

Inflation

# 天文学概論

## 第12回 超新星・宇宙論(2)

担当：黒川 宏之

# スケジュール 2

11/22 天体観測 (大宮)

11/29 超新星・宇宙論 (1) (黒川)

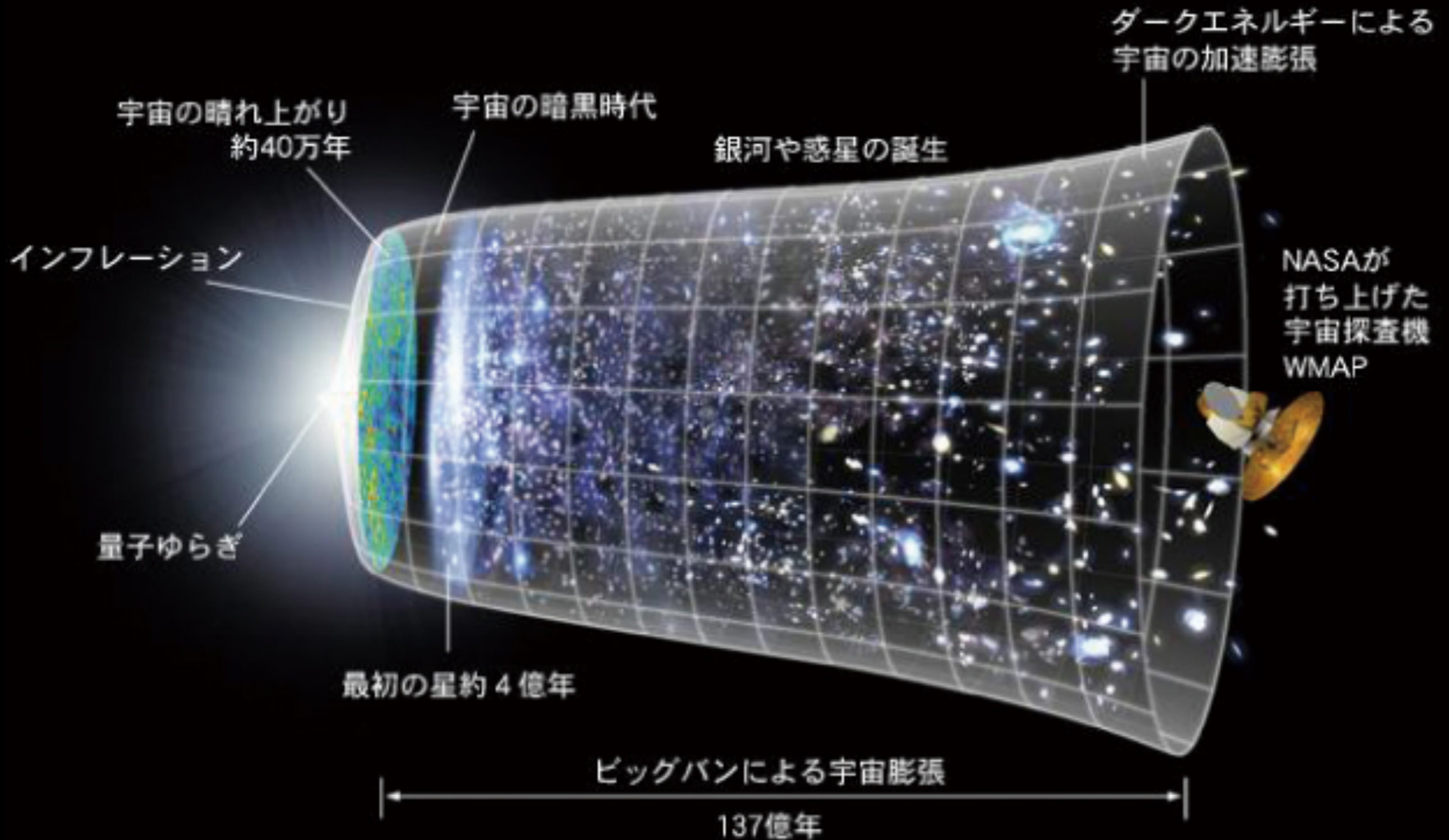
12/6 超新星・宇宙論 (2) (黒川)

12/13 初期宇宙と構造形成 (1) (林)

12/20 初期宇宙と構造形成 (2) (林)

1/10 全体のまとめ (大宮)

# 前回の復習



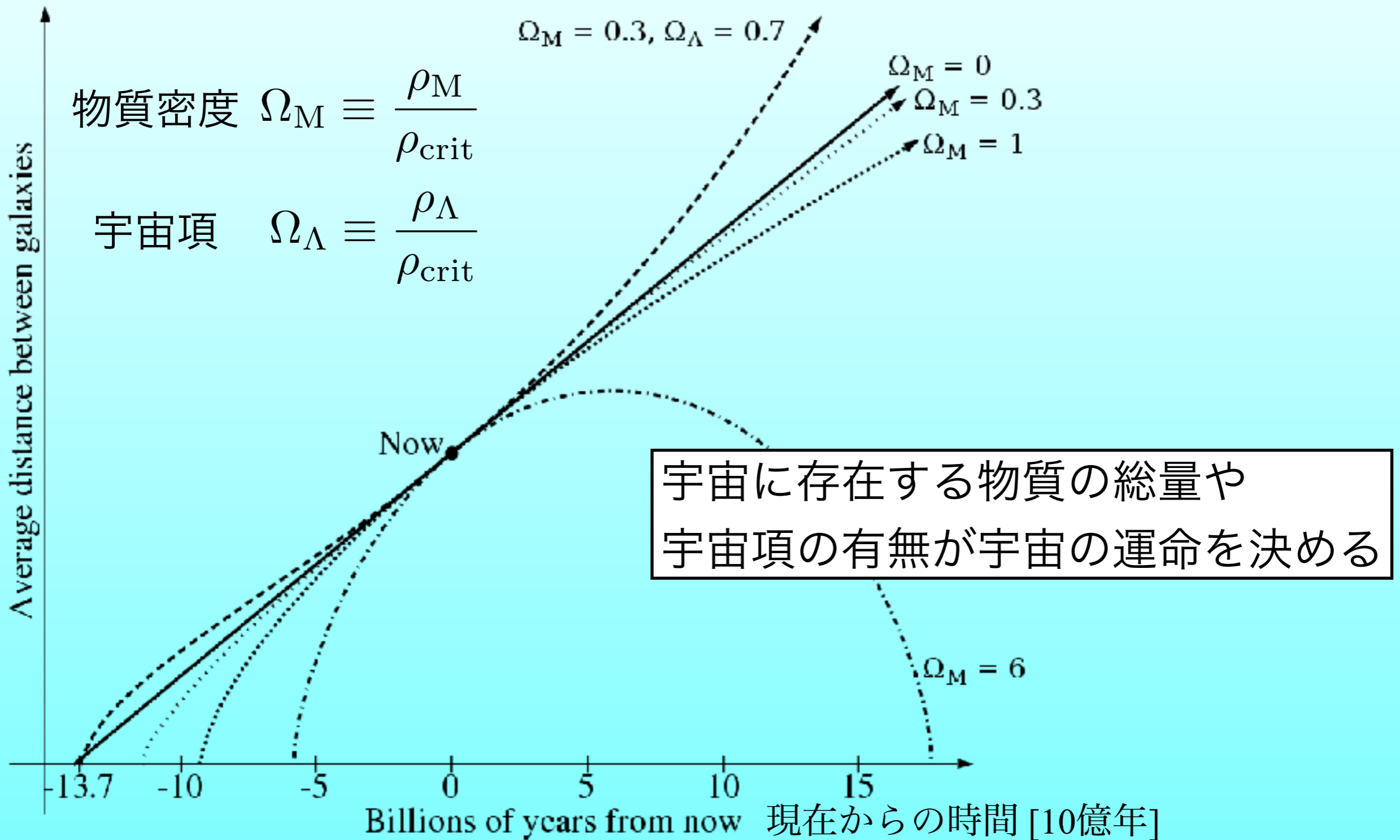
# 観測的宇宙論

宇宙の進化に関わる物理量を観測を通じて決定し、  
宇宙の起源や進化を理解する

- ・ ダークマター
- ・ 距離の梯子
- ・ 超新星
- ・ ダークエネルギー etc.

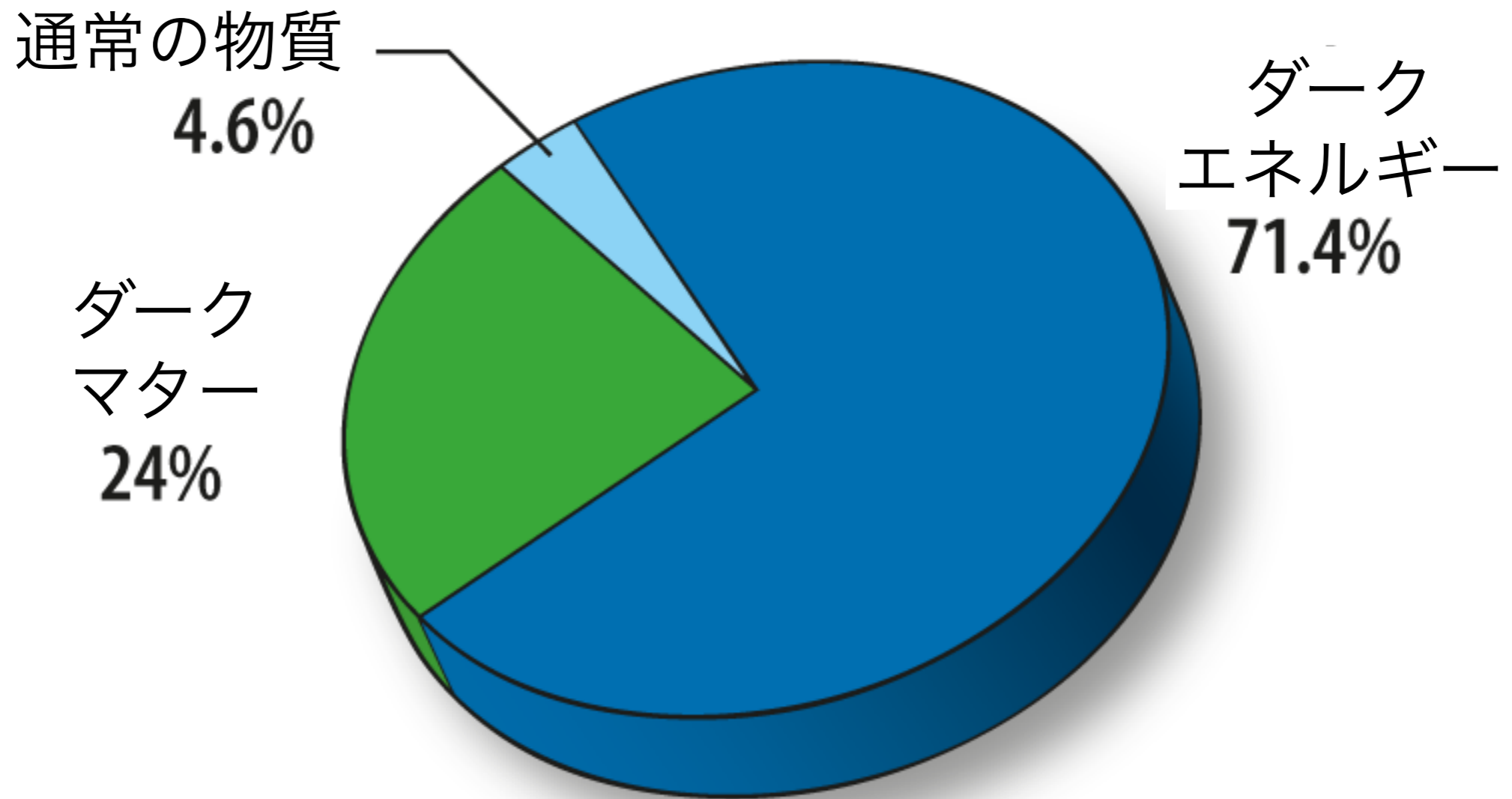
# 宇宙の運命

銀河間の平均距離 (宇宙の大きさに対応)



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dc/Friedmann\\_universes.svg/1000px-Friedmann\\_universes.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dc/Friedmann_universes.svg/1000px-Friedmann_universes.svg.png)

# 宇宙の組成



TODAY

Credit: NASA

# 銀河の回転速度

回転速度： $v(r)$

$r$  内部の質量： $M(< r)$

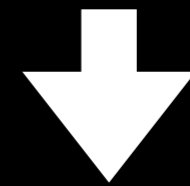


力の釣り合い

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

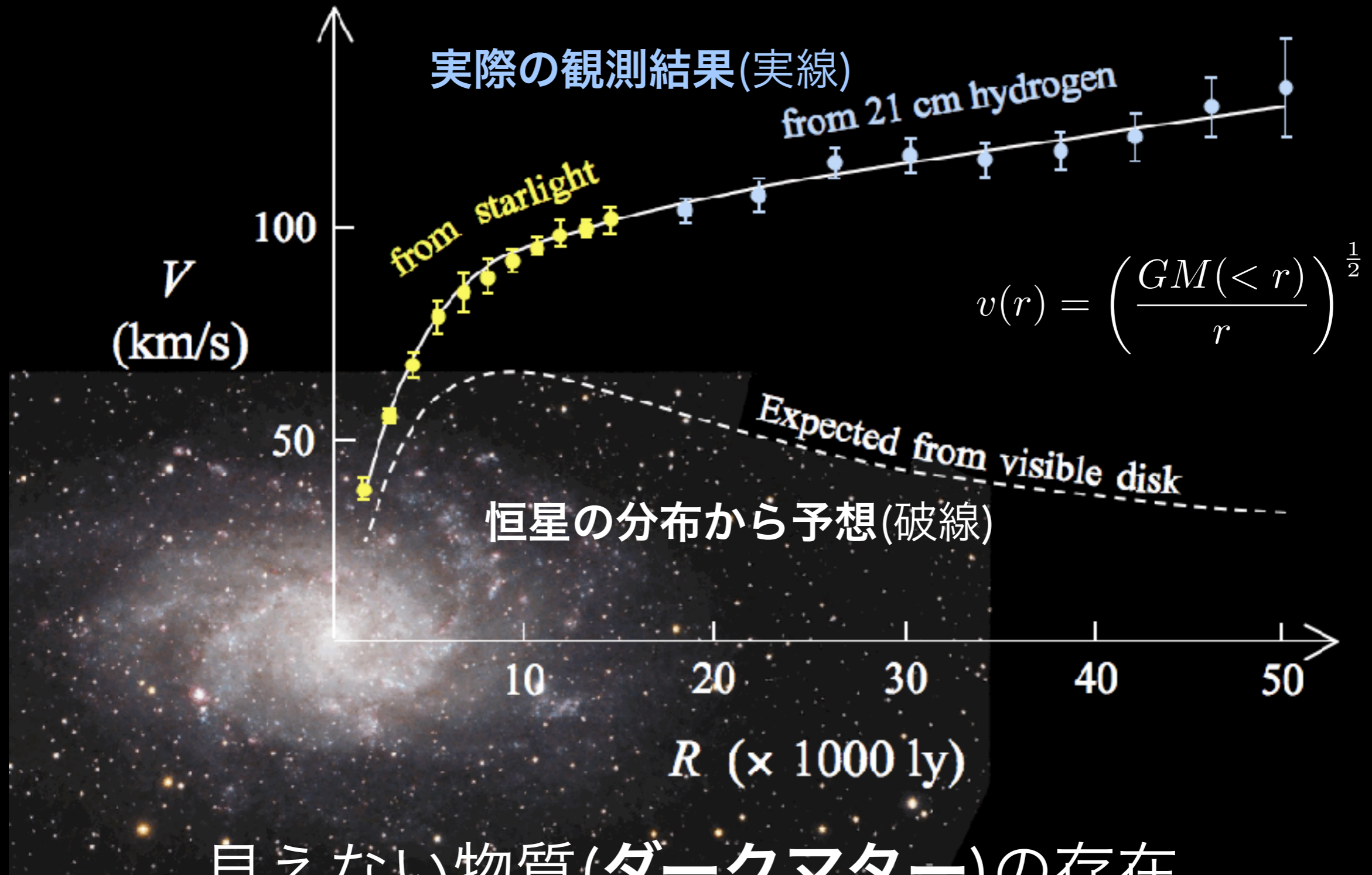
遠心力

重力



$$v(r) = \left( \frac{GM(< r)}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

# 銀河の回転速度

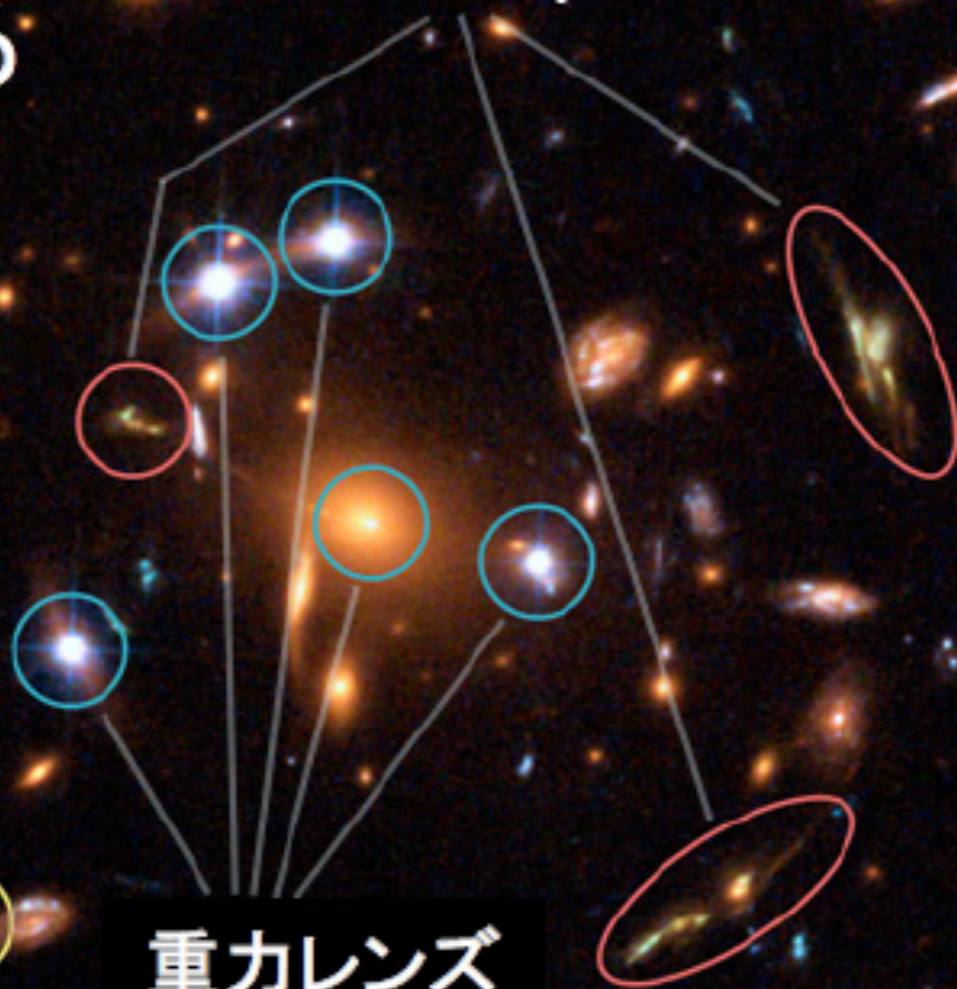




# ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重力レンズ SDSS J1004+4112

これだけ強く曲げる  
ためには大量の質  
量の存在が必要

重力レンズを  
受けた銀河



超新星

重力レンズ  
クエーザー

10"

# ダークマターの候補

## MACHO (Massive Compact Halo Object)

1. 褐色矮星・浮遊惑星
2. ブラックホール

## WIMPS (Weakly Interacting Massive particles)

1. ニュートリノ
2. 未知の素粒子

- ・ 観測されるMACHOの量は銀河の回転速度を説明できない  
⇒ MACHO以外にもダークマターは存在する
- ・ ダークマターの総量は通常物質より多い

# 距離の梯子

1. 太陽系内の距離 (~ 0.001光年)
2. 近くの恒星までの距離 (~ 1000光年)
3. 銀河系内の天体までの距離 (~ 1万光年)
4. 近傍の銀河までの距離 (~ 1千万光年)
5. 遠くの銀河までの距離 (~ 100億光年)

複数の測定方法をつないで大きな距離を測る

# 月までの距離

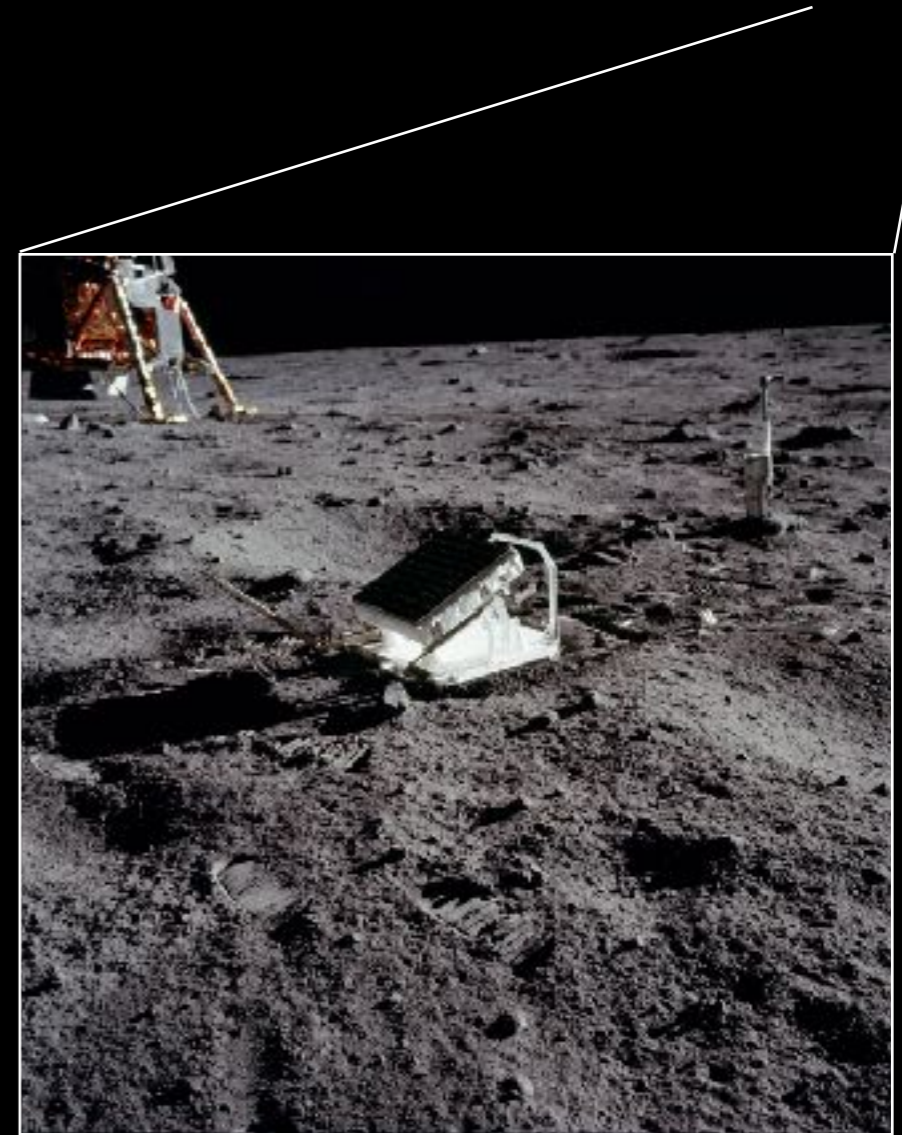
レーダー



反射

$$(\text{地球-月間の距離}) = \frac{(\text{レーダーの往復時間})/2}{(\text{光速})}$$

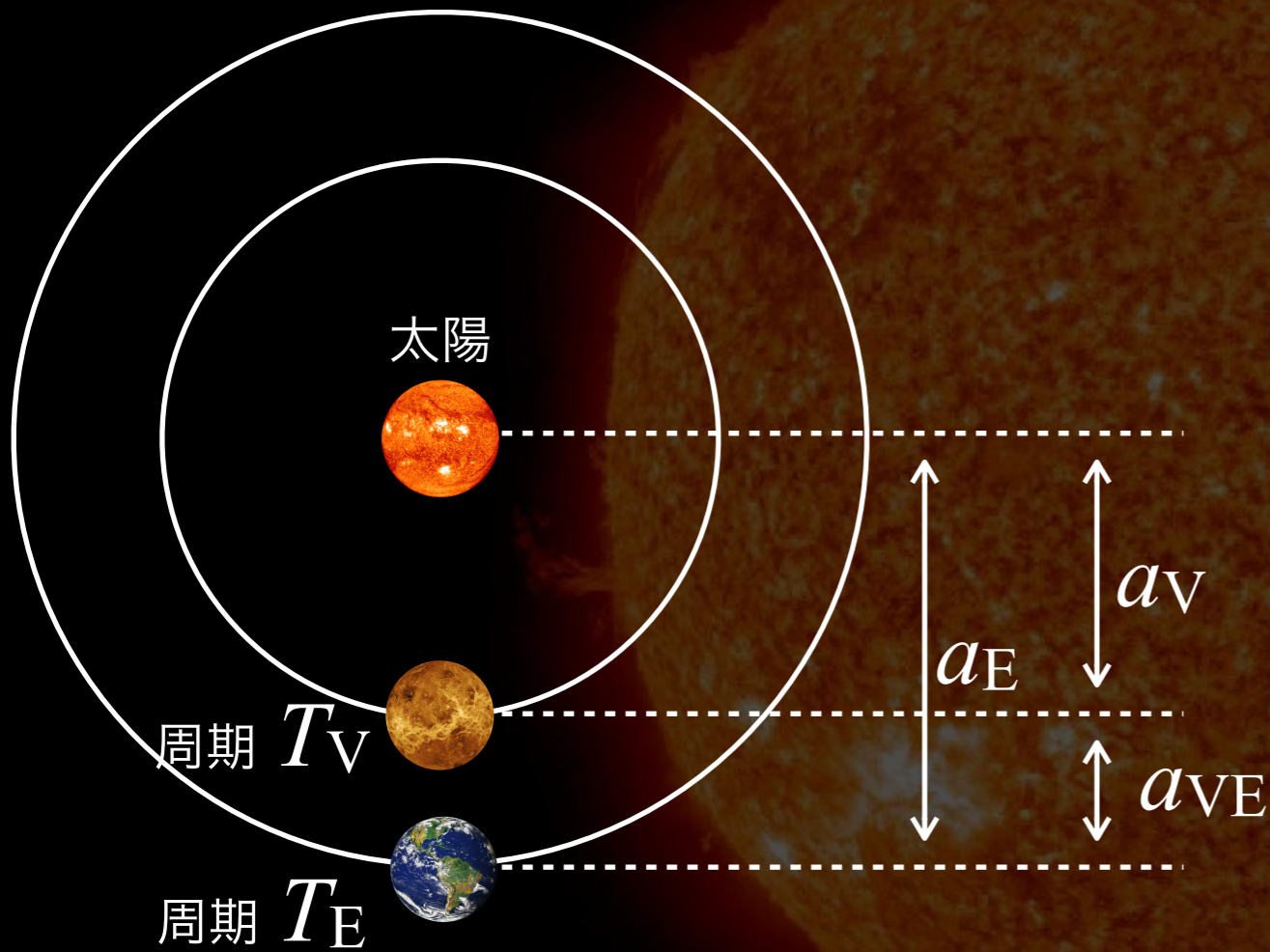
- ・ レーダーの到達時間を利用して、距離を測ることができる
- ・ 金星までの距離もレーダーを使って測定可能



アポロ11号が設置した反射プリズム (Credit NASA)

# 太陽までの距離

ケプラーの第3法則：惑星の公転周期の2乗は軌道長半径の3乗に比例



$$(a_V)^3 = k(T_V)^2$$

$$(a_E)^3 = k(T_E)^2$$

$$(a_E)^3 / (a_V)^3 = (T_E)^2 / (T_V)^2$$

$$a_E - a_V = a_{EV}$$

$a_{VE}$ ,  $T_E$ ,  $T_V$  から  
 $a_E$ ,  $a_V$  がわかる

太陽と地球の距離 = 149,597,892 km  $\equiv$  1 AU

# 距離の梯子

1. 太陽系内の距離 (~ 0.001光年)
2. 近くの恒星までの距離 (~ 1000光年)
3. 銀河系内の天体までの距離 (~ 1万光年)
4. 近傍の銀河までの距離 (~ 1千万光年)
5. 遠くの銀河までの距離 (~ 100億光年)

複数の測定方法をつないで大きな距離を測る

# 近傍の星までの距離 (~1000光年)

**年周視差**：地球の公転運動による天球上の見かけの恒星の位置の変化



<http://ksgeo.kj.yamagata-u.ac.jp/~kazsan/class/chronology/distance.html>

# 近傍の星までの距離

$$d = \frac{a_E}{\tan \theta}$$

$\theta$  は十分に小さい値をとるので、

$$d \simeq \frac{a_E}{\theta}$$

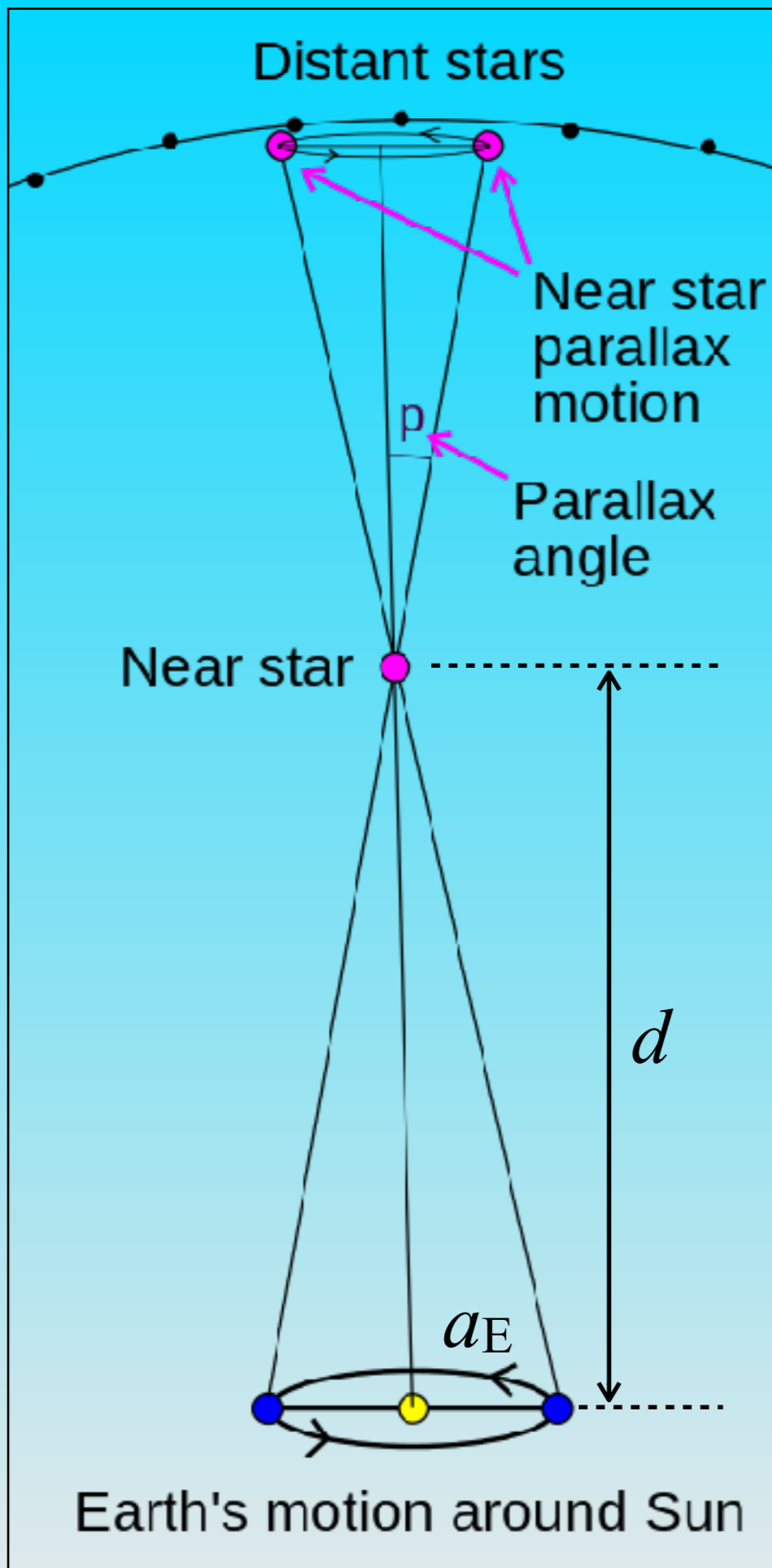
観測から  $\theta$  を求めることで、距離  $d$  がわかる

特に、

$\theta$  が1秒角に対応する時の距離  $d$

$= 3.085\,677\,581 \times 10^{16} \text{ m} (= 2.06 \times 10^5 \text{ AU} = 3.26 \text{ 光年})$

を 1 pc (パーセク) と定義する





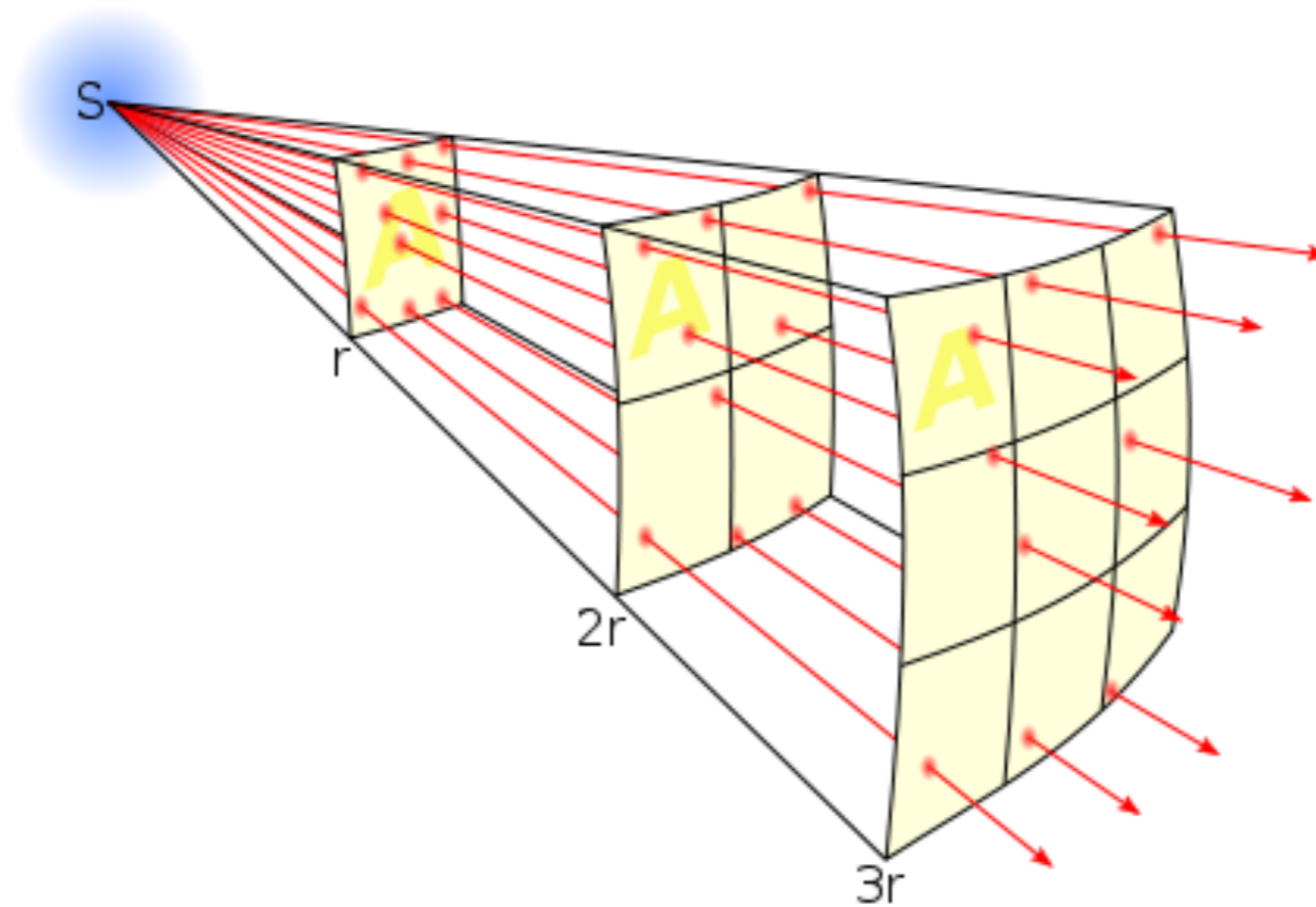
# 距離の梯子

1. 太陽系内の距離 (~ 0.001光年)
2. 近くの恒星までの距離 (~ 1000光年)
3. 銀河系内の天体までの距離 (~ 1万光年)
4. 近傍の銀河までの距離 (~ 1千万光年)
5. 遠くの銀河までの距離 (~ 100億光年)

複数の測定方法をつないで大きな距離を測る

# 系外銀河の距離

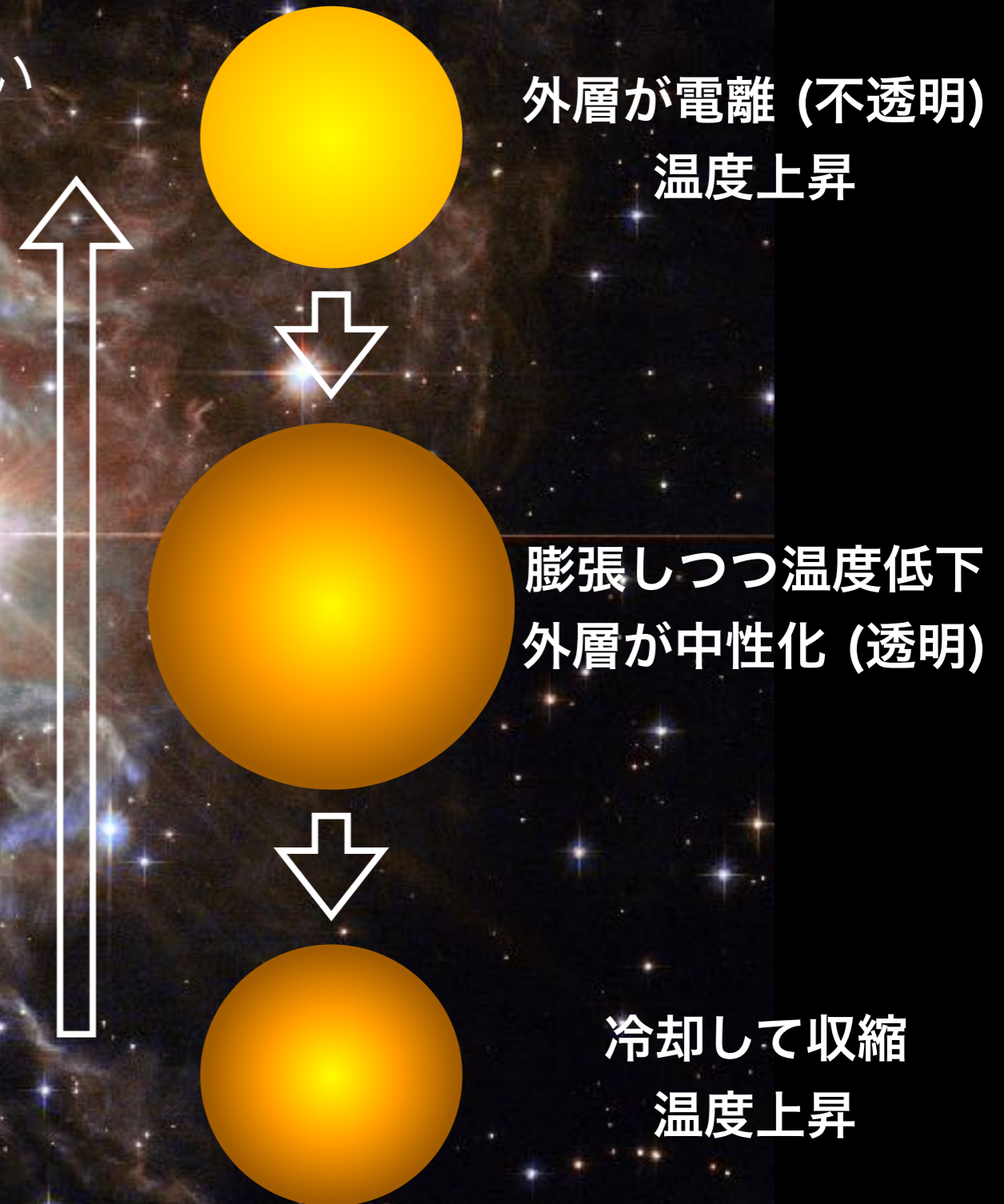
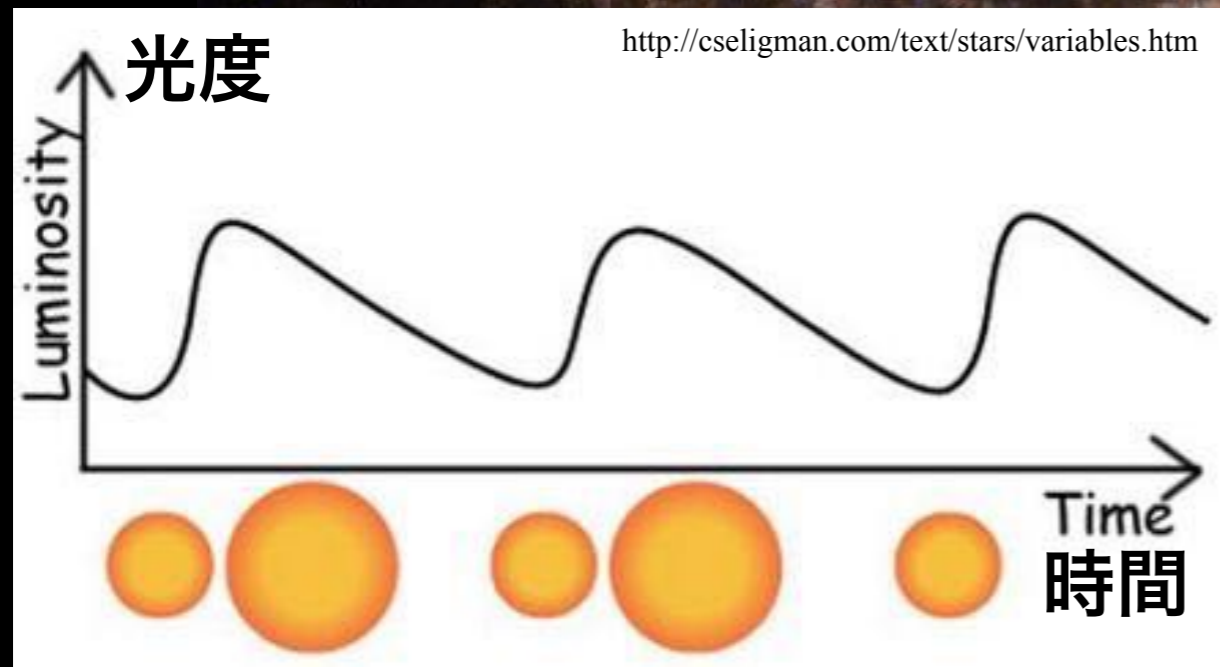
- ・ 系外銀河の距離は 数万~数億光年 もしくはそれ以上
- ・ 絶対光度がわかっている特殊な天体(変光星・超新星)を使う



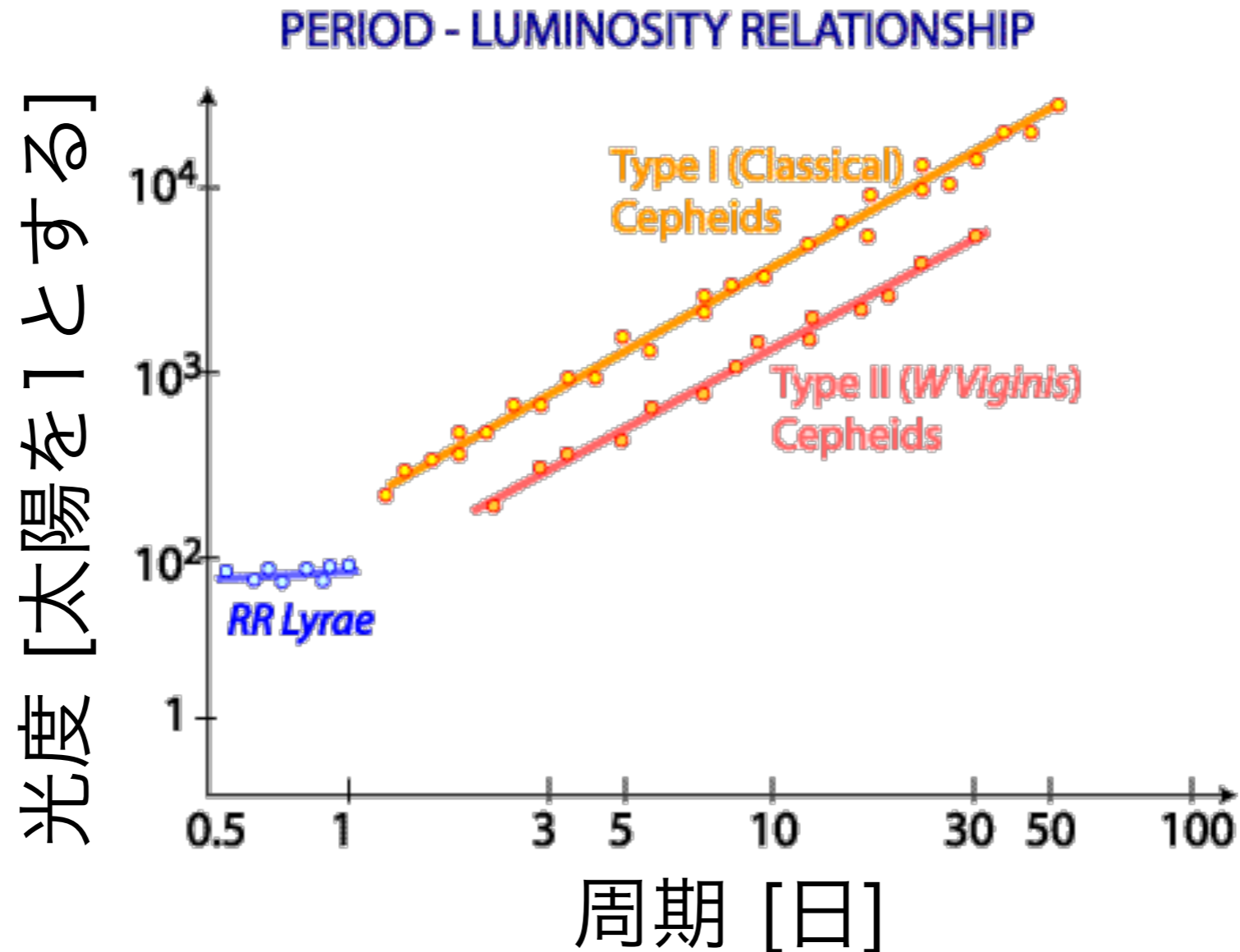
逆2乗の法則：見かけの光度は距離の2乗に反比例して減少

# セファイド型変光星

太陽の1000倍から10万倍程度明るい  
⇒ 観測しやすい



# セファイド型変光星



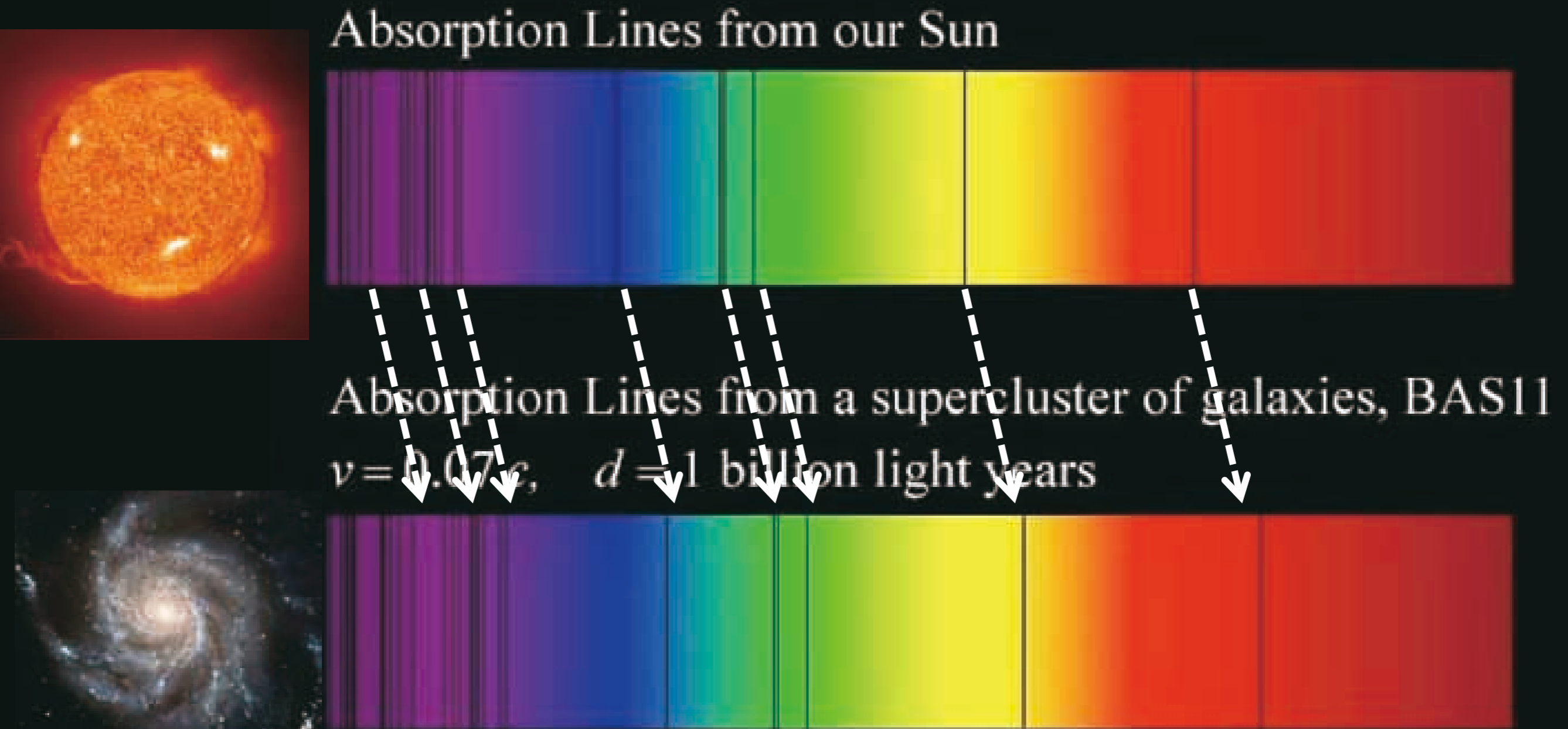
[http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable\\_cepheids.html](http://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html)

- ・ まず、近傍の星から周期と絶対光度の関係を得る
- ・ 近傍(～数千万光年)の銀河の中のセファイド型変光星を観測することで、見かけの光度から距離を計算することができる



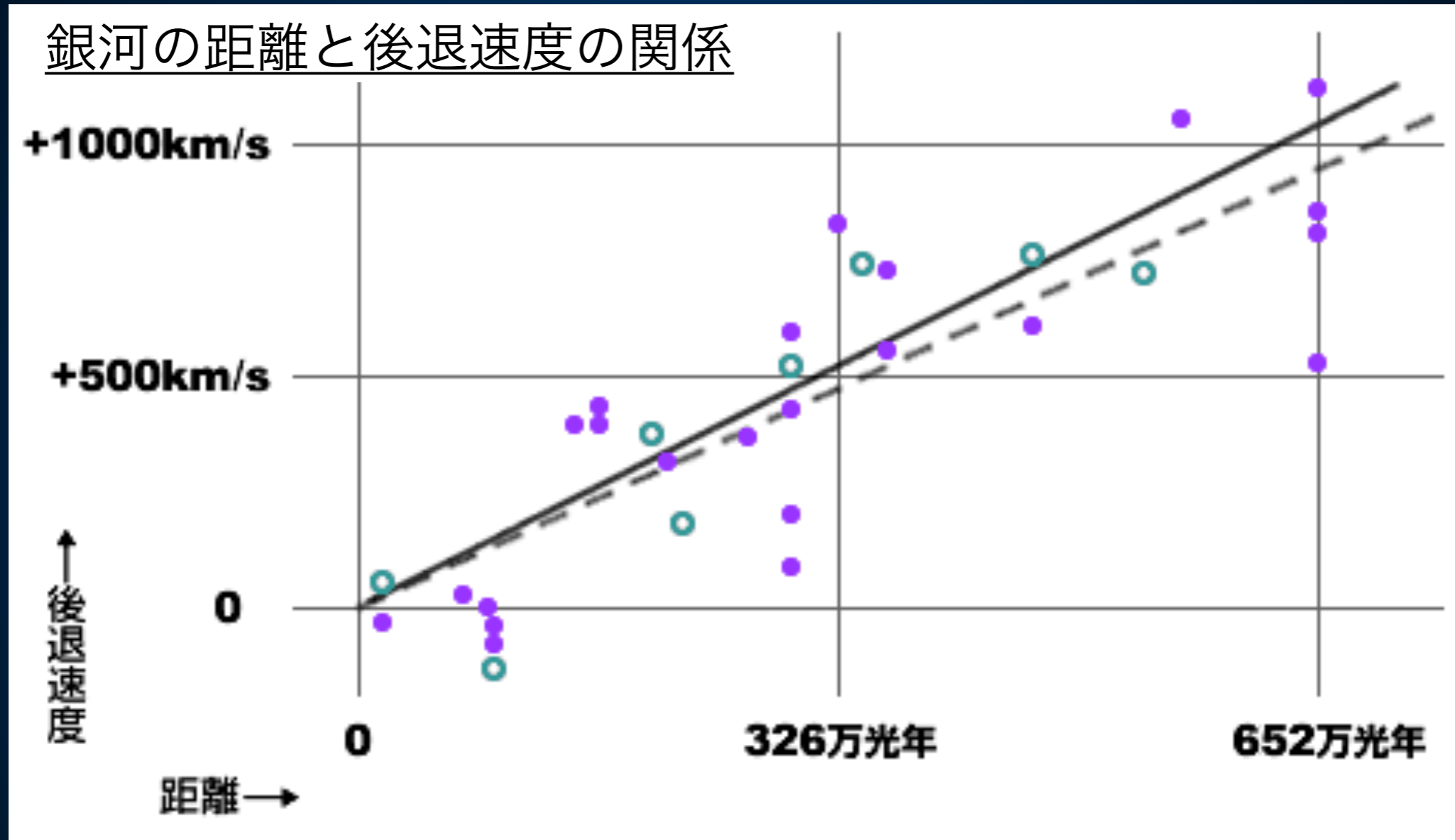
**Cepheid Variable Star V1 in M31**  
*Hubble Space Telescope* ■ WFC3/UVIS

# 後退速度（赤方偏移）の測定



後退速度0.07cの銀河からのスペクトル（シミュレーション）

# セファイド型変光星観測による膨張宇宙の発見



<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/theory/theory01.html>

ハッブルの法則：銀河の後退速度が距離に比例

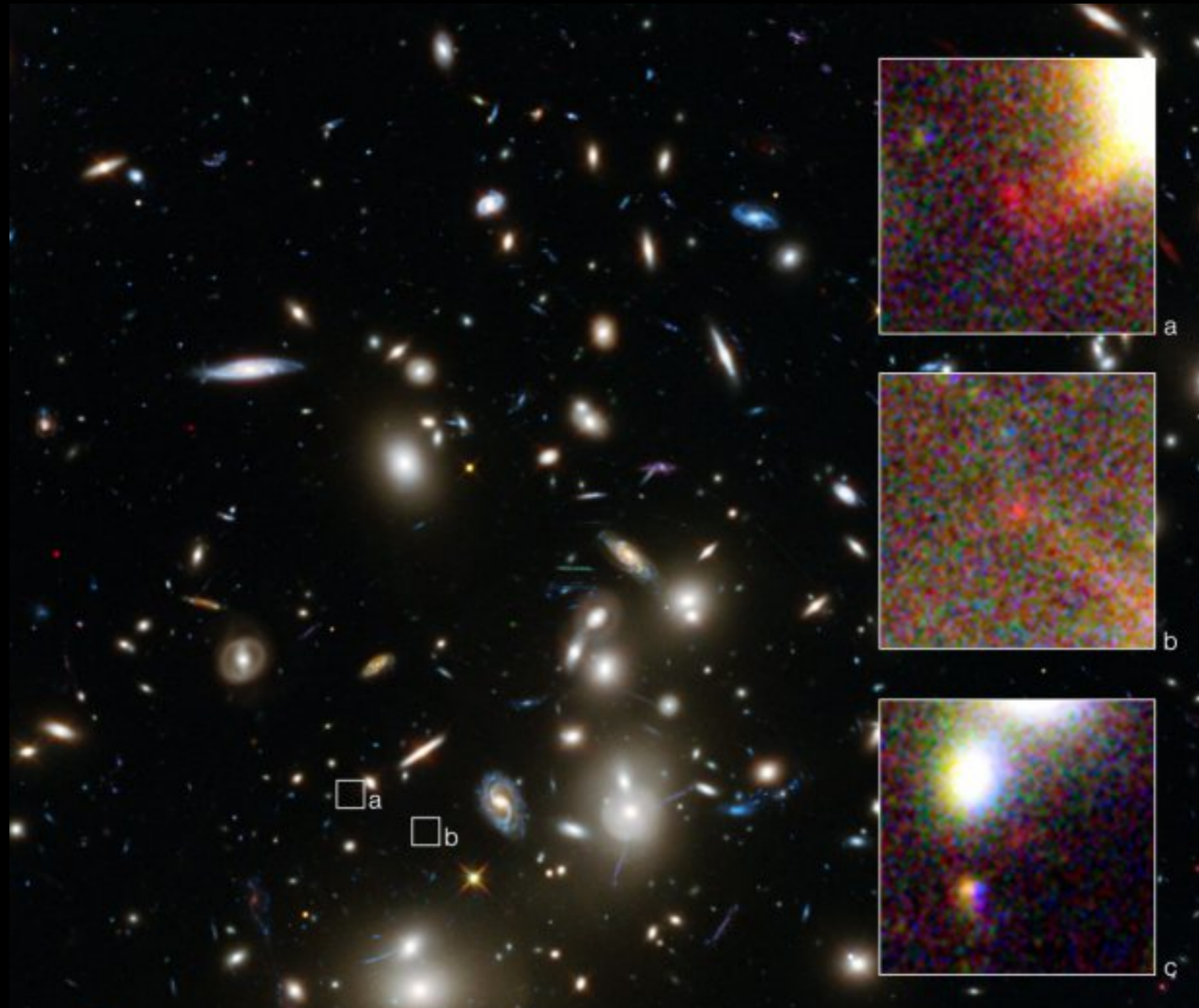
# 距離の梯子

1. 太陽系内の距離 (~ 0.001光年)
2. 近くの恒星までの距離 (~ 1000光年)
3. 銀河系内の天体までの距離 (~ 1万光年)
4. 近傍の銀河までの距離 (~ 1千万光年)
5. 遠くの銀河までの距離 (~ 100億光年)

複数の測定方法をつないで大きな距離を測る



# 遠方の銀河の距離



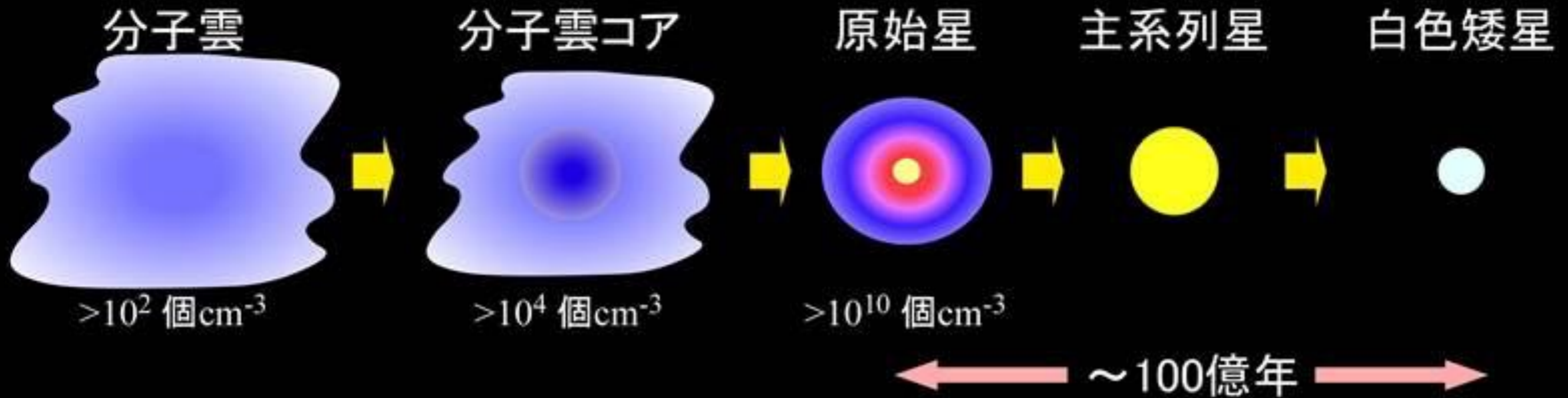
数億光年以上離れた銀河の場合、  
明るいセファイド型変光星でも観測が困難 ⇒ 超新星を使う

# 超新星とは

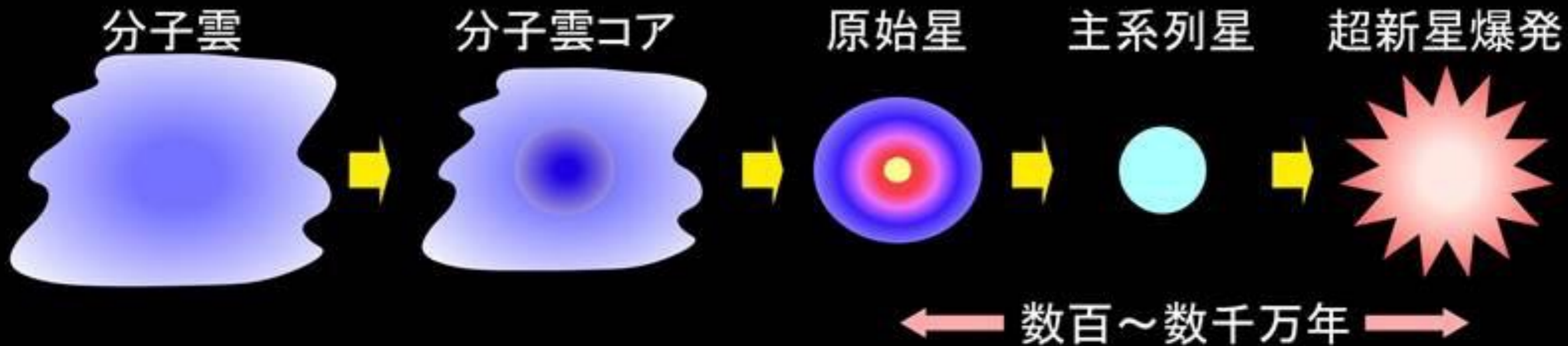


- ・ 質量の大きい恒星の最期に起こる大爆発
- ・ 銀河全体と同程度の光を放つ
- ・ ひとつの銀河の中で 40~200年に1度程度の頻度
- ・ 我々の銀河系では1604年の発見が最後

## 小質量星の進化

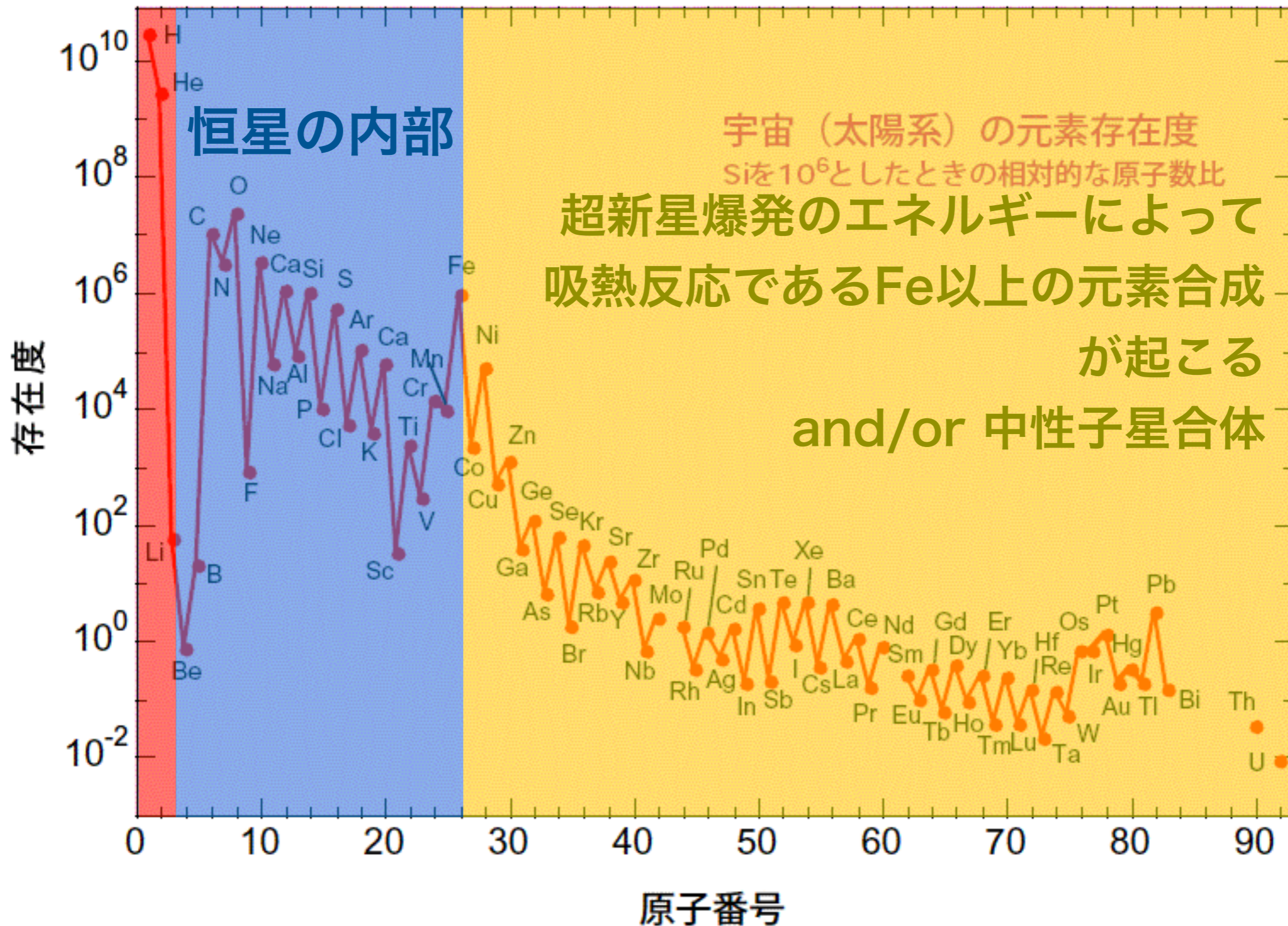


## 大質量星の進化



# 超新星元素合成

ビッグバン



# 超新星爆発の数値シミュレーション

4D2U

# 超新星の分類

I型超新星：スペクトルに水素の吸収線が見られない

Ia型：ケイ素の吸収線が見られる ⇒ **特殊な連星系の最期**

Ib型：ヘリウムの吸収線が見られる

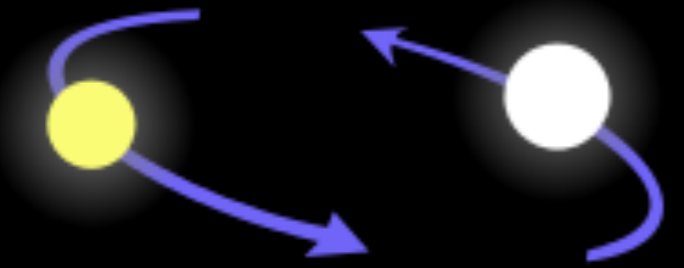
Ic型：ケイ素・ヘリウムのどちらの吸収線も見られない

II型超新星：スペクトルに水素の吸収線が見られる

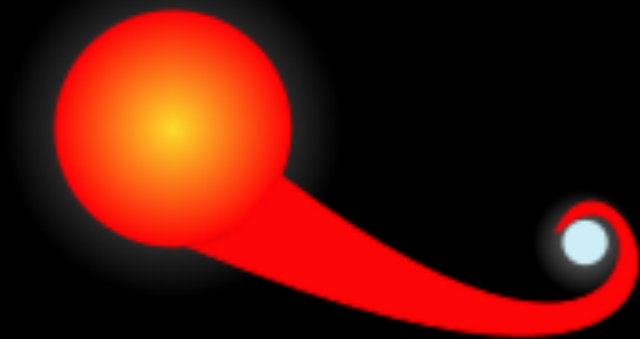
**大質量星の最期**

※ある元素の吸収線の存在 ⇒ その元素が観測天体に存在

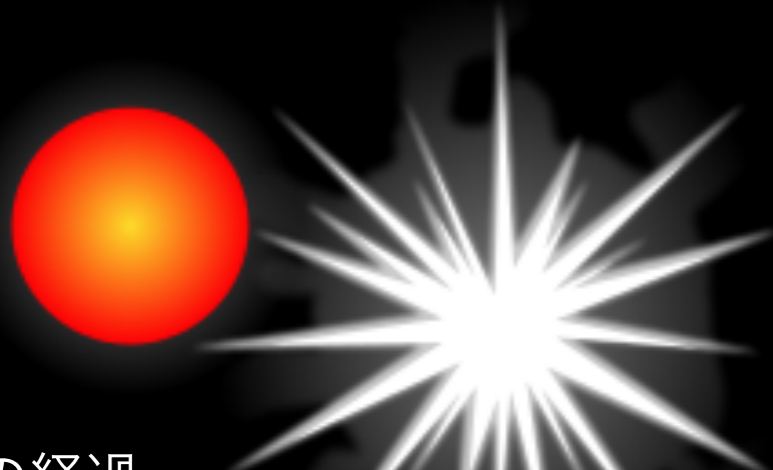
# Ia型超新星



質量の異なる連星系

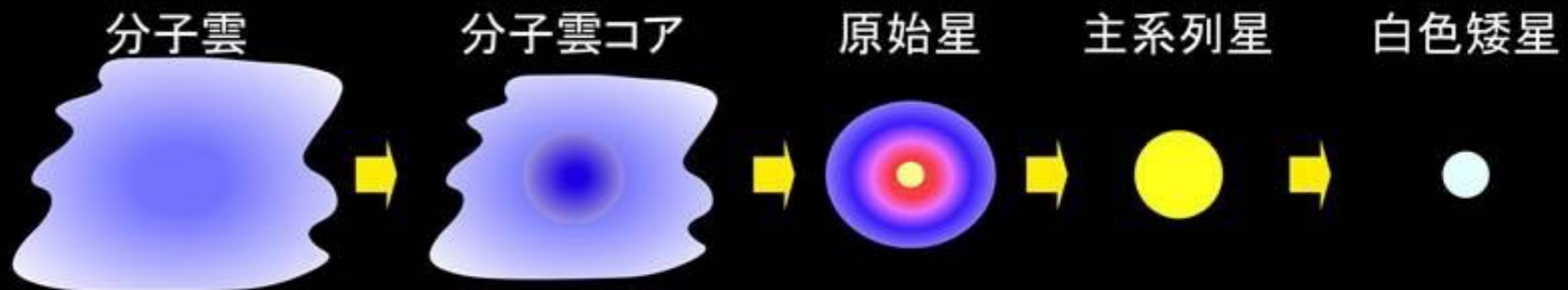


白色矮星と巨星に進化  
(質量降着)



超新星爆発

## 小質量星の進化



## 機構

- ・ 連星からの質量降着によって白色矮星が超新星爆発

## 特徴

- ・ 超新星の中で最も明るい
- ・ どの銀河にいつ出現しても同じ性質を持つ

# 遠方銀河の中の超新星

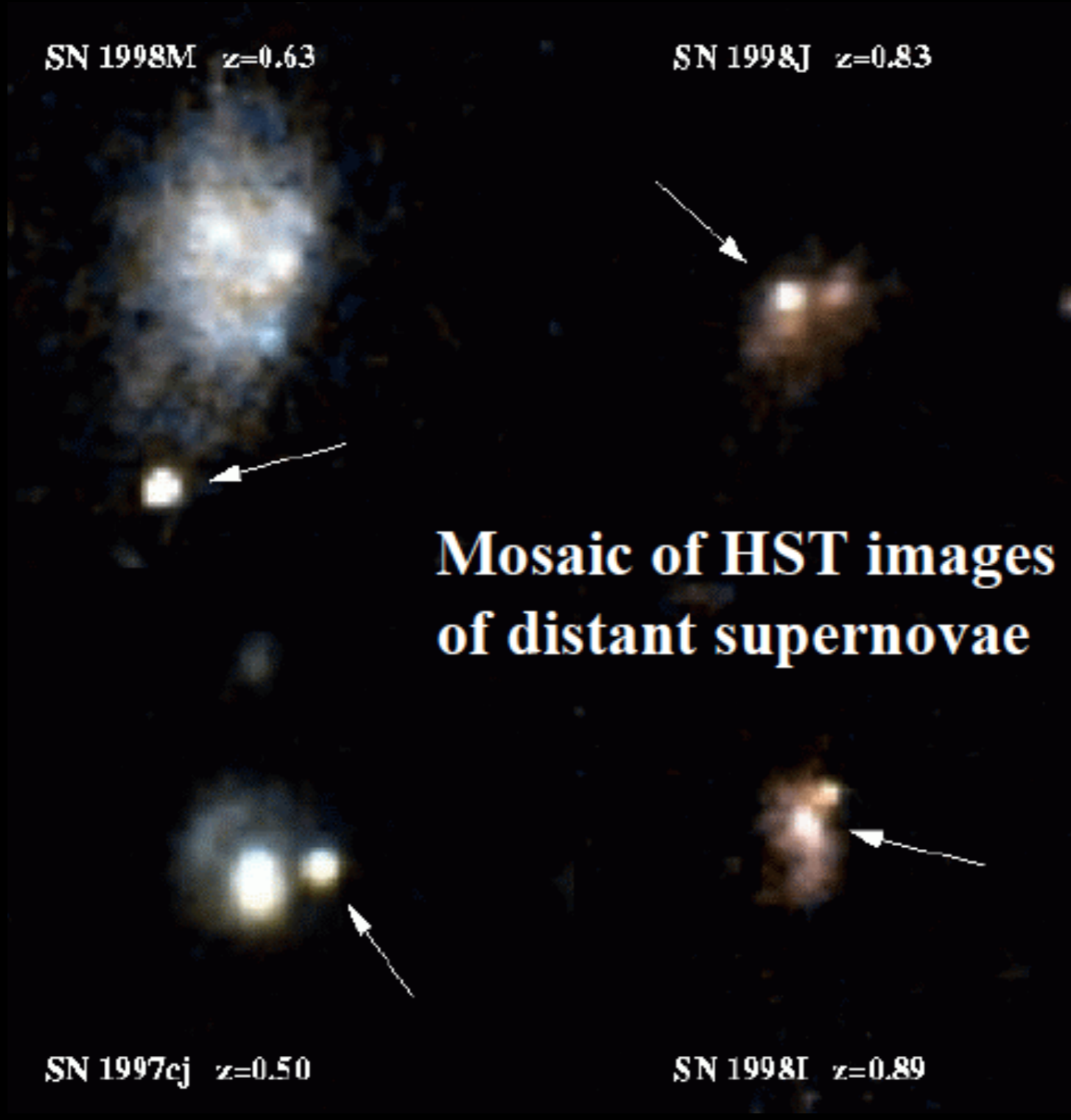
SN 1998M  $z=0.63$

SN 1998J  $z=0.83$

**Mosaic of HST images  
of distant supernovae**

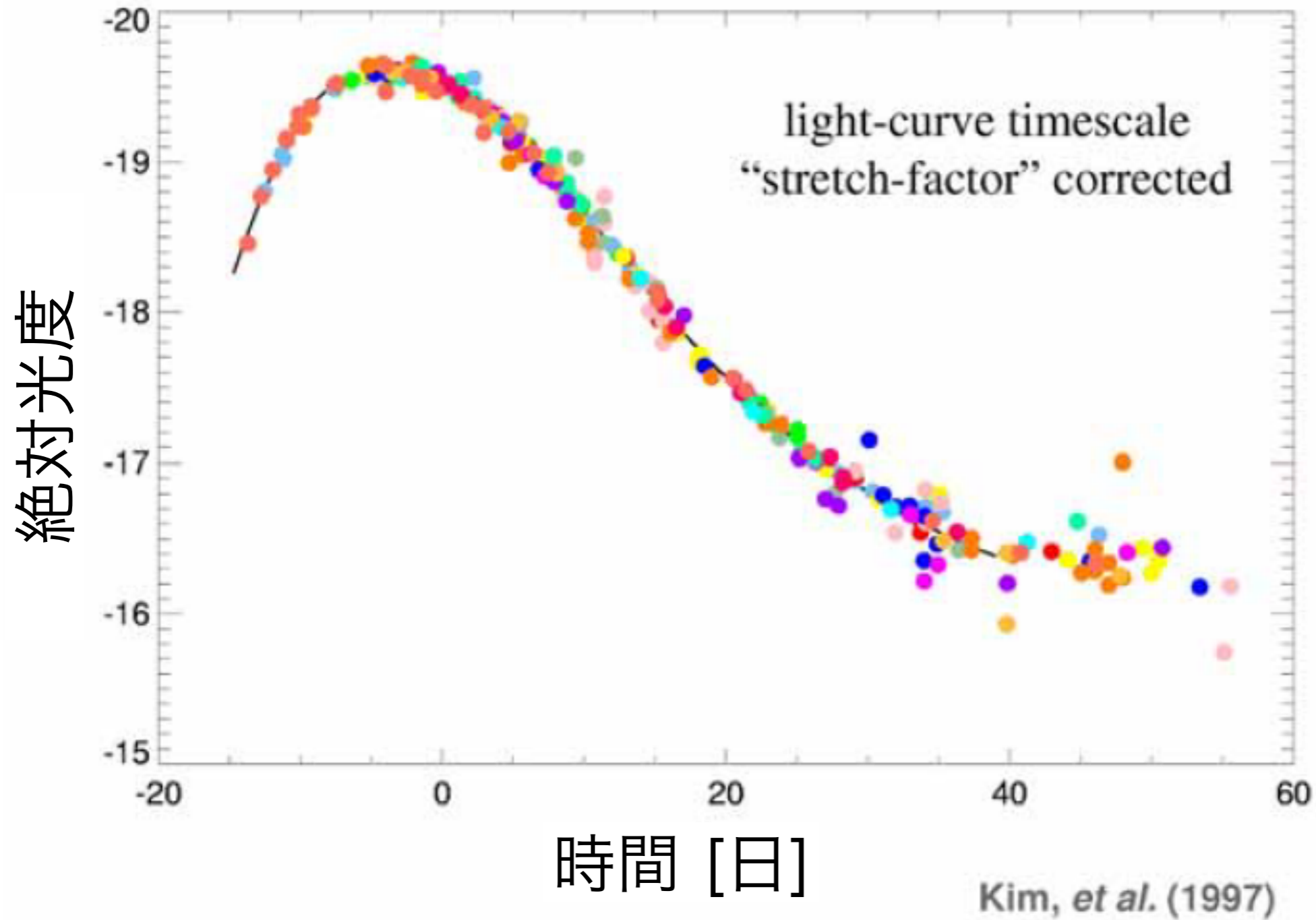
SN 1997cj  $z=0.50$

SN 1998I  $z=0.89$



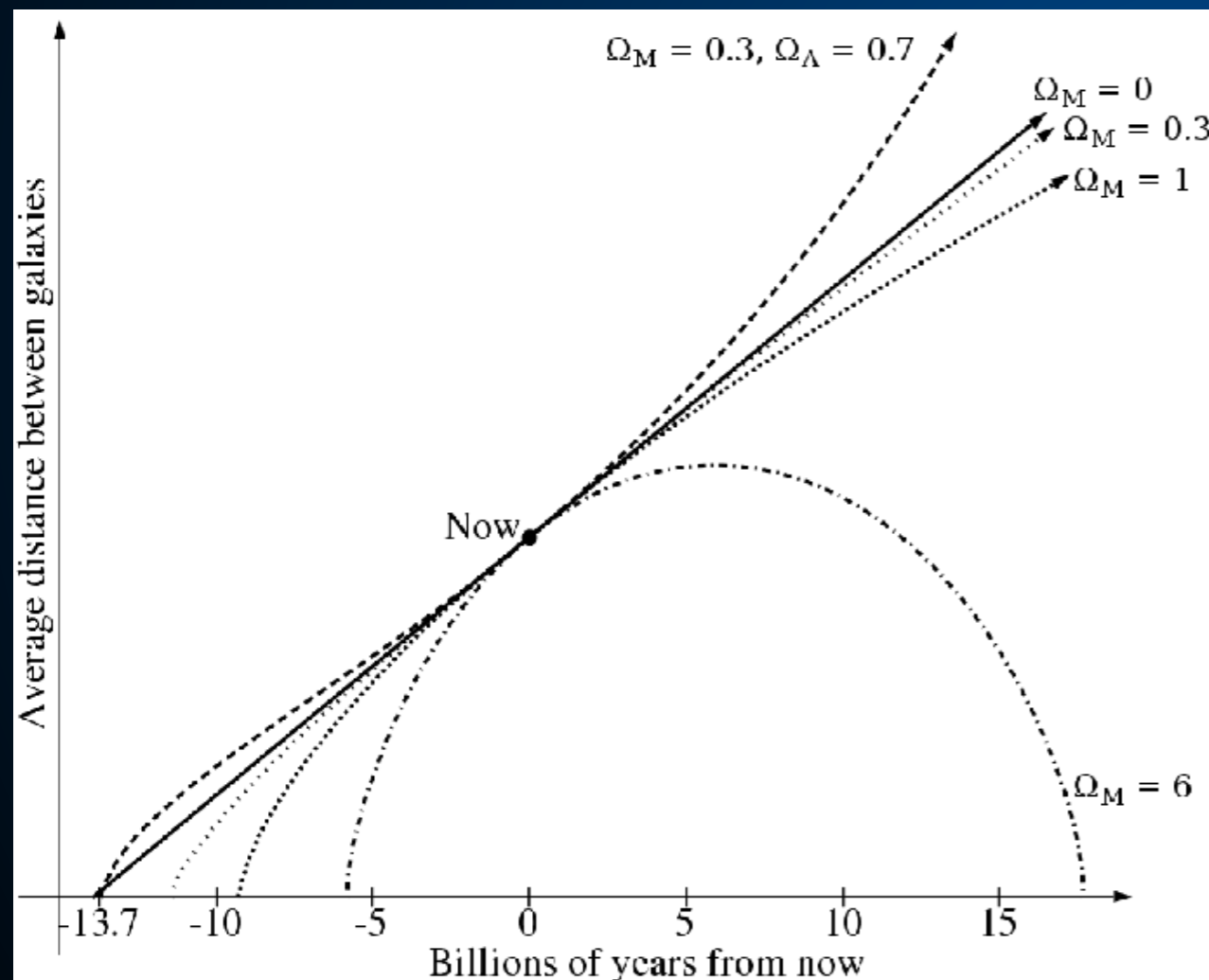


# Ia型超新星の光度曲線



# 超新星観測による宇宙加速膨張の発見

物質による引力だけが存在すると仮定した場合の予想より  
実際の遠方の銀河の距離は遠かった



## 宇宙の斥力：宇宙項の復活

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

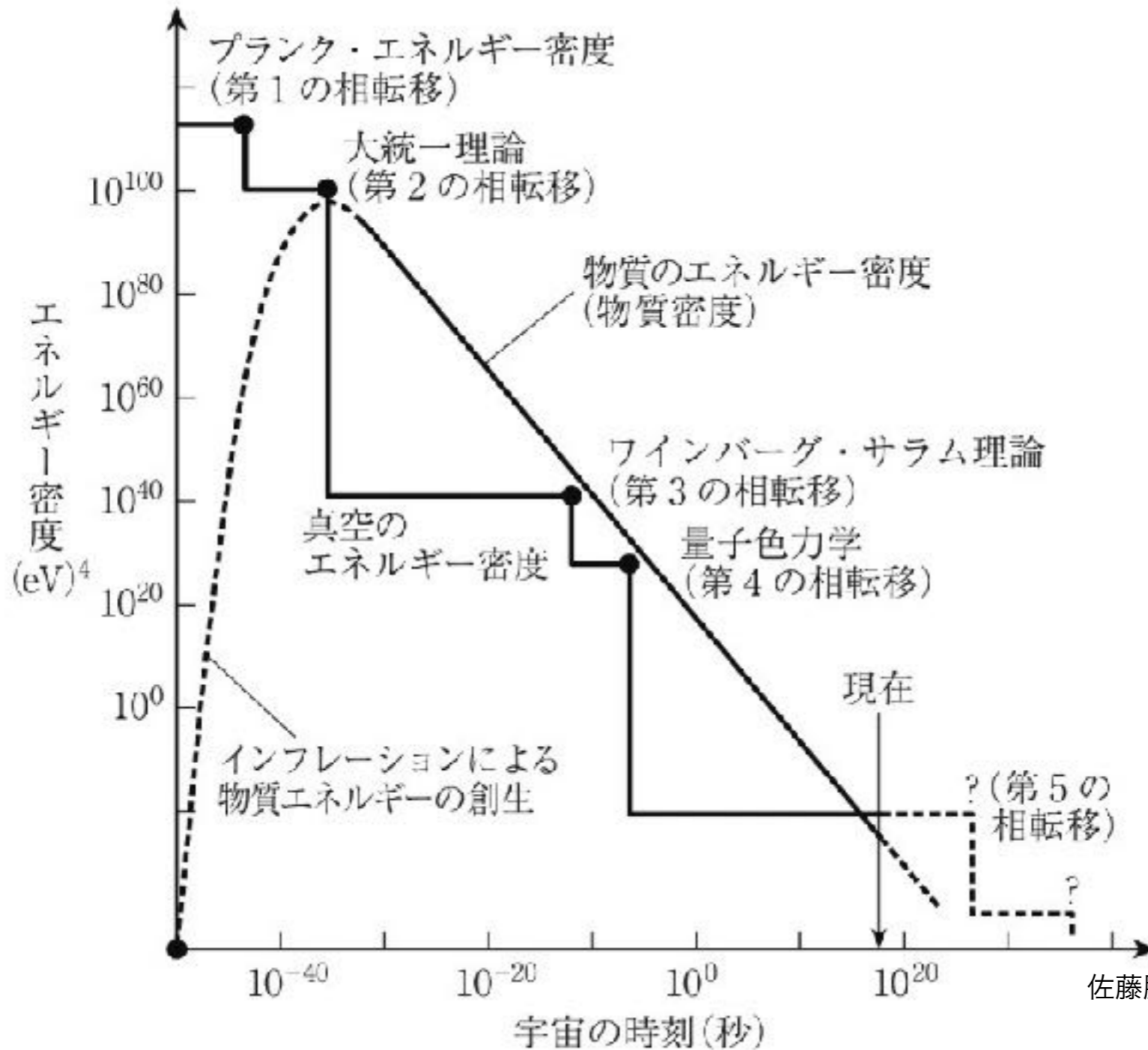
時空の歪み      物質の分布      宇宙項

ダークエネルギーと呼ばれ、

その正体は不明

真空のエネルギーも候補の一つ

# 宇宙の未来



佐藤勝彦『宇宙論入門』岩波新書より

- ・ ダークエネルギーの正体が宇宙の運命を決める
- ・ 真空のエネルギーがその正体の場合、真空の相転移がない限り加速膨張を続ける

# まとめ

## 距離の梯子

- ・ 電波の往復時間 ⇒ 月・金星までの距離
- ・ ケプラーの第3法則 ⇒ 太陽までの距離
- ・ 年周視差 ⇒ 近傍の星までの距離
- ・ セファイド型変光星 ⇒ 近傍銀河までの距離
- ・ (Ia型)超新星 ⇒ 遠方銀河までの距離

## 宇宙の組成

通常物質に加えて、

- ・ 銀河の回転則 ⇒ ダークマター
- ・ 宇宙の加速膨張 ⇒ ダークエネルギー

# 参考文献

- ・ 宇宙論入門—誕生から未来へ (佐藤勝彦, 岩波新書)
- ・ シリーズ現代の天文学 宇宙論 I・II (日本評論社)

# レポート課題 (黒川担当分)

「星と惑星の形成」(第5回) または

「宇宙誕生から現在までの歴史」(第11回)

のどちらかについて

他人が読んでもわかりやすいように要点をまとめよ。

文章の他に、イラスト・図などを用いてもよい。

(A4レポート用紙1枚以内)

**提出先：レポートボックス**

**提出期限：12/13(水) 17時**

# スケジュール 2

11/22 天体観測 (大宮)

11/29 超新星・宇宙論 (1) (黒川)

12/6 超新星・宇宙論 (2) (黒川)

12/13 初期宇宙と構造形成 (1) (林)

12/20 初期宇宙と構造形成 (2) (林)

1/10 全体のまとめ (大宮)