

Nobel Prize in Physics 2011



Photo: Roy Kaltschmidt.
Courtesy: Lawrence
Berkeley National
Laboratory

**Saul
Perlmutter**



Photo: Belinda Pratten,
Australian National
University

**Brian P.
Schmidt**



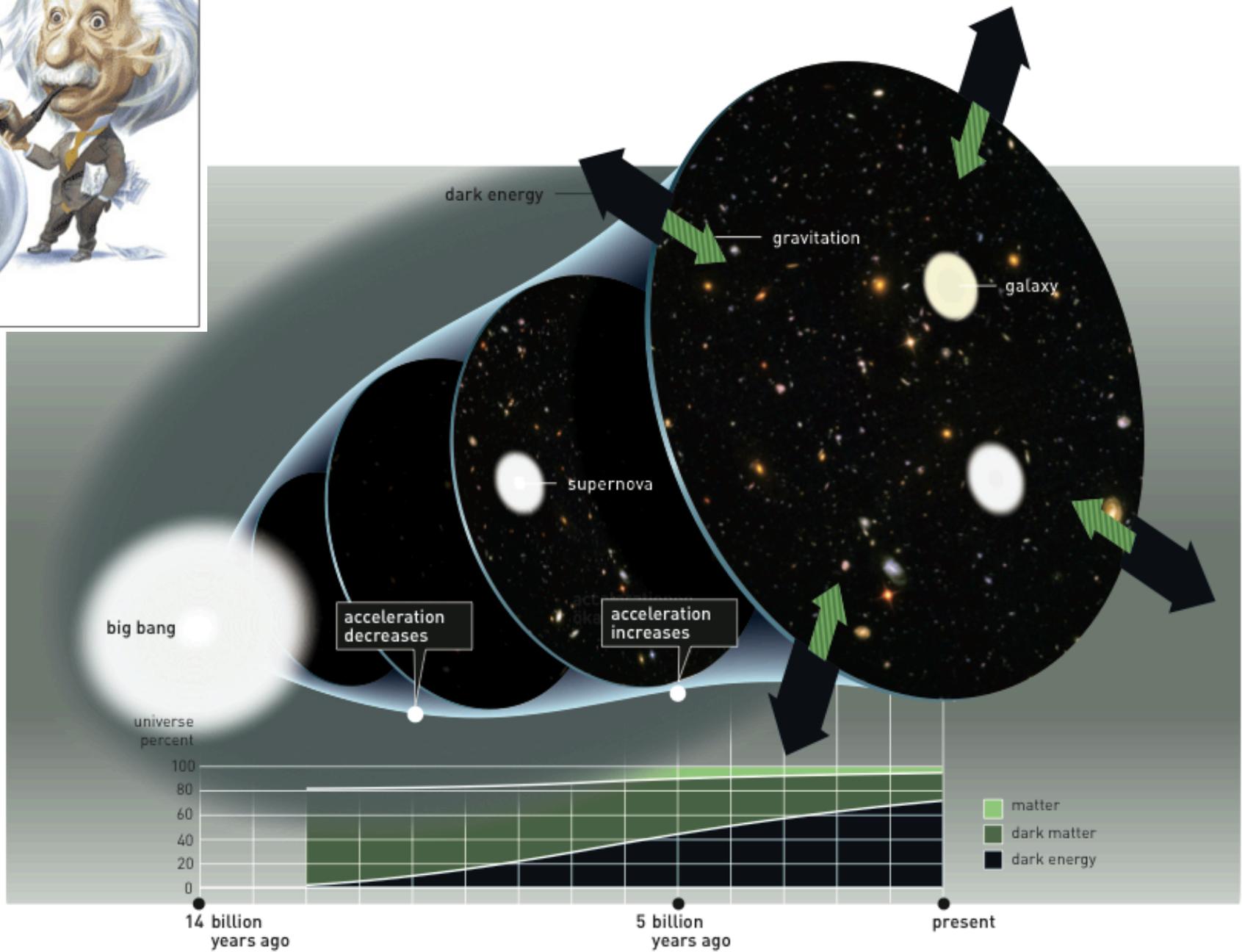
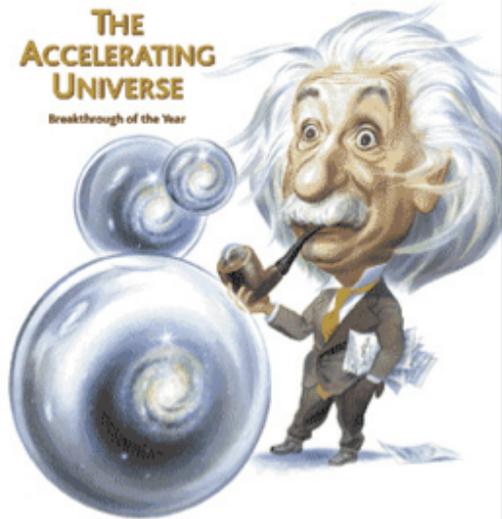
Photo: Homewood
Photography

**Adam G.
Riess**

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess *"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"*.

THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year



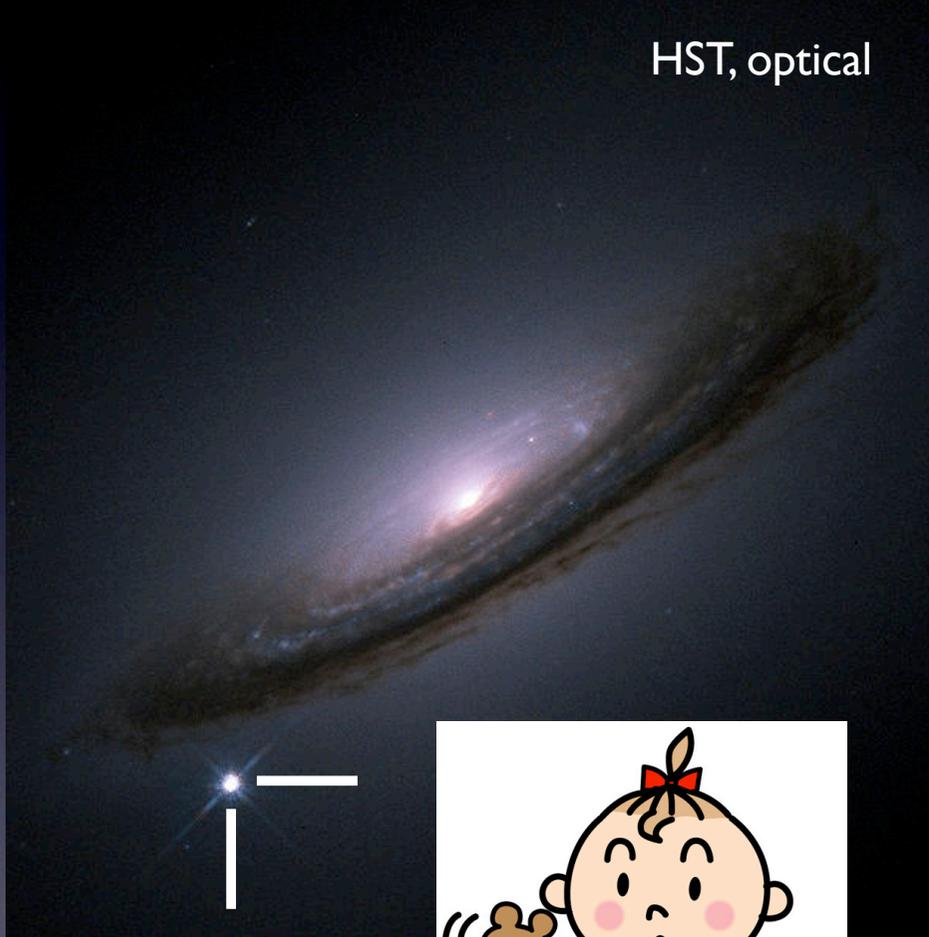
idation.



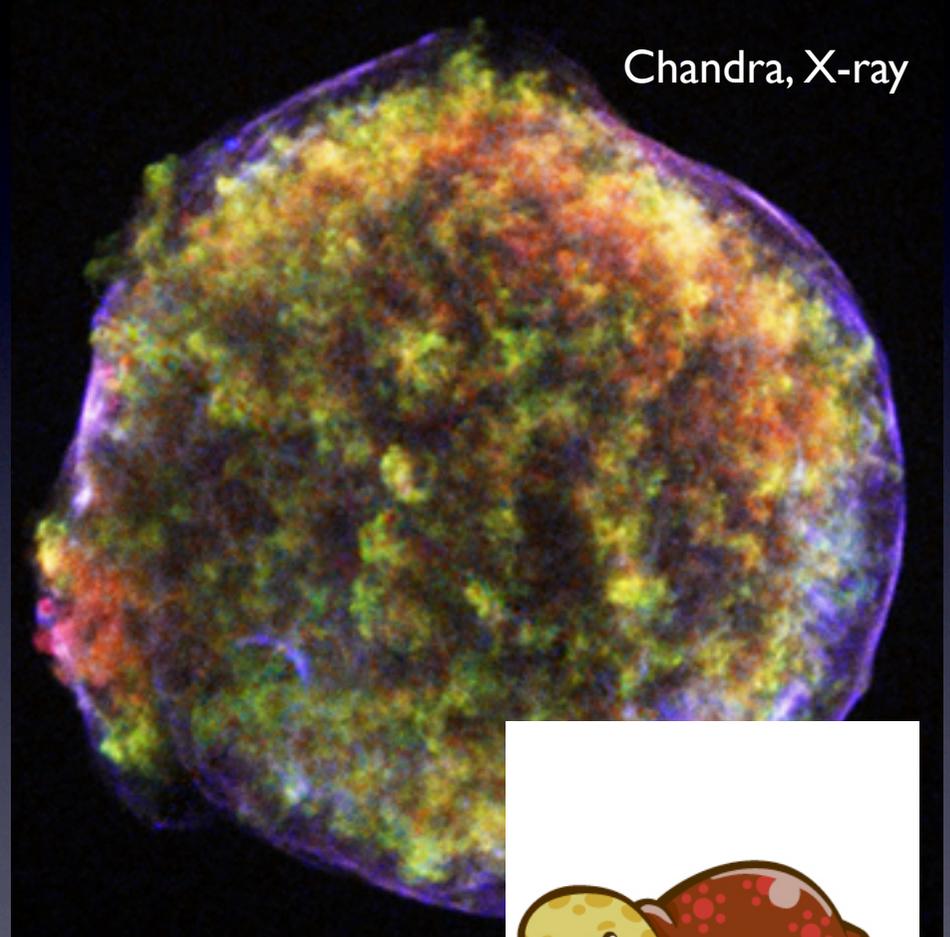
la型超新星、
宇宙の距離指標、
宇宙の加速度的膨張

Ia型超新星

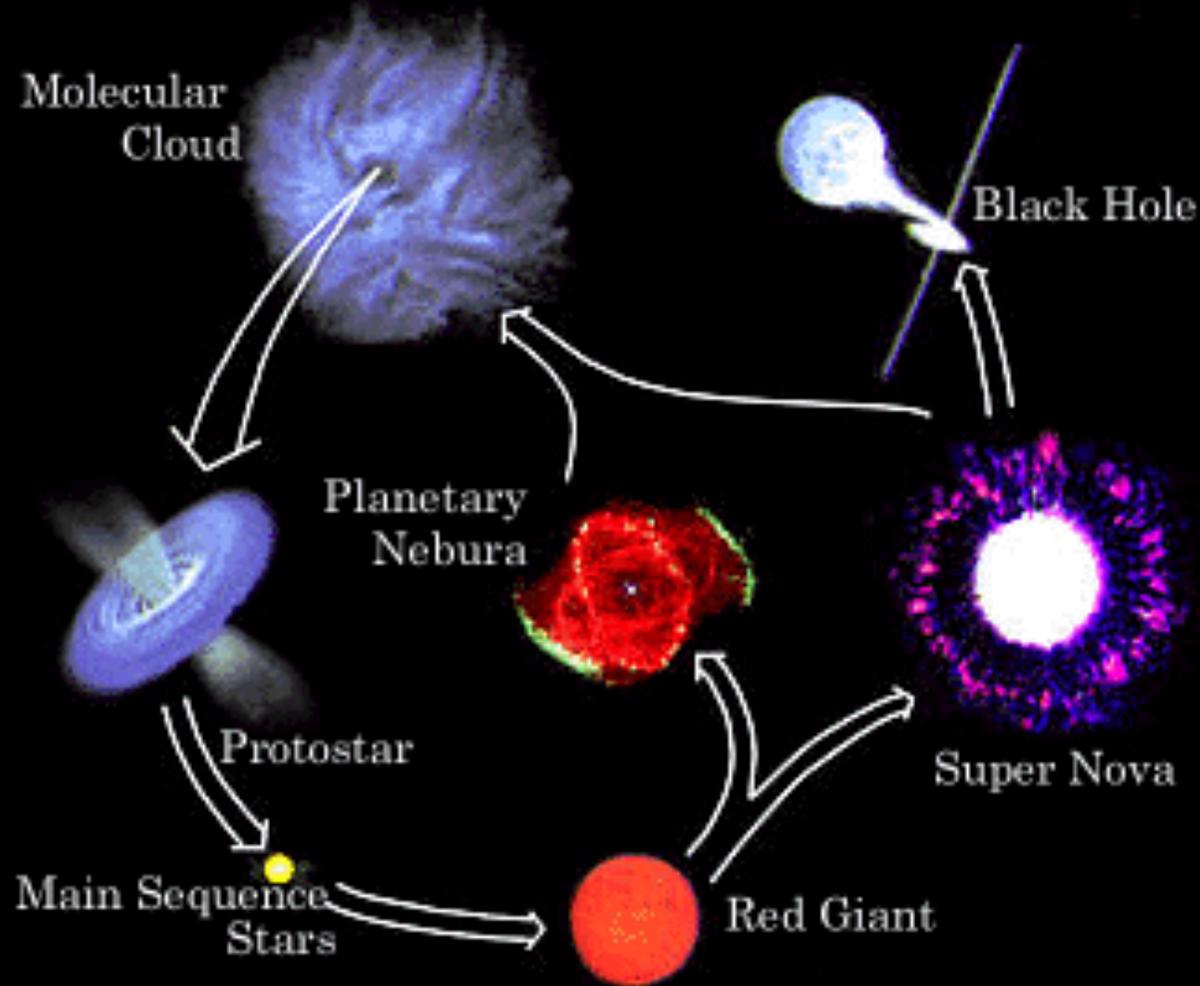
HST, optical

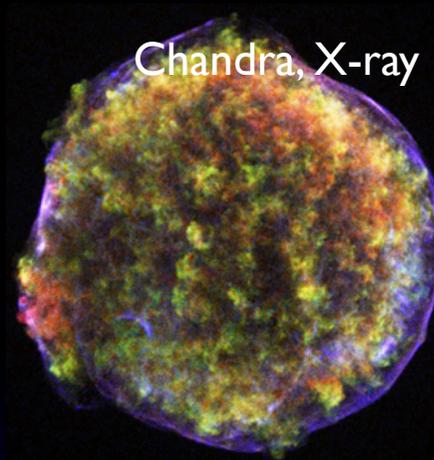
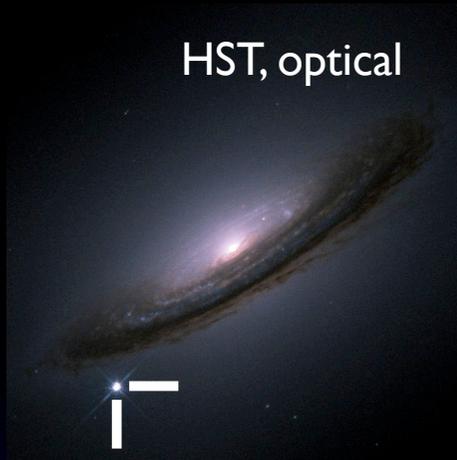


Chandra, X-ray



A STAR'S LIFE CYCLE





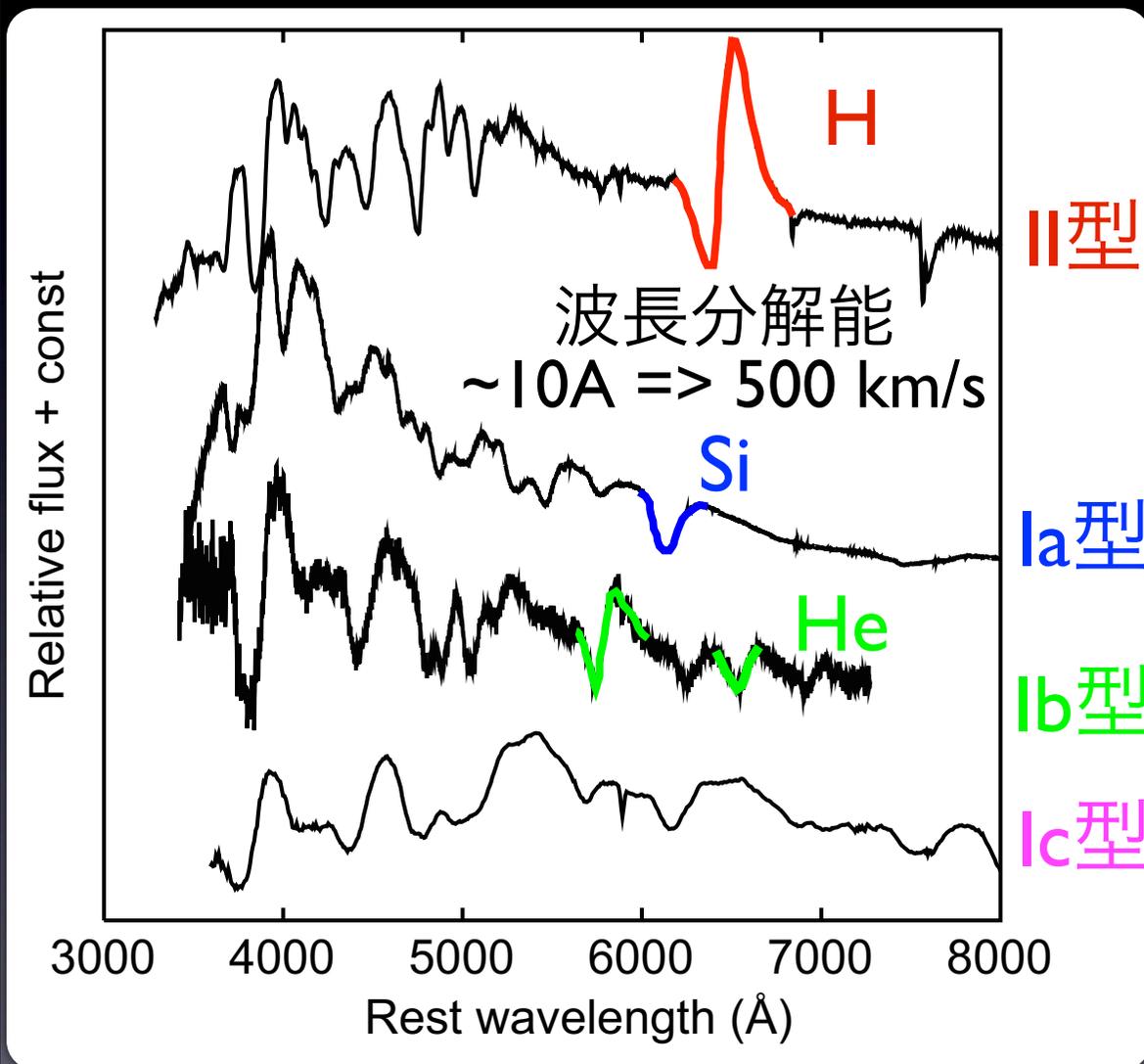
超新星残骸



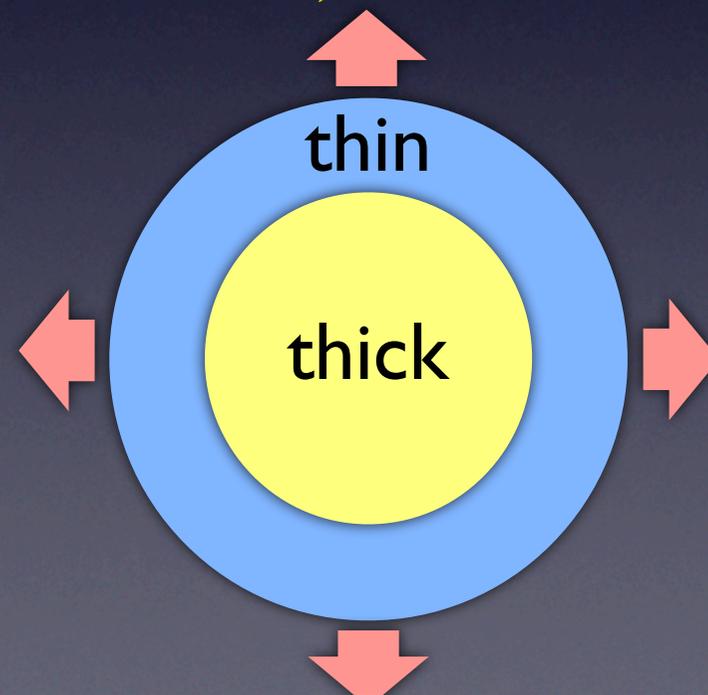
- 銀河系外 (点源)
 - 年間300-500天体
 - $R \sim 10^{15}$ cm, $v \sim 10,000$ km/s
 - 熱源は放射性元素
 - 主に可視光で明るい
 - $L_{opt} \sim 10^{43}$ erg/s
 - 吸収線スペクトル
=> 輝線スペクトル
- 主に銀河系内
 - 銀河系内に~200天体
 - $R > \sim$ pc, $v \sim 3,000$ km/s
 - 熱源は衝撃波
 - X線、電波で明るい
 - $L_x \sim 10^{37}$ erg/s
 - 輝線スペクトル
(超新星+星間空間)

そもそも「Ia型」とは

- 可視光スペクトル



- 銀河系外の超新星
- 爆発後20日程度
- $v \sim 10,000$ km/s



Ia型超新星の正体

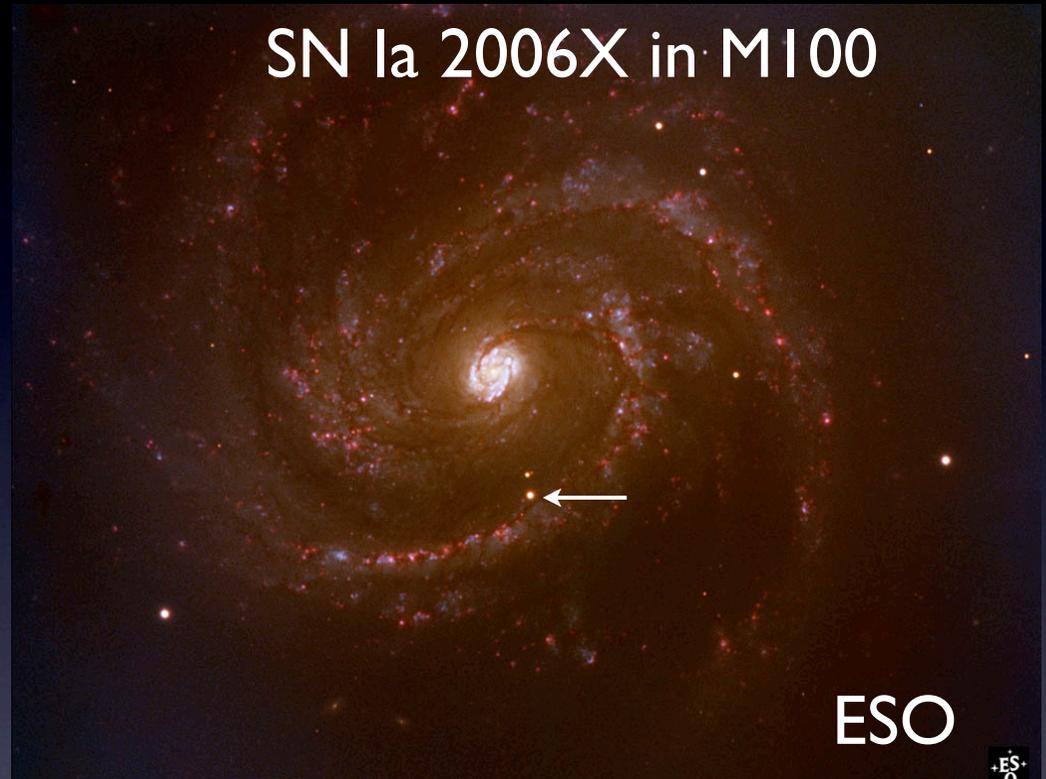
SN Ia 2006dd & 2006mr
in NGC 1316



NASA, Swift

Ia型

SN Ia 2006X in M100



ESO

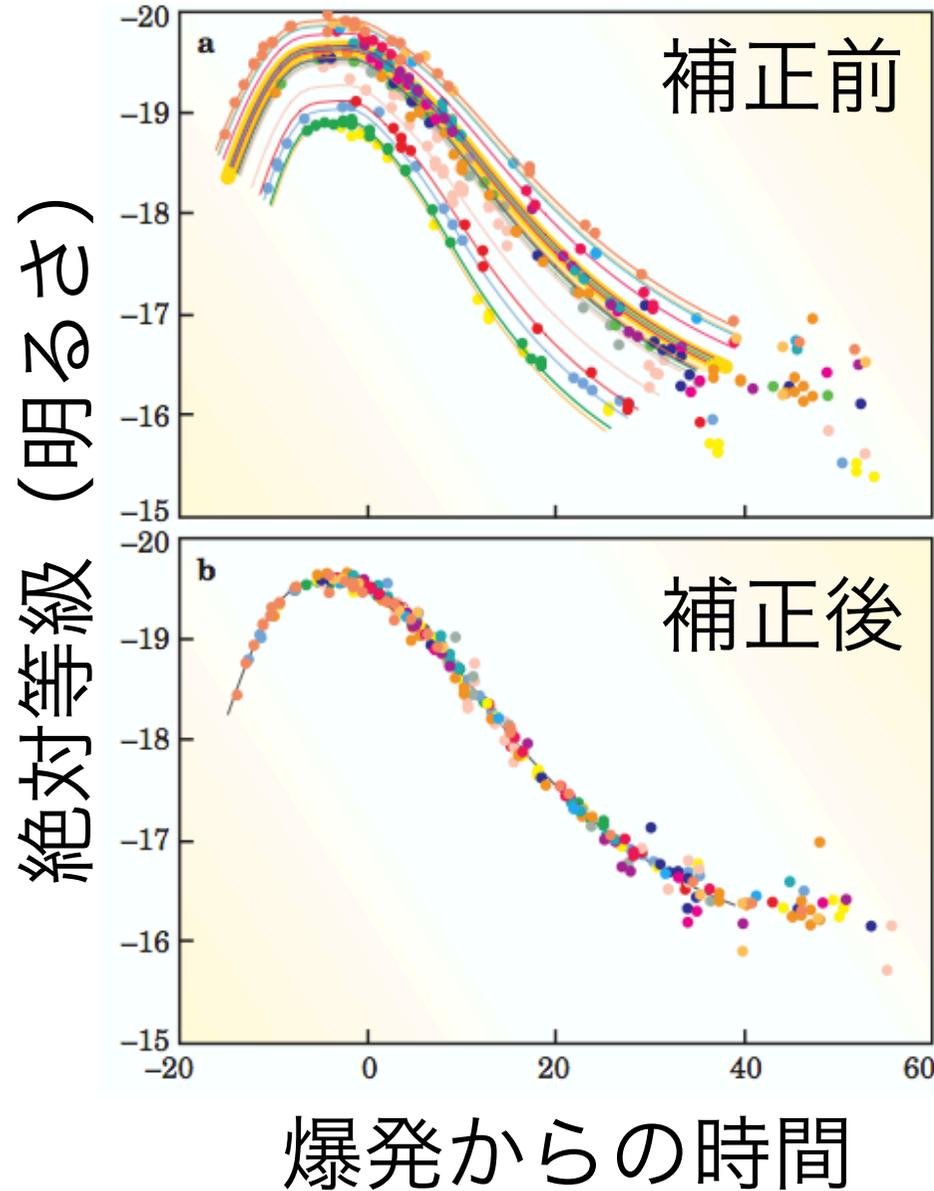
Ia型

Ib, Ic, II型

「古い」星が起源

(Ib, Ic, II型は大質量星の重力崩壊)

Ia型超新星

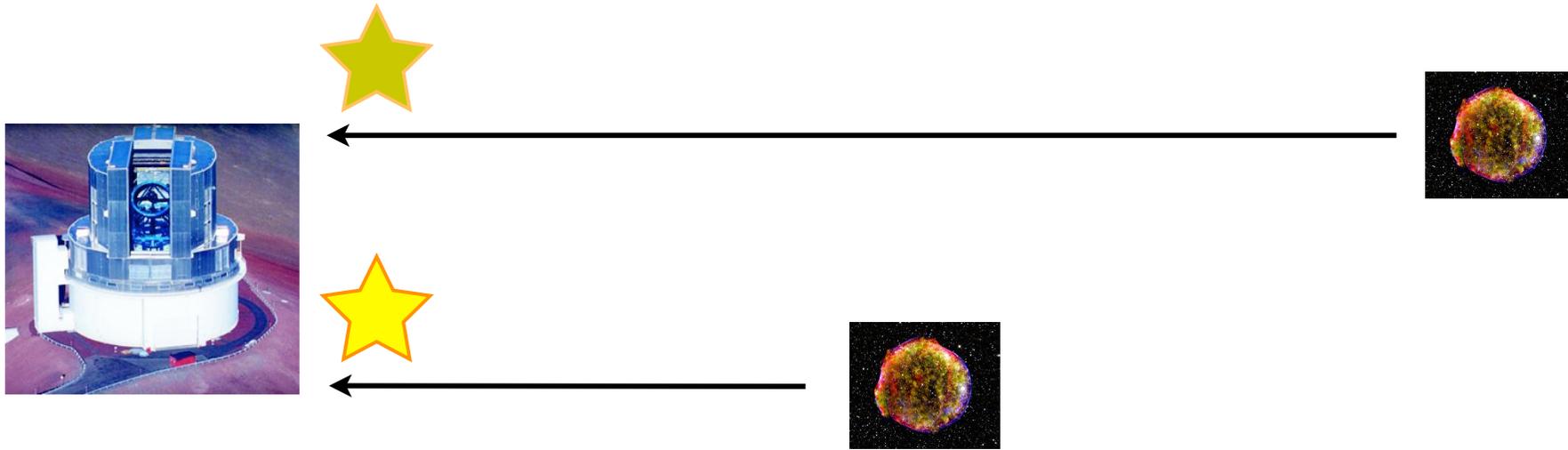


驚異的な性質を持つ

超新星の明るさの変動と
最大光度との間に
簡単な関係がある。

宇宙のどこにあっても
同じ明るさの天体として
使うことができる

見かけの明るさと距離

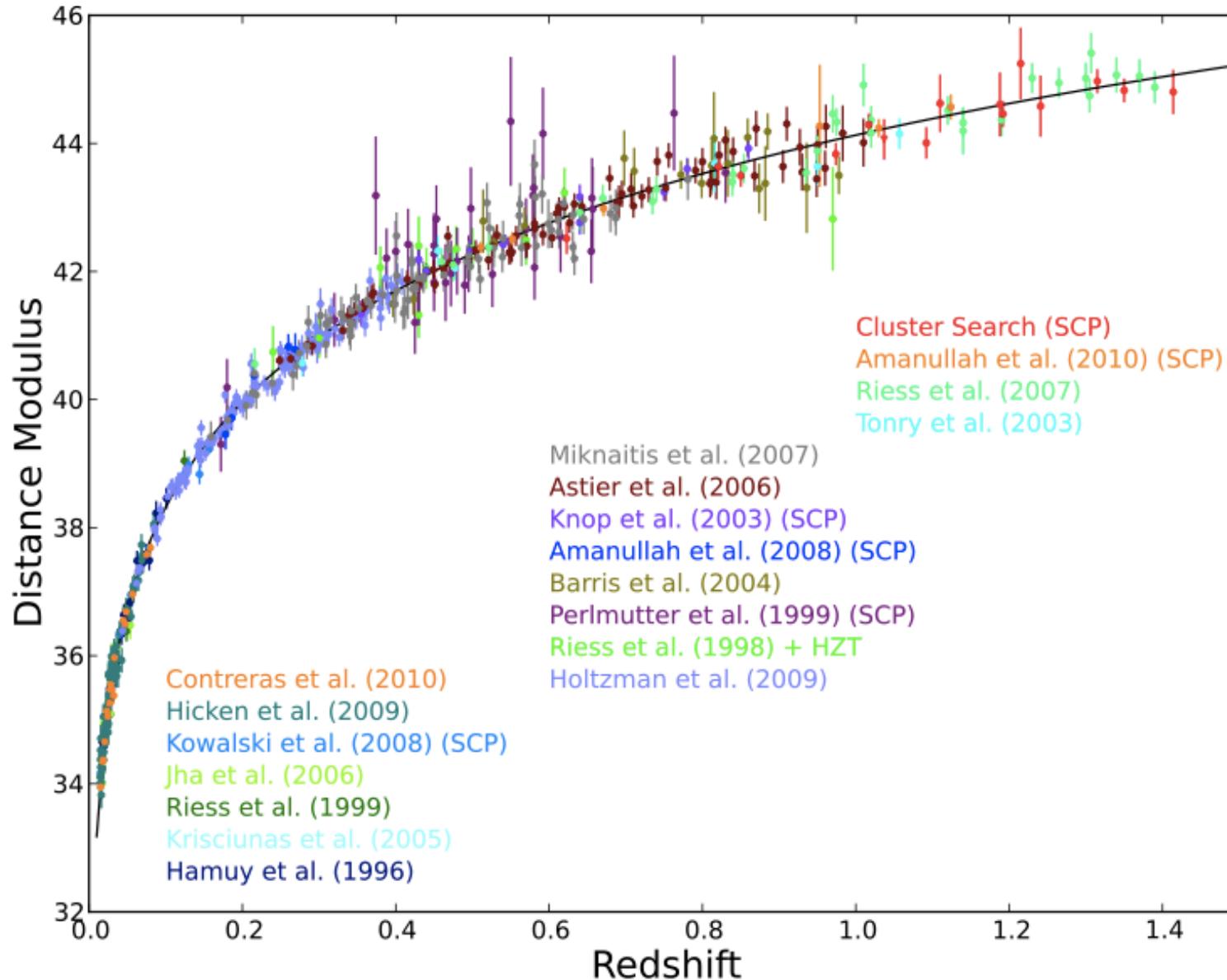


同じ明るさのものが2倍遠い場所にあると、
明るさは4分の1に「見える」



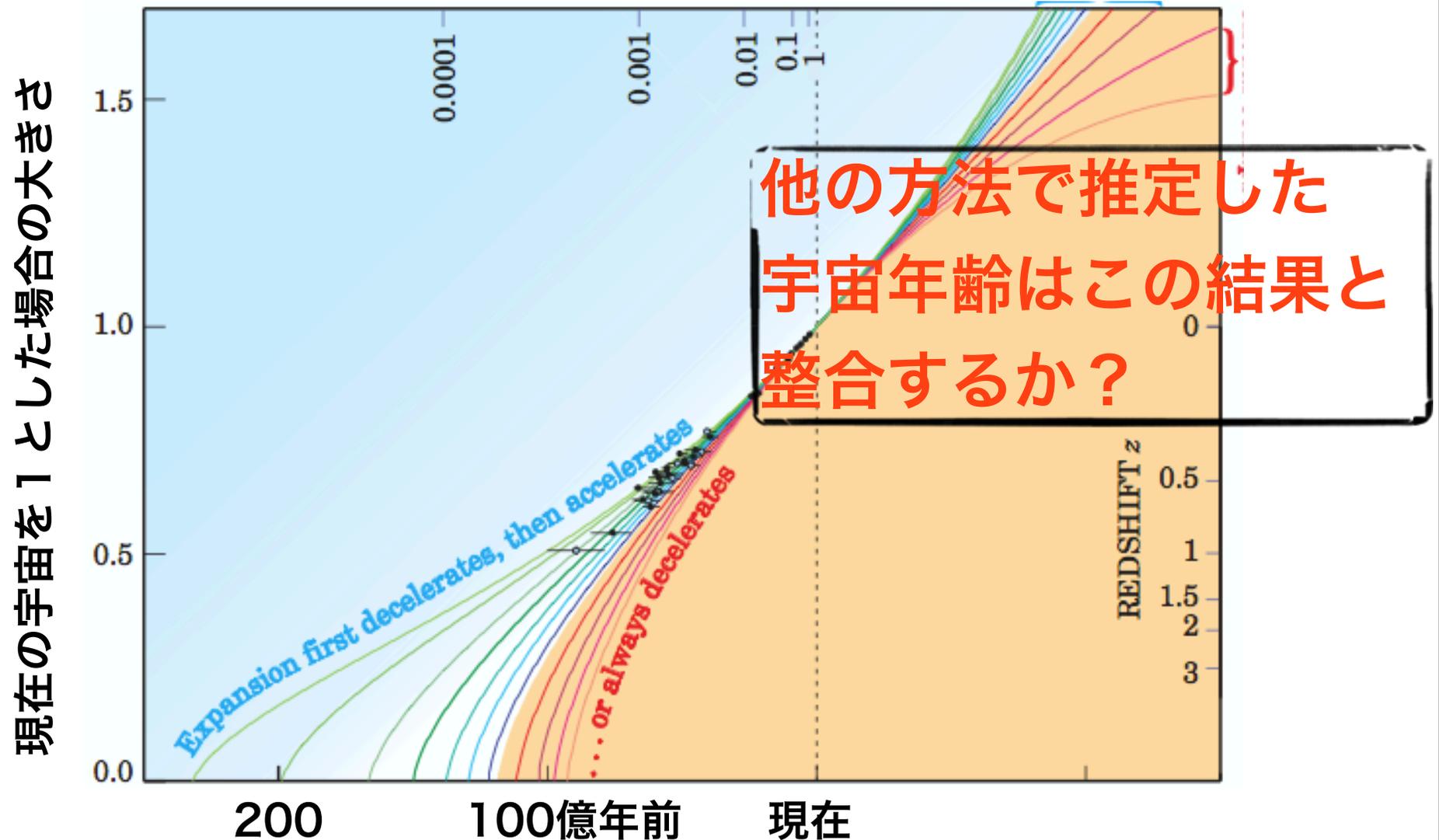
見かけの明るさを使って超新星までの距離を
「測る」ことができる

赤方偏移-距離關係式

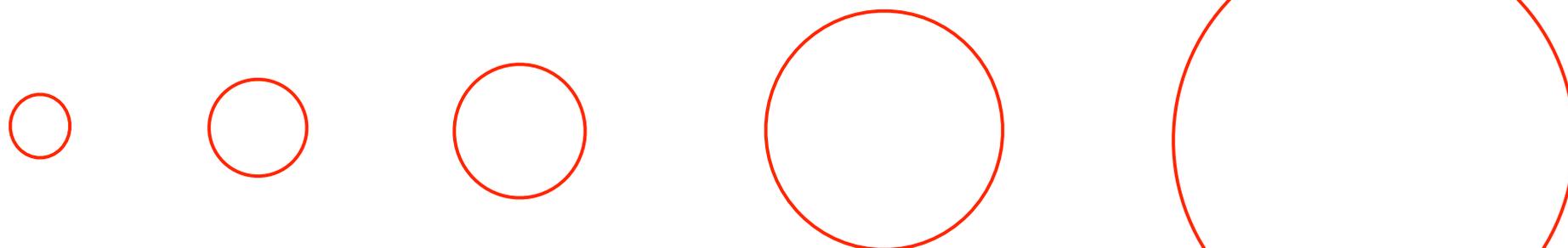
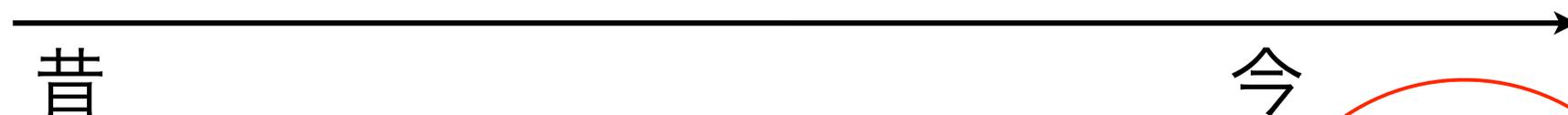


宇宙の膨張史

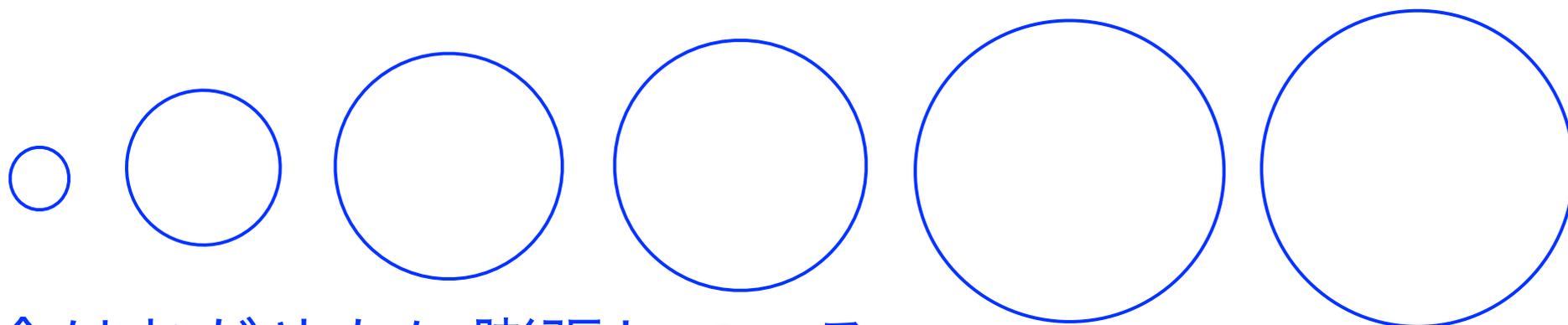
超新星の明るさ



膨張宇宙のいろいろ



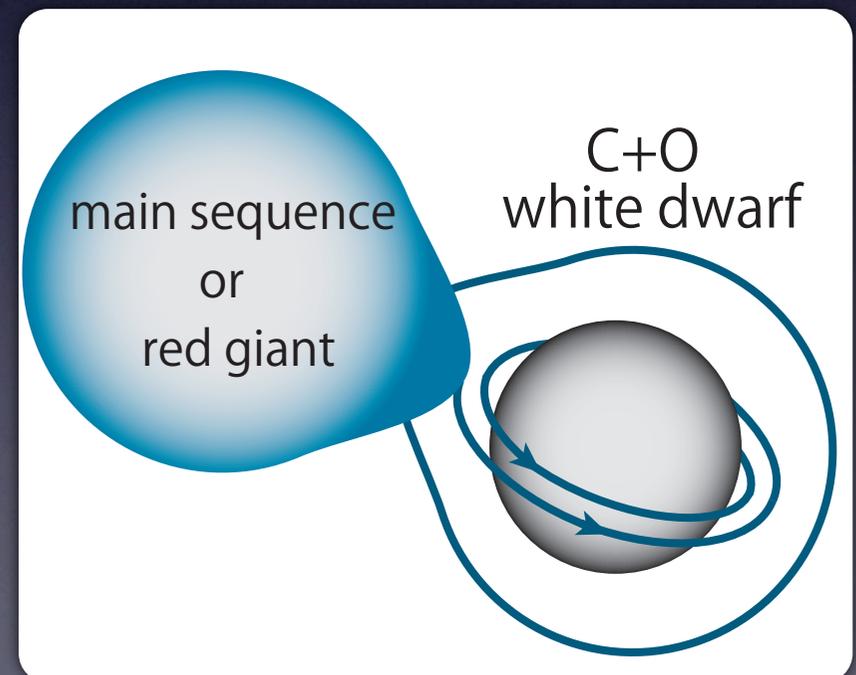
膨張がどんどん激しくなる



今はおだやかに膨張している

爆発する「古い」星

- 白色矮星の核爆発
 - C+O縮退コア
=> チャンドラセカール限界 => 核爆発
- 中性子星merger
 - ガンマ線バースト (たぶん)

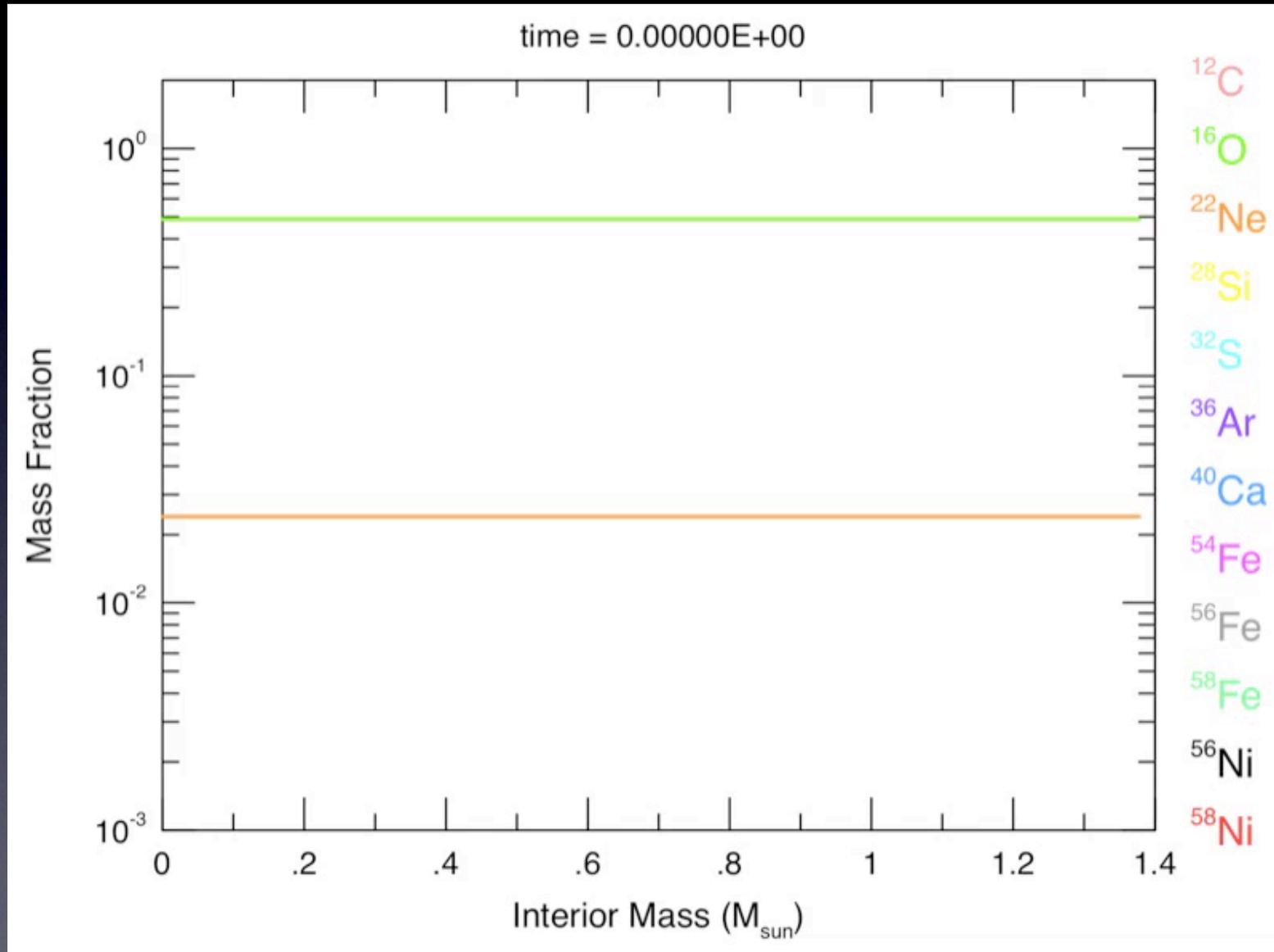


白色矮星とは（板書）

C+O白色矮星の爆発

元素の質量割合

内側



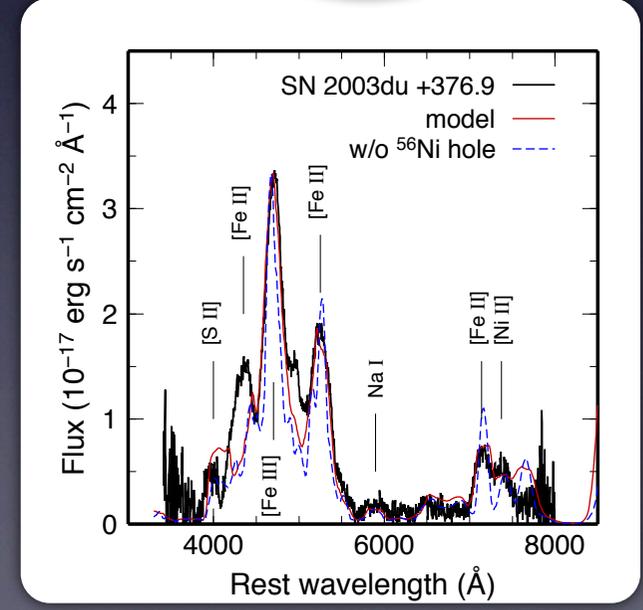
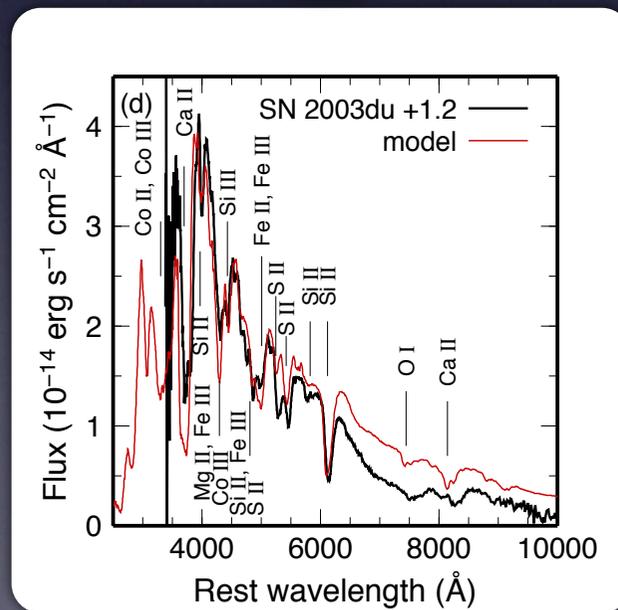
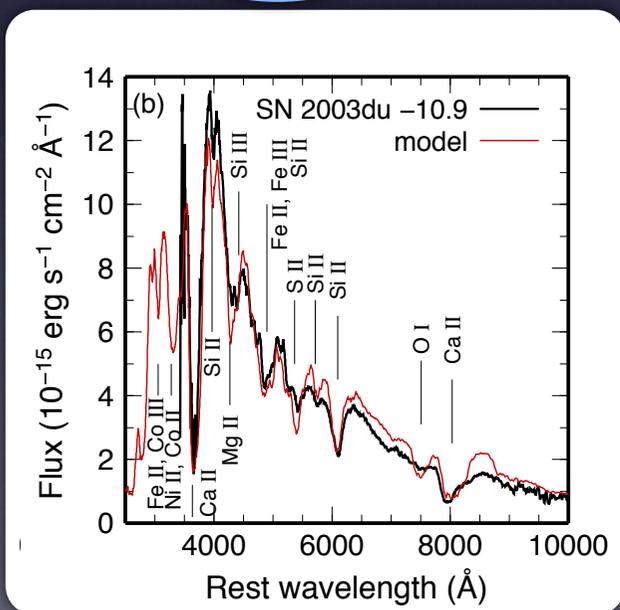
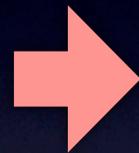
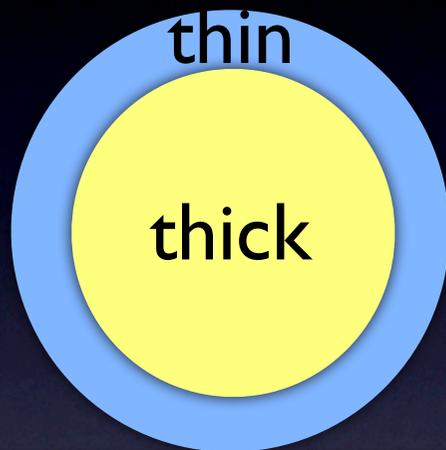
外側

超新星の内部構造を探る

爆発数日後
~ 10 AU

爆発20日後
~ 100 AU

爆発1年後
~ 1000 AU ~ 0.01 pc



ちょっと算数

- 核反応によるエネルギー生成

- $E(\text{nuclear}) = [1.56M(^{56}\text{Ni}) + 1.74M(\text{Fe}) + 1.24M(\text{Si})] 10^{51}$
 $\sim (1.56 \times 0.6 + 1.74 \times 0.3 + 1.24 \times 0.3) 10^{51}$
 $\sim 1.8 \times 10^{51} \text{ erg}$

- 運動エネルギー = 核反応 - 重力束縛

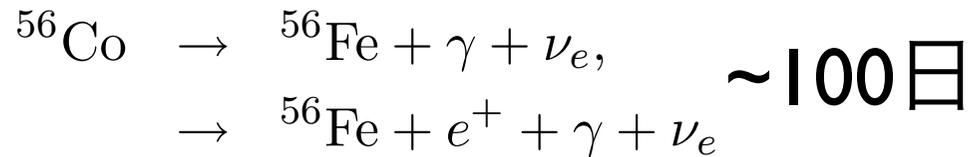
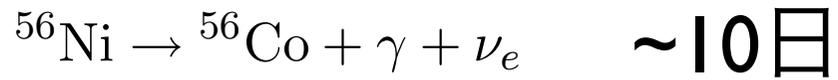
- $E(\text{kinetic}) = E(\text{nuclear}) - E(\text{binding energy of WD})$
 $\sim 1.8 \times 10^{51} - 0.5 \times 10^{51} \sim 1.3 \times 10^{51} \text{ erg}$

- 膨張速度

- $v \sim [2E(\text{kinetic}) / M]^{0.5} \sim (2 \times 1.3 \times 10^{51} / 1.4 \times 2 \times 10^{33})^{0.5}$
 $\sim 10^9 \text{ cm/s} \sim 10,000 \text{ km/s}$

“Standard Candle”

- 放射性元素 ^{56}Ni ($\sim 0.6 M_{\text{sun}}$)



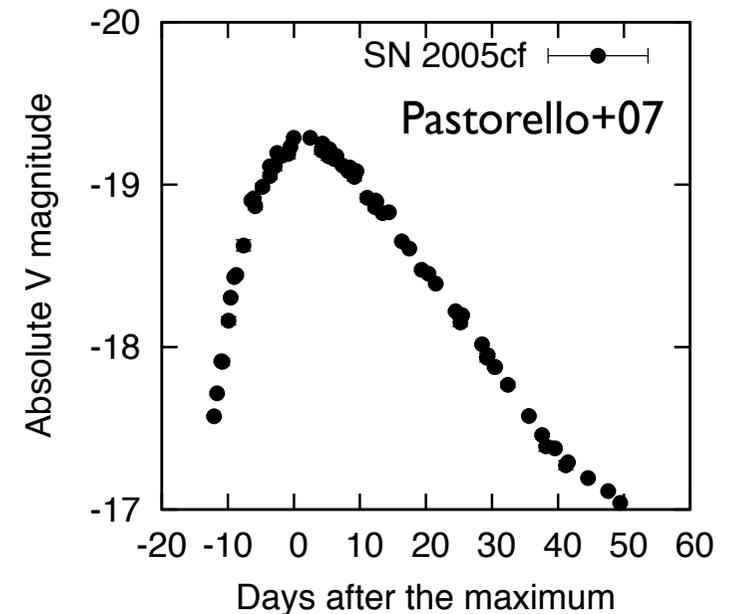
$$L_{\text{max}} = \left(6.45 e^{\frac{-t_r}{8.8\text{d}}} + 1.45 e^{\frac{-t_r}{111.3\text{d}}} \right) \left(\frac{M_{\text{Ni}}}{M_{\odot}} \right) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$$

Absolute magnitude $\sim -19 \text{ mag}$

一様性 + 強烈な明るさ



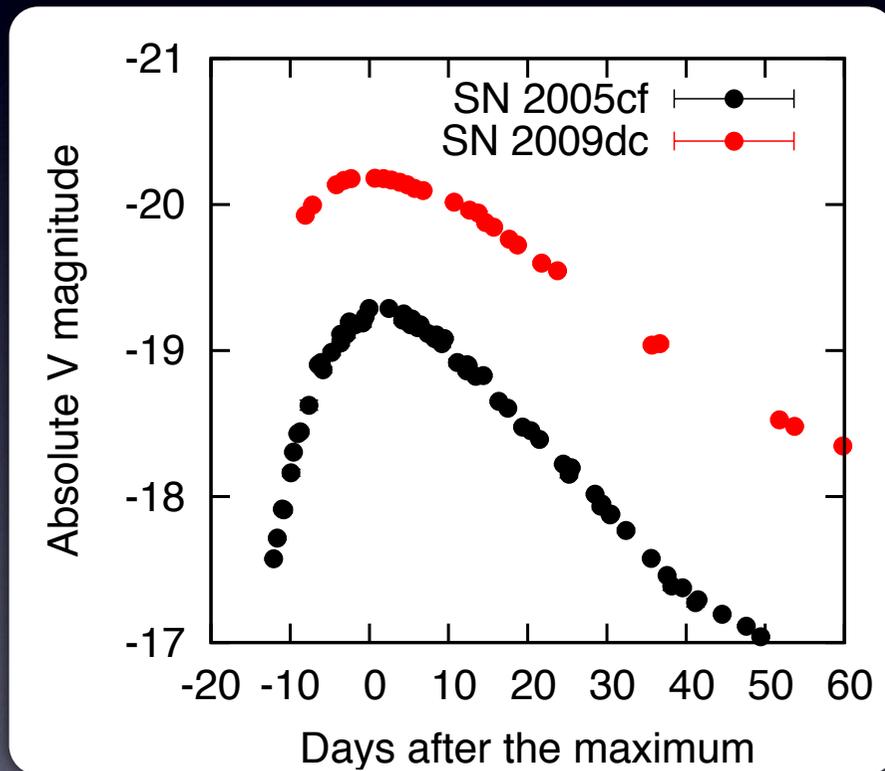
宇宙における距離指標



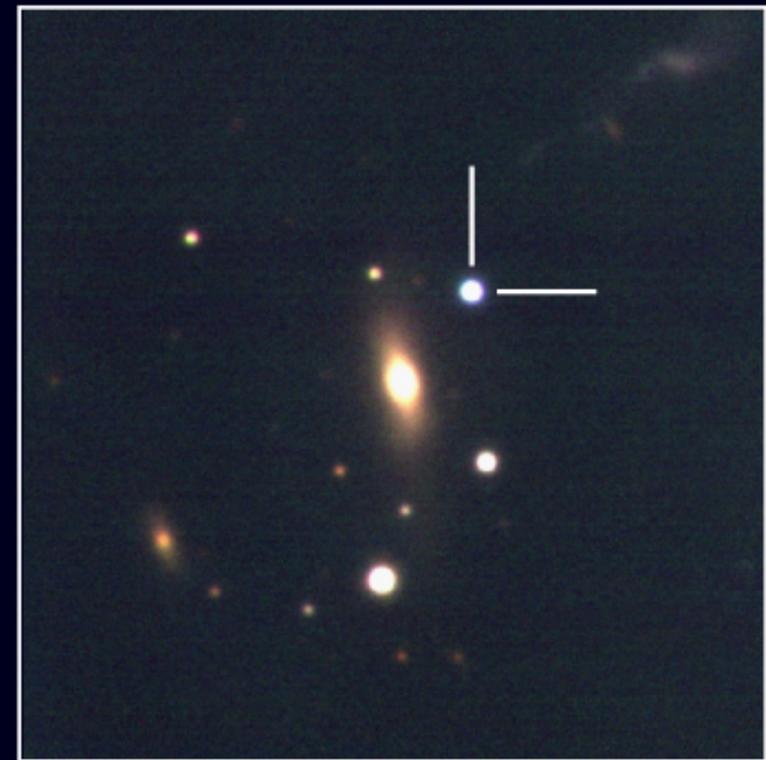
スーパー明るいIa型超新星がいる

- **大問題4：チャンドラセカール限界質量を超えて爆発する？**

Yamanaka et al. 2009



➡ $M(^{56}\text{Ni}) > 1.2M_{\text{sun}}!!$



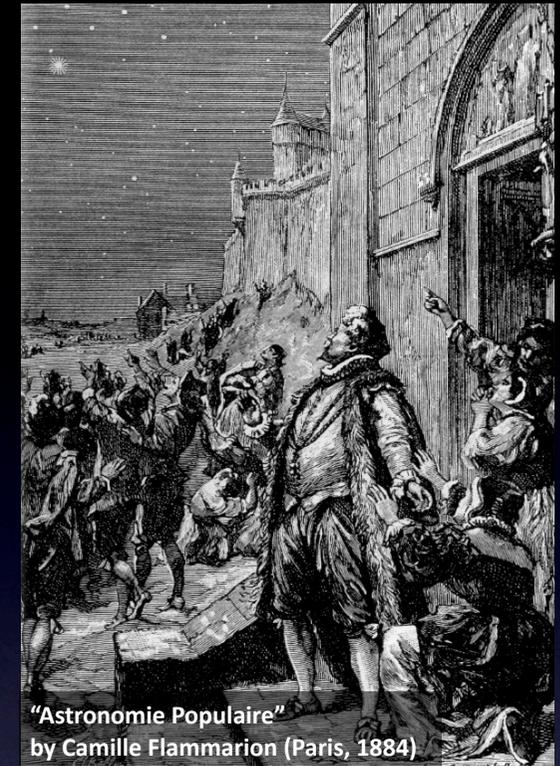
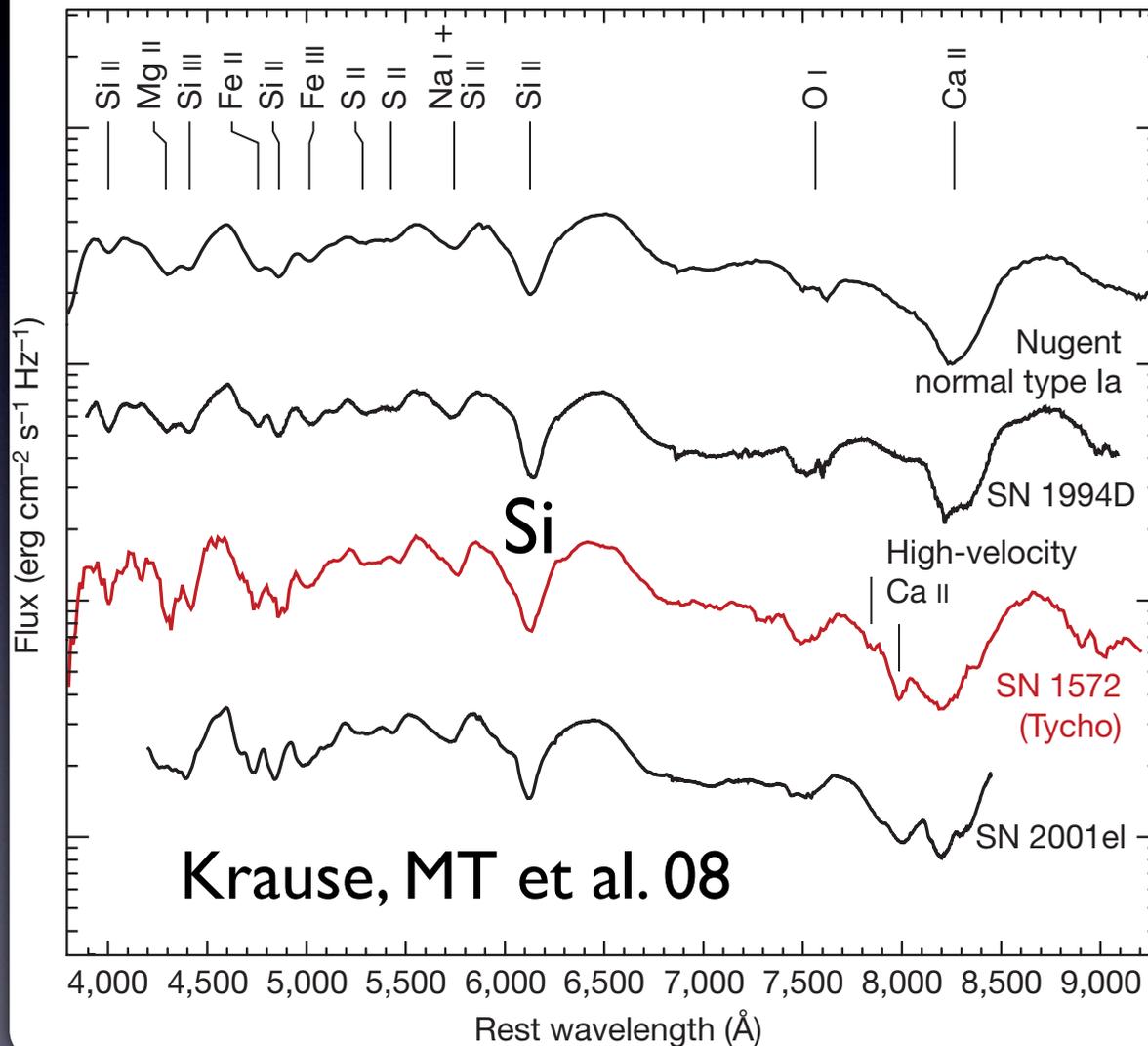
SN 2009dc in UGC 10064
KANATA Telescope/HOWPol (B, V, R)

Copyright © Higashi-Hiroshima Observatory

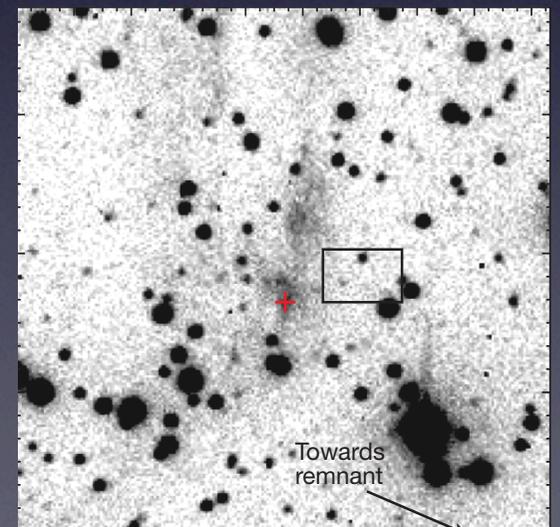
“Light Echo”



Tycho's SN = Type Ia!!

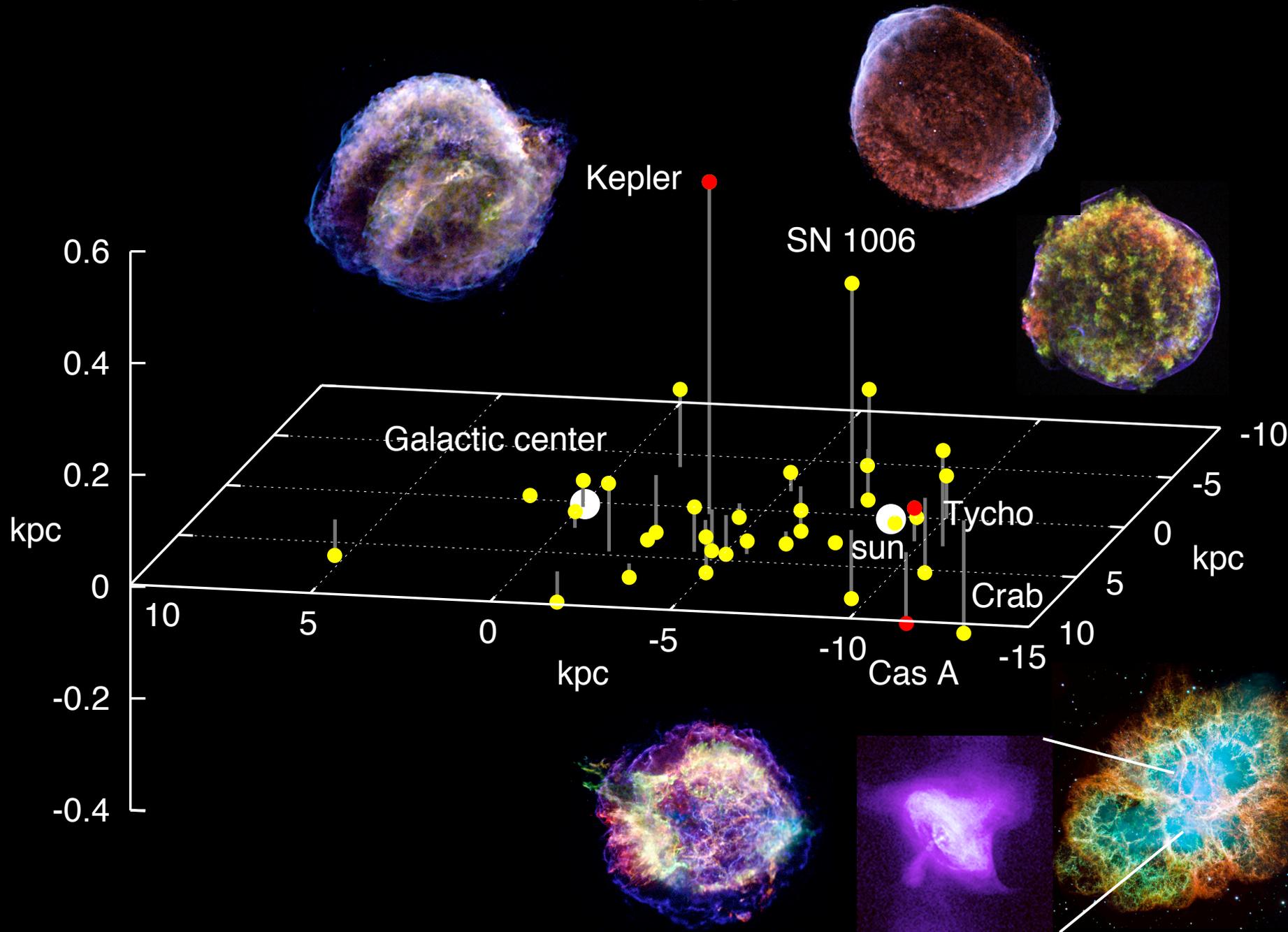


1572



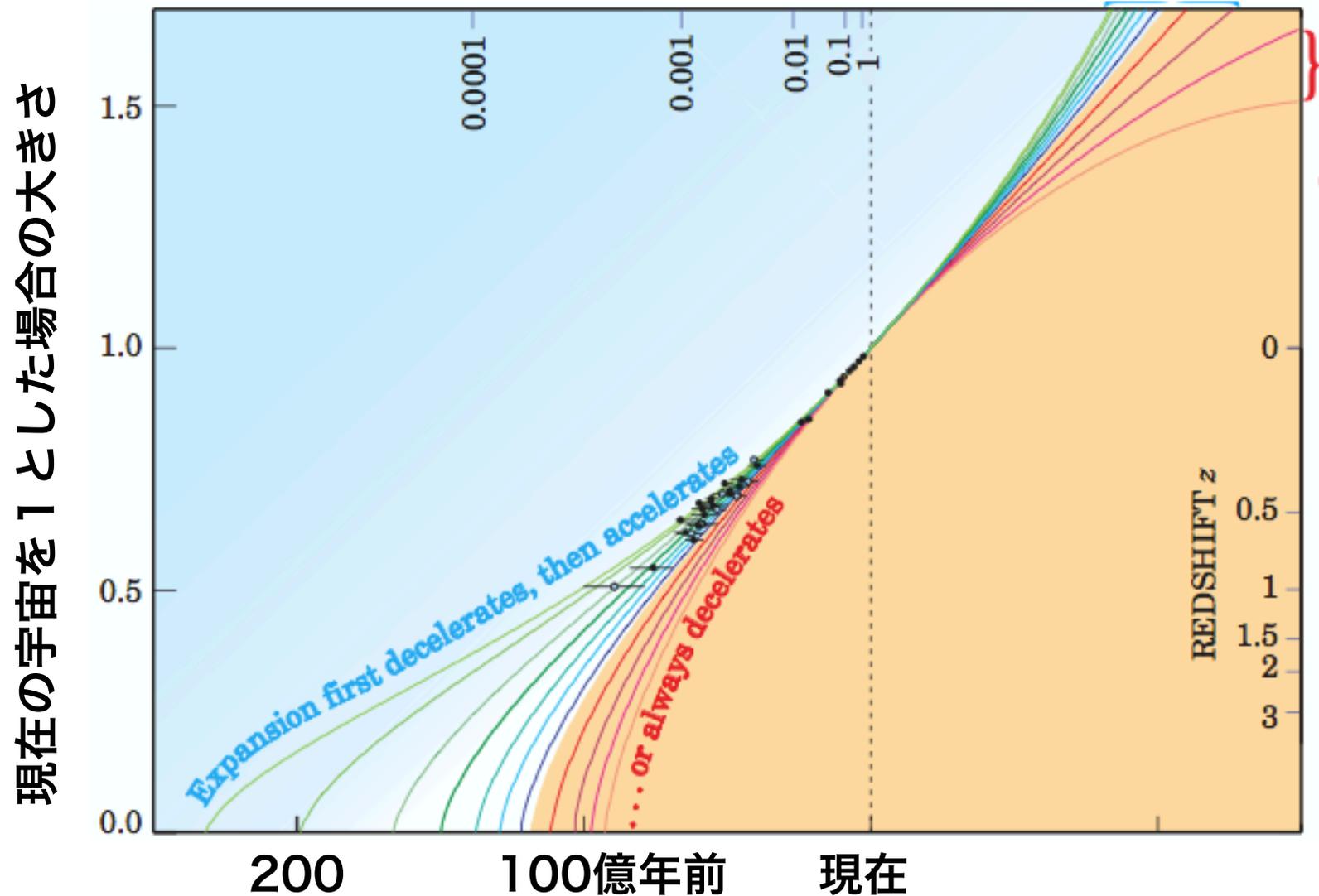
2008

銀河系内の超新星残骸



宇宙の膨張史

超新星の明るさ



現在の宇宙は 暗黒エネルギーに 満たされている！

が、理論モデルは皆無。（つまり正体不明）

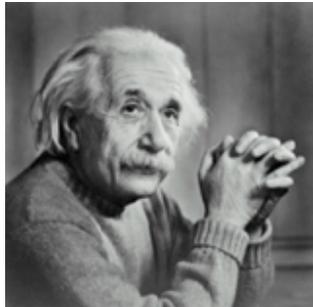
- ・ 何故今頃(~100億年) 重要になってくるのか。
- ・ なぜ中途半端な量なのか。
- ・ 宇宙はこれから一体どうなるのか。

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



アインシュタインの
宇宙項



“The biggest blunder in my life.”

この項が大きな値をもつと、宇宙の膨張はやがて指数関数的になる

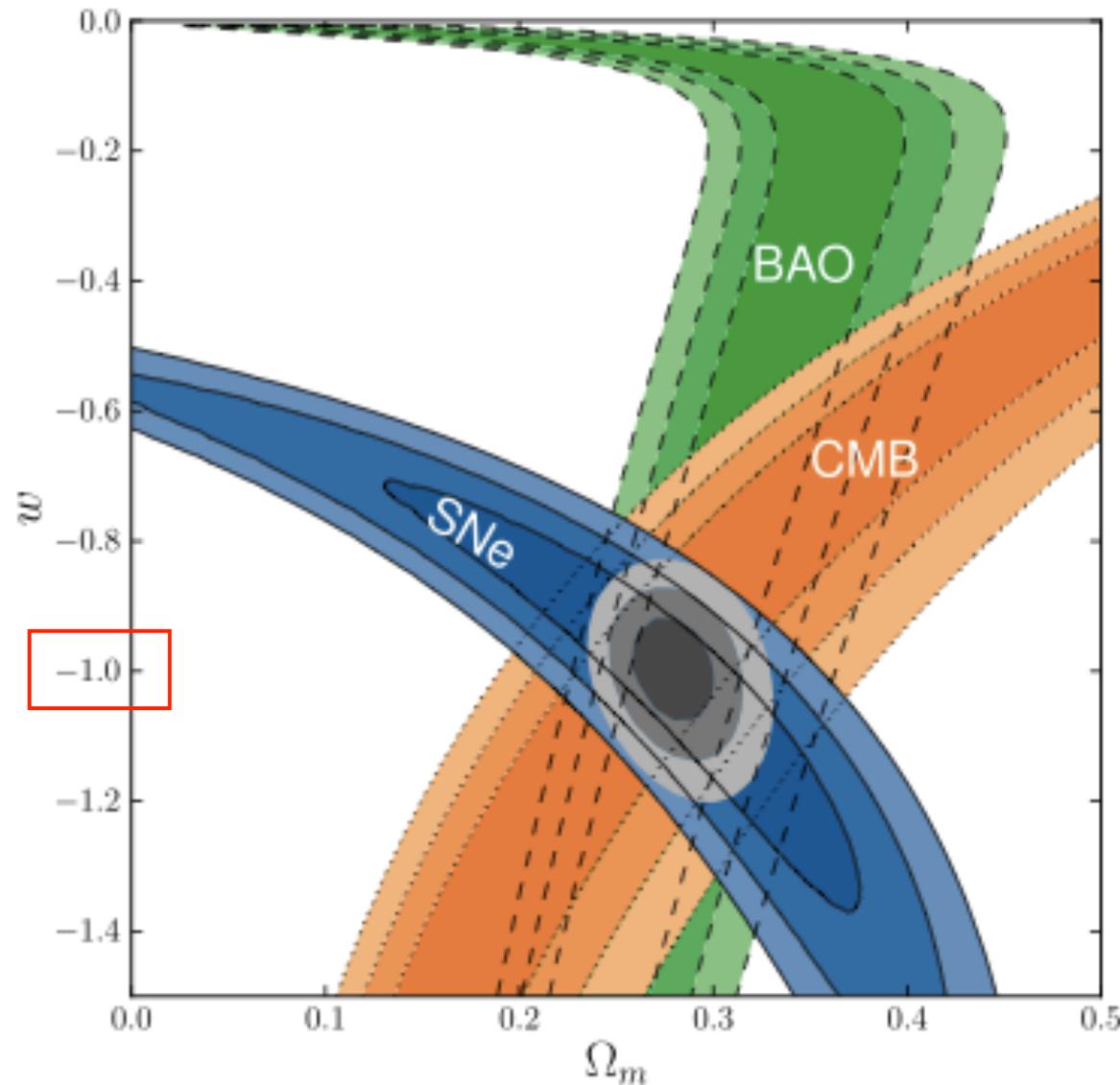
本当に宇宙「定数」か

$$p = w \rho$$

BAO：銀河の大域的分布から得る幾何学的情報

CMB：物質密度、宇宙の平坦性

SNe：近傍宇宙の距離-赤方偏移関係



昔(70億年前)

なんとも
微かな感じ...

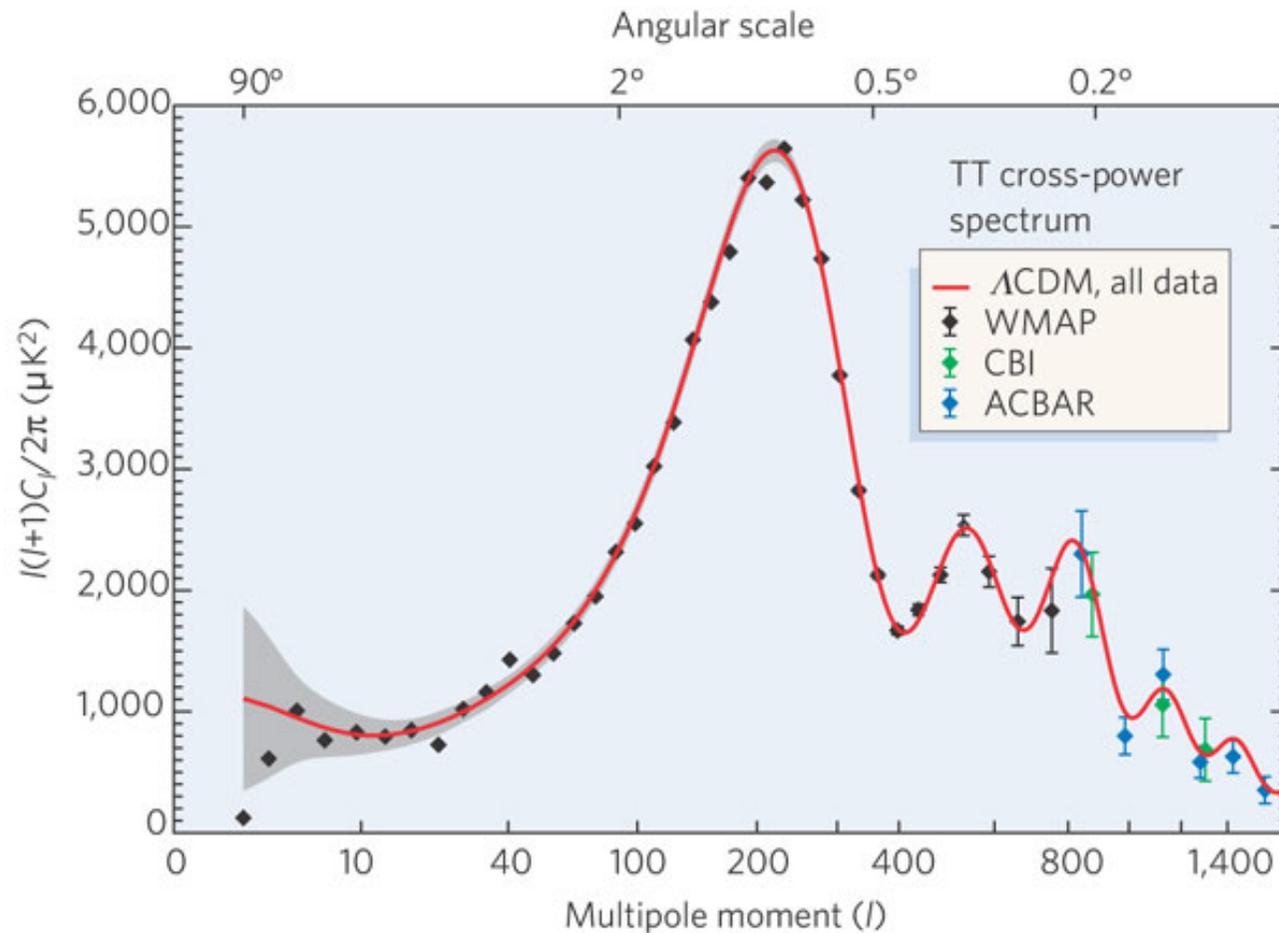
暗黒
工ネ有

無

今

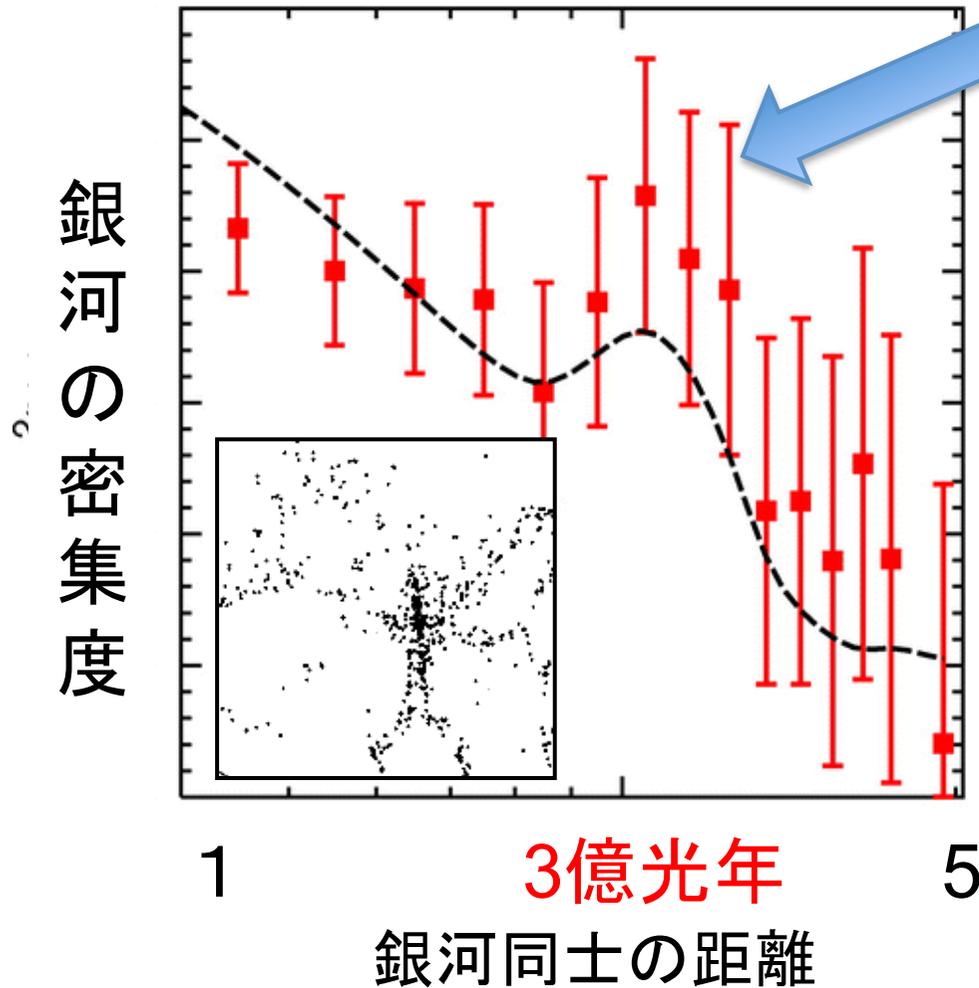
ダークエネルギーの観測

幾何学的方法 標準尺度



銀河分布に見つかった古代宇宙の痕跡

奥村、松原ら SDSSグループ



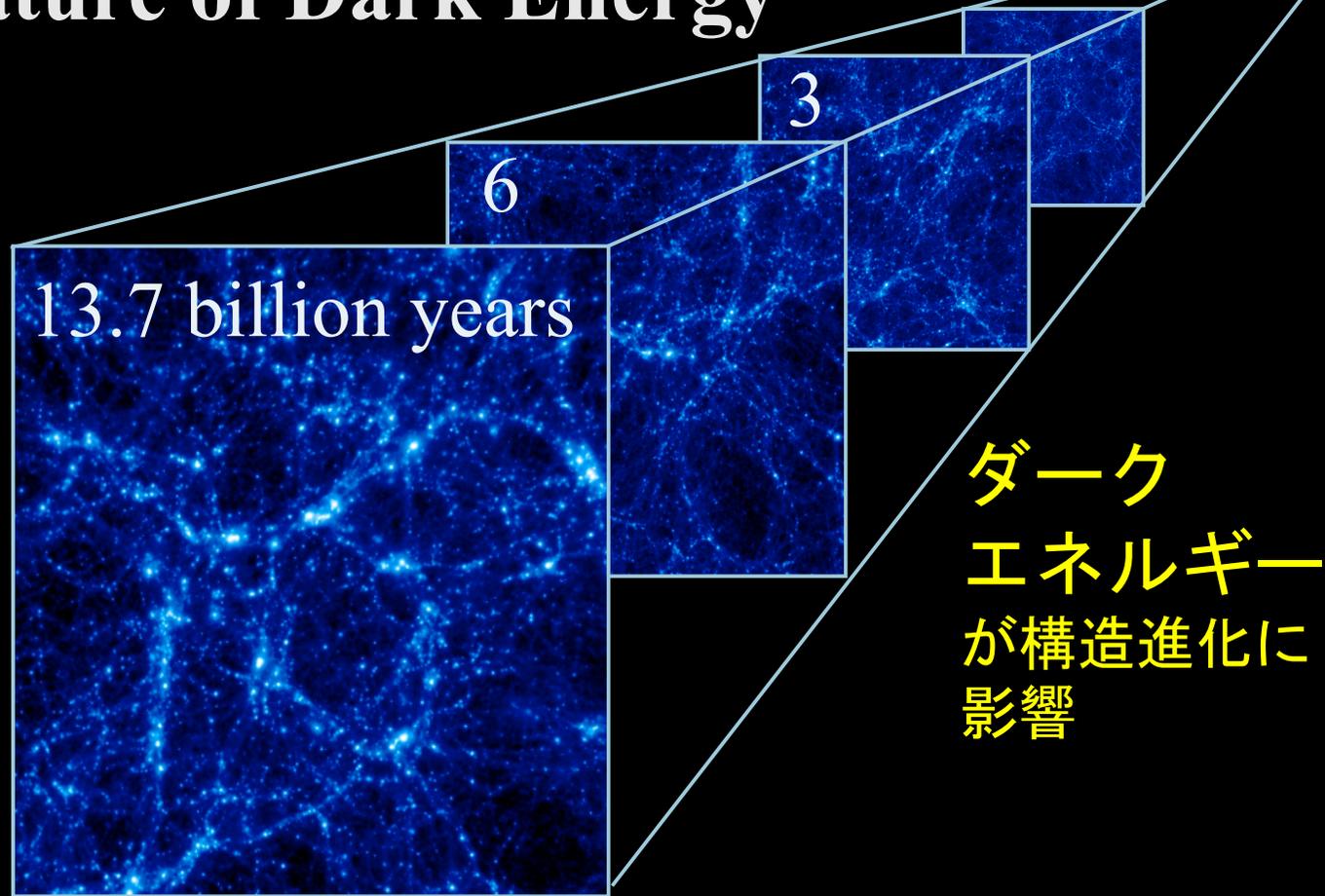
特徴的長さ:
宇宙初期のプラズマに
伝搬していた音波

**現在の銀河の分布には
137億年前の物質分布
の痕跡が残っている!**

構造形成の起源

Dark Matter as a Probe of the Nature of Dark Energy

Big Bang!



100万個以上の銀河の画像解析

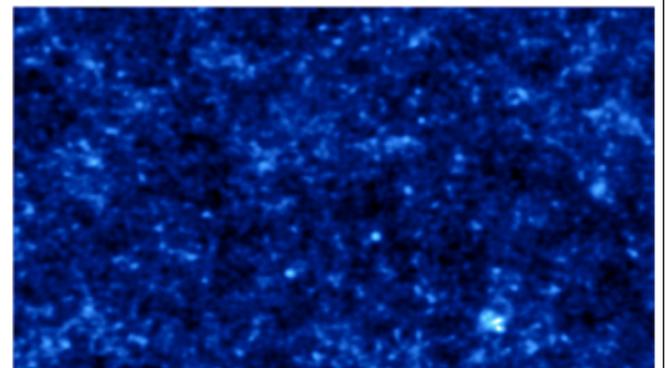
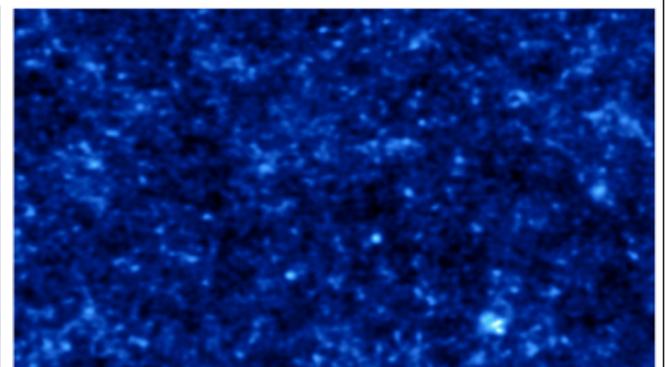
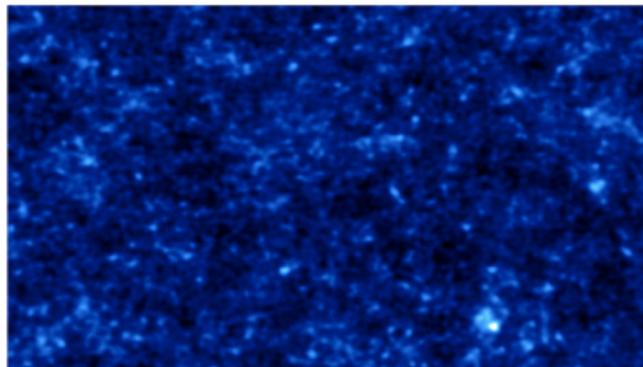
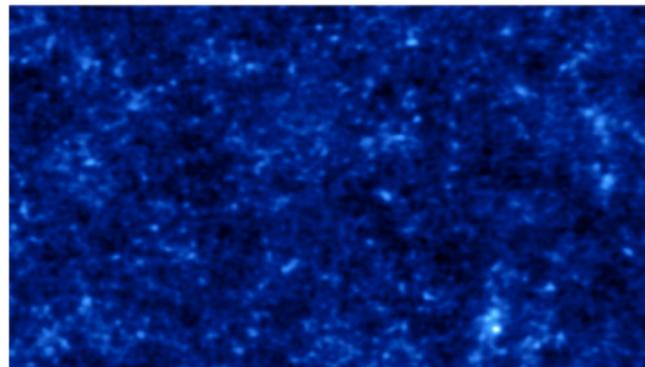
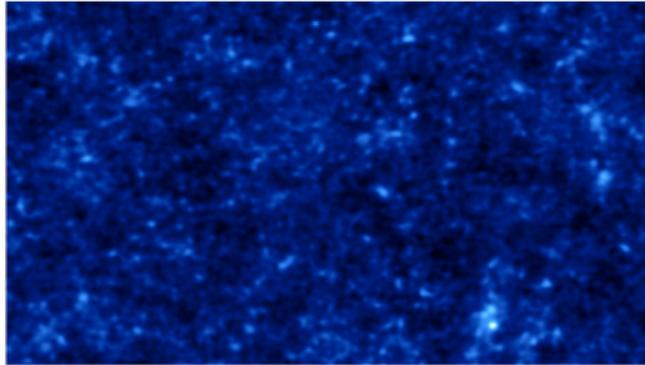
ダークエネルギーが構造進化に影響



拝啓銀河を選択し、時期の異なる宇宙の姿を見ることができる

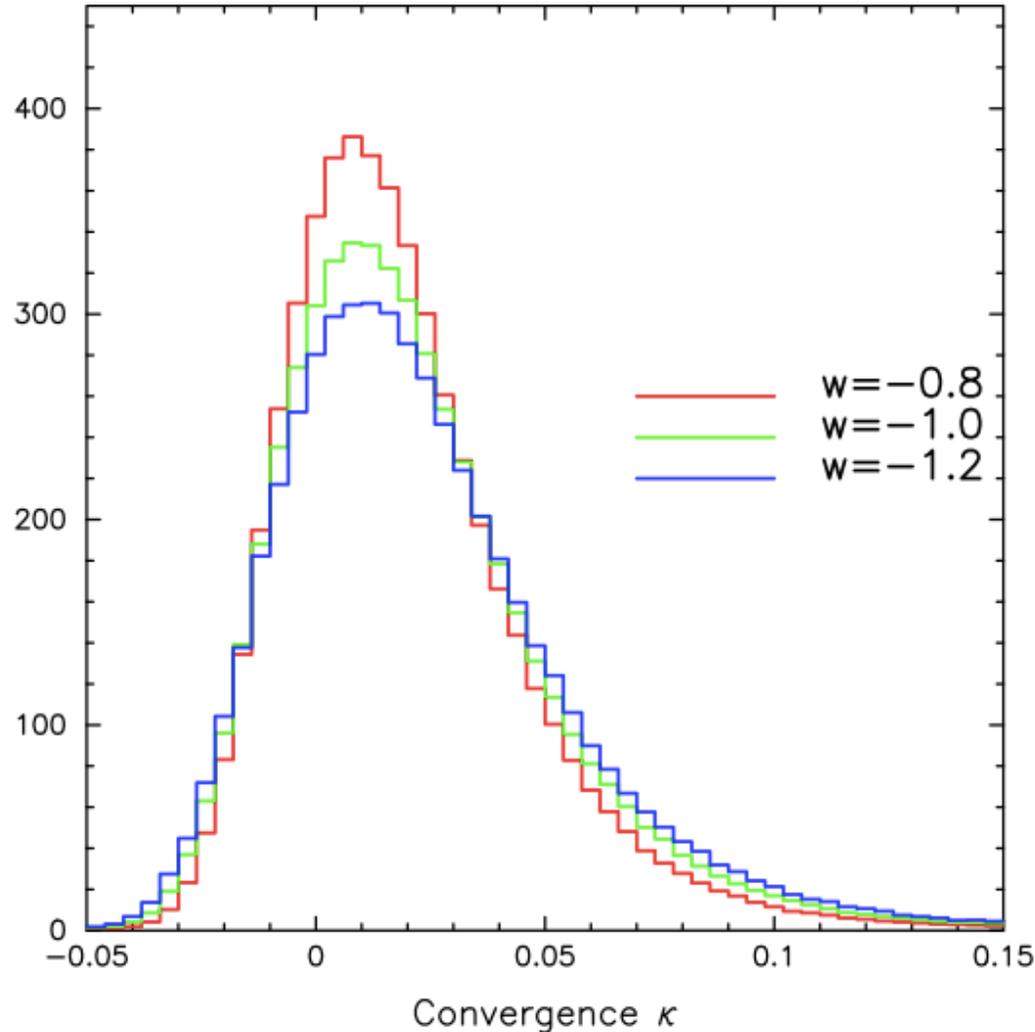
Matter distribution as a probe (?) of cosmology

W , σ_8 , f_{NL}



Simulation by M. Shirasaki

Results: Peak counts

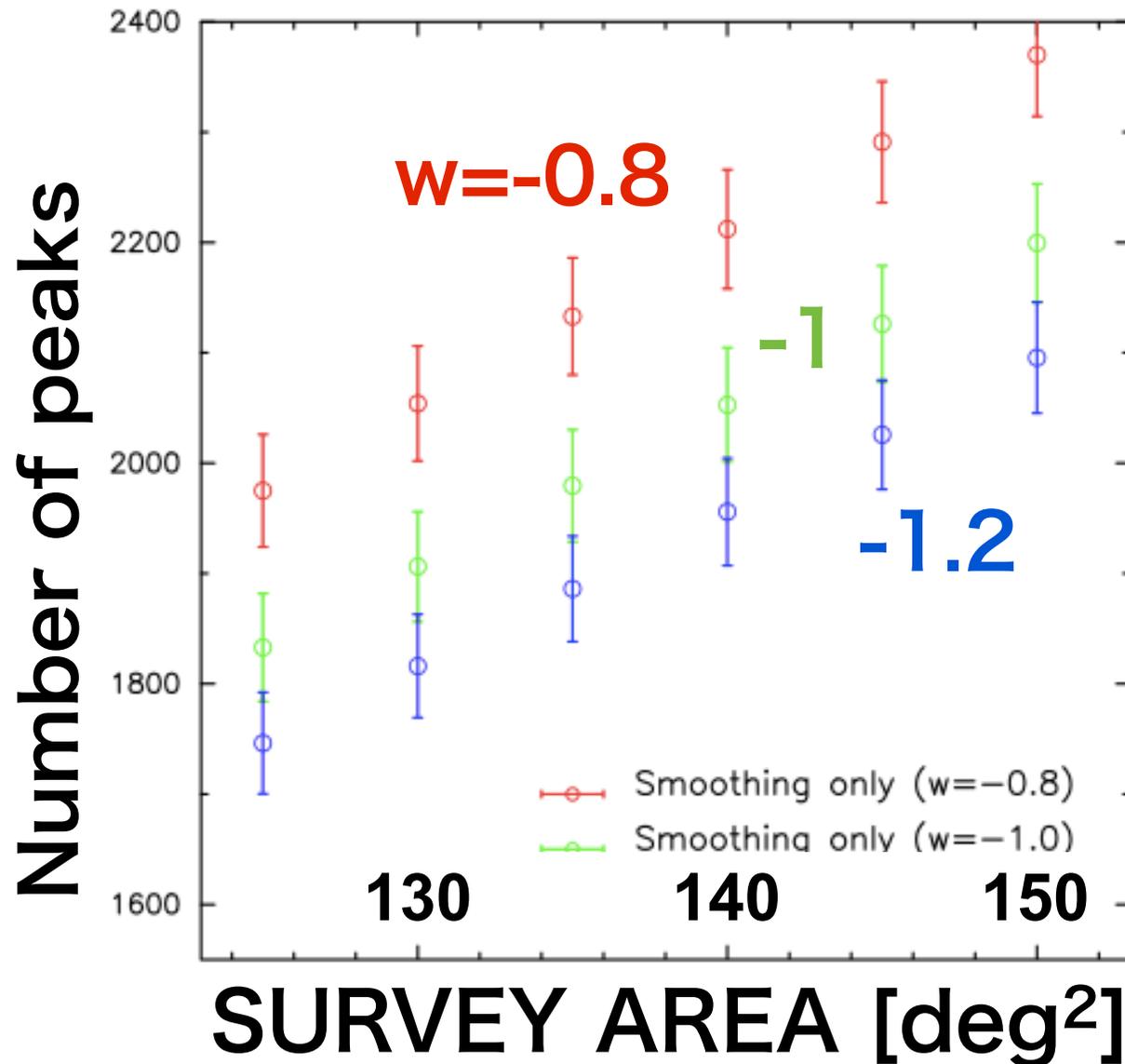


$Z_{\text{source}} = 2$
+ 1 arcmin noise
(mock observation)

Appreciable differences
at high- κ tail.

Differences
at medium κ
formally distinguishable.

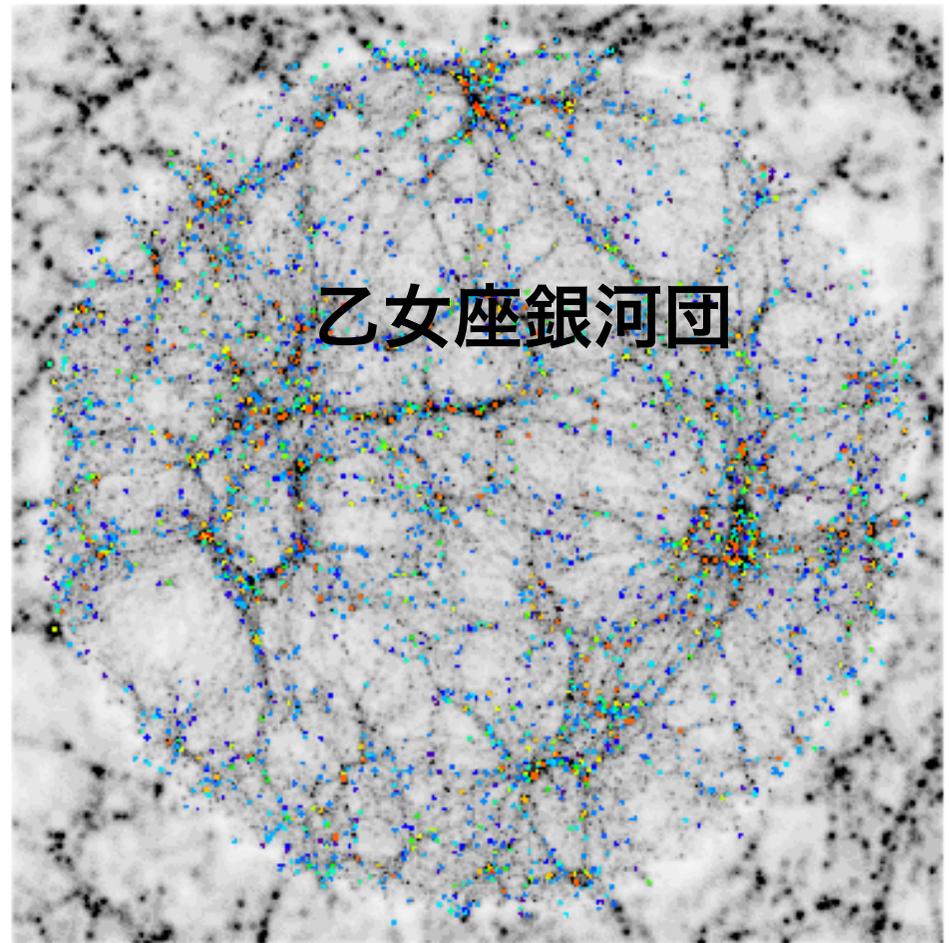
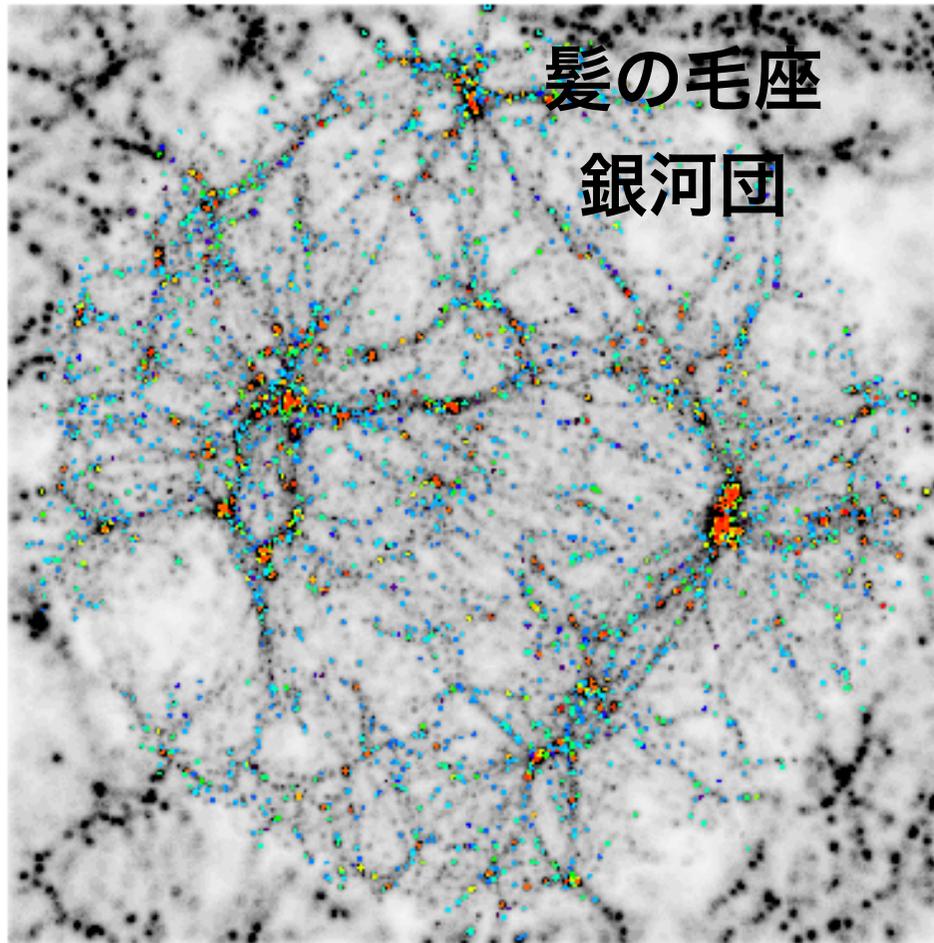
$\sim 100 \text{ deg}^2$ enough



宇宙の将来

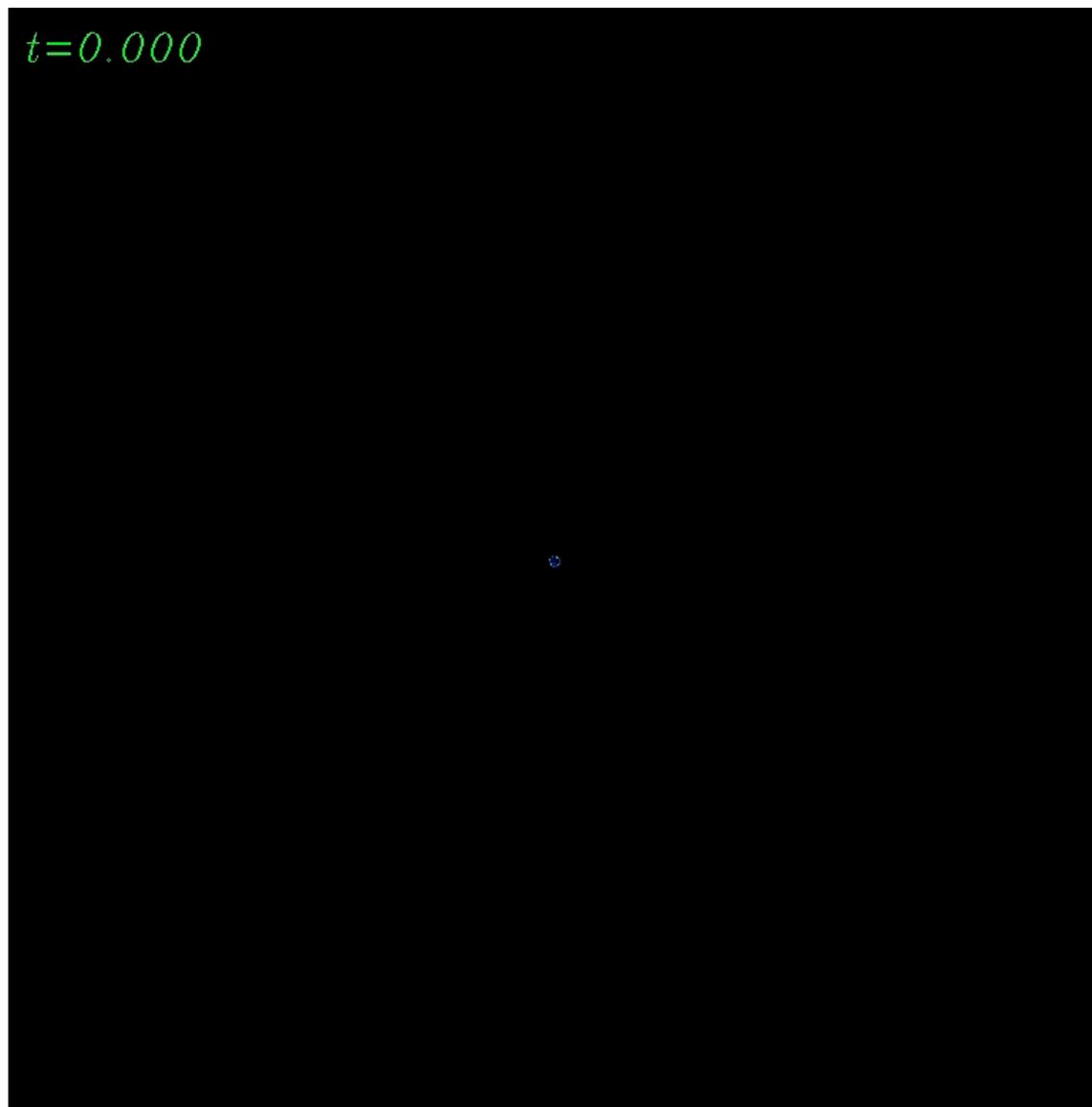
(ここから先は...)

近傍宇宙の大規模構造

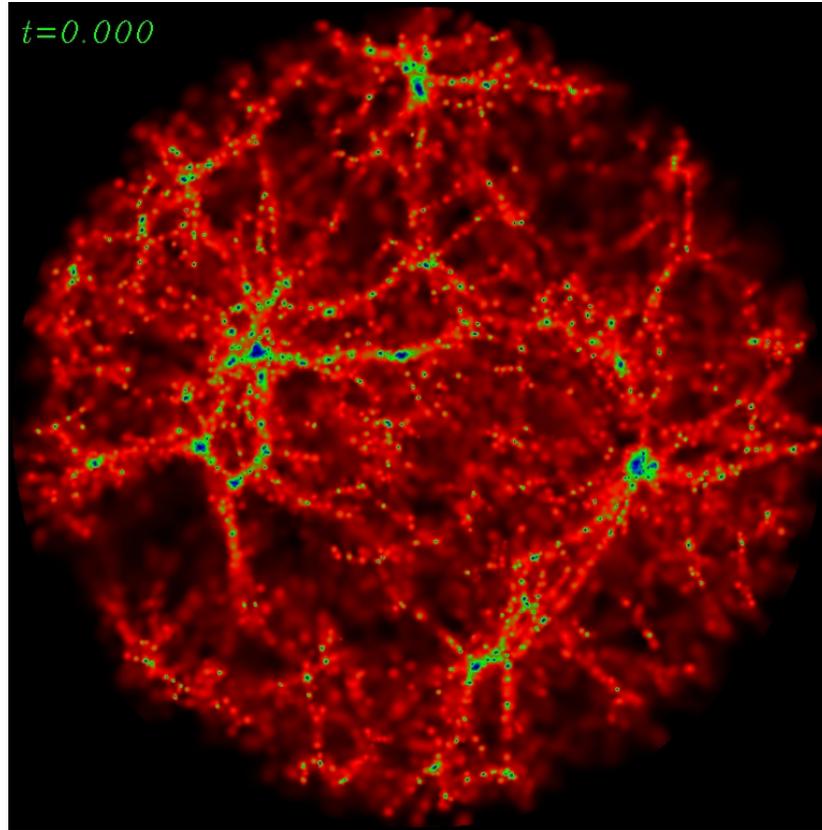


← 600万光年 →

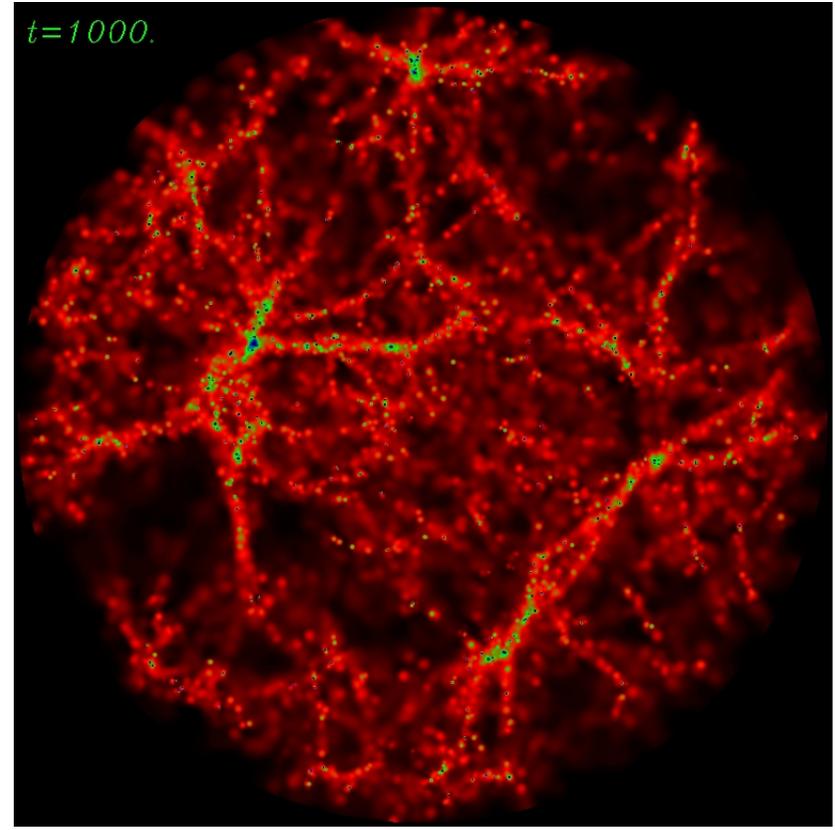
今から1000億年後



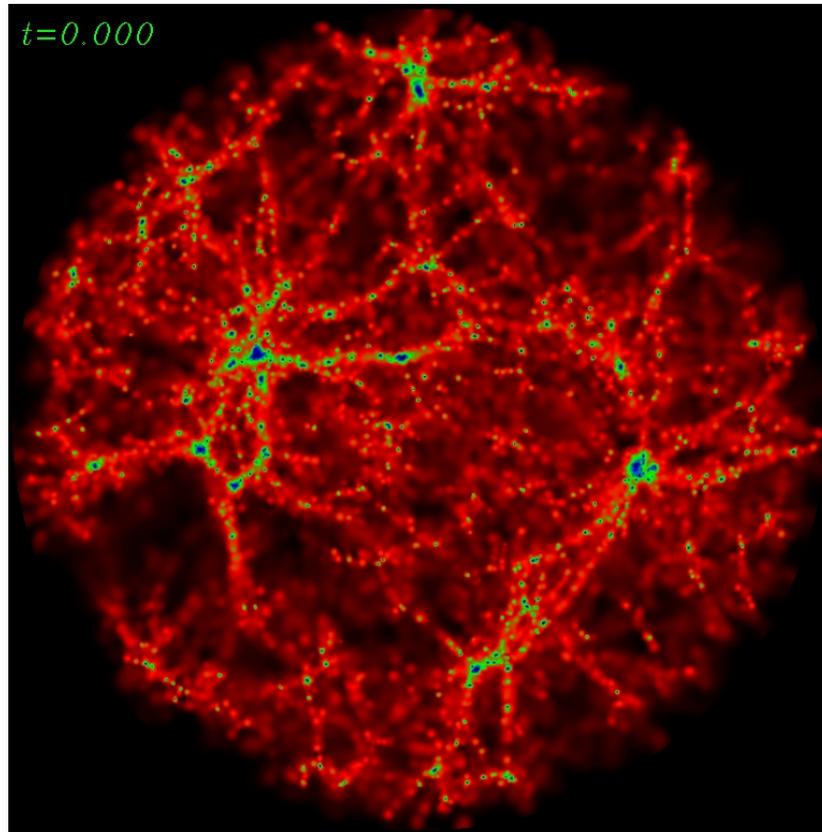
現在



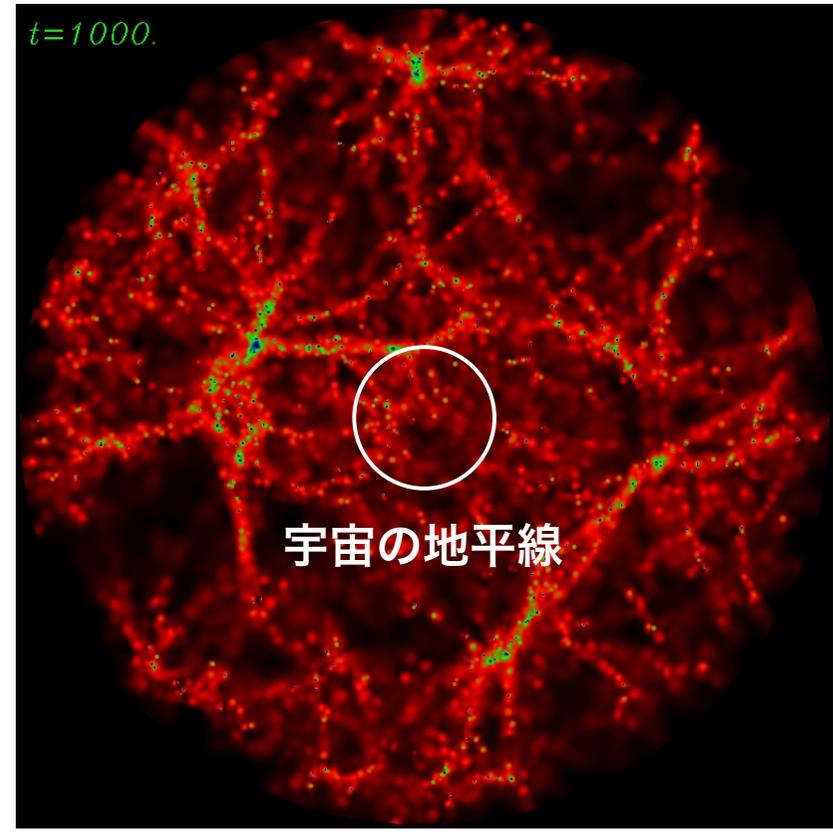
1000億年後



現在



1000億年後



右の領域は物理的には200倍以上に膨張している。
その頃の宇宙の地平線（そこから先の新しい情報は届かない）が図ではすぐ近くに見える。

1000億年後...

観測できる銀河は一つだけ。

宇宙が膨張しているかどうかも観測ではわからないだろう。

新しい星などが生まれる頻度も少なくなり、やがてはもう一度暗黒の宇宙へと姿を変えていく。