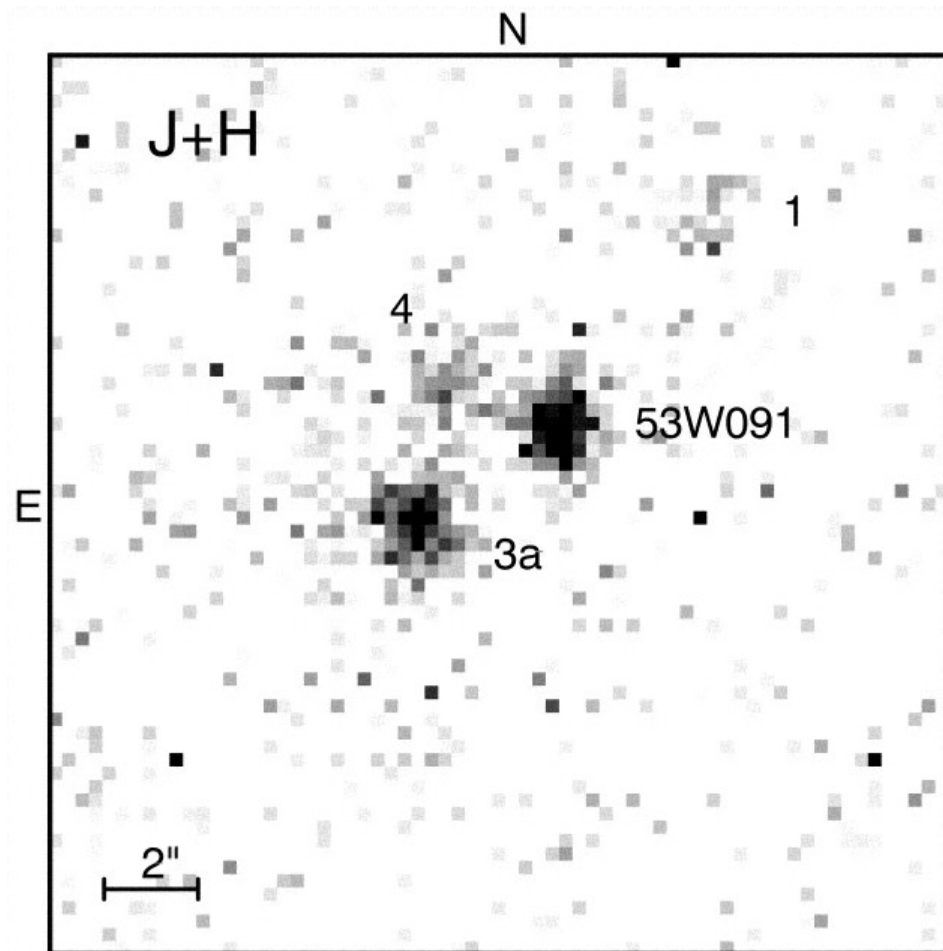
Worthey 1994

Age-metallicity degeneracy



Worthey 1994

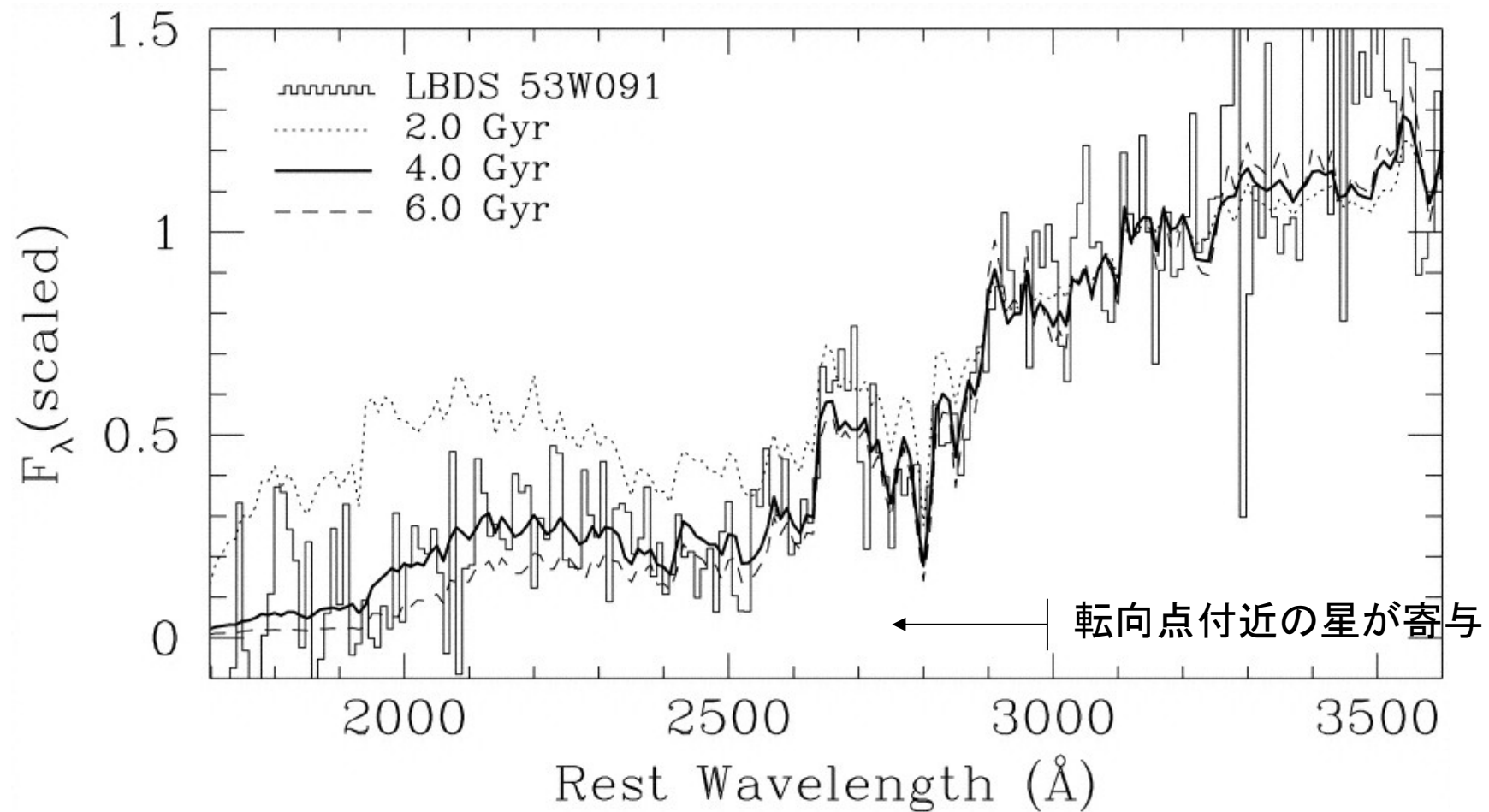
LBDS 53W091 at $z = 1.552$



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

橈円銀河の進化モデル (Worthey 1994)

年齢固定

金属量固定

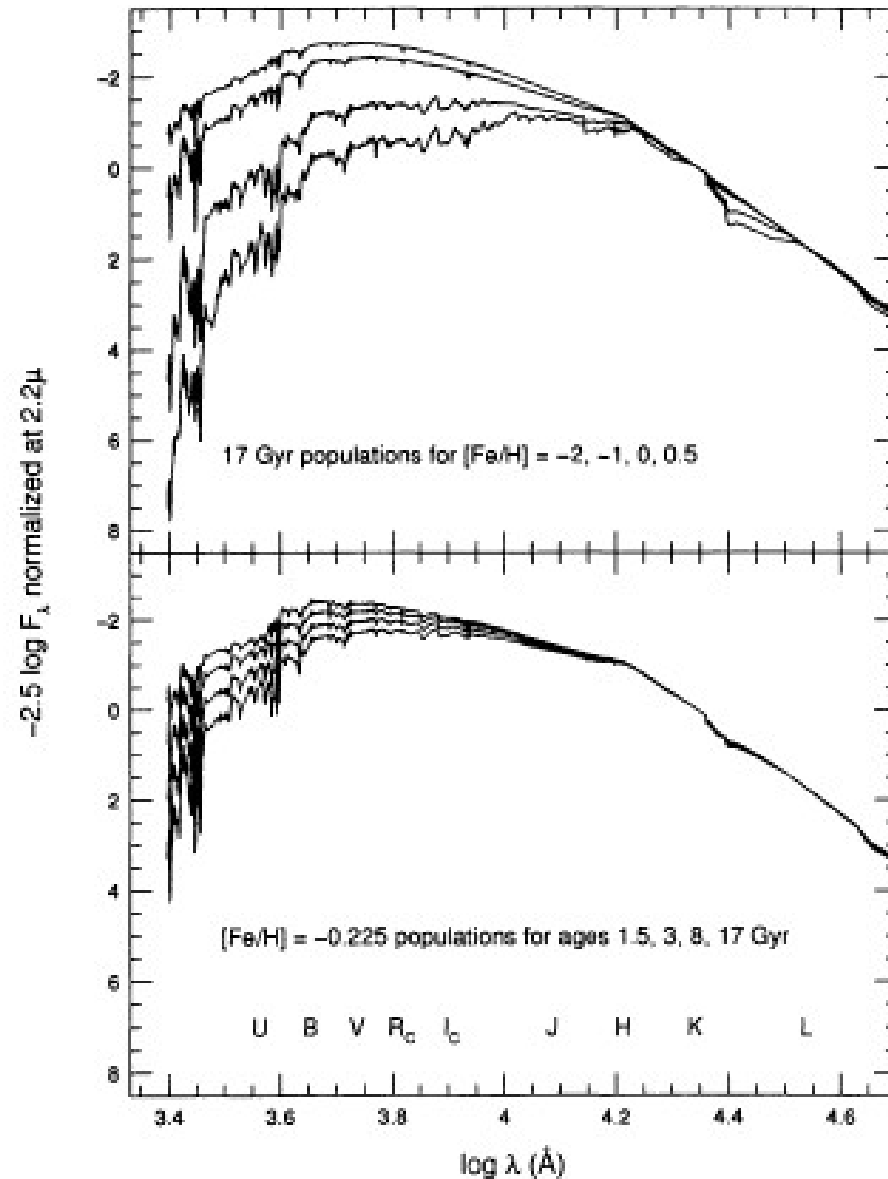
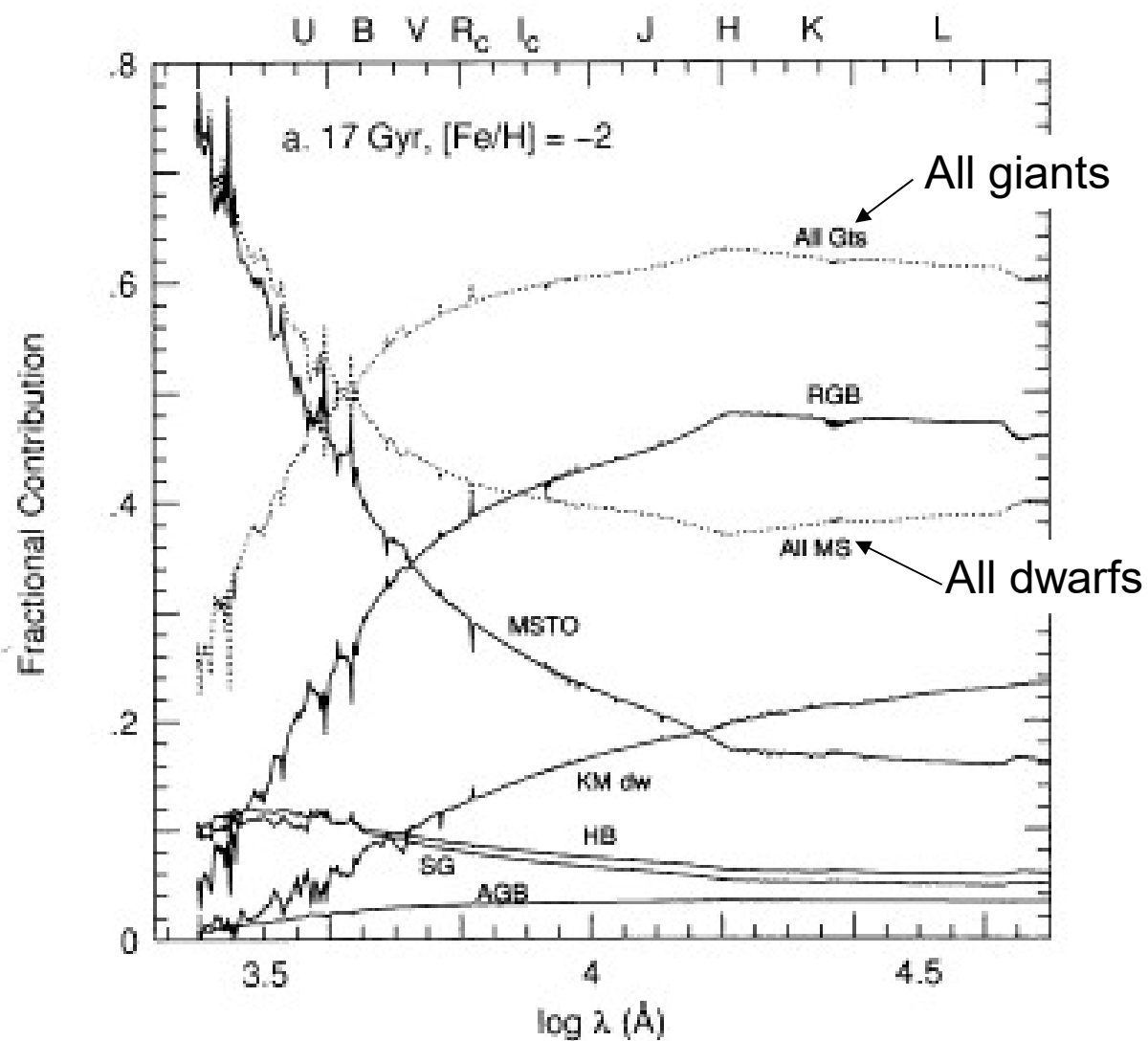


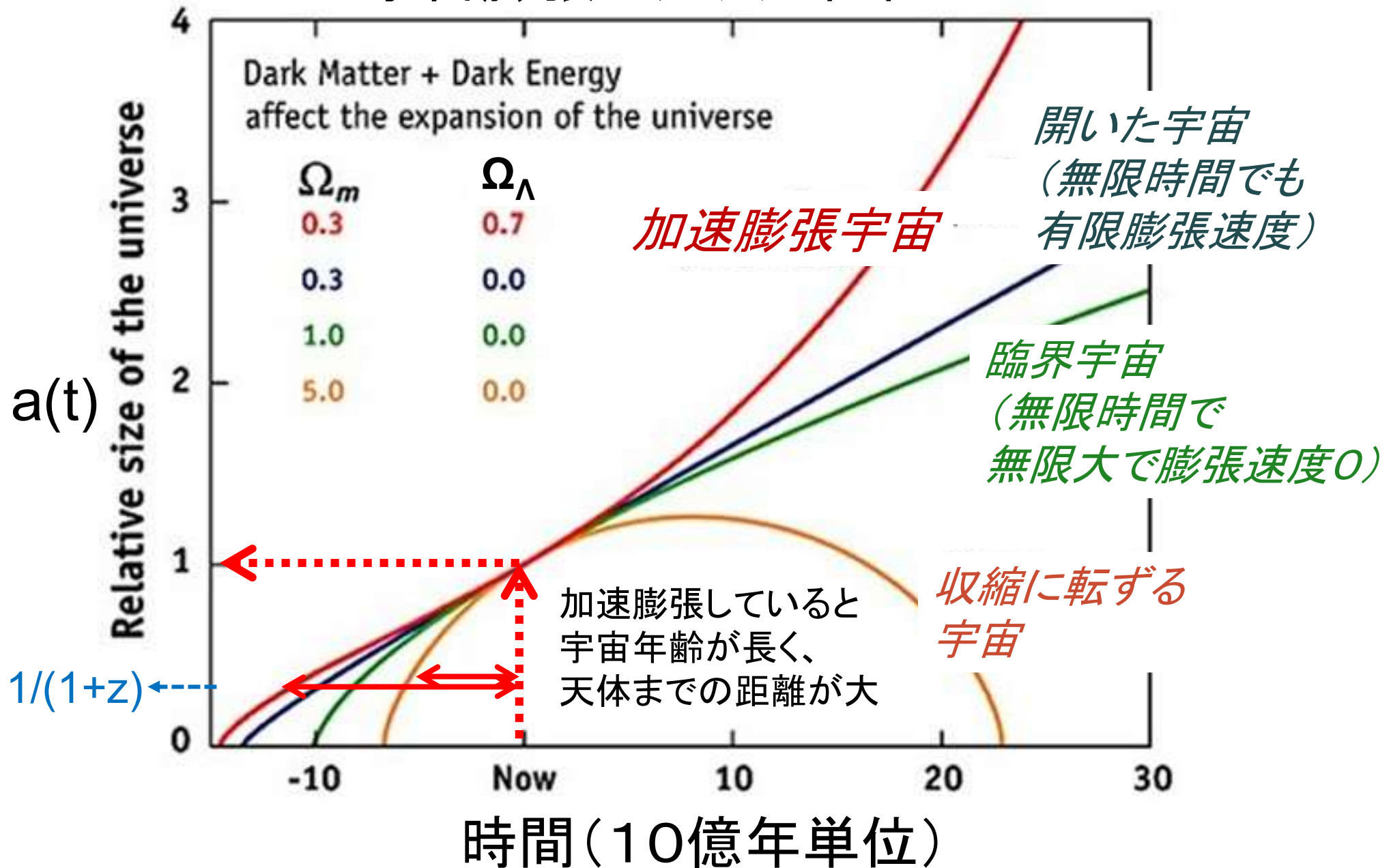
FIG. 38.—(a) Spectral energy distributions (SEDs) for 17 Gyr populations of $[\text{Fe}/\text{H}] = -2, -1, 0$, and 0.5 dex. Note that the presence of M stars leaves a strong signature in the optical red. (b) SEDs for $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.225$ populations of ages 1.5, 3, 8, and 17 Gyr. The vertical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

スペクトルに対する恒星種類の寄与

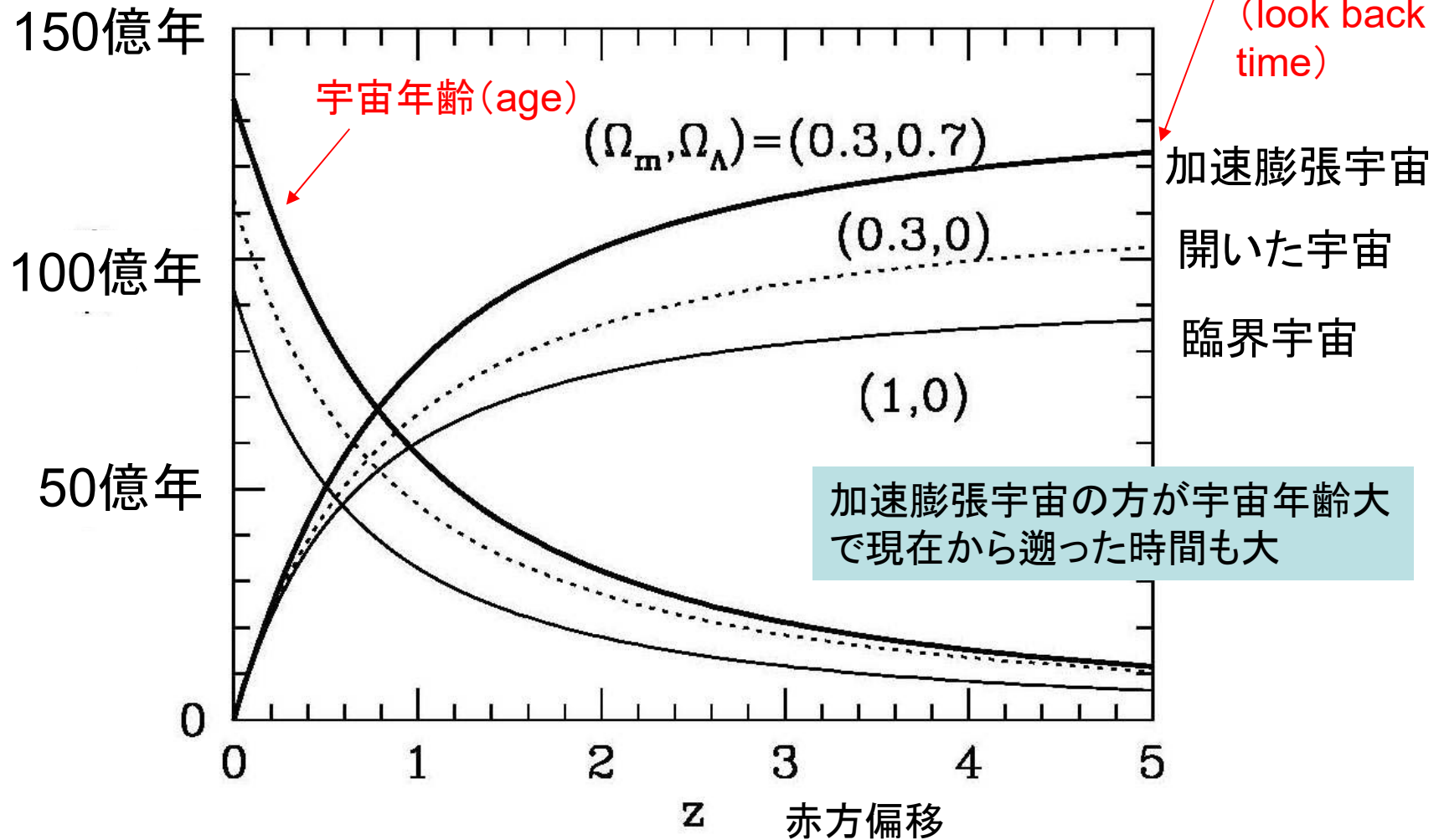


Worthey 1994

宇宙膨張の過去・未来

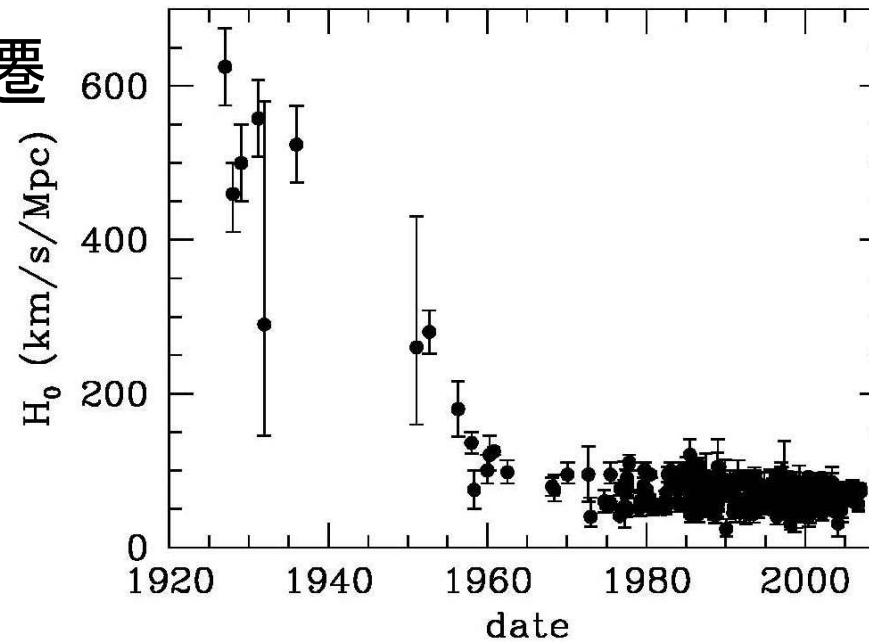


宇宙年齢と現在から遡った時間の 赤方偏移依存性



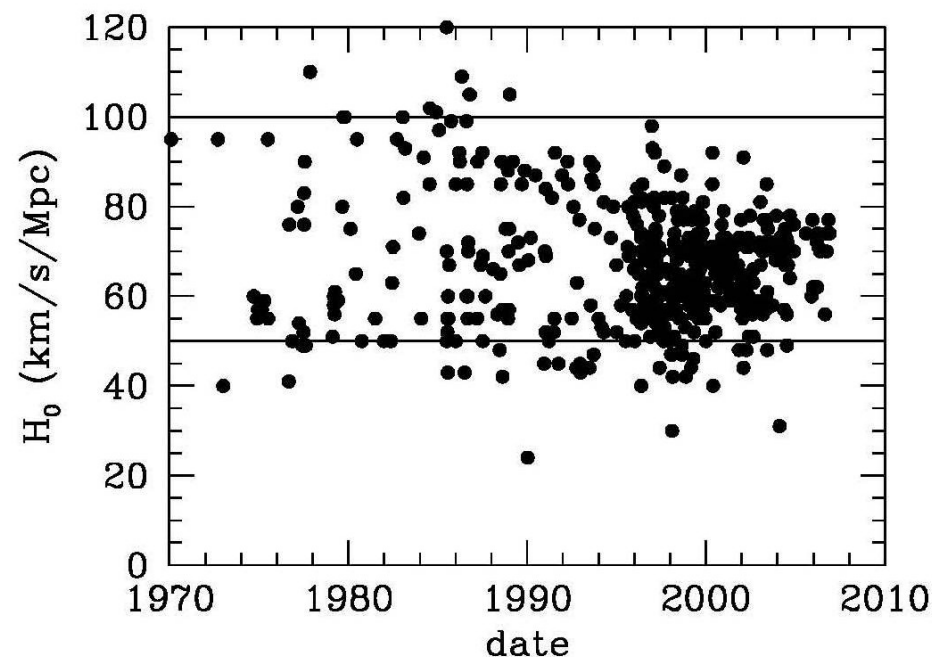
For $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$

H_0 決定の変遷



$$V = H_0 R$$

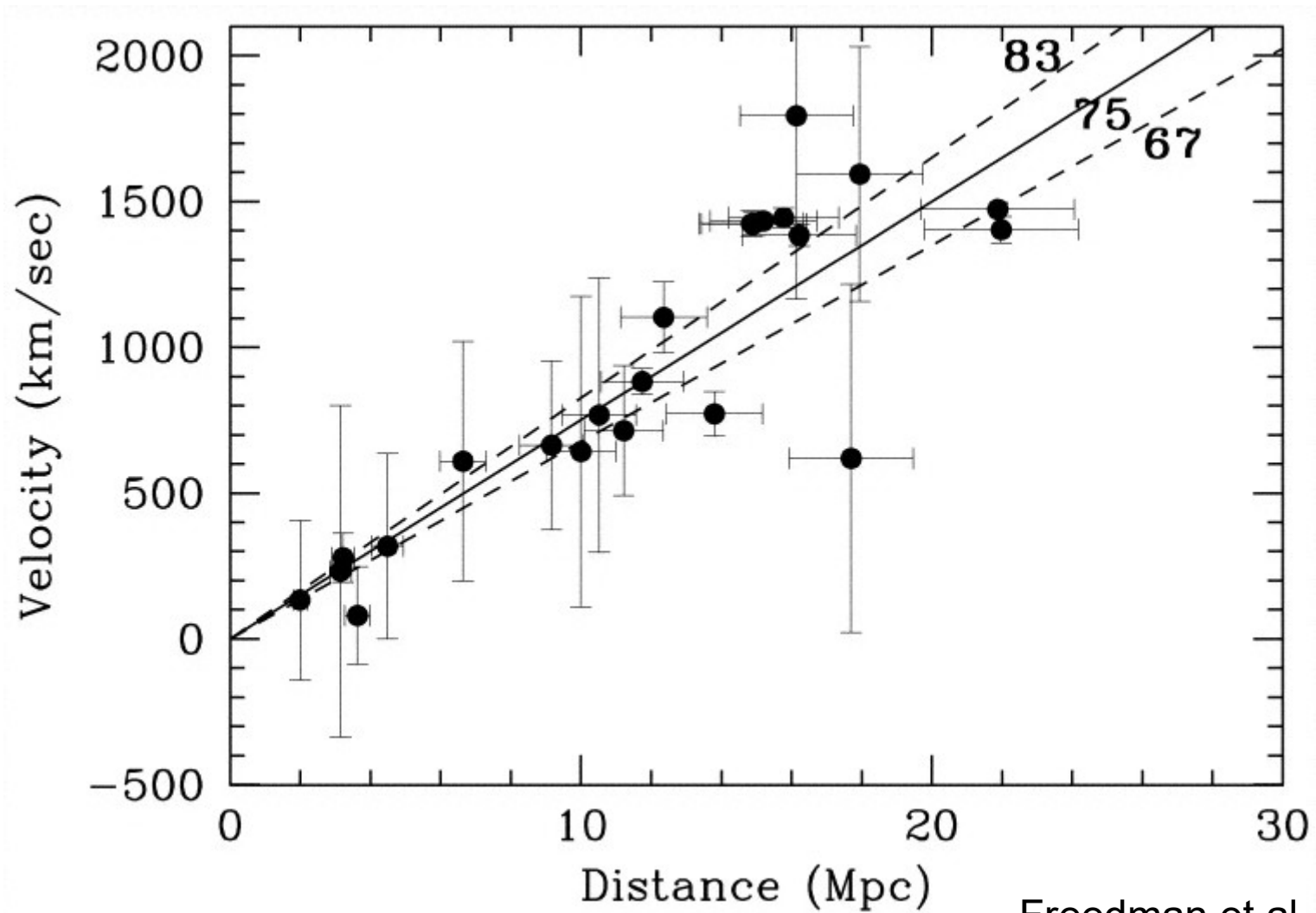
H_0 の不定性:
距離R決定の
不定性が反映



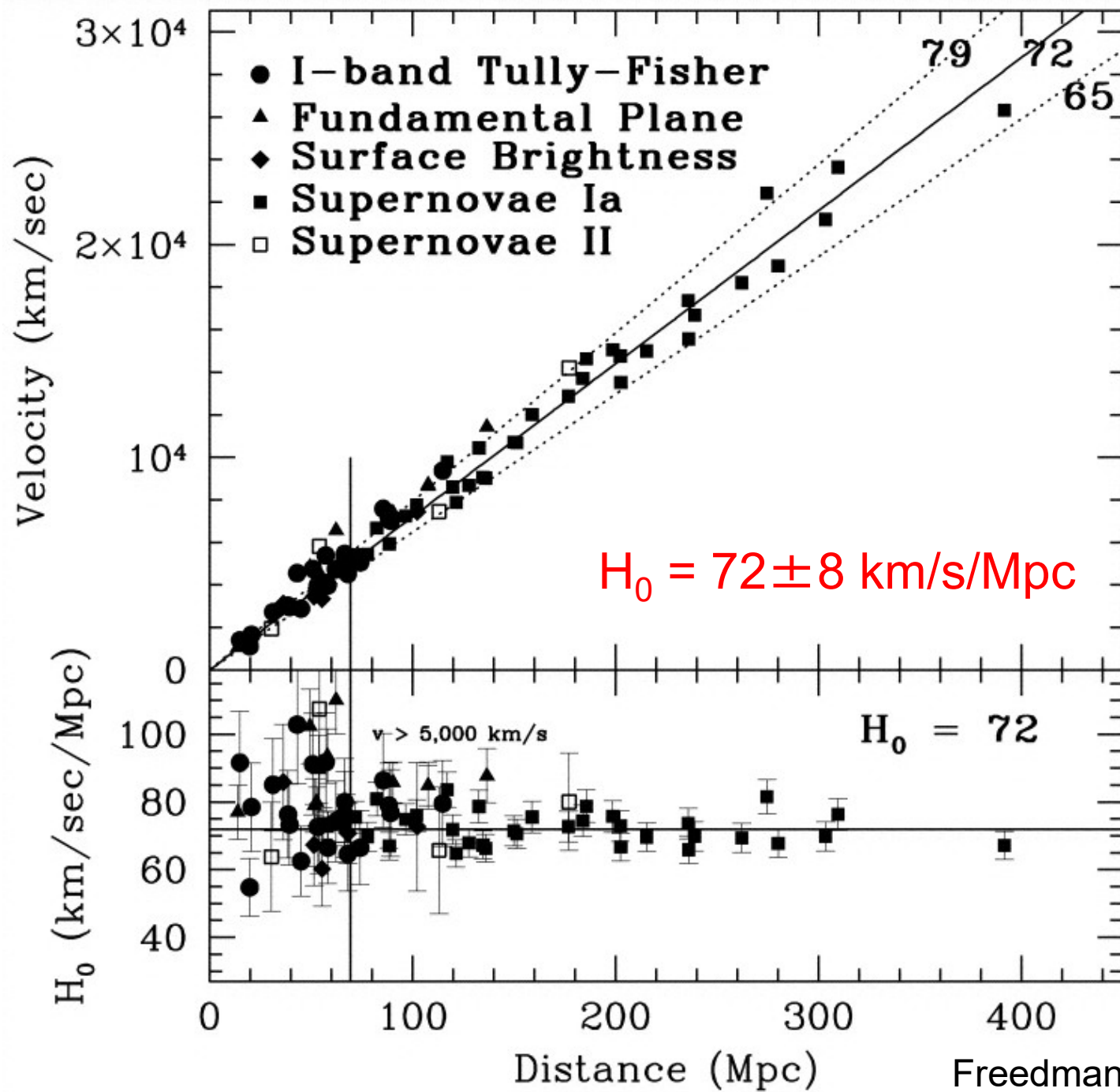
かつては50か100かの論争があったが、最近では70付近に収束しつつある。しかし、現在もまだ問題あり(後述)。

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

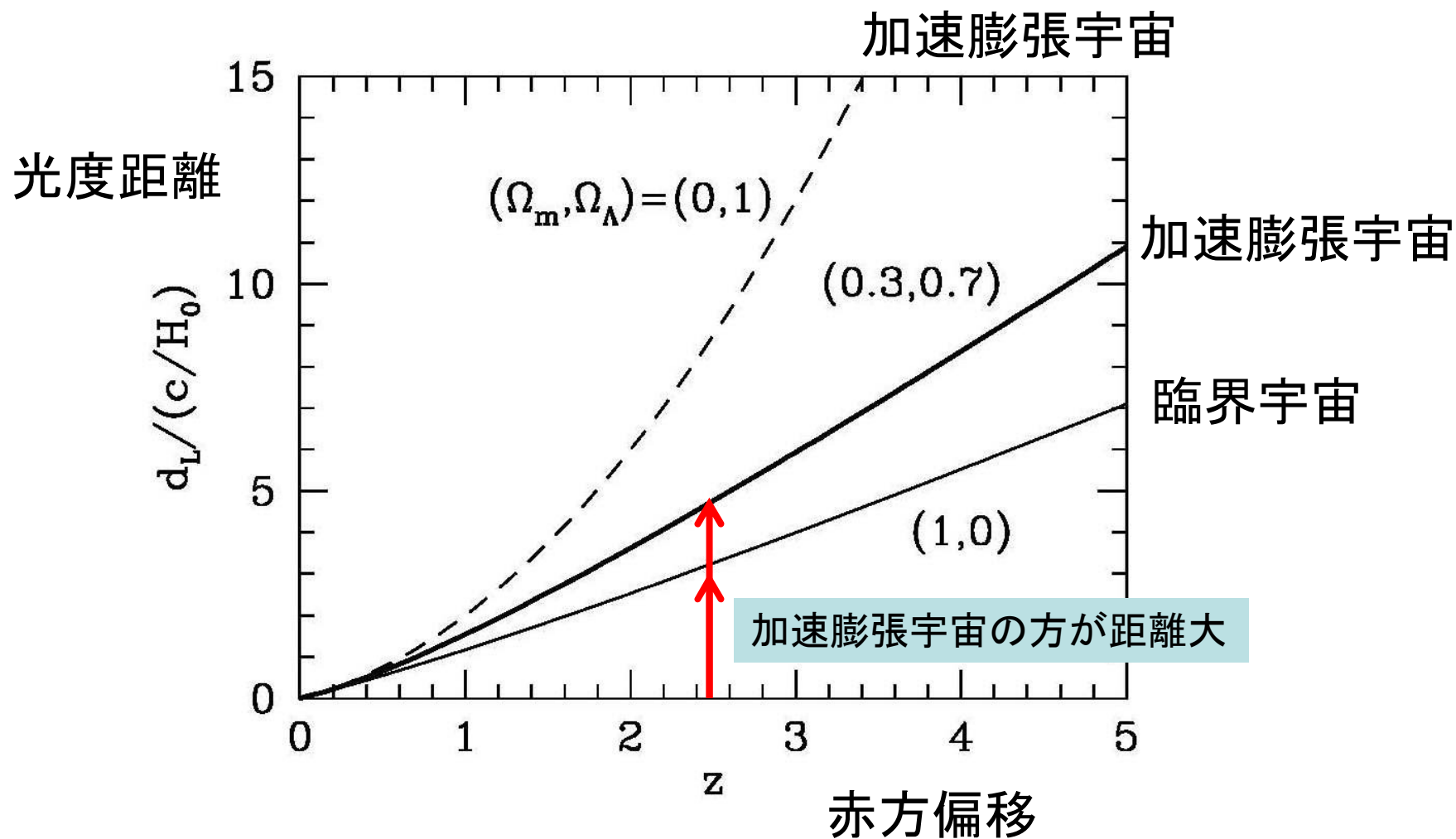


Freedman et al. 2001

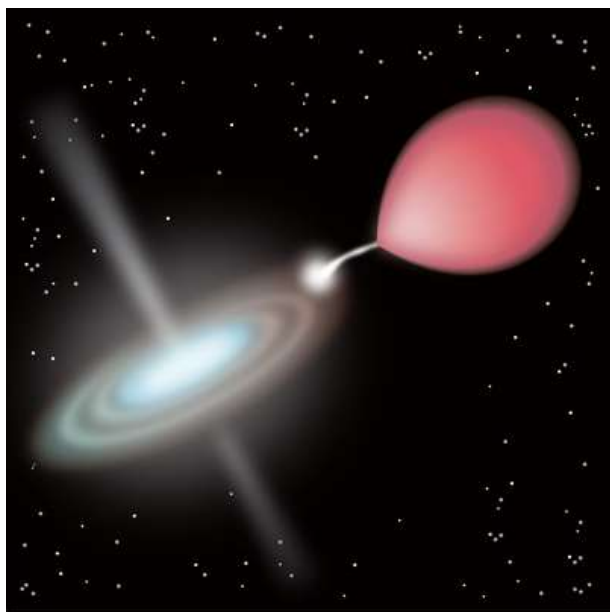


Freedman et al. 2001

標準光源までの距離（光度距離）

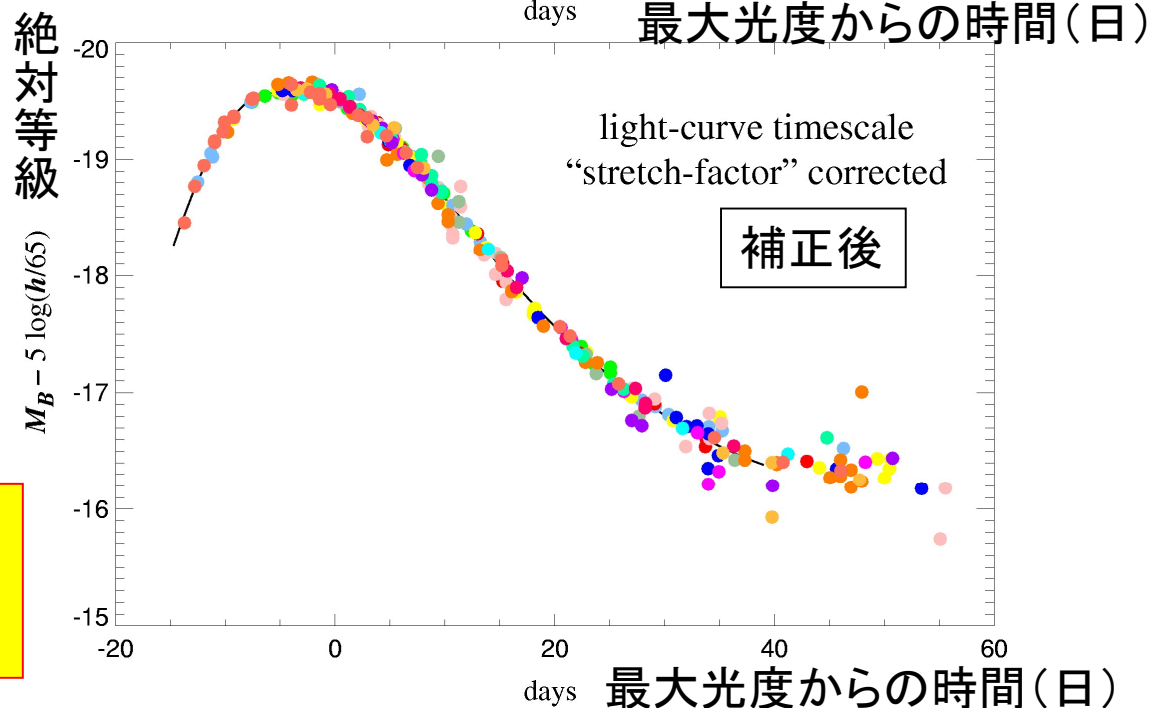
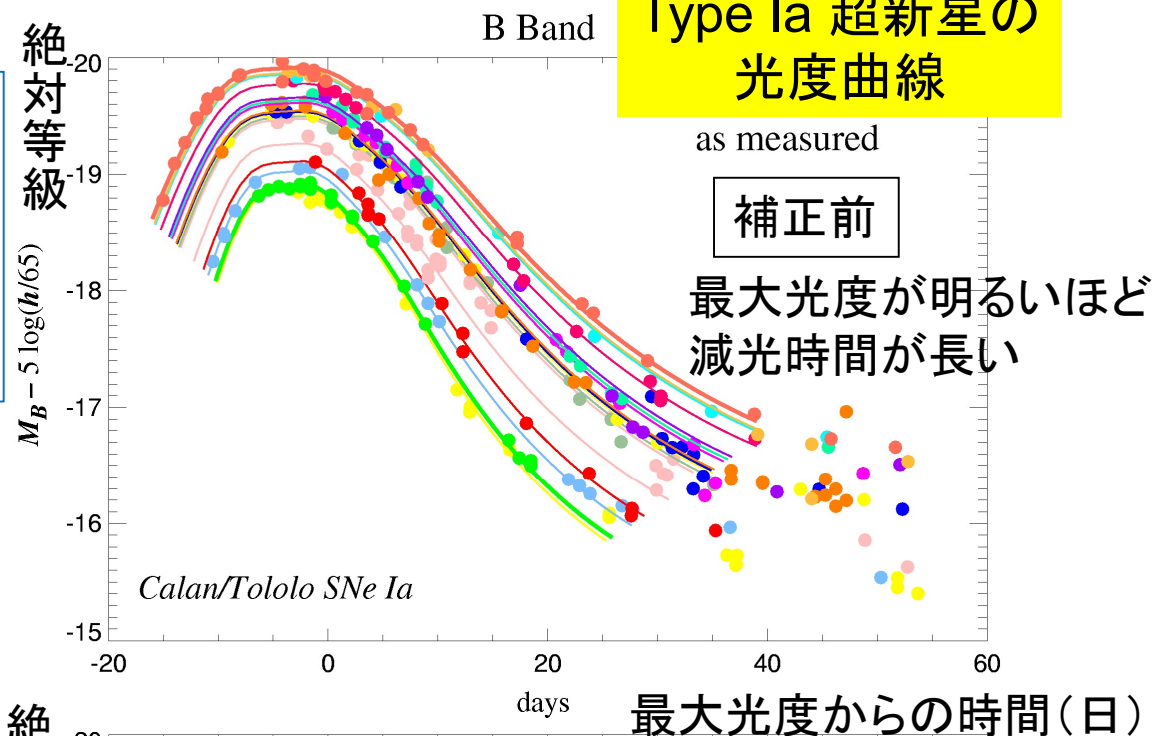


$M < 8 M_{\text{sun}}$ の星の最後
Ia型超新星爆発
 (残った白色矮星に伴星
 からガスが降着して爆発)

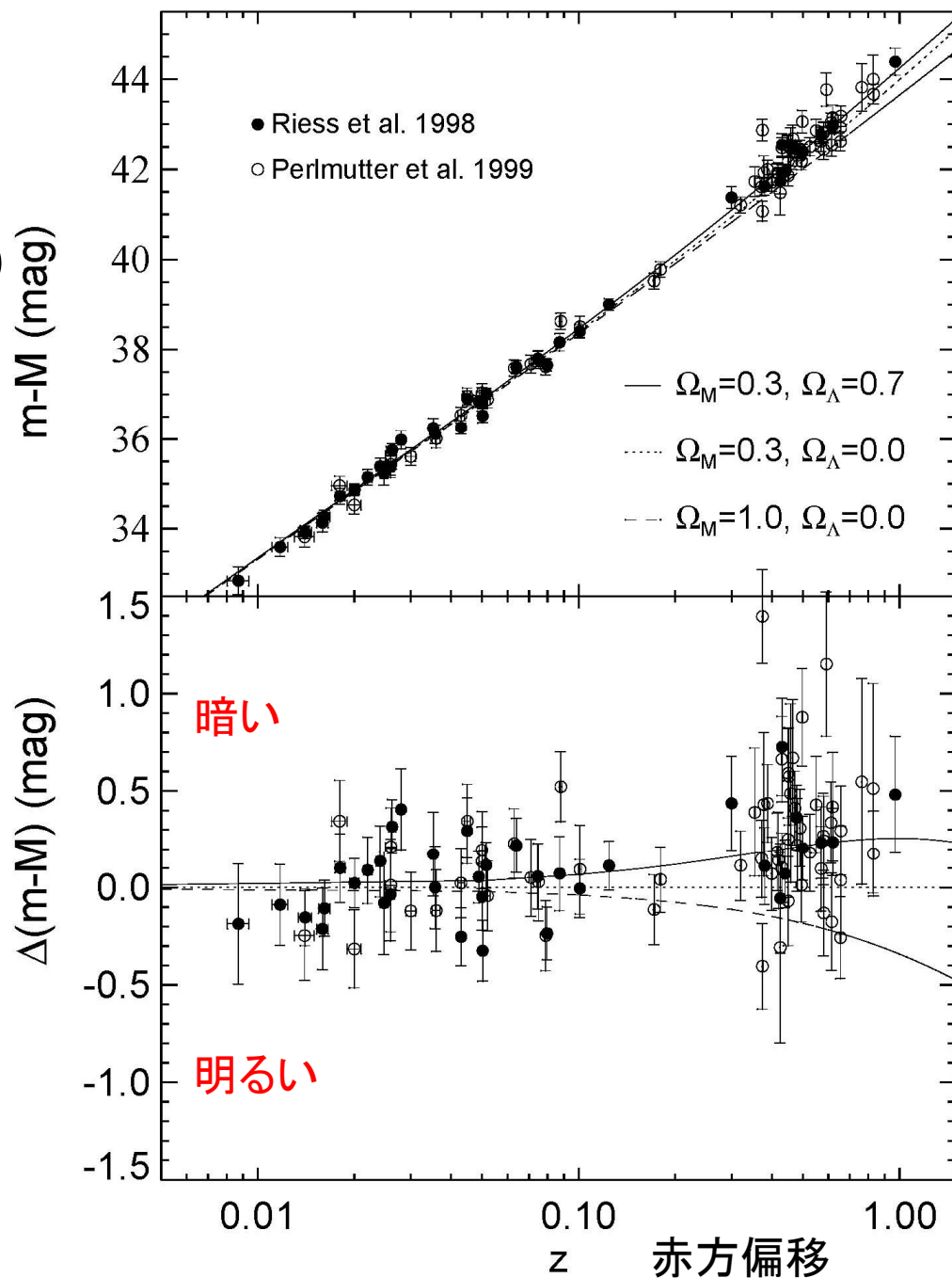


補正した光度曲線から絶対等級
 を求め、見かけ等級と比べて
 距離を決定

Type Ia 超新星の 光度曲線



Ia型超新星 までの距離 (距離指数)

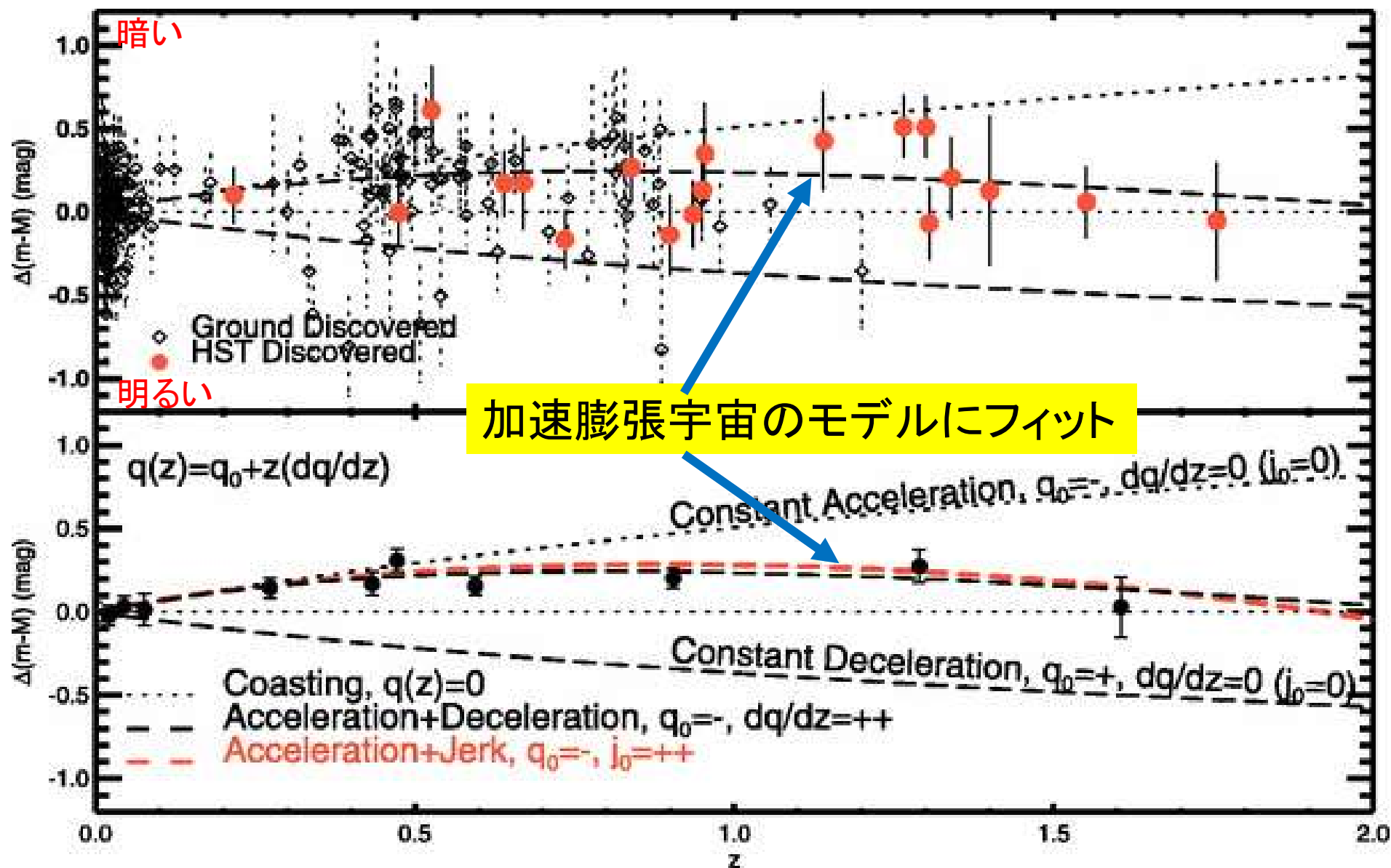


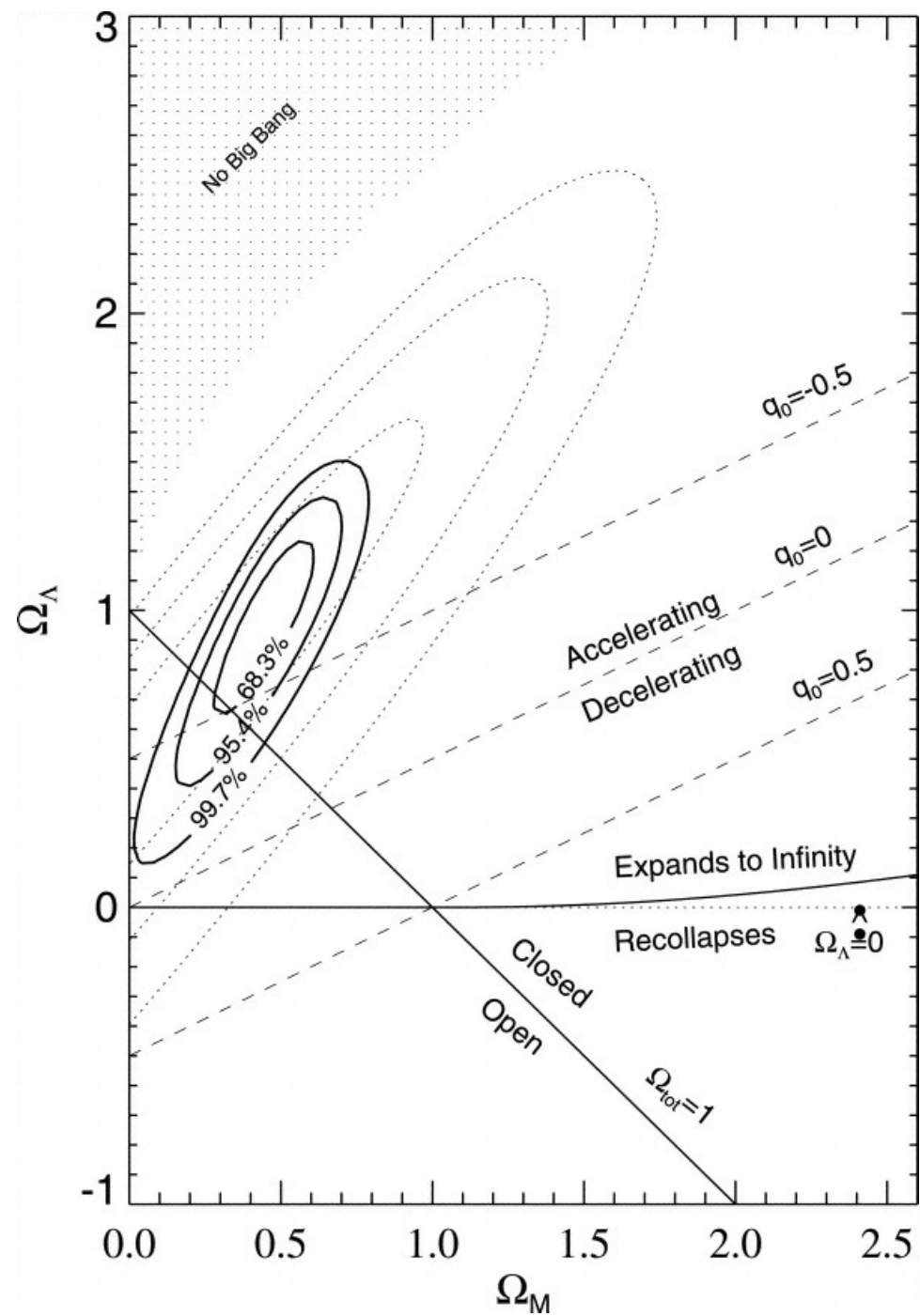
加速膨張宇宙
開いた宇宙
臨界宇宙

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

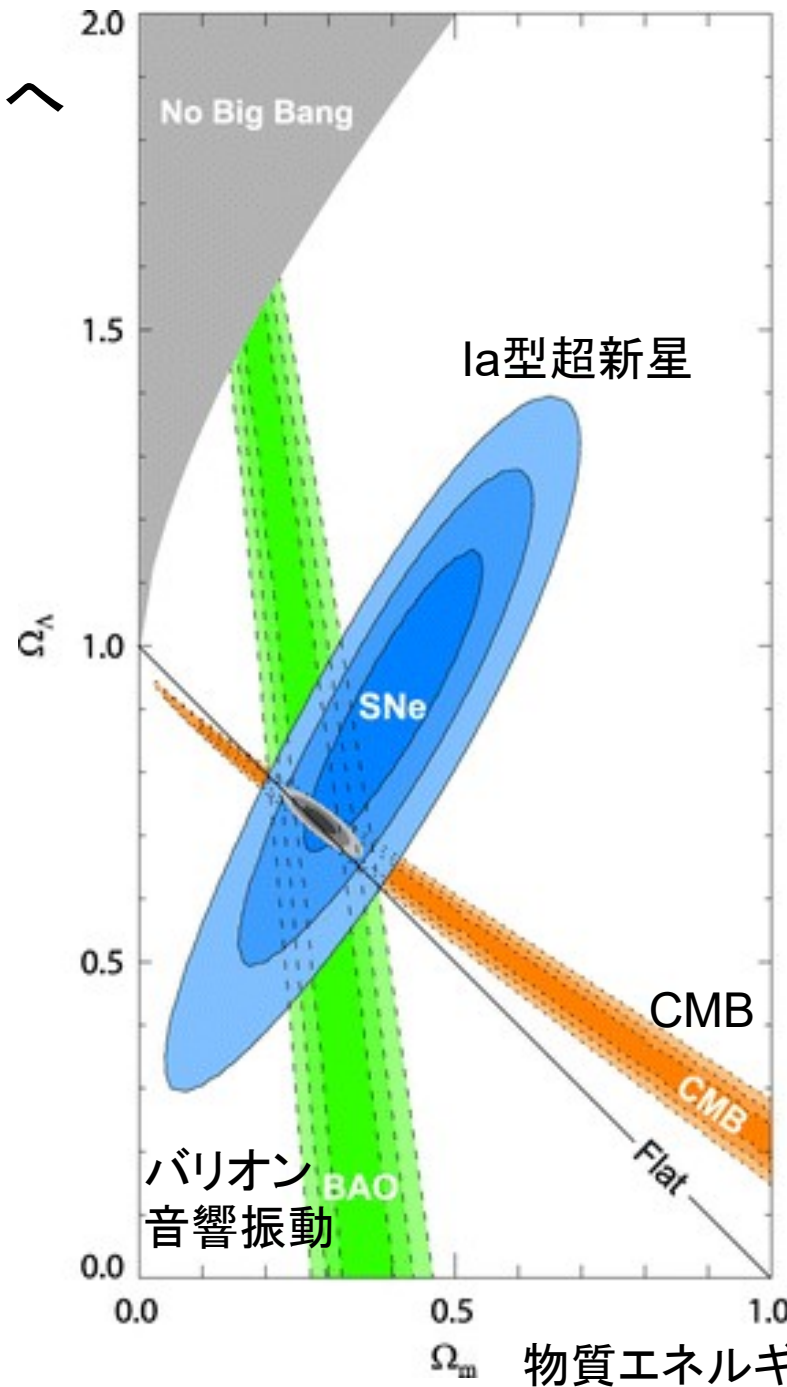




Riess et al 2004

宇宙論パラメータへの制限

暗黒エネルギー密度



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)

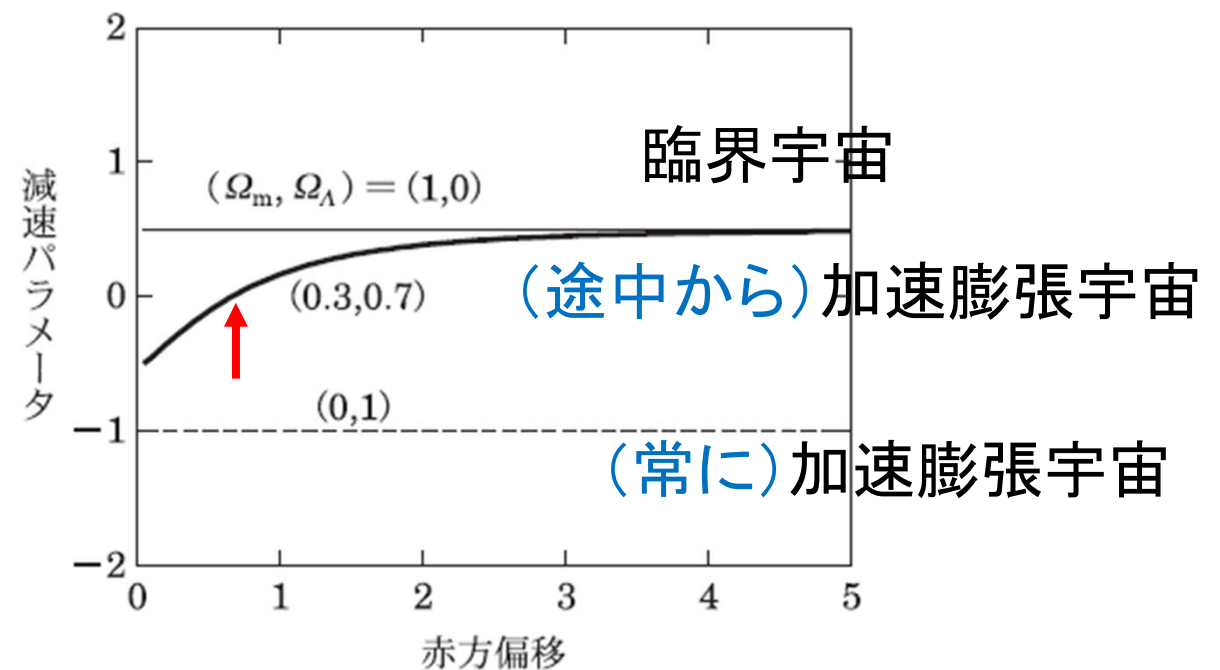
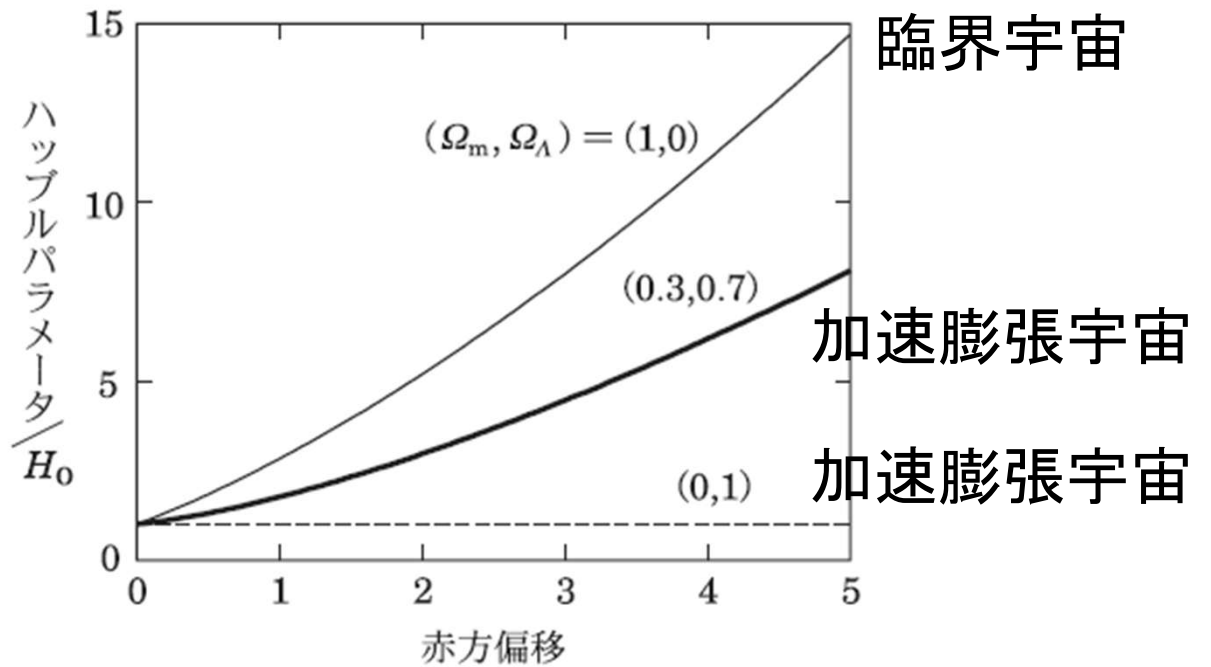
$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

減速パラメータ

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

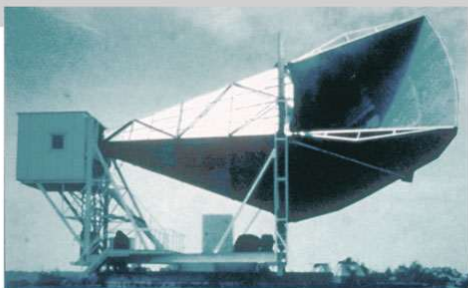
$q > 0$: 減速

$q < 0$: 加速

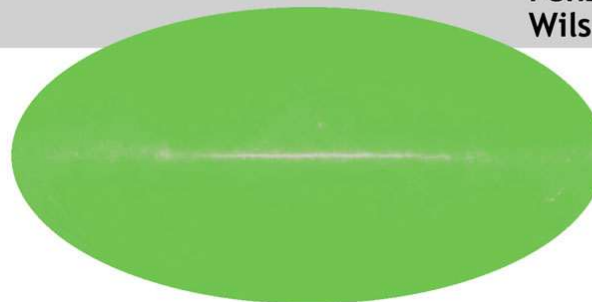


宇宙背景輻射 (CMB: Cosmic Microwave Background) の測定の歴史

1965



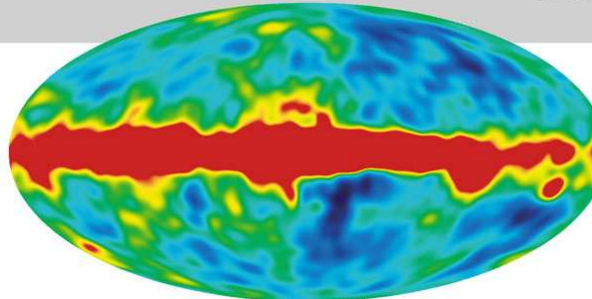
Penzias and
Wilson



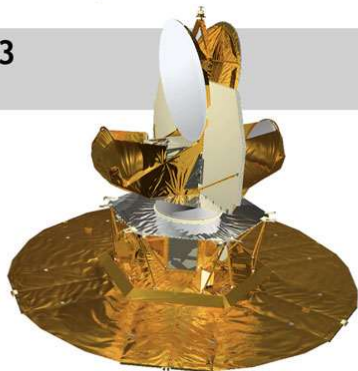
1992



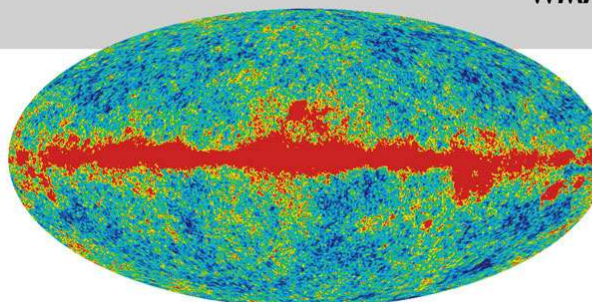
COBE



2003

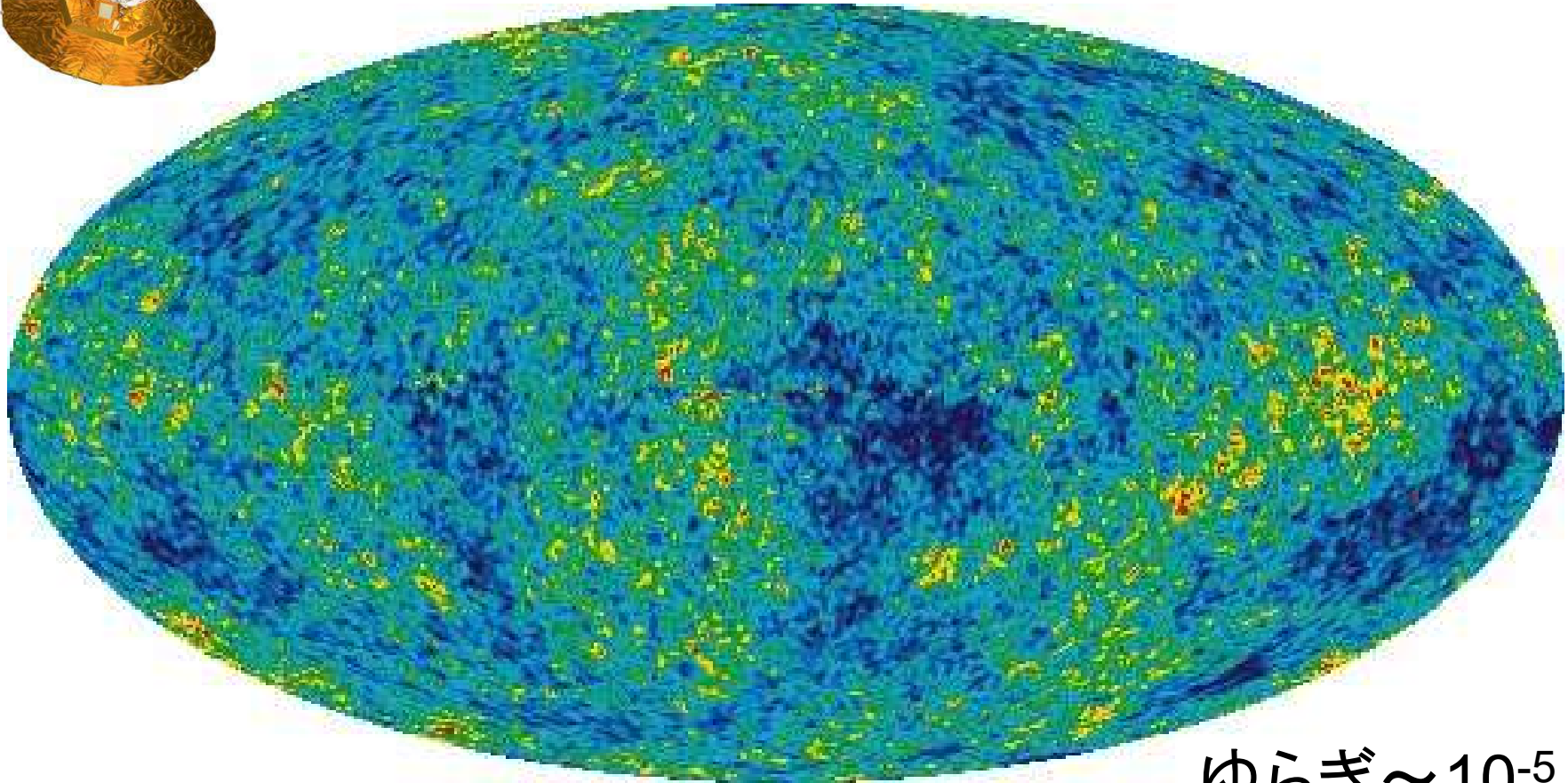
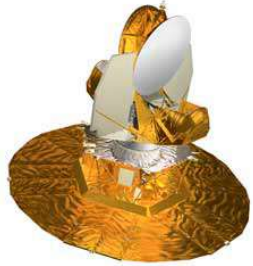


WMAP



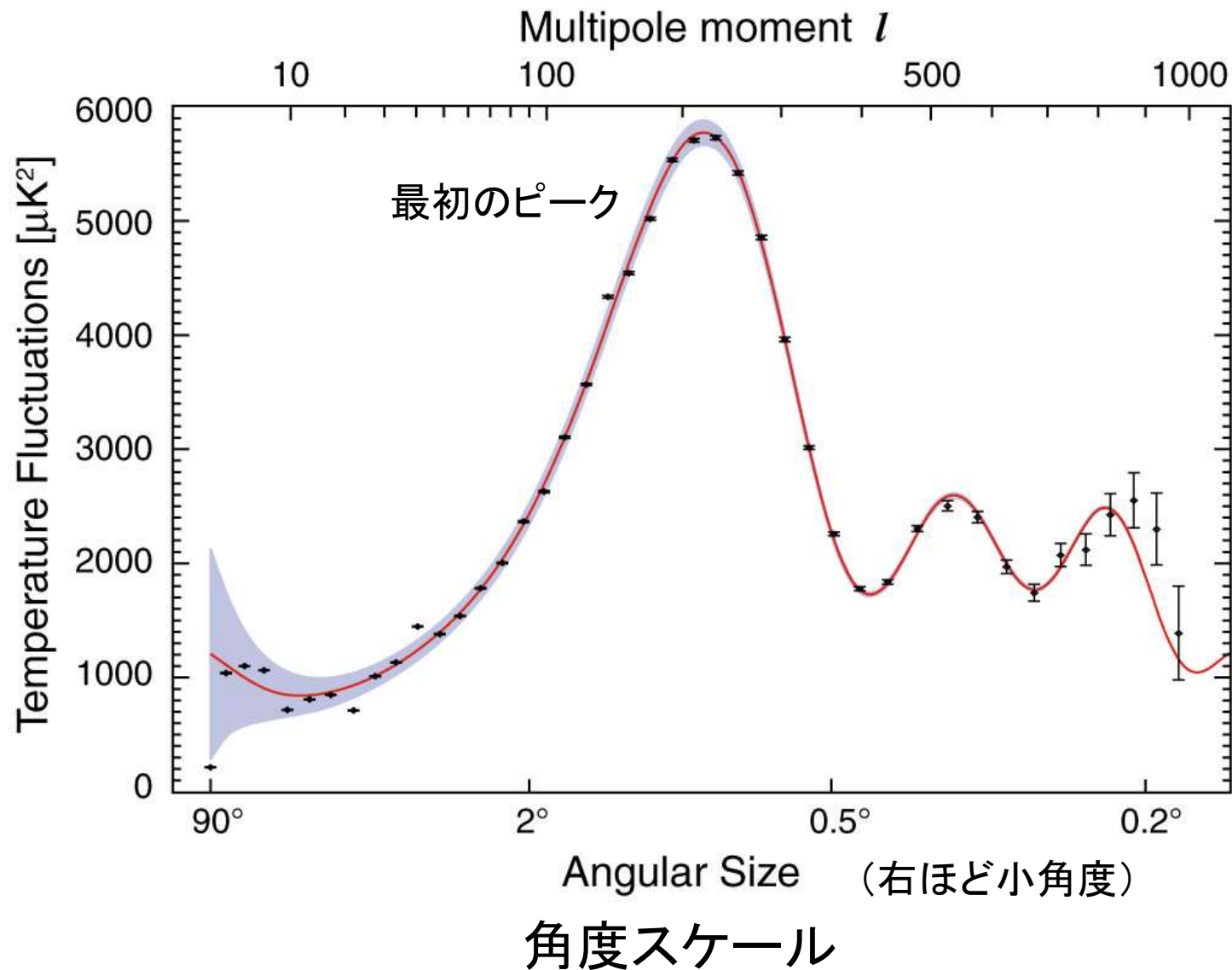
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)
(2001~2010)

宇宙背景輻射の温度パターン



ゆらぎ $\sim 10^{-5}$

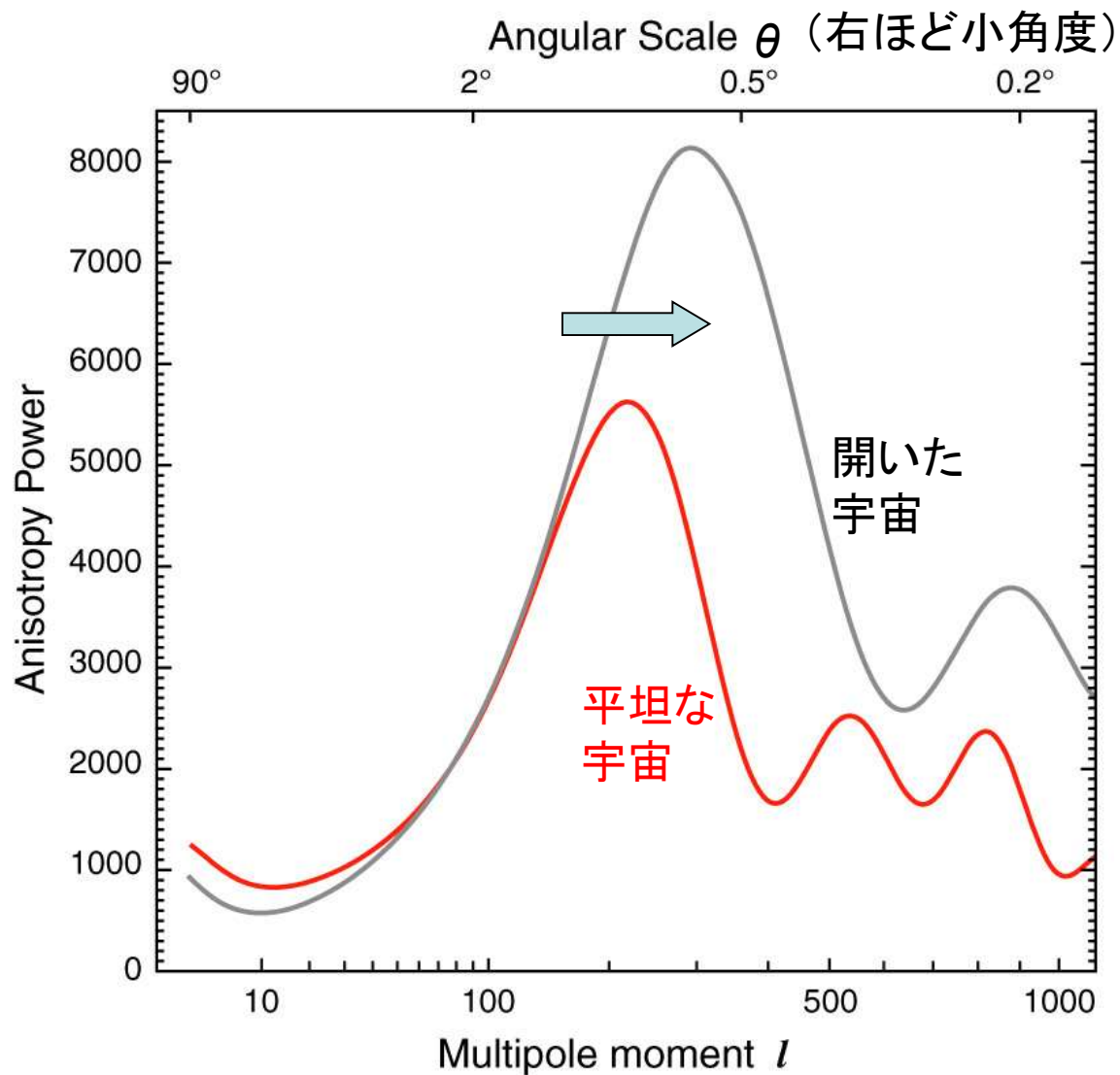
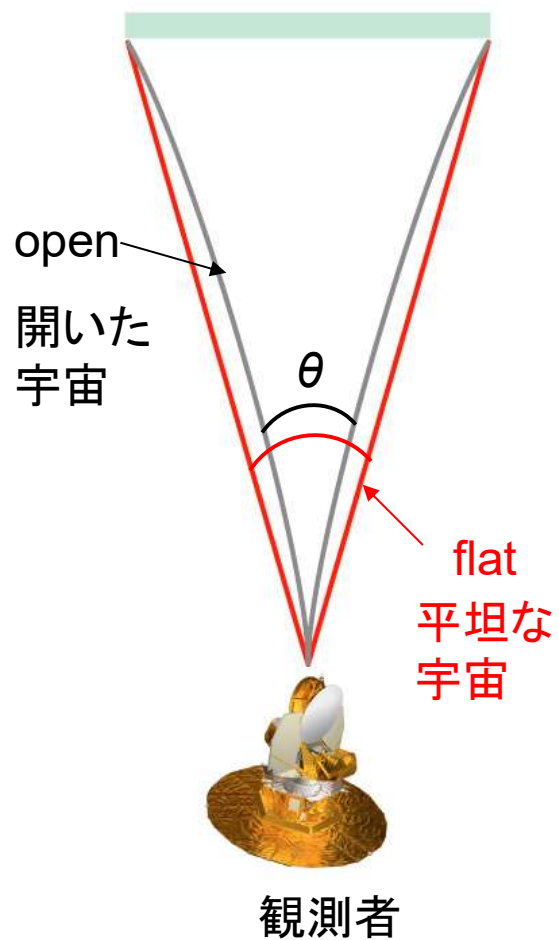
CMBの温度揺らぎのスペクトラム



最初のピークを与える
物理的長さ

Standard Ruler:

1° arc measurement of
dominant energy spike

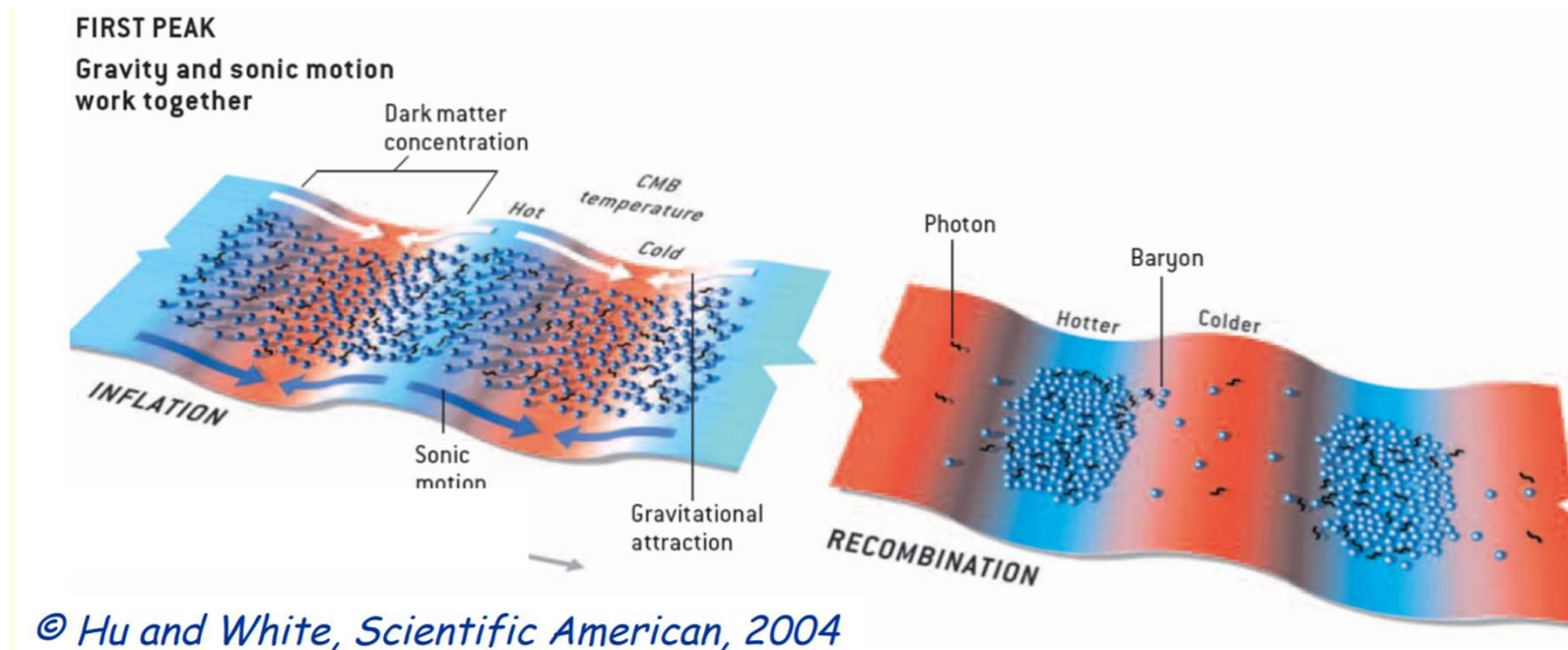


前頁の最初のピーク位置と比べると、
平坦な宇宙がいいことがわかる。

バリオン音響振動

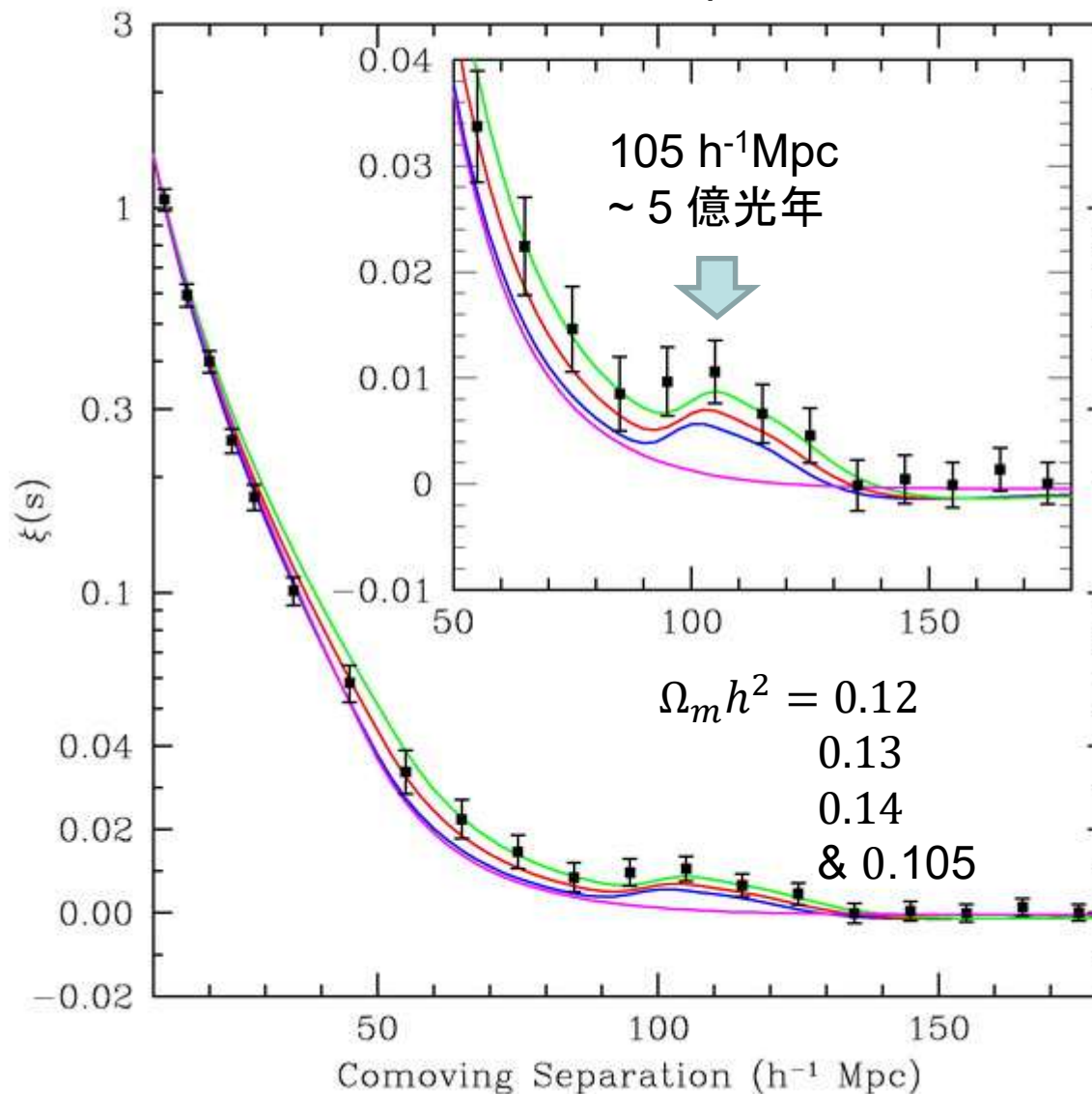
Baryon Acoustic Oscillation (BAO)

- 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



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

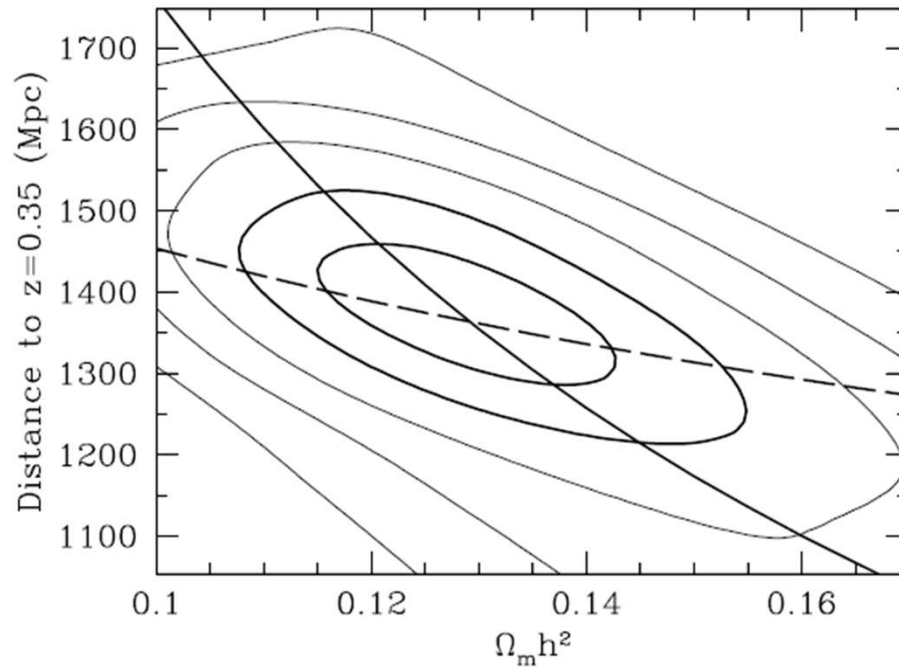


FIG. 7.—Likelihood contours of CDM models as a function of $\Omega_m h^2$ and $D_V(0.35)$. The likelihood has been taken to be proportional to $\exp(-\chi^2/2)$, and contours corresponding to 1 through 5 σ for a two-dimensional Gaussian have been plotted. The one-dimensional marginalized values are $\Omega_m h^2 = 0.130 \pm 0.010$ 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.]

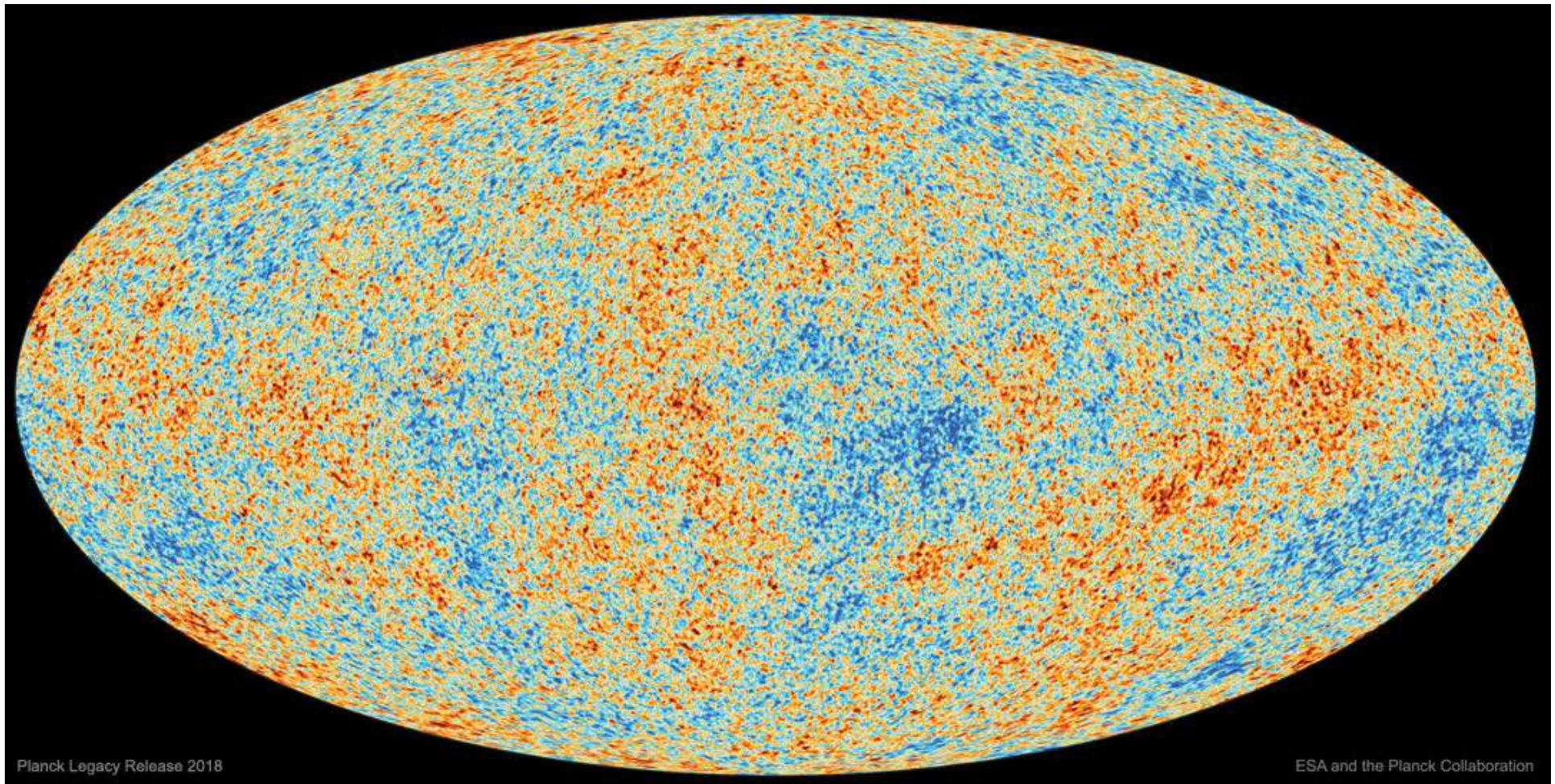
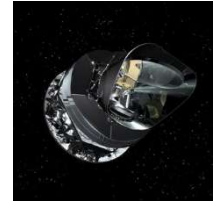
Angular diameter distance $D(z)$

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)



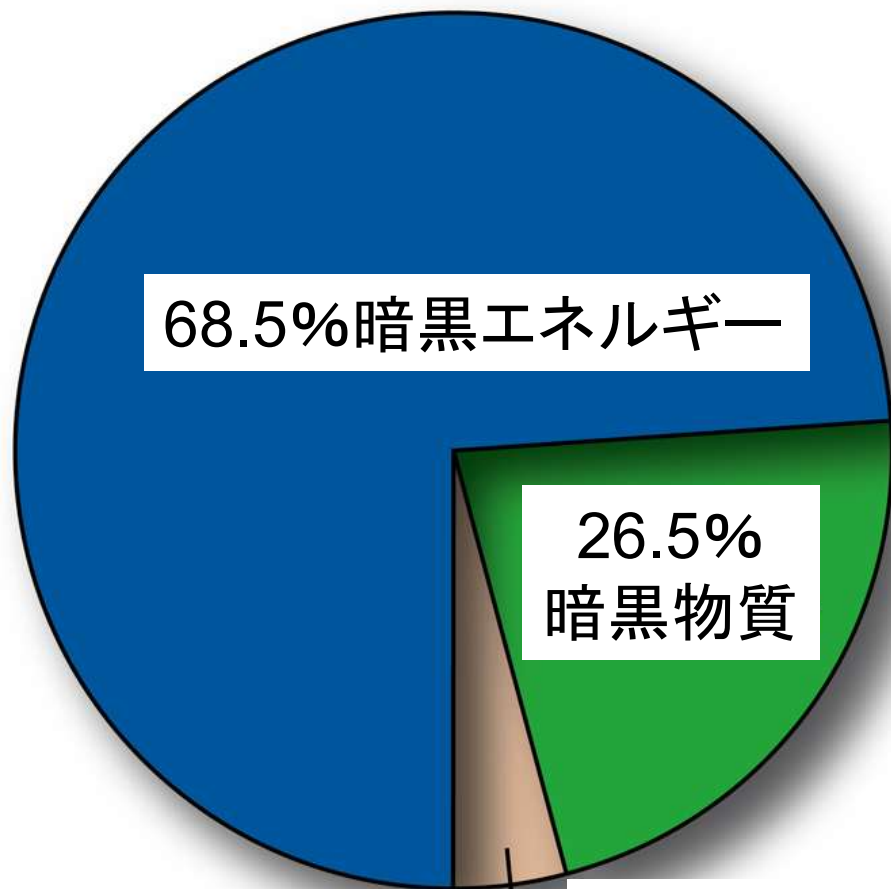
WMAPとPlanckの結果の比較



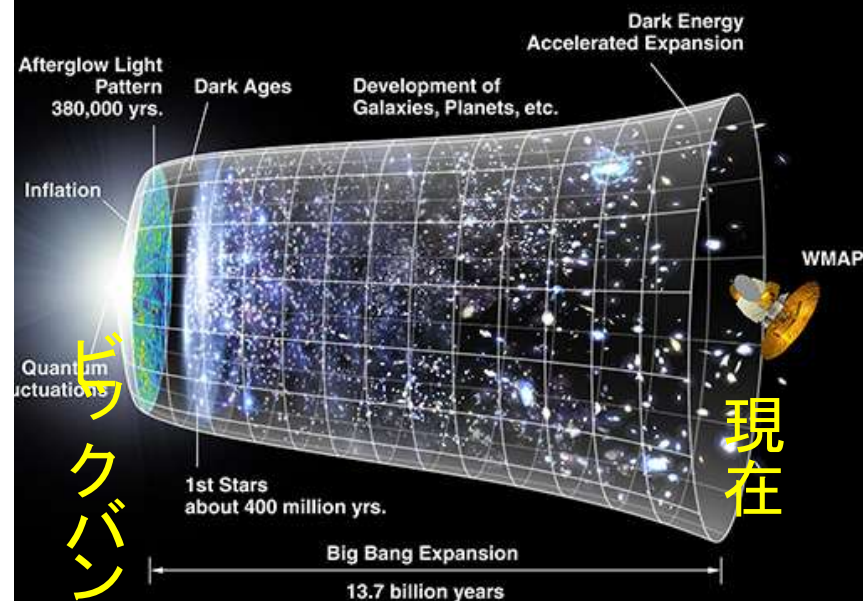
	WMAP (2012)	Planck (2018)
$100\Omega_b h^2$	2.264 ± 0.050	2.237 ± 0.015
$\Omega_{\text{DM}} h^2$	0.1138 ± 0.0045	0.1200 ± 0.0012
Ω_Λ	0.721 ± 0.025	0.6847 ± 0.0073
n	0.972 ± 0.013	0.9649 ± 0.0042
$10^9 A_s$	2.203 ± 0.067	2.100 ± 0.030
τ_e	0.089 ± 0.014	0.0544 ± 0.0073
t_0 [億年]	137.4 ± 1.1	137.97 ± 0.23
H_0 [$\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$]	70.0 ± 2.2	67.36 ± 0.54
$\Omega_m h^2$	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)

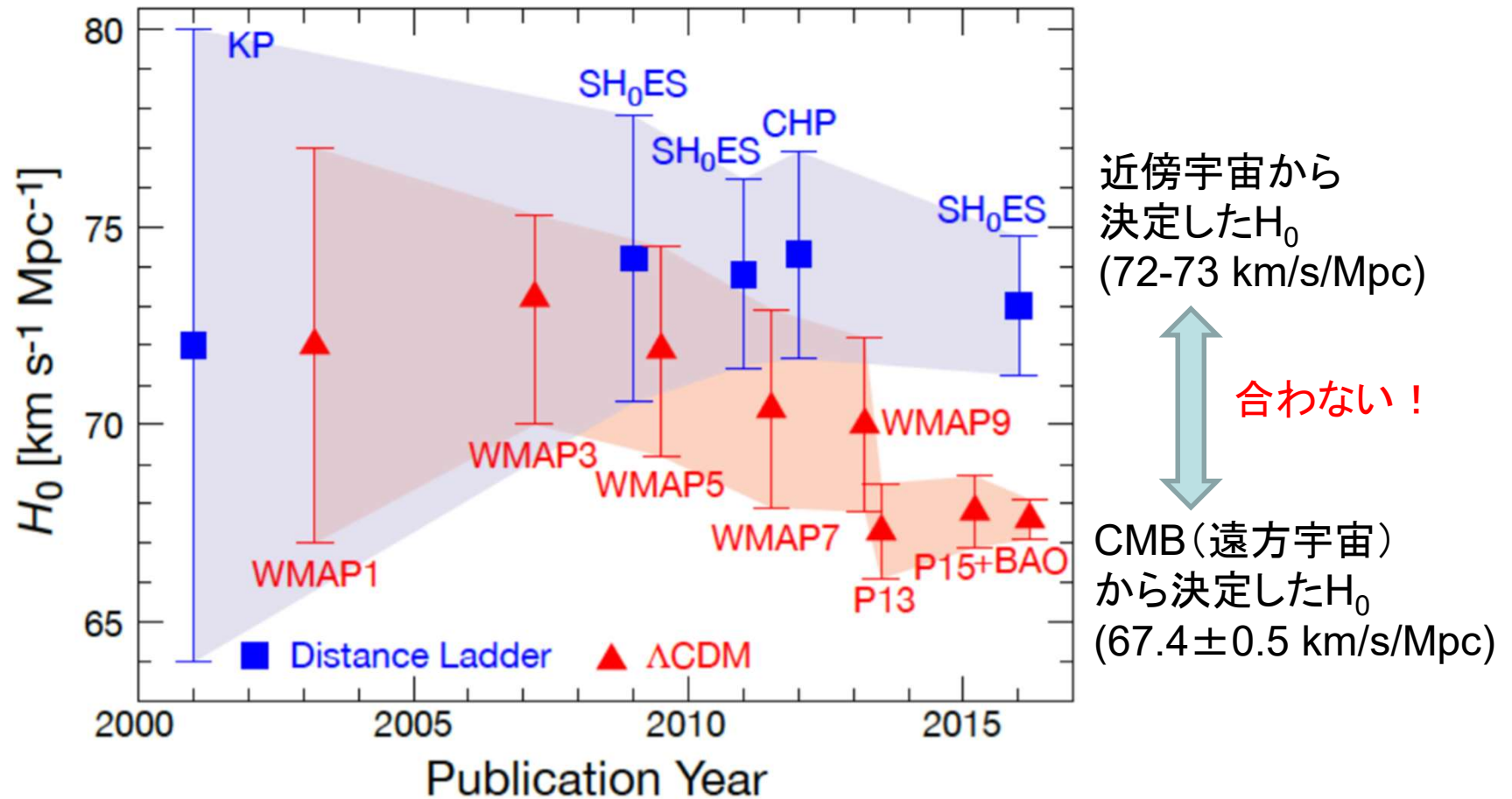


宇宙の年齢: 138億年
(現在のベスト値)

現在の問題

The Hubble Tension

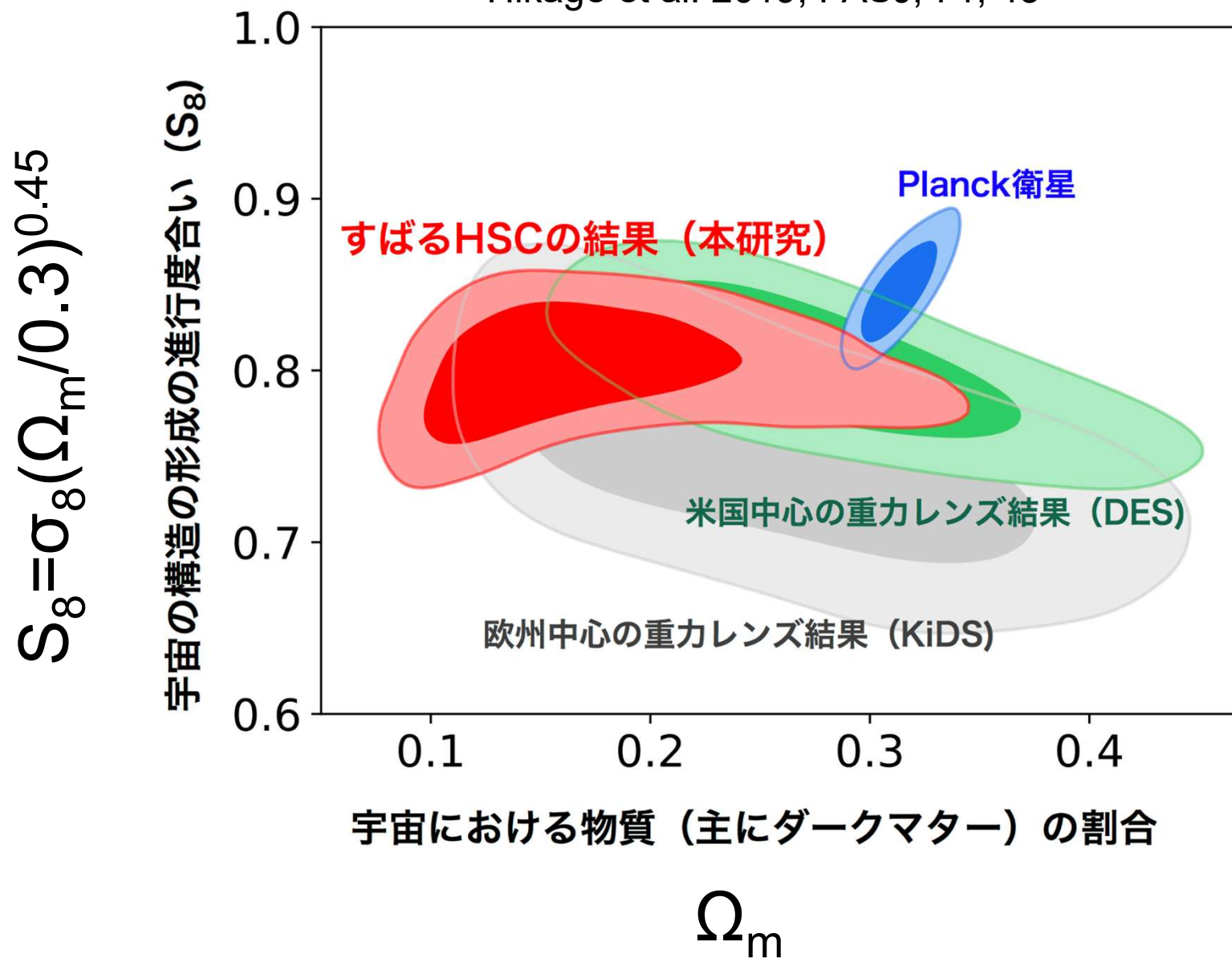
Freedman 2017



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



ダークエネルギー の時間変化

2025年3月に米国DESIに
よって発表された、
時間変化するダークエネ
ルギーの観測的示唆

w_0 , w_a はダークエネルギーの時間変化を
現象論的に記述するパラメータ

$$w(a) = w_0 + w_a (1-a)$$

アインシュタインの宇宙定数では
 $w_0 = -1$, $w_a = 0$

(DESI collaboration: arXiv:2404.03002)

