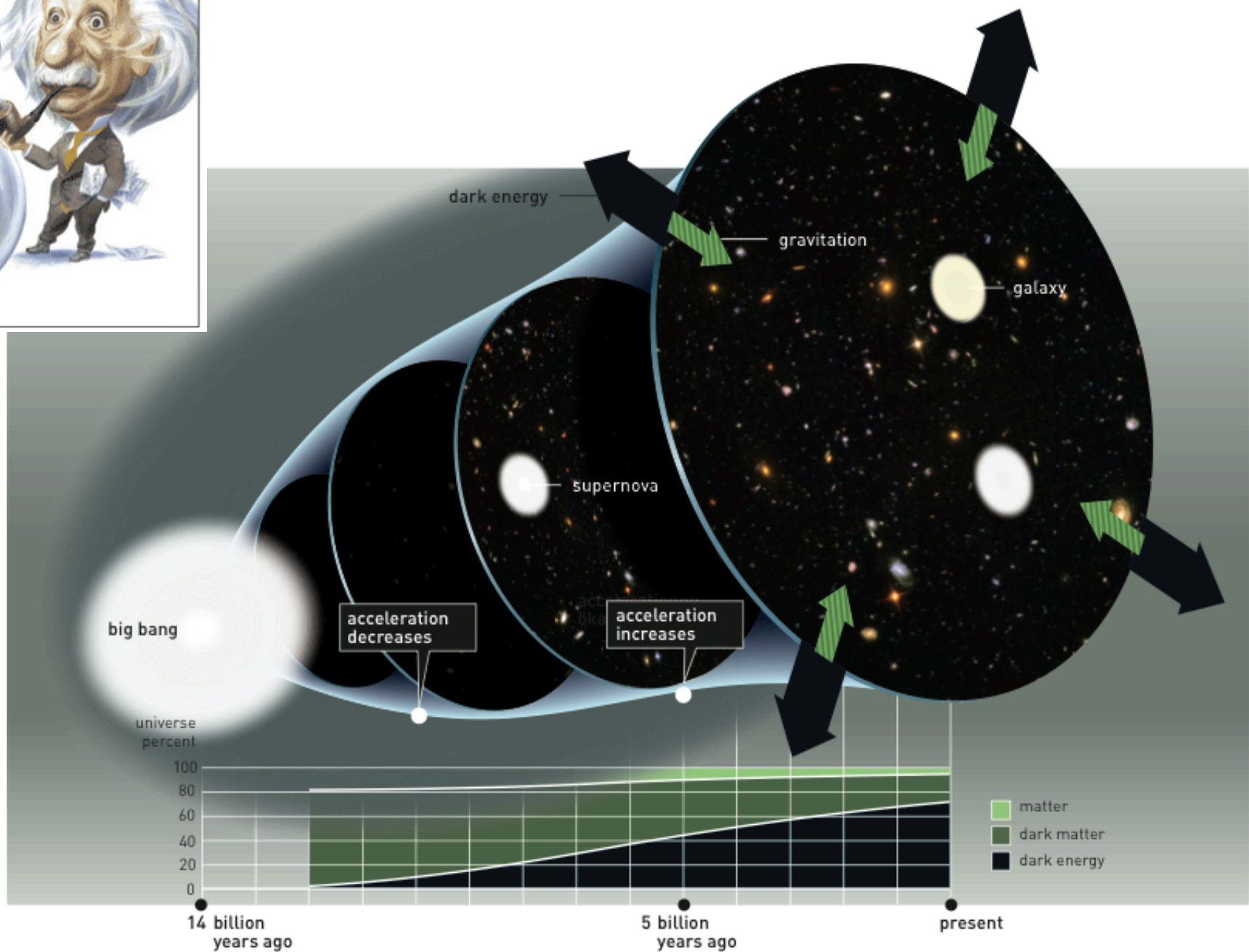
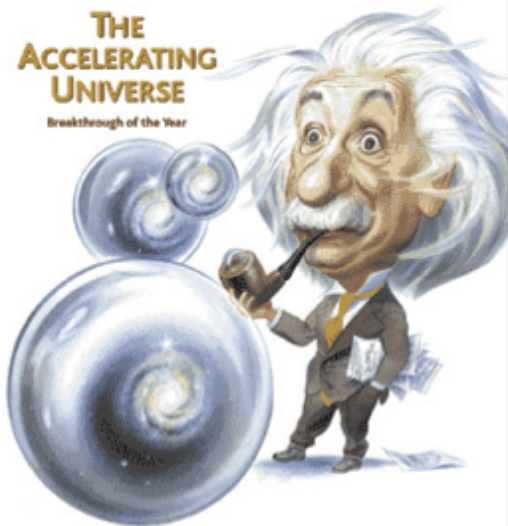


# THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year



time

# 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"*.

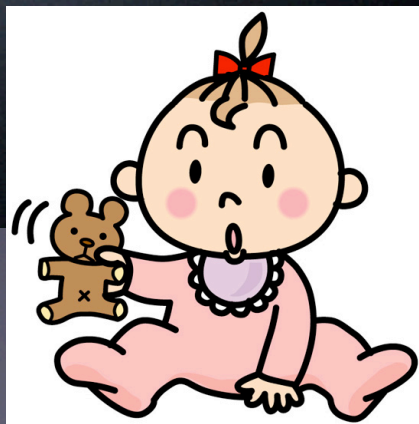
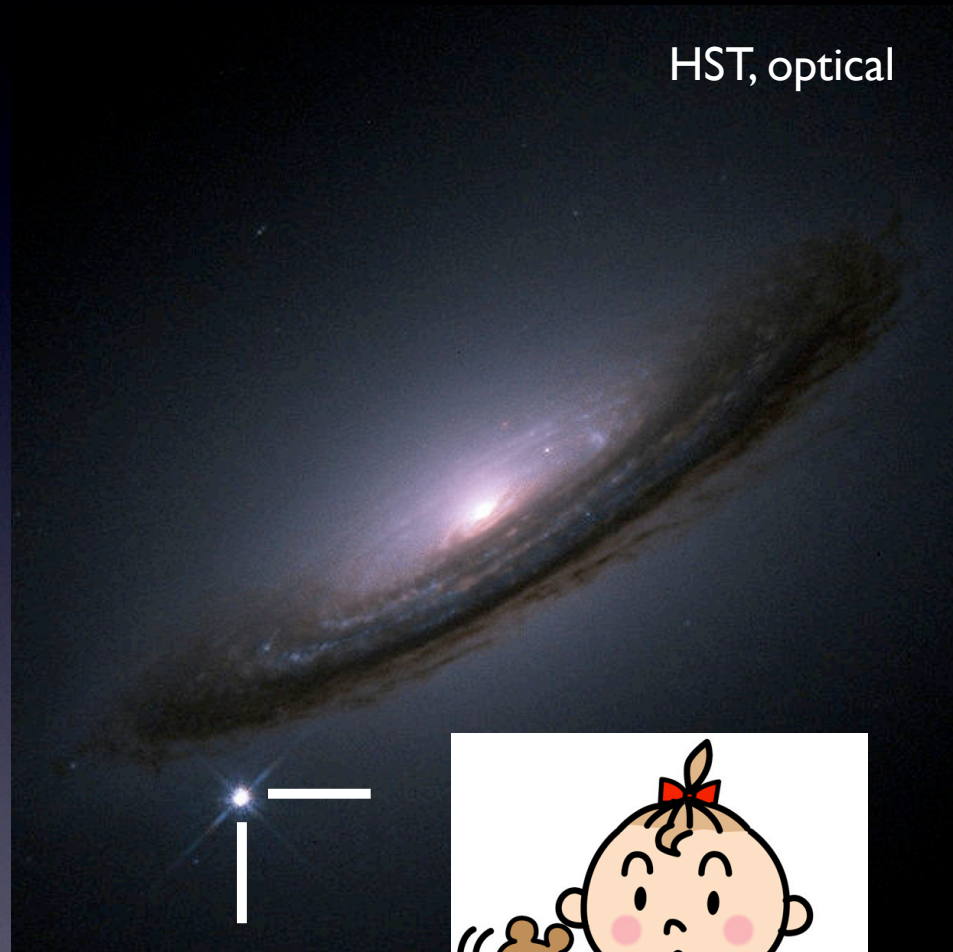
la型超新星、  
宇宙の距離指標、  
宇宙の加速度的膨張

国立天文台

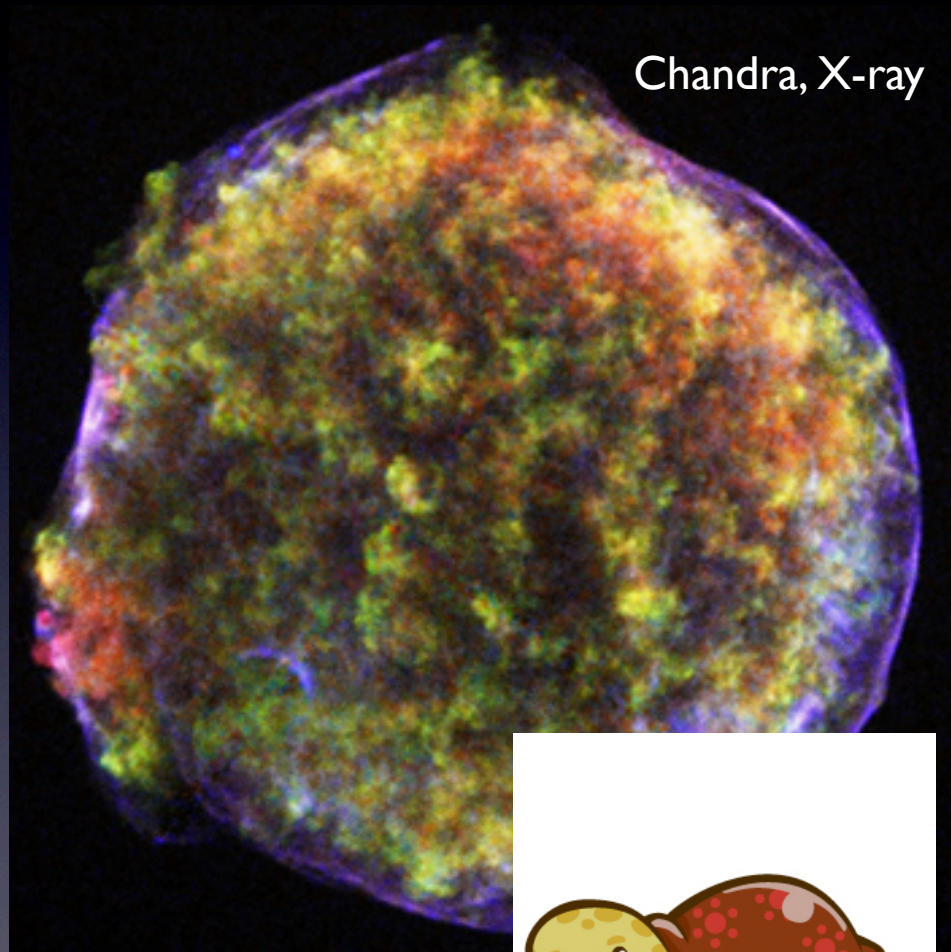
田中雅臣さん作成協力

# Ia型超新星

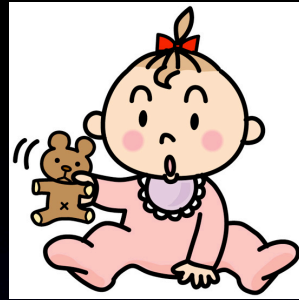
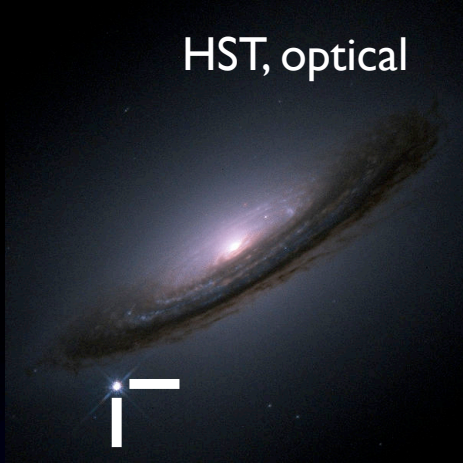
HST, optical



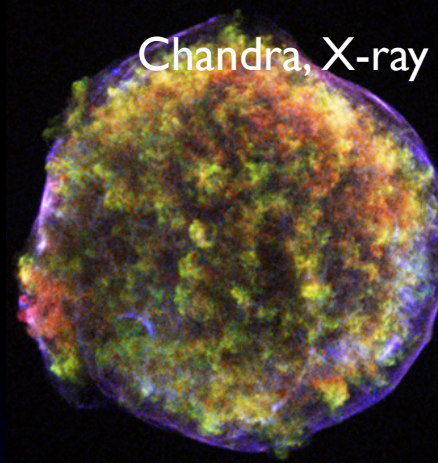
Chandra, X-ray



HST, optical



Chandra, X-ray



超新星残骸



● 銀河系外 (点源)

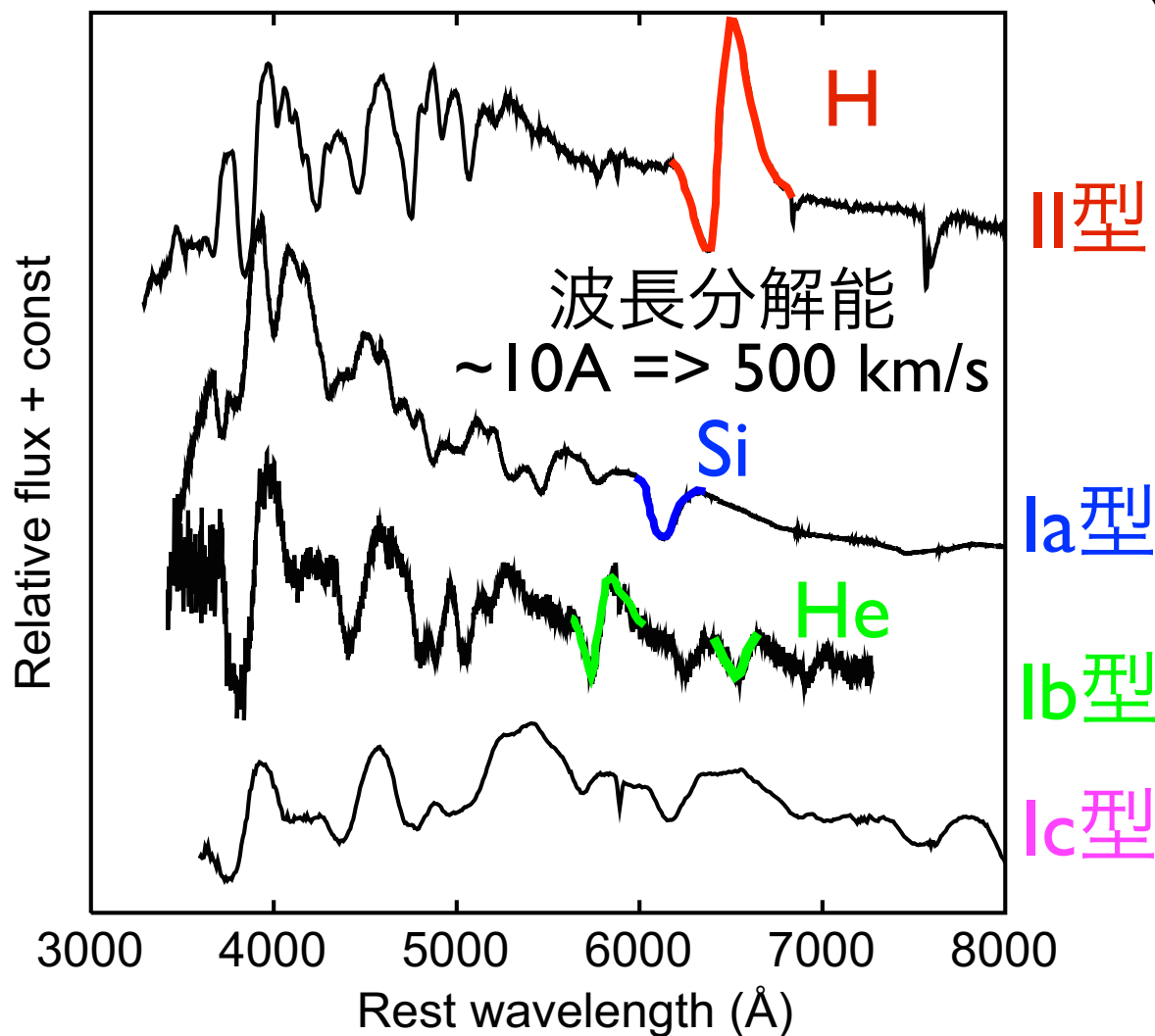
- 年間300-500天体
- $R \sim 10^{15}$  cm,  $v \sim 10,000$  km/s
- 熱源は放射性元素
- 主に可視光で明るい
  - $L_{opt} \sim 10^{43}$  erg/s
- 吸収線スペクトル  
=> 輝線スペクトル

● 主に銀河系内

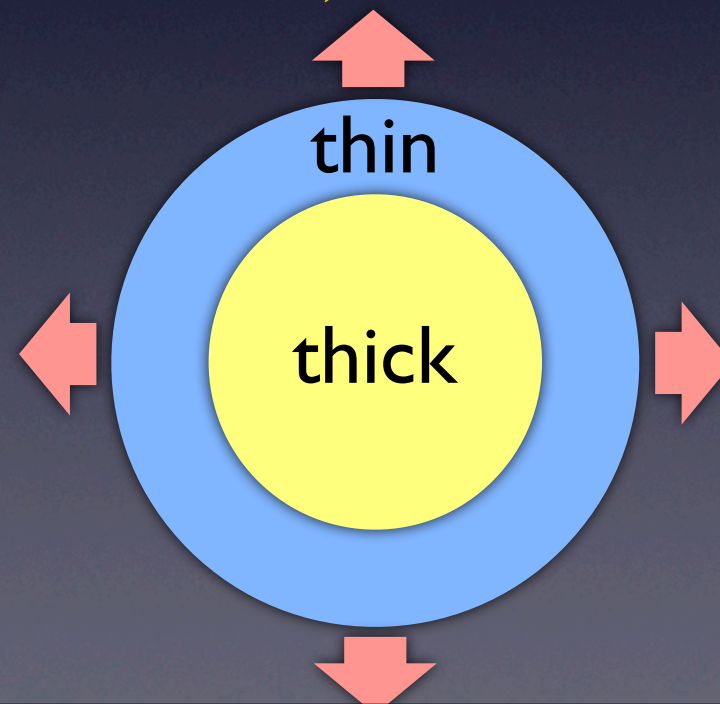
- 銀河系内に~200天体
- $R > \sim$  pc,  $v \sim 3,000$  km/s
- 熱源は衝撃波
- X線、電波で明るい
  - $L_x \sim 10^{37}$  erg/s
- 輝線スペクトル  
(超新星+星間空間)

# 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

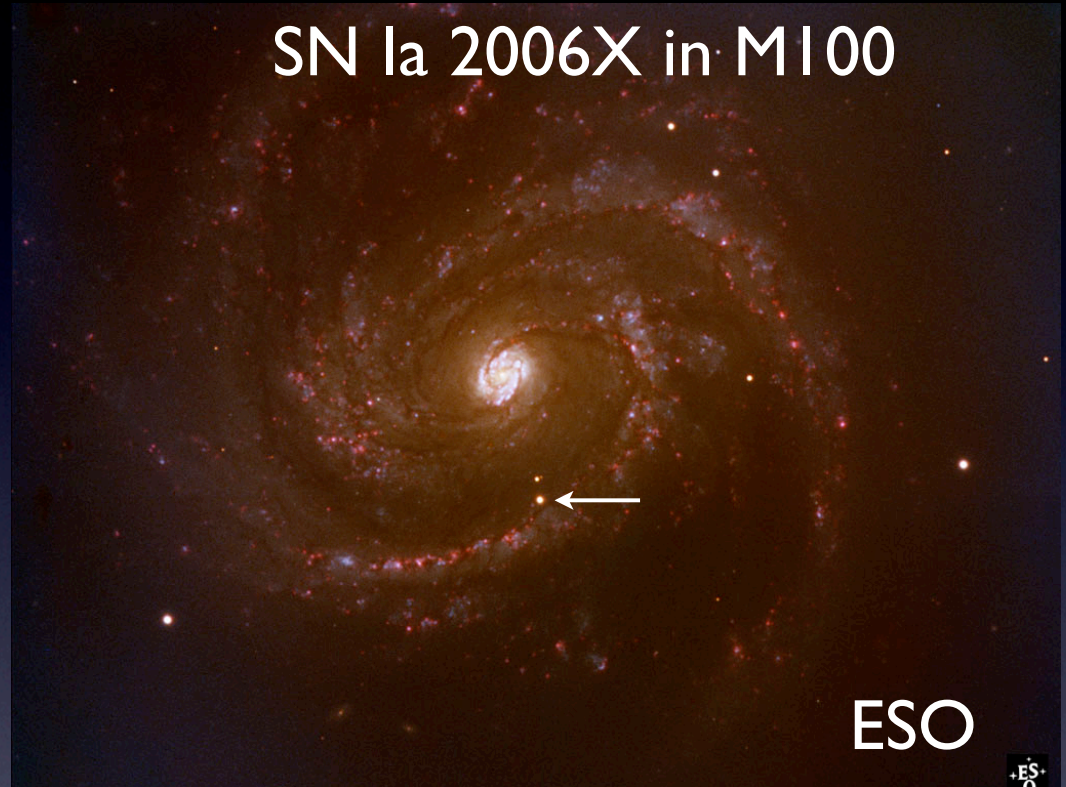
SN Ia 2006dd & 2006mr  
in NGC 1316



NASA, Swift

Ia型

SN Ia 2006X in M100



ESO

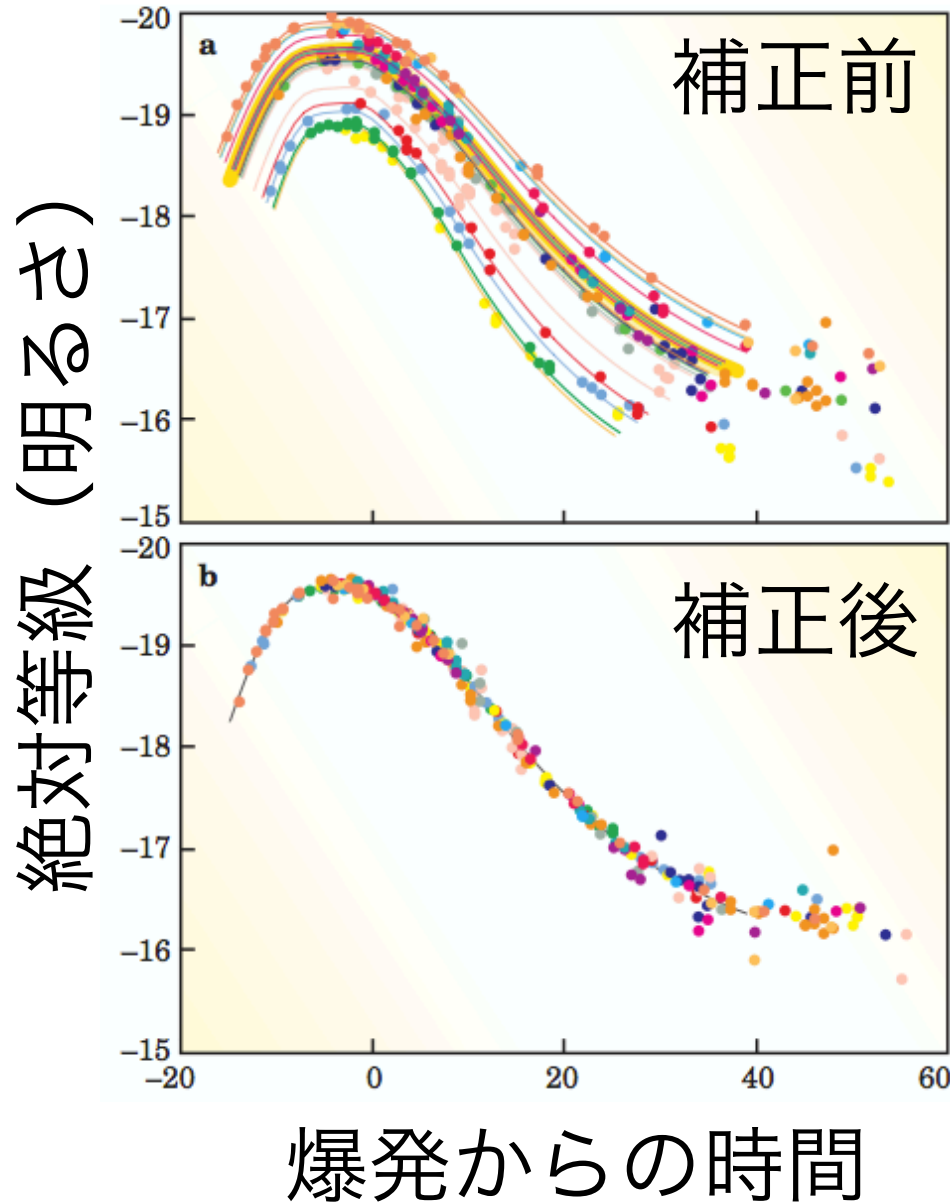
Ia型

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



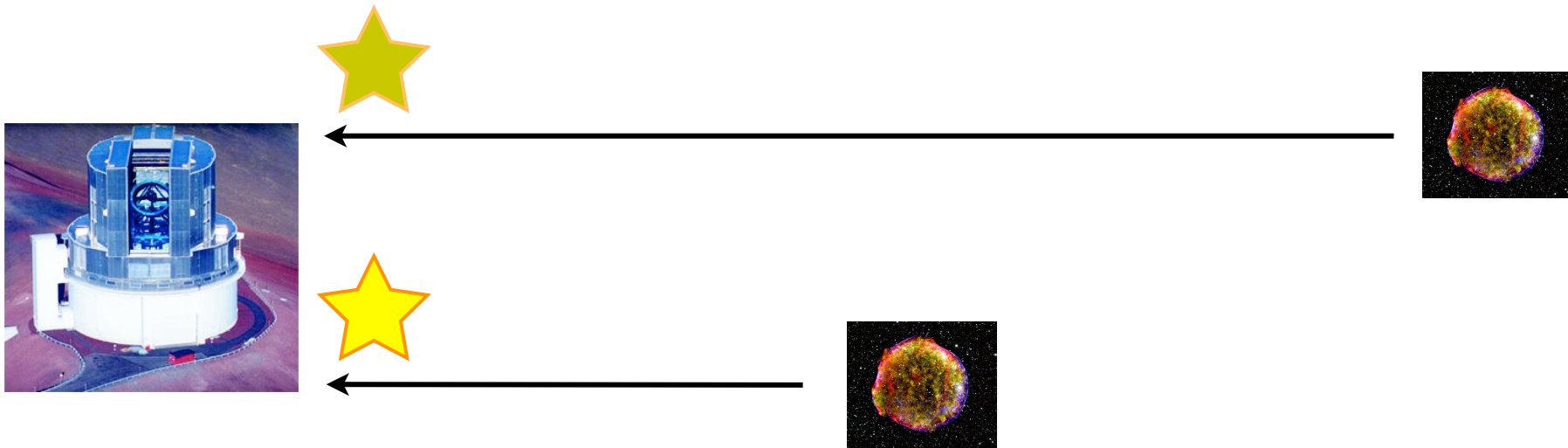
驚異的な性質を持つ

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

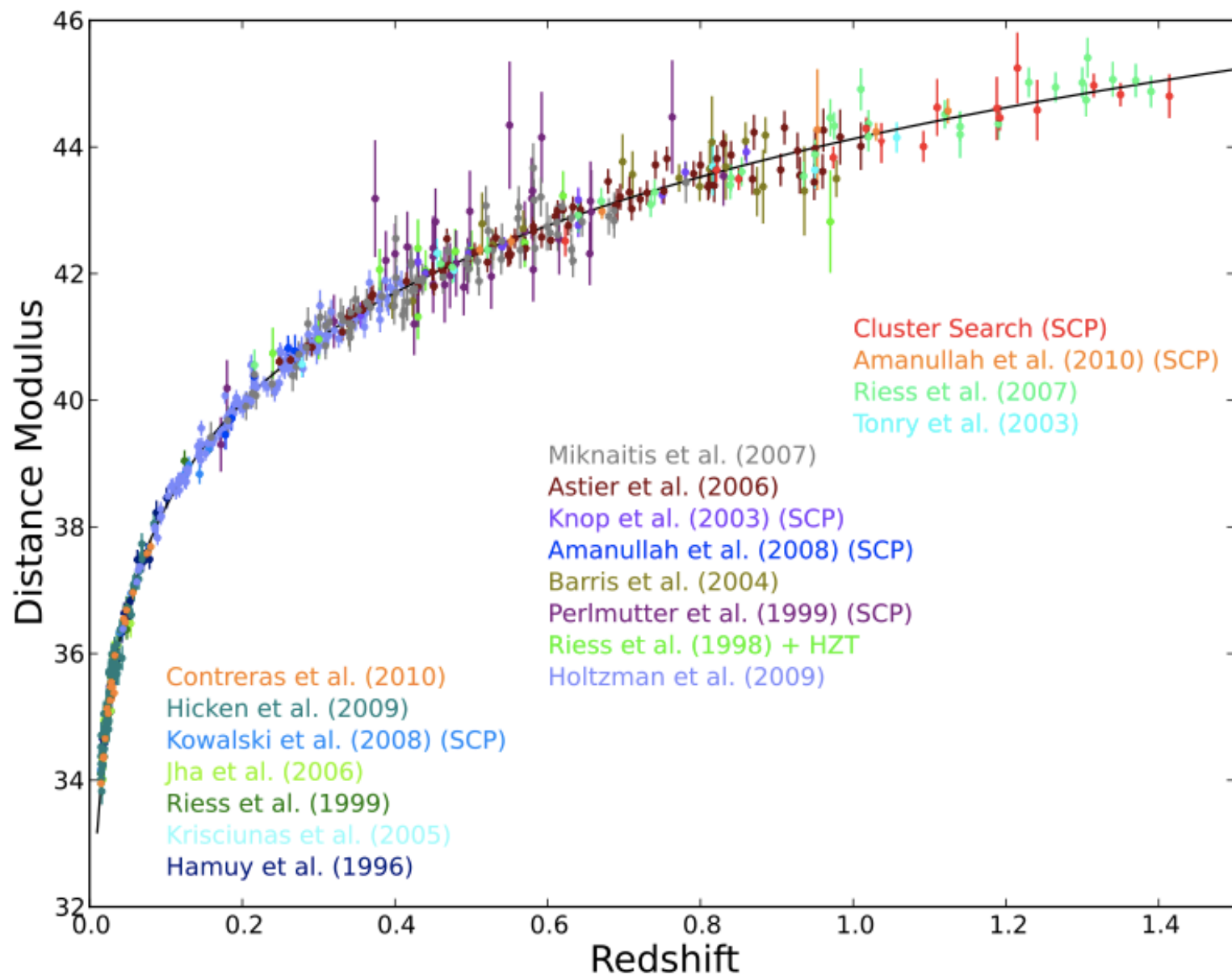


同じ明るさのものが2倍遠い場所にあると、  
明るさは4分の1に「見える」



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

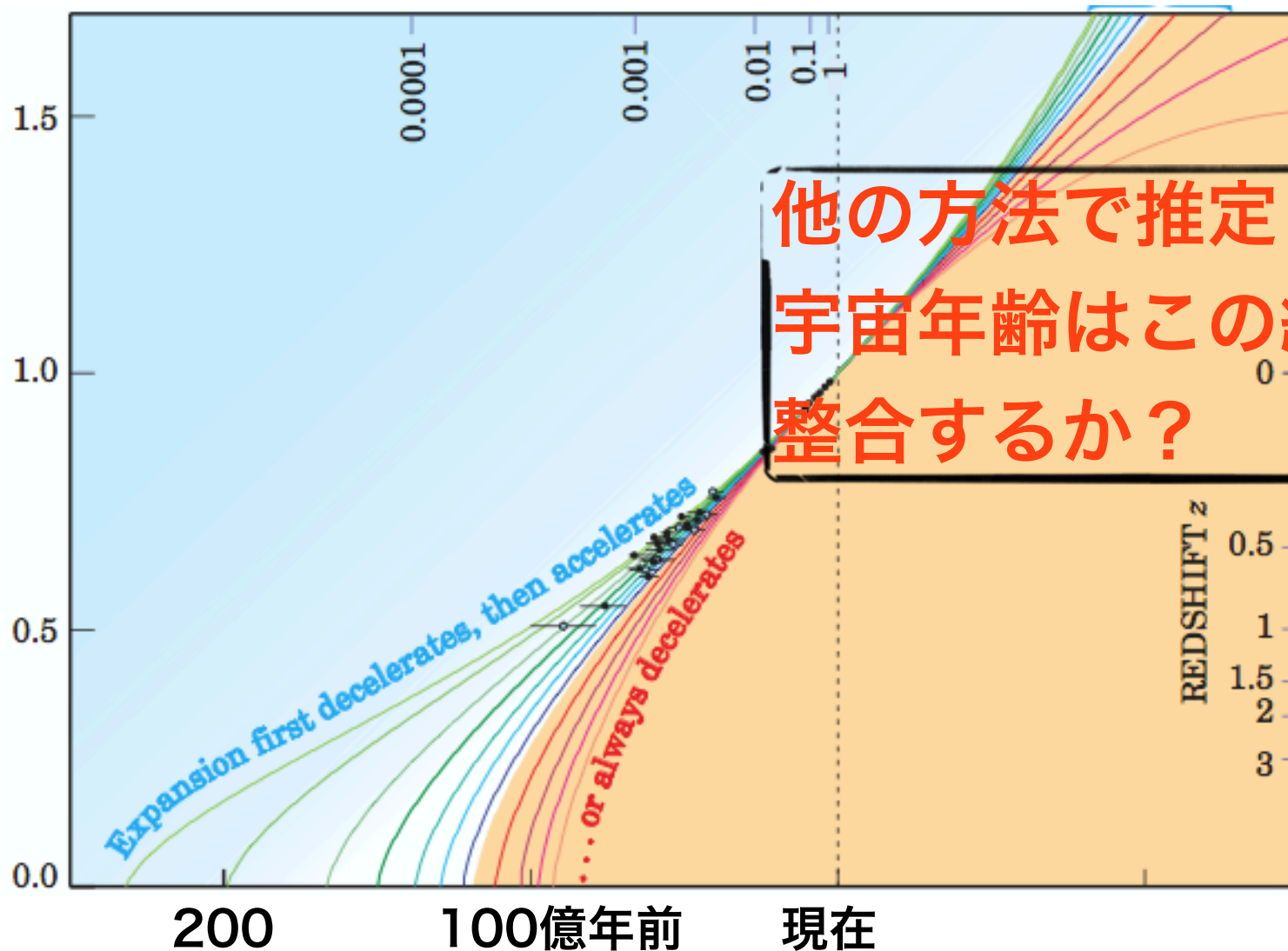
# 赤方偏移-距離關係式



# 宇宙の膨張史

超新星の明るさ

現在の宇宙を1とした場合の大きさ



他の方法で推定した  
宇宙年齢はこの結果と  
整合するか？

# 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）

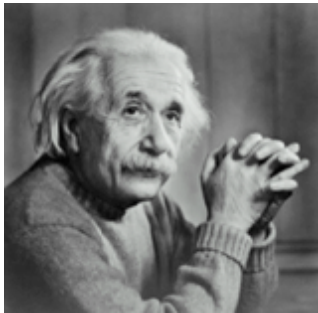
- ・ 何故今頃(~100億年) 重要になってくるのか。
- ・ なぜ中途半端な量なのか。
- ・ 宇宙はこれから一体どうなるのか。

# アインシュタイン方程式

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



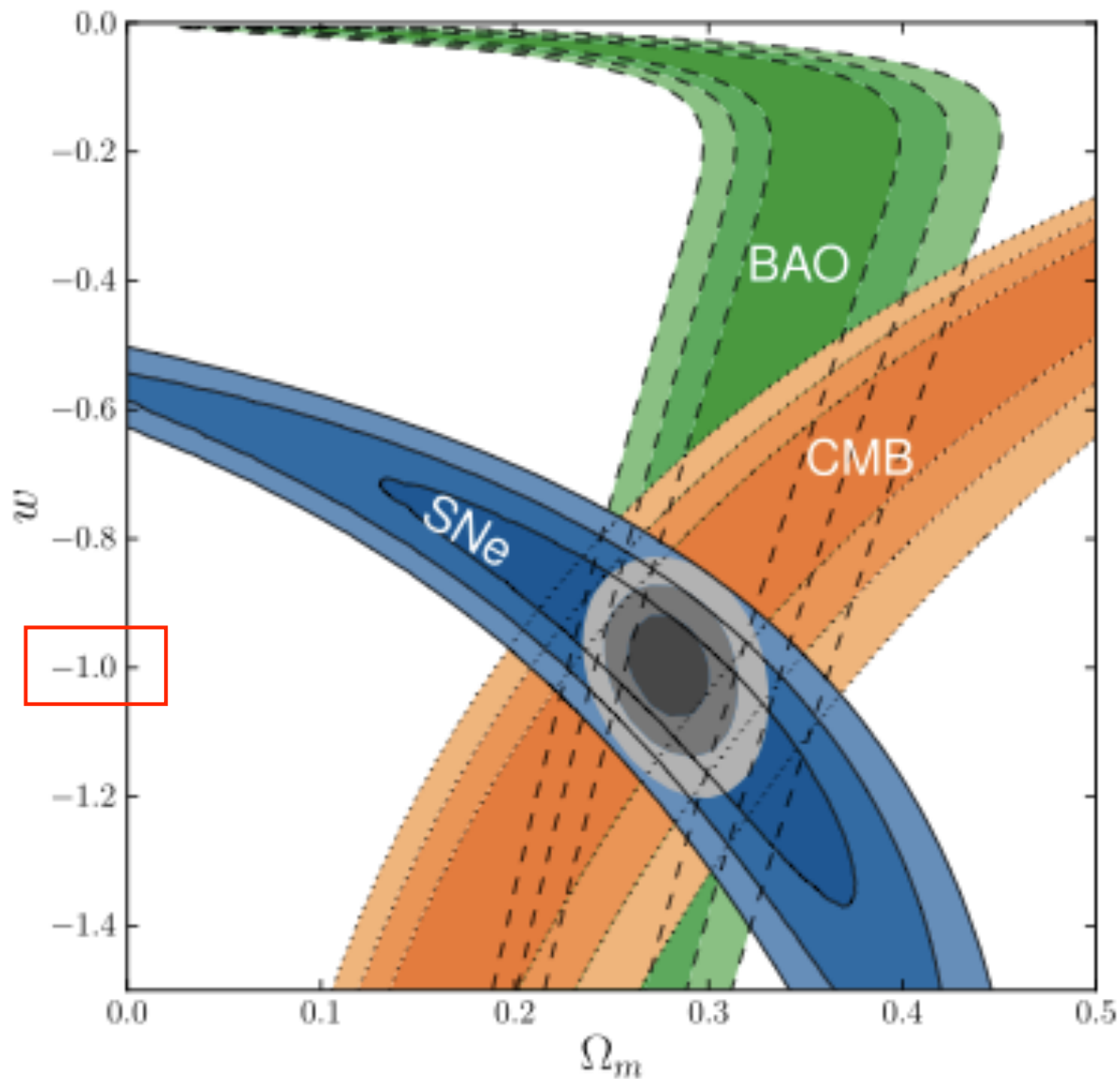
アインシュタインの  
宇宙項



“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



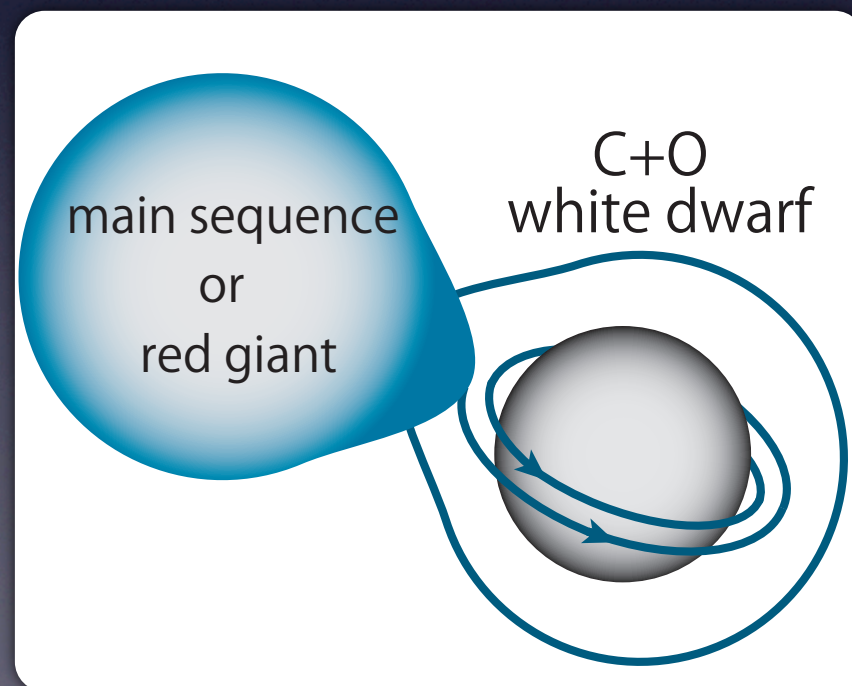
BAO：銀河の大域的分布から得る幾何学的情報

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

# 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)



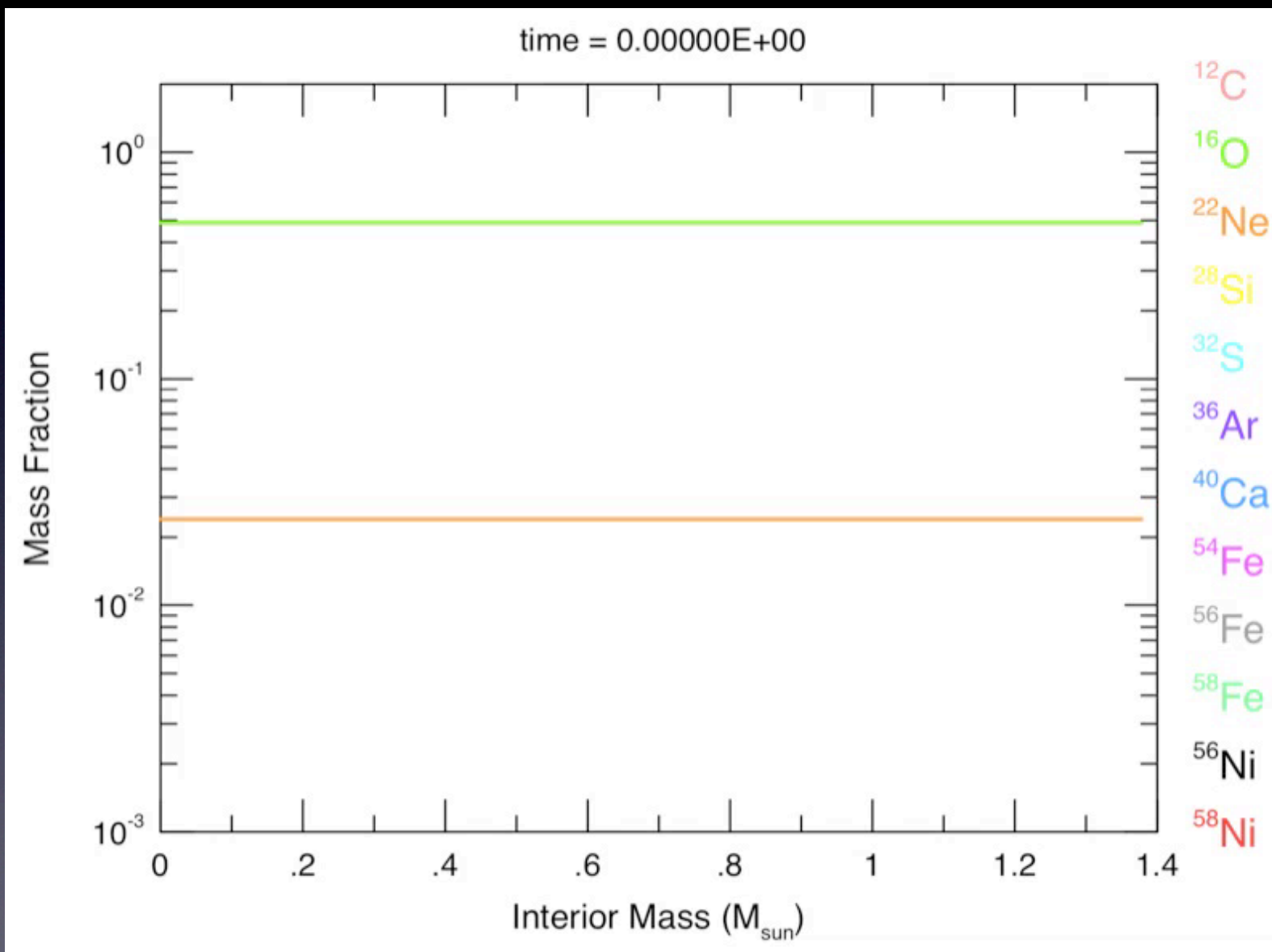
# 白色矮星 (板書)



# C+O白色矮星の爆発

元素の質量割合

内側



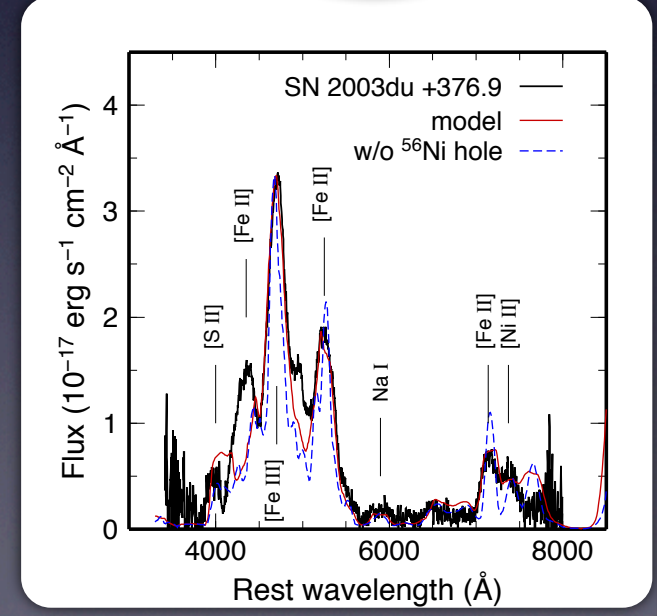
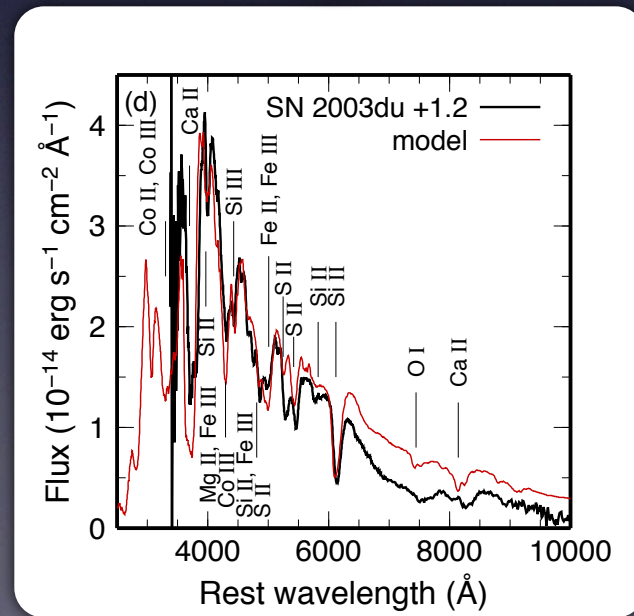
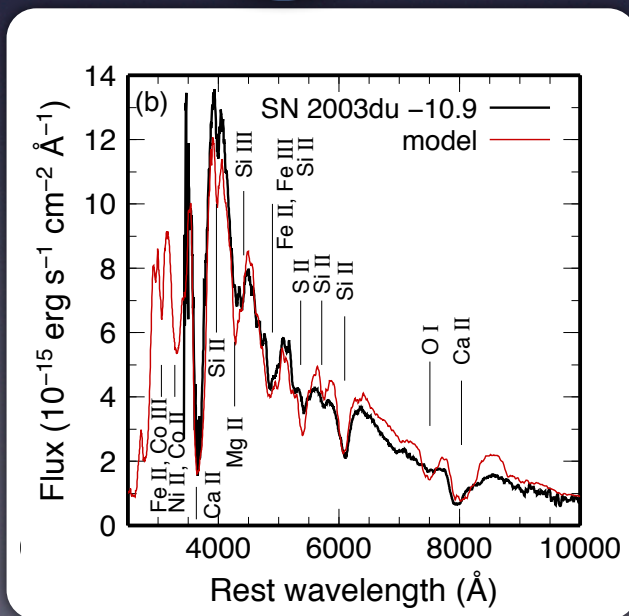
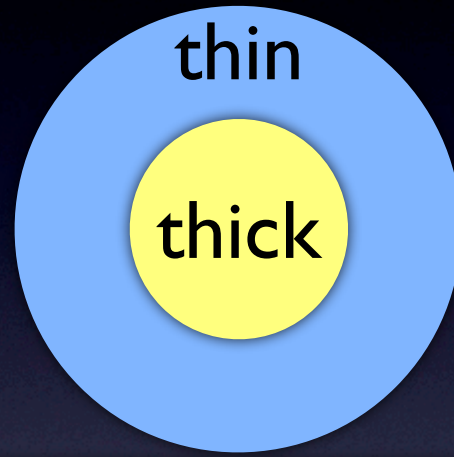
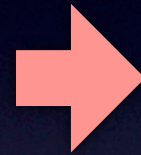
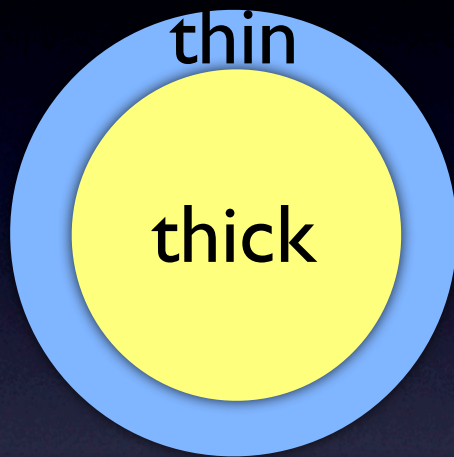
外側

# 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

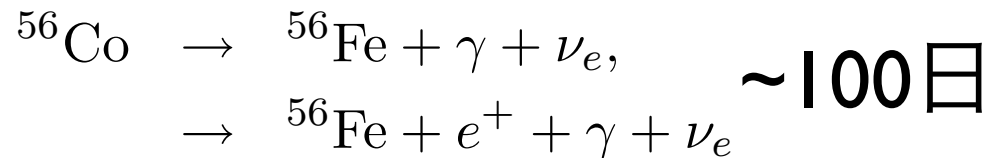
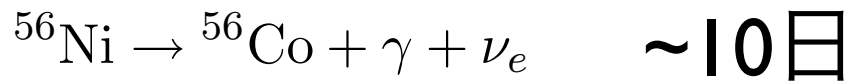
- $E(\text{kinetic}) = E(\text{nuclear}) - E(\text{binding energy of WD})$   
 $\sim 1.8 \times 10^{51} - 0.5 \times 10^{51} \sim 1.3 \times 10^{51} \text{ erg}$

- 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  $^{56}\text{Ni}$  ( $\sim 0.6 M_{\text{sun}}$ )



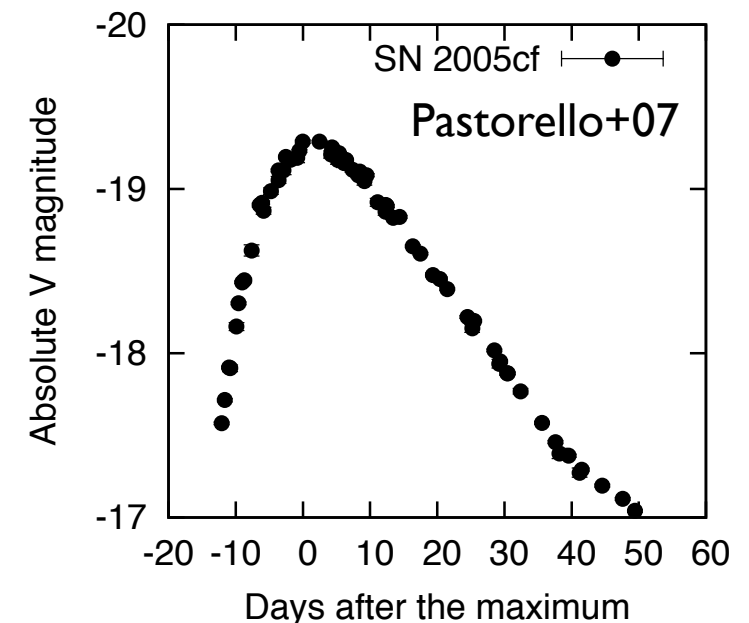
$$L_{\text{max}} = \left( 6.45 e^{\frac{-t_r}{8.8\text{d}}} + 1.45 e^{\frac{-t_r}{111.3\text{d}}} \right) \left( \frac{M_{\text{Ni}}}{M_{\odot}} \right) \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$$

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

一様性 + 強烈な明るさ



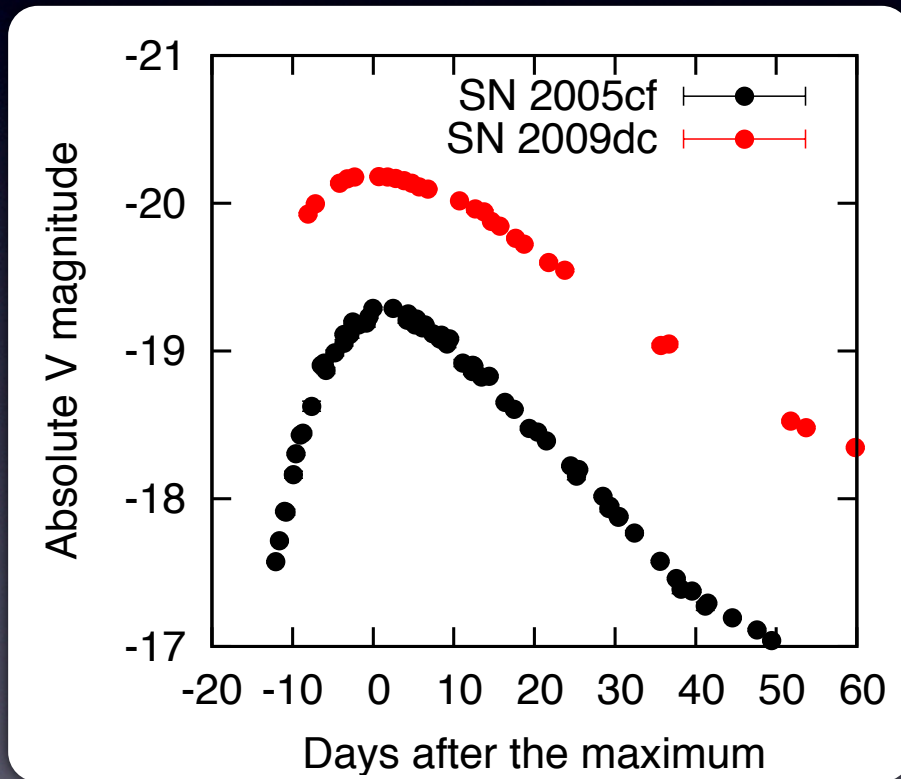
宇宙における距離指標



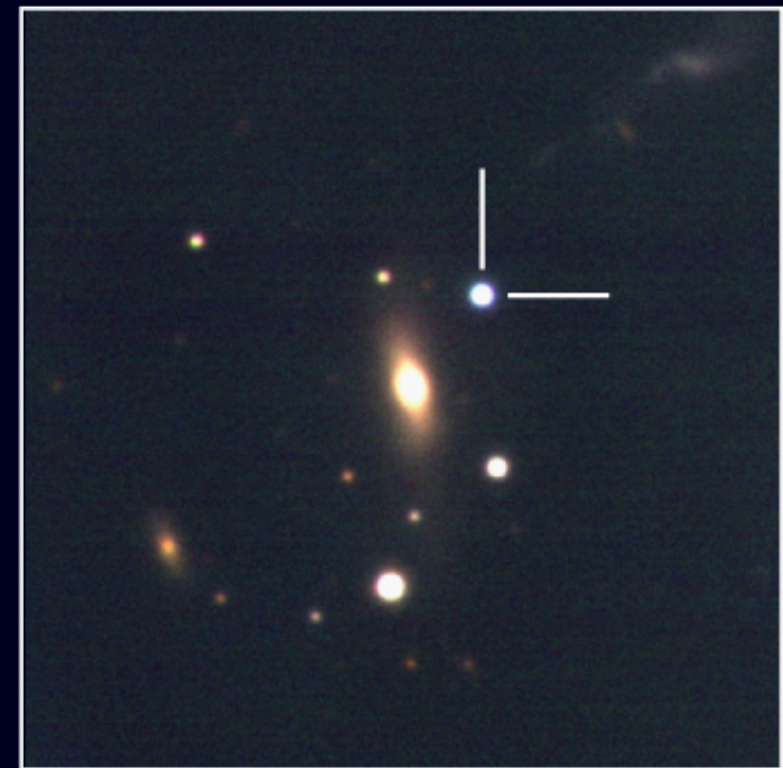
# スーパー明るいIa型超新星がいる

- **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

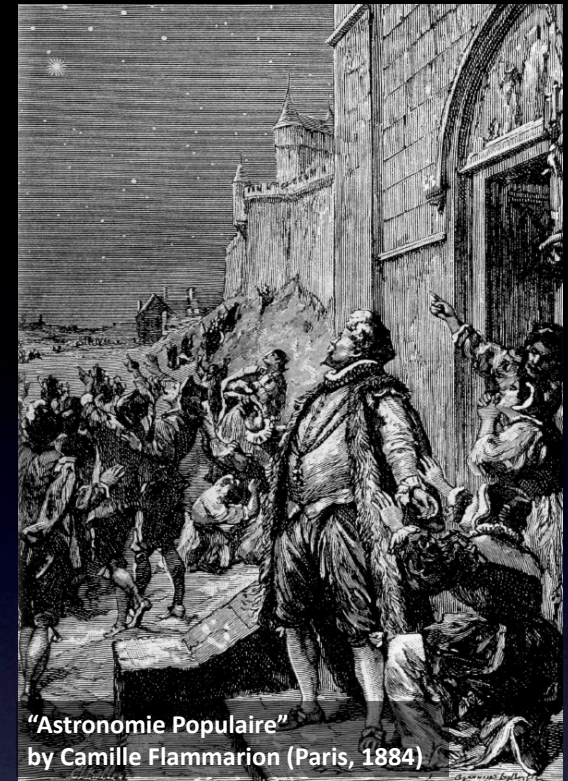
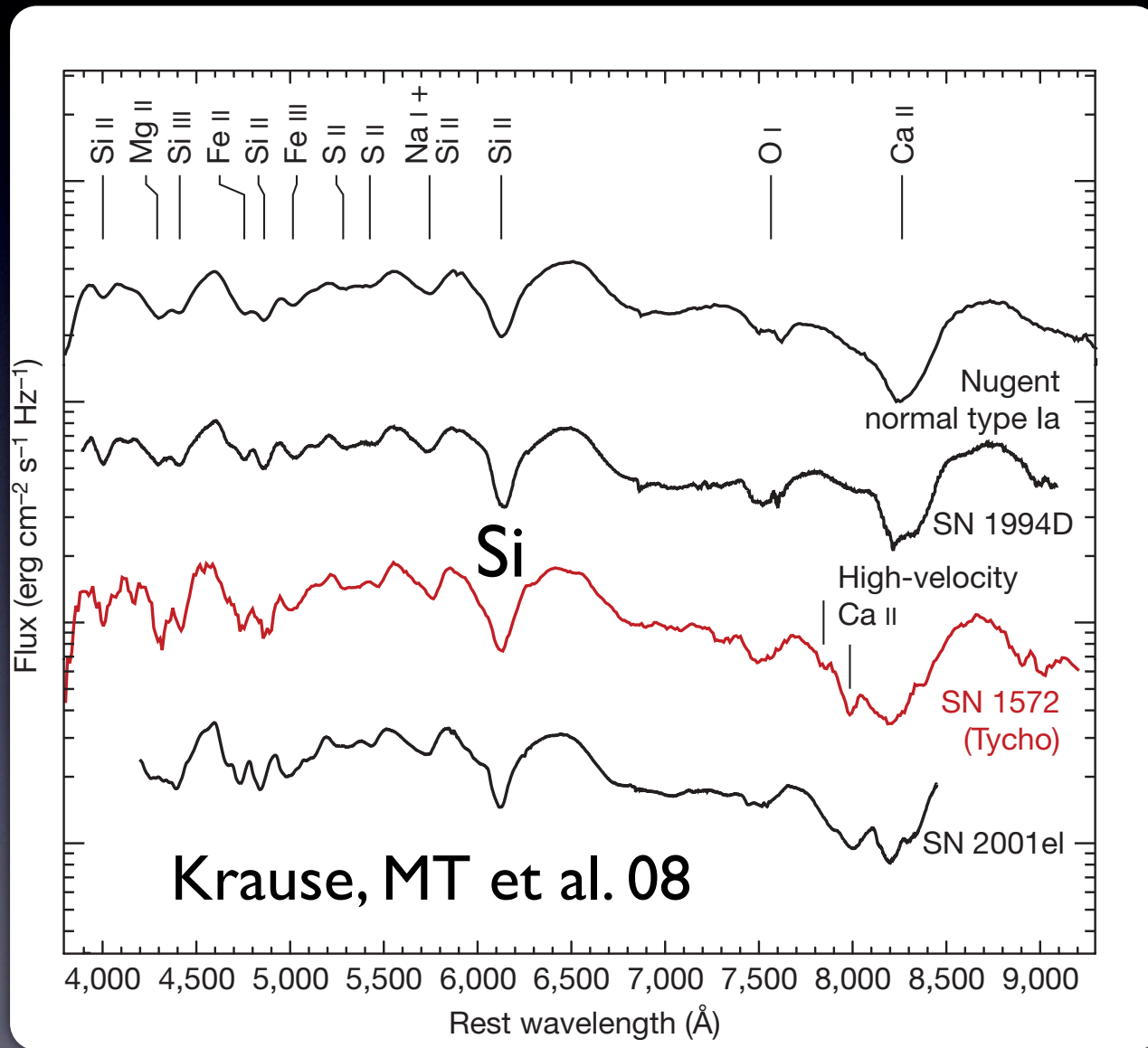
KANATA Telescope/HOWPol (B, V, R)

Copyright © Higashi-Hiroshima Observatory

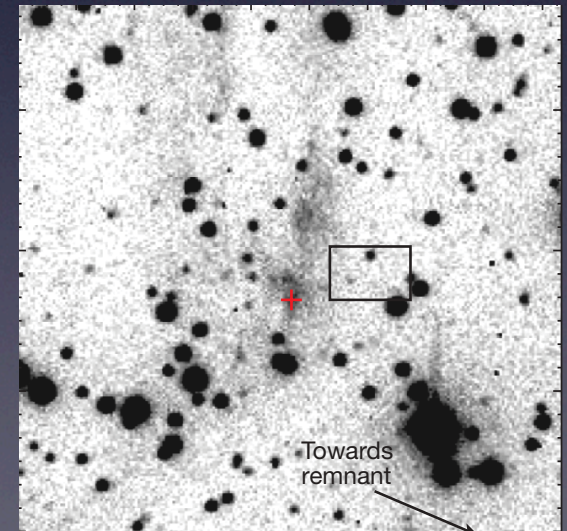
# “Light Echo”



# Tycho's SN = Type Ia!!



1572



2008

# 銀河系内の超新星残骸

