

宇宙論・超新星

天文学概論 第11回

The Tadpole Galaxy — UGC 10214



HUBBLESITE.org

担当教員

高梨 直紘 (東京大学 生産技術研究所)
naohiro.takanashi@emp.u-tokyo.ac.jp

専 門

- ・ 観測的宇宙論 (宇宙膨張の測定)
- ・ 科学コミュニケーション

講義の内容

■ 宇宙全体の俯瞰

→ 前回の内容

■ 観測的宇宙論（超新星）

(mitaka)

宇宙図の見方

宇宙図とは、宇宙の構造や進化を視覚的に表現した図である。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。宇宙図の見方には、いくつかのポイントがある。

- 1. 宇宙の膨張: 宇宙は膨張している。宇宙図には、宇宙の膨張を示す矢印や、膨張の速度を示す数値が描かれている。
- 2. 銀河の分布: 宇宙には、数億個の銀河が存在している。宇宙図には、銀河の分布を示す点や、銀河の形状を示す図が描かれている。
- 3. 星の形成: 星は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。宇宙図には、星の形成を示す図や、星の寿命を示す数値が描かれている。

宇宙とはなんだろう?

宇宙とは、私たちの生活圏を超えた、無限の空間と時間のことである。宇宙には、数億個の銀河が存在し、数兆個の星が存在している。宇宙の起源や進化については、多くの科学者が研究している。

- 1. 宇宙の起源: 宇宙は、約138億年前にビッグバンによって誕生したとされている。
- 2. 宇宙の進化: 宇宙は膨張し続けている。膨張の速度は、宇宙の密度や温度によって変化する。
- 3. 宇宙の未来: 宇宙の未来については、多くの説がある。宇宙は膨張し続けるのか、それとも収縮するのか、それによって宇宙の未来は大きく異なる。

太陽系天体に生命を求めて

太陽系天体に生命を求めて、多くの科学者が研究している。火星や木星の衛星などに、生命の存在の可能性が示されている。

- 1. 火星: 火星には、かつて水が存在していたとされている。火星には、生命の存在の可能性が示されている。
- 2. 木星の衛星: 木星の衛星には、多くの液体の水が存在している。木星の衛星には、生命の存在の可能性が示されている。
- 3. 土星の衛星: 土星の衛星には、多くの液体の水が存在している。土星の衛星には、生命の存在の可能性が示されている。

もうひとつの地球を探して

もうひとつの地球を探して、多くの科学者が研究している。宇宙には、数億個の地球のような惑星が存在している。宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。

- 1. 宇宙には、数億個の地球のような惑星が存在している。
- 2. 宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。
- 3. 宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。

宇宙はどのように生まれたのか?

私たちの生活圏を超えた、無限の空間と時間のことである。宇宙の起源や進化については、多くの科学者が研究している。

- 1. 宇宙の起源: 宇宙は、約138億年前にビッグバンによって誕生したとされている。
- 2. 宇宙の進化: 宇宙は膨張し続けている。膨張の速度は、宇宙の密度や温度によって変化する。
- 3. 宇宙の未来: 宇宙の未来については、多くの説がある。宇宙は膨張し続けるのか、それとも収縮するのか、それによって宇宙の未来は大きく異なる。

宇宙図の中へ

宇宙図の中へ、宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 宇宙の膨張: 宇宙は膨張している。宇宙図には、宇宙の膨張を示す矢印や、膨張の速度を示す数値が描かれている。
- 2. 銀河の分布: 宇宙には、数億個の銀河が存在している。宇宙図には、銀河の分布を示す点や、銀河の形状を示す図が描かれている。
- 3. 星の形成: 星は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。宇宙図には、星の形成を示す図や、星の寿命を示す数値が描かれている。

人間の材料はどこから来たのか?

私たちの人間体は、宇宙の材料からできている。宇宙には、数億個の地球のような惑星が存在している。宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。

- 1. 宇宙には、数億個の地球のような惑星が存在している。
- 2. 宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。
- 3. 宇宙には、生命の存在の可能性が示されている。

宇宙の誕生から、生命が生まれた

宇宙の誕生から、生命が生まれた。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 宇宙の誕生: 宇宙は、約138億年前にビッグバンによって誕生したとされている。
- 2. 生命の誕生: 生命は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。生命の誕生は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。
- 3. 生命の誕生: 生命は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。生命の誕生は、宇宙の膨張とともに形成されてきた。

生命を生み出すステージが整う

生命を生み出すステージが整う。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 生命を生み出すステージが整う。
- 2. 生命を生み出すステージが整う。
- 3. 生命を生み出すステージが整う。

元素がばらばら、星の大爆発

元素がばらばら、星の大爆発。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 元素がばらばら、星の大爆発。
- 2. 元素がばらばら、星の大爆発。
- 3. 元素がばらばら、星の大爆発。

一生を終え、宇宙に溶ける星

一生を終え、宇宙に溶ける星。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 一生を終え、宇宙に溶ける星。
- 2. 一生を終え、宇宙に溶ける星。
- 3. 一生を終え、宇宙に溶ける星。

年老いた星は、元素の工場

年老いた星は、元素の工場。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 年老いた星は、元素の工場。
- 2. 年老いた星は、元素の工場。
- 3. 年老いた星は、元素の工場。

成熟し、宇宙に輝く星

成熟し、宇宙に輝く星。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 成熟し、宇宙に輝く星。
- 2. 成熟し、宇宙に輝く星。
- 3. 成熟し、宇宙に輝く星。

星の誕生と成長

星の誕生と成長。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 星の誕生と成長。
- 2. 星の誕生と成長。
- 3. 星の誕生と成長。

元素は宇宙を流転する

元素は宇宙を流転する。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 元素は宇宙を流転する。
- 2. 元素は宇宙を流転する。
- 3. 元素は宇宙を流転する。

宇宙の誕生から、生命が生まれた

宇宙の誕生から、生命が生まれた。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 宇宙の誕生から、生命が生まれた。
- 2. 宇宙の誕生から、生命が生まれた。
- 3. 宇宙の誕生から、生命が生まれた。

時間と空間の始まり

時間と空間の始まり。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 時間と空間の始まり。
- 2. 時間と空間の始まり。
- 3. 時間と空間の始まり。

宇宙の誕生にけさる

宇宙の誕生にけさる。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 宇宙の誕生にけさる。
- 2. 宇宙の誕生にけさる。
- 3. 宇宙の誕生にけさる。

宇宙の誕生

宇宙の誕生。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を、一つの図にまとめて表現している。

- 1. 宇宙の誕生。
- 2. 宇宙の誕生。
- 3. 宇宙の誕生。

宇宙とはなんだろうか？

科学とはなんだろうか？

宇宙図の見方

宇宙図の見方
宇宙図は、宇宙の構造や進化を視覚的に表現した図です。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を一目で理解することができます。

こんなことがなぜわかるのか？

宇宙はどのように生まれたのか？

私たちの知る宇宙の始まりは、ビッグバン理論に基づいています。約138億年前、宇宙は一点から爆発的に膨張し、現在の宇宙の姿になりました。

推測される「現在の宇宙」の姿

現在の宇宙は、膨張し続けている状態にあります。銀河同士は互いに遠ざかり、星々も互いに離れていっています。宇宙の未来は、膨張の速度によって変わります。

宇宙に現れる星の目

宇宙には、数えきれないほどの星があります。私たちの目で見える星は、ほんの一部分に過ぎません。宇宙の深奥には、まだまだ多くの星が隠れています。

最初の星が宇宙に灯る

宇宙の誕生後、最初の星が形成されました。これらの星は、宇宙の最初の光を放ち、宇宙の進化を促しました。

原子が登場し、宇宙が暗くなる

最初の星が燃え尽きた後、宇宙は再び暗くなりました。原子が形成され、宇宙は静寂のうちにありました。

すべてを生み出した3分間

宇宙の誕生から3分間、高温高圧の状態で、物質が形成されました。この期間、宇宙の基本的な構造が定まりました。

超高温の火の玉宇宙

宇宙の誕生直後、超高温の火の玉状態でした。この状態から、宇宙は徐々に冷却されていきました。

時間と空間の始まり

宇宙の誕生は、時間と空間の始まりでもあります。この瞬間から、宇宙の歴史が始まりました。

宇宙の誕生にけさる

宇宙の誕生は、私たちの目には見えませんが、科学者たちは様々な証拠から、その瞬間を推測しています。

太陽系天体に生命を求めて

太陽系天体に生命を求めて
地球以外の天体に生命が存在する可能性は、科学者たちによって研究されています。火星や木星の衛星など、いくつかの天体には、生命が存在する可能性があります。

もうひとつの地球を探して

もうひとつの地球を探して
地球以外の天体に、地球と似たような環境が存在する可能性があります。このような天体を探し出すことが、人類の未来にとって重要です。

人間の材料はどこから来たのか？

人間の材料はどこから来たのか？
私たちの体は、宇宙の物質から成り立っています。星の爆発によって、宇宙に物質が散らばり、それが最終的に私たちの体になりました。

さまざまな元素から、生命が生まれた

さまざまな元素から、生命が生まれた
生命の誕生には、様々な化学元素が必要です。これらの元素は、宇宙の物質から形成されました。

生命を生み出すステージが整う

生命を生み出すステージが整う
生命の誕生には、適切な環境が必要です。地球は、生命を生み出すための完璧な環境を提供しました。

元素がばらばら、星の大爆発

元素がばらばら、星の大爆発
星の爆発は、宇宙に様々な元素を散らばります。これらの元素は、新しい星の形成に役立ちます。

一生を終え、宇宙に溶ける星

一生を終え、宇宙に溶ける星
星は一生を終ると、宇宙に溶け込んでしまいます。この過程は、宇宙の進化の一部です。

年老いた星は、元素の工場

年老いた星は、元素の工場
年老いた星は、新しい元素を生成する工場のようなものです。これらの元素は、宇宙に散らばります。

成熟し、宇宙に輝く星

成熟し、宇宙に輝く星
星は成熟すると、宇宙に輝き始めます。これらの星は、宇宙の美しさを演出しています。

星の誕生と成長

星の誕生と成長
星の誕生と成長は、宇宙の進化の重要な部分です。これらの過程は、宇宙の未来を決定づけます。

元素は宇宙を流転する

元素は宇宙を流転する
元素は宇宙を流転し、新しい星の形成に役立ちます。この過程は、宇宙の循環の一部です。

宇宙図の中

宇宙図の中
宇宙図は、宇宙の構造を視覚的に表現した図です。宇宙の膨張や、銀河の分布、星の形成など、宇宙の様々な現象を一目で理解することができます。

宇宙の始まり

宇宙の始まり
宇宙の始まりは、ビッグバン理論に基づいています。約138億年前、宇宙は一点から爆発的に膨張し、現在の宇宙の姿になりました。

宇宙の未来

宇宙の未来
宇宙の未来は、膨張の速度によって変わります。宇宙は、膨張し続けている状態にあります。

宇宙の現在

宇宙の現在
宇宙の現在は、膨張し続けている状態にあります。銀河同士は互いに遠ざかり、星々も互いに離れていっています。

宇宙の過去

宇宙の過去
宇宙の過去は、最初の星が形成された時期です。これらの星は、宇宙の最初の光を放ち、宇宙の進化を促しました。

宇宙の未来

宇宙の未来
宇宙の未来は、膨張の速度によって変わります。宇宙は、膨張し続けている状態にあります。

宇宙の現在

宇宙の現在
宇宙の現在は、膨張し続けている状態にあります。銀河同士は互いに遠ざかり、星々も互いに離れていっています。

宇宙の過去

宇宙の過去
宇宙の過去は、最初の星が形成された時期です。これらの星は、宇宙の最初の光を放ち、宇宙の進化を促しました。

宇宙の未来

宇宙の未来
宇宙の未来は、膨張の速度によって変わります。宇宙は、膨張し続けている状態にあります。

宇宙の現在

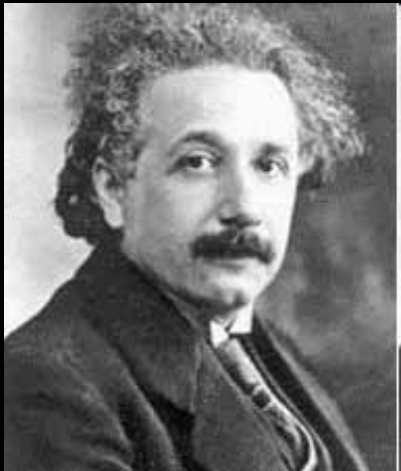
宇宙の現在
宇宙の現在は、膨張し続けている状態にあります。銀河同士は互いに遠ざかり、星々も互いに離れていっています。

宇宙の過去

宇宙の過去
宇宙の過去は、最初の星が形成された時期です。これらの星は、宇宙の最初の光を放ち、宇宙の進化を促しました。

宇宙の運命を決める式

(1915-16年)



Albert Einstein
(1879-1955)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

時空の歪み 宇宙項 物質の分布

アインシュタイン方程式
(一般相対性理論から導かれる)

3通りの運命 (1922年)



A. Friedmann
(1888-1925)

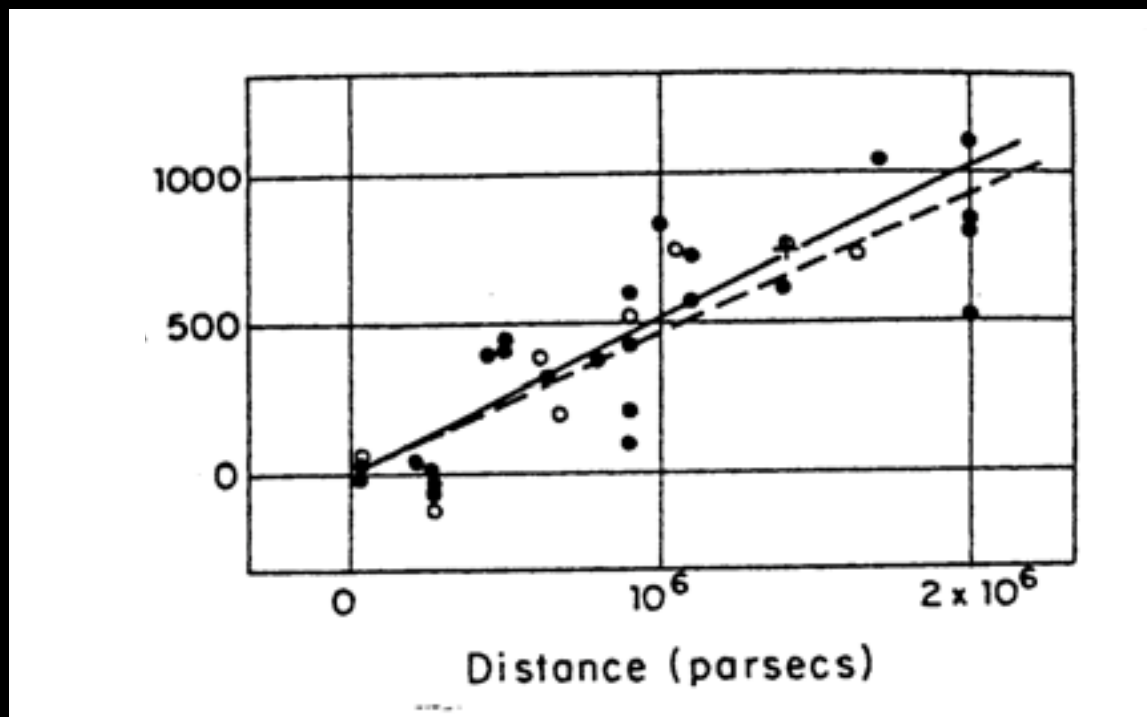
$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{K}{a^2(t)} + \frac{\Lambda}{3}$$

- ① 永遠に膨らみ続ける
- ② いつか止まって安定する
- ③ 縮んで閉じて終わる

膨張宇宙の発見 (1929年)



Edwin Hubble
(1889-1953)



$t = 0$

$t = t_1$



宇宙の運命は？

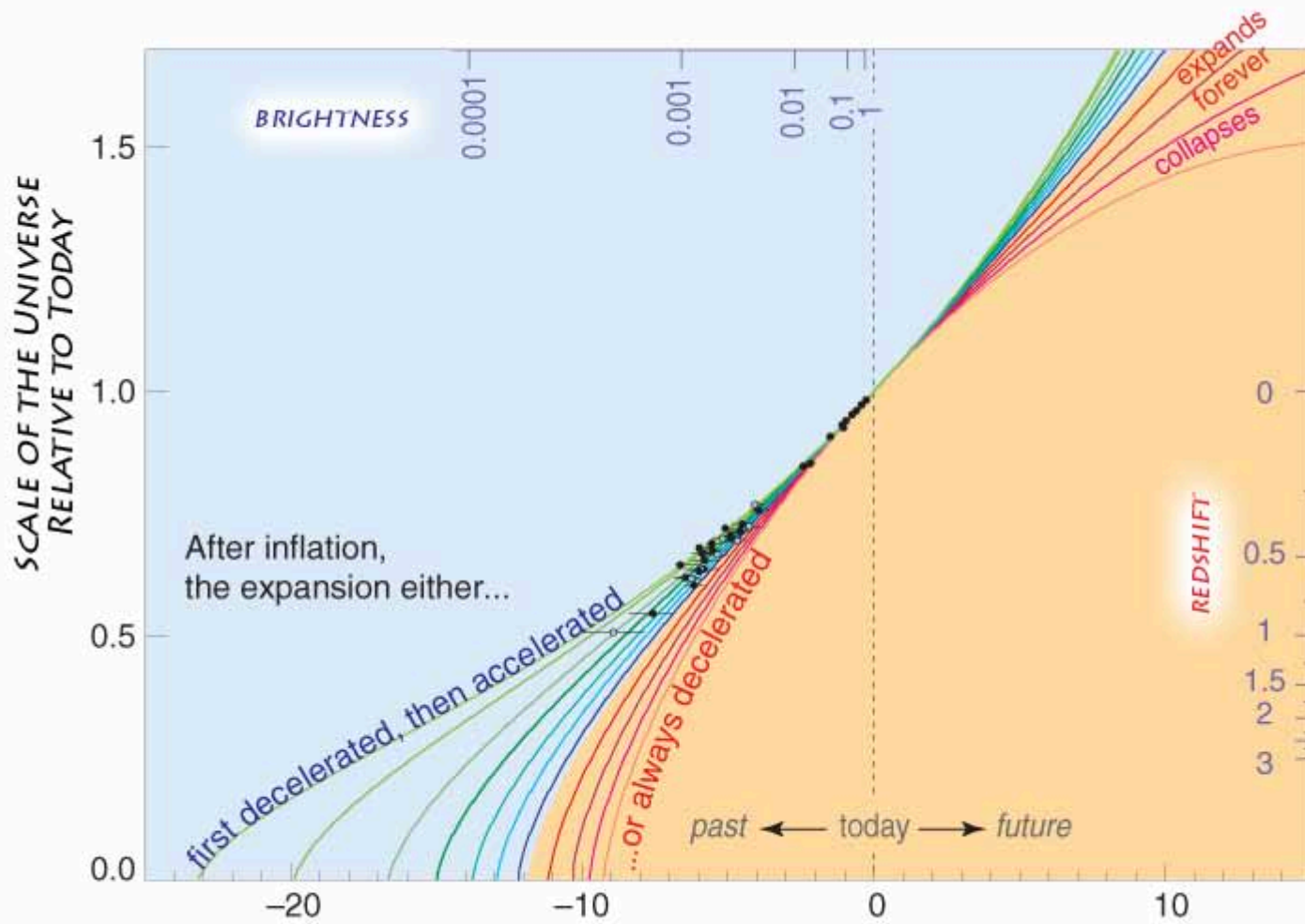
赤方偏移
(=後退速度)

縮んで閉じて終わる宇宙
(昔は膨張速度が速かった)

永遠に膨らむ宇宙
(昔は膨張速度が遅かった)

現在

時間 (=距離) 100億年

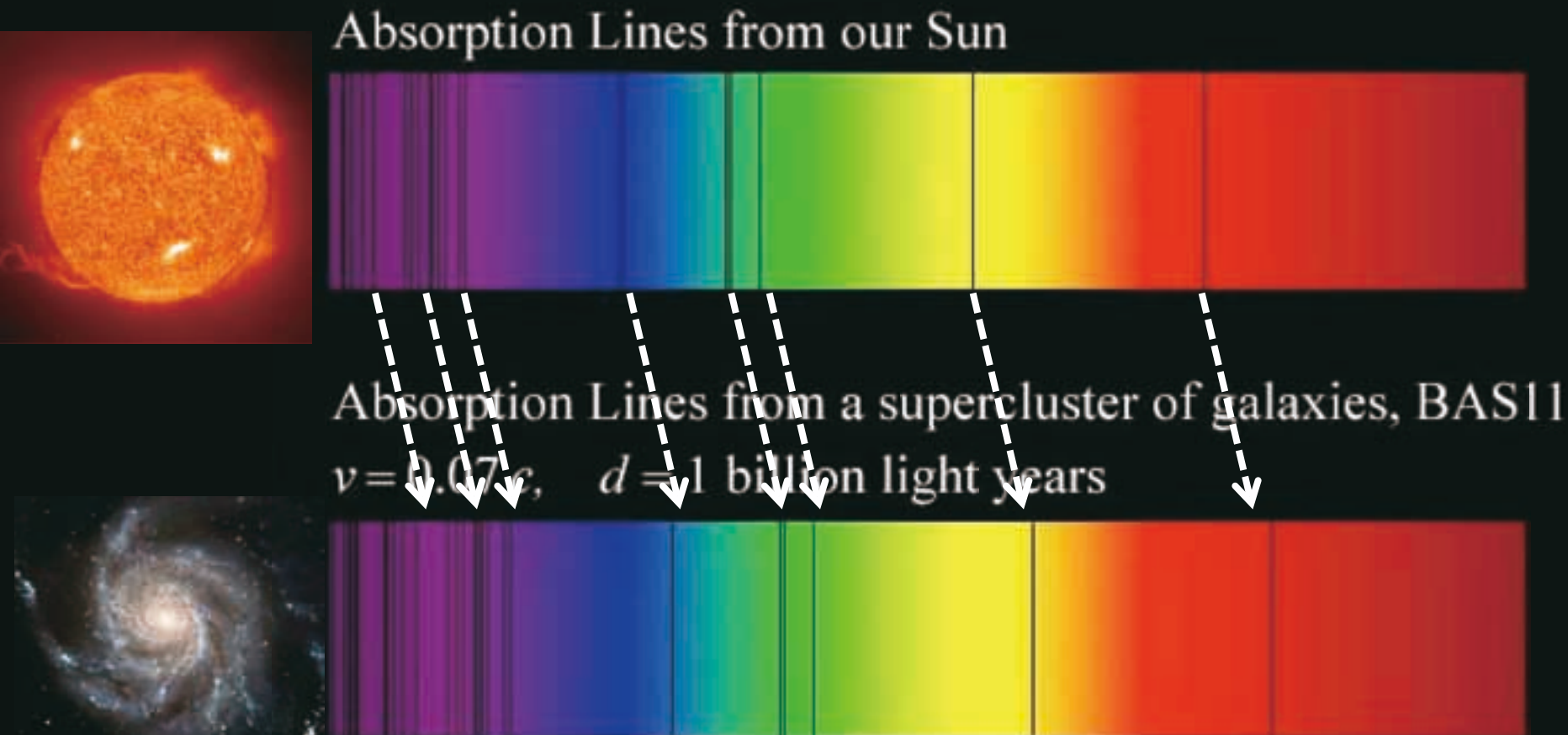


ここまでのまとめ

- ・ 宇宙図の形は、理論モデルでわかる
- ・ 理論モデルのパラメータは、観測でわかる
- ・ 観測は、後退速度と距離を測れば良い

どうやって？

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）

距離の測定は？



距離測定の方法論

距離のハシゴ

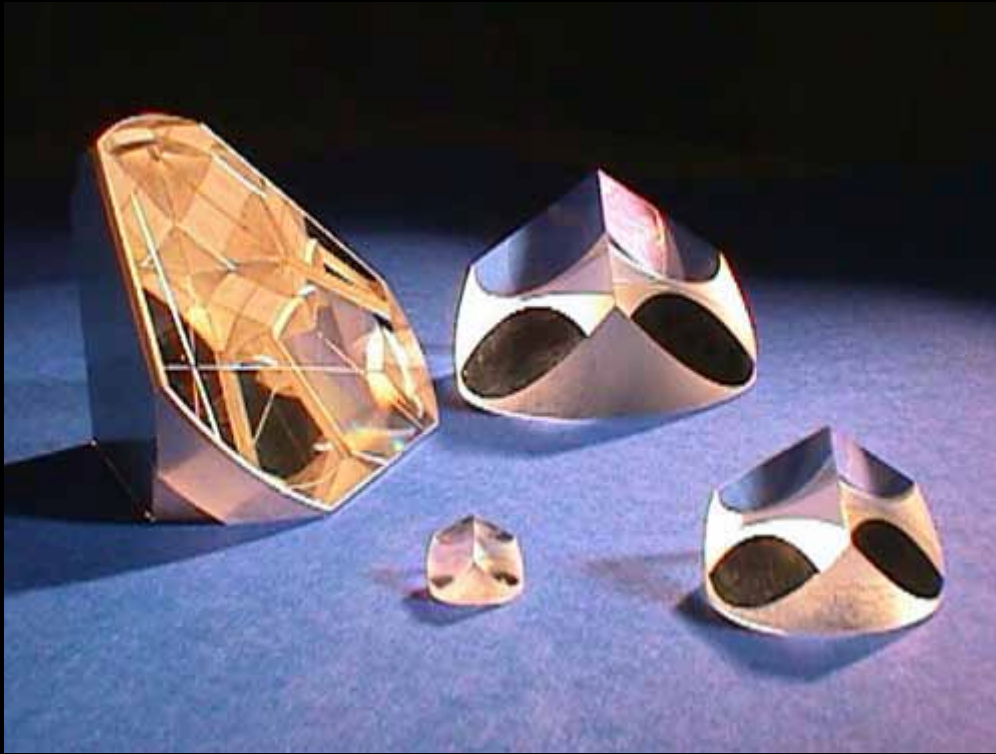
1. 太陽系内の距離測定（～0.001光年）
2. 近くの恒星までの距離測定（～1000光年）
3. 銀河系内の天体までの距離測定（～1万光年）
4. 近傍の銀河までの距離測定（～1億光年）
5. 遠くの銀河までの距離測定（～100億光年）

測定方法をつないで大きな距離を測る

月までの距離



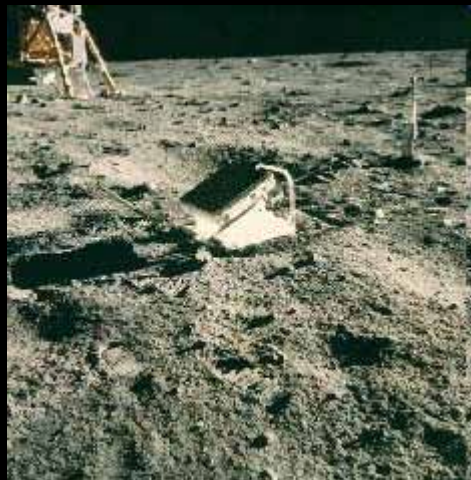
レーザーによる距離の測定



反射プリズム

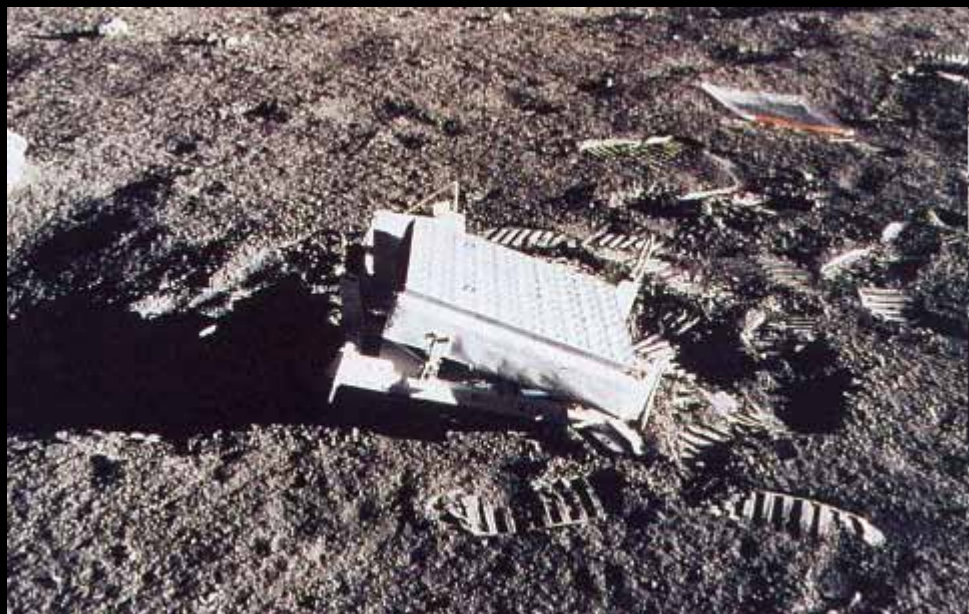
どの方向から光が入っても入射方向に
反射するプリズム

設置されたプリズム

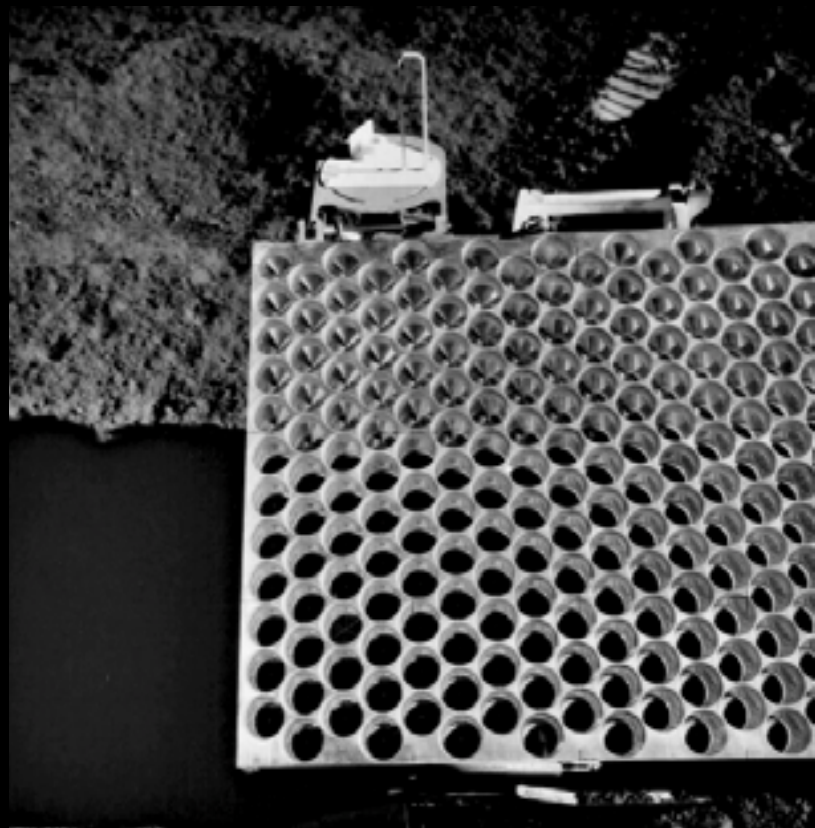


アポロ11号

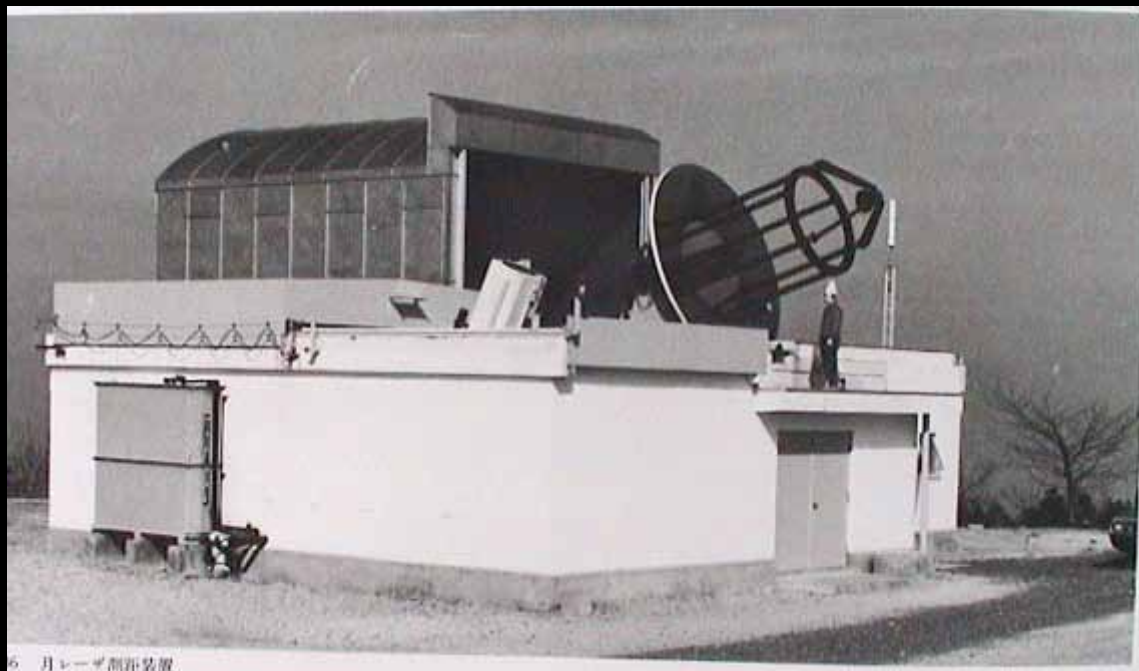
アポロ14号



アポロ15号



国立天文台 堂平観測所



6 月レーザー測距装置



金星までの距離



レーダーによる距離測定

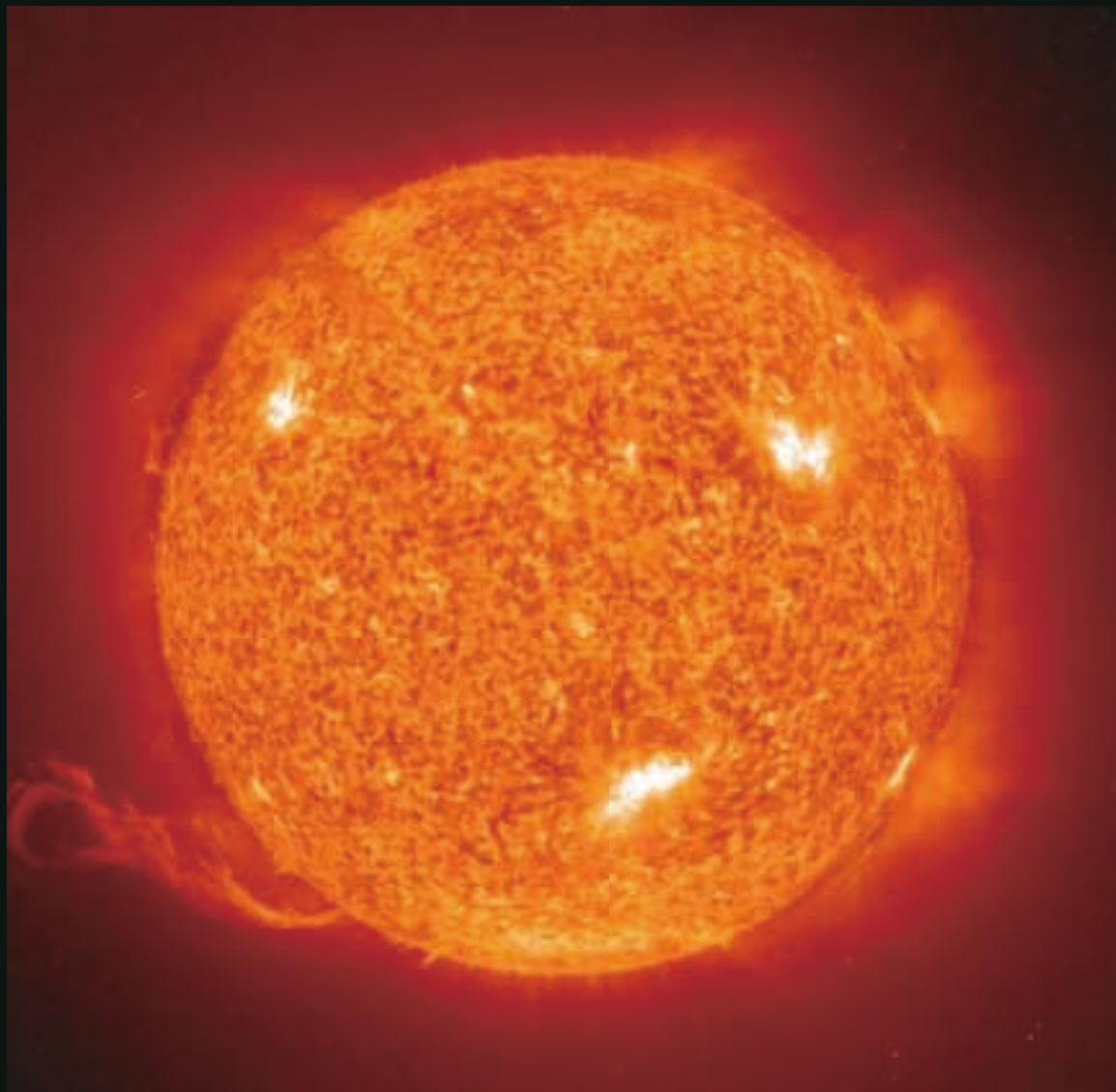


Arecibo Observatory (USA)



Green Bank Telescope (USA)

太陽までの距離



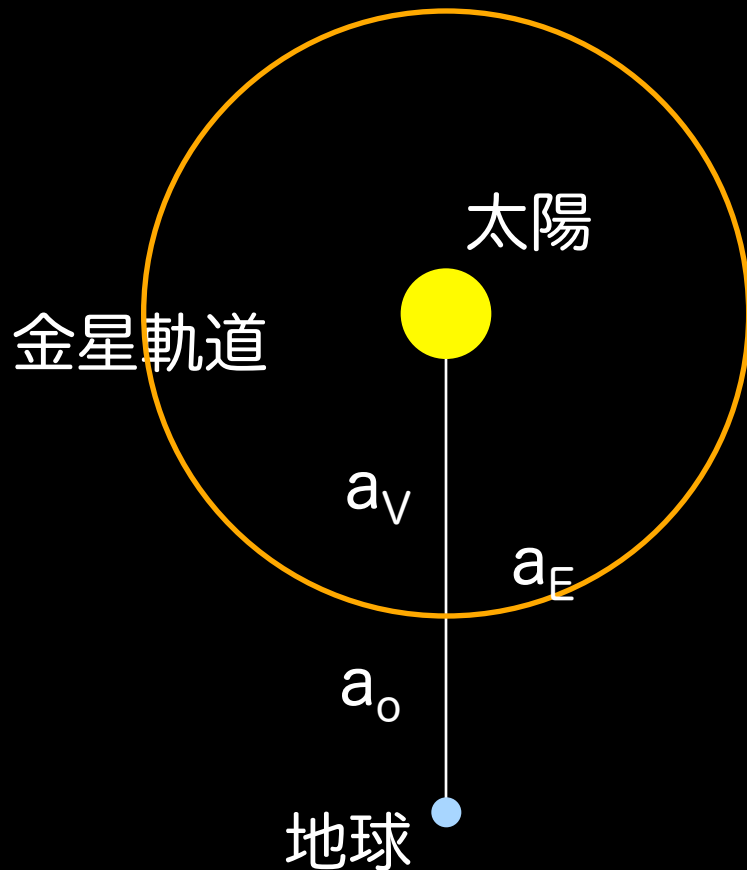
ケプラーの法則の利用

第3法則：

惑星の公転周期(T)の2乗は、
軌道の半長径(a)の3乗に比例する。

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

ケプラーの法則



金星と太陽の距離 : a_v

地球と太陽の距離 : a_E

地球と金星の距離 : a_o

金星の公転周期 : T_v

地球の公転周期 : T_E

$$(a_v)^3 = k (T_v)^2$$

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

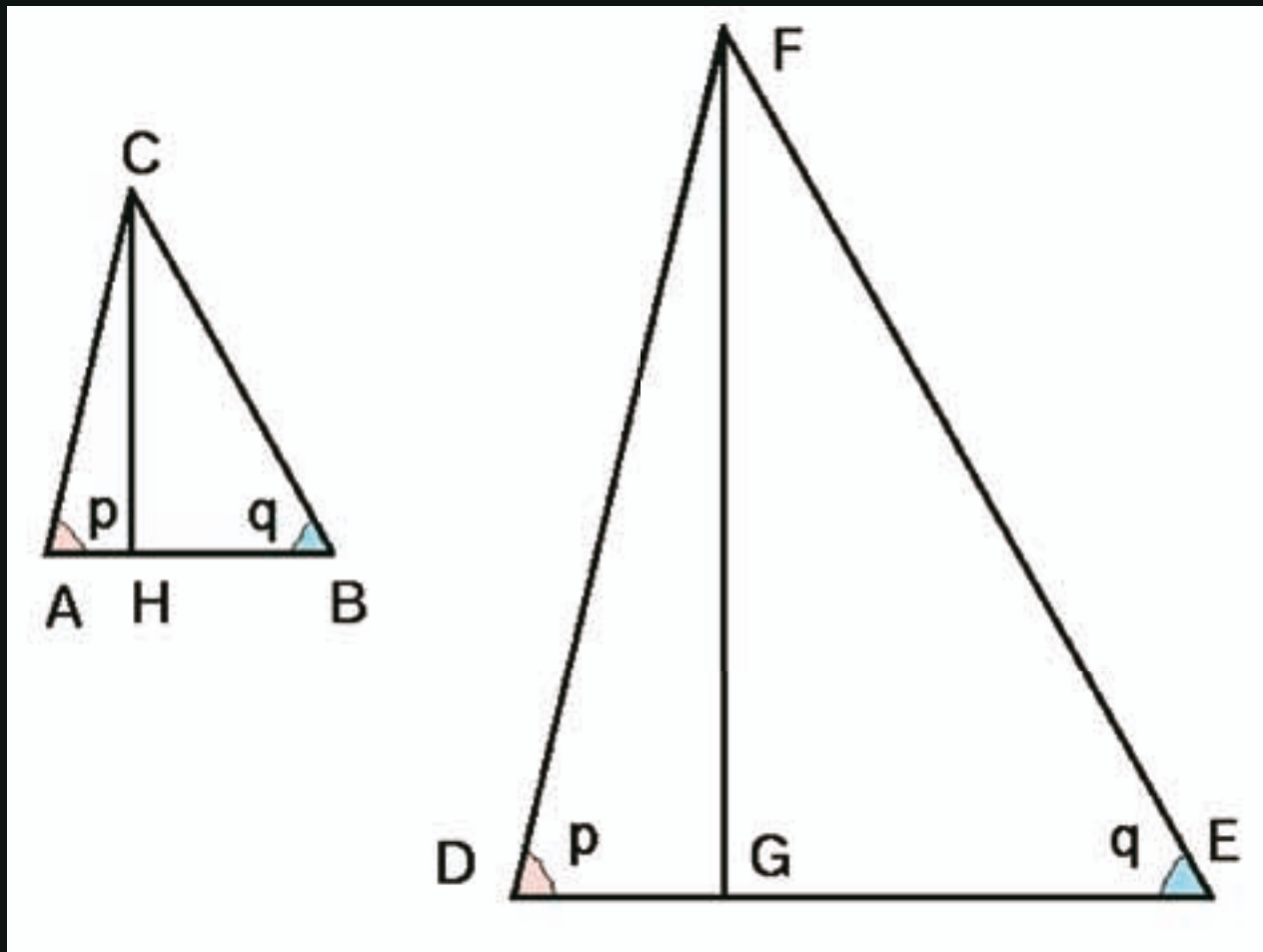
地球と太陽の距離(1天文単位) = 149,597,892 km

近傍の星までの距離

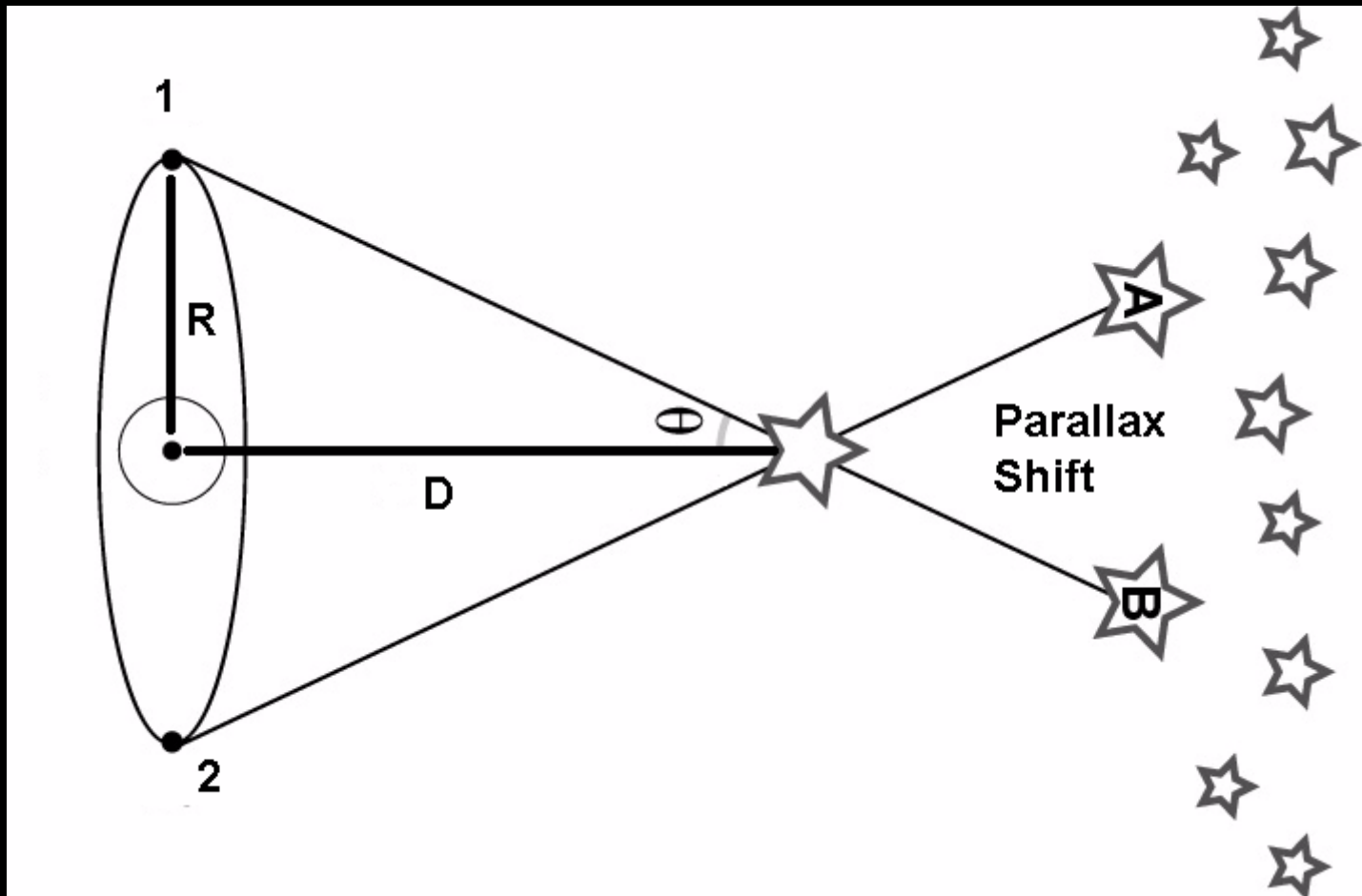
近傍の星までの距離



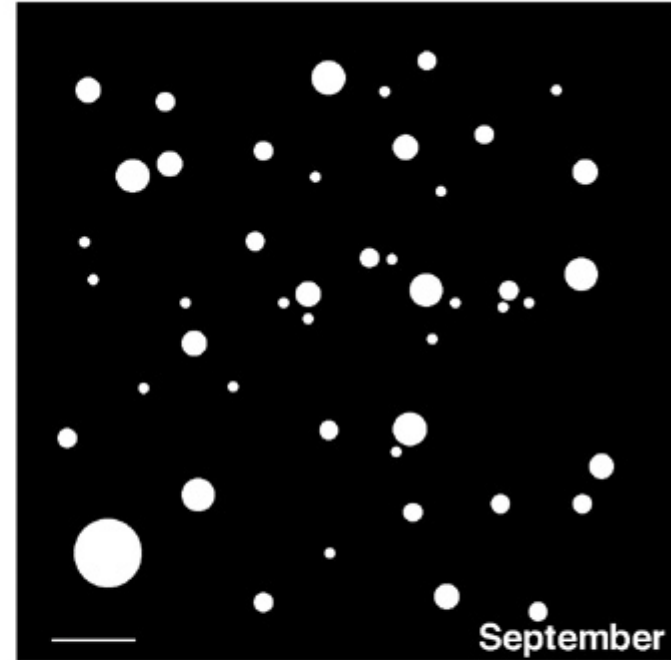
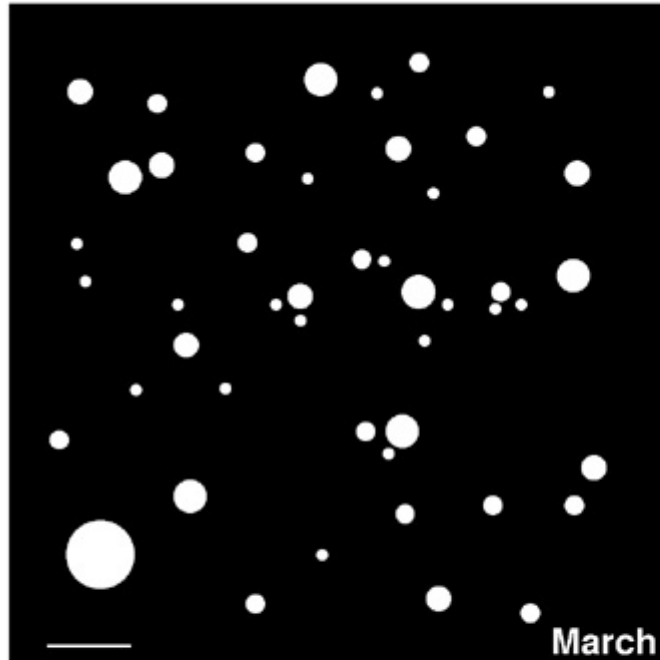
三角測量の原理



年周視差による測定



年周視差による測定



背景の星に対して手前の星は移動して見える
シリウス～0.4秒角

年周視差による測定



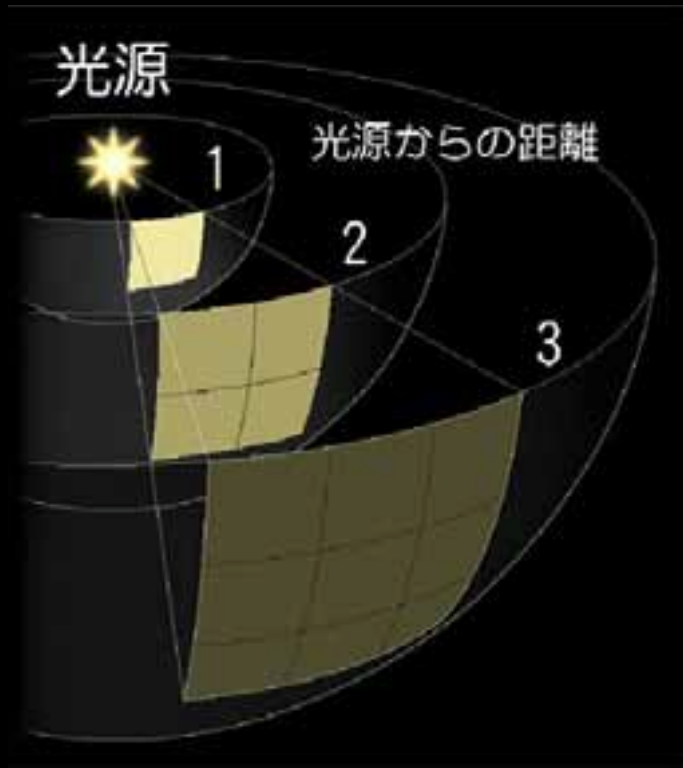
Hipparcos (ESA)

誤差 1ミリ秒角で12万天体
(ヒッパルコス星表)

誤差 30ミリ秒角で100万天体
(ティコ星表)

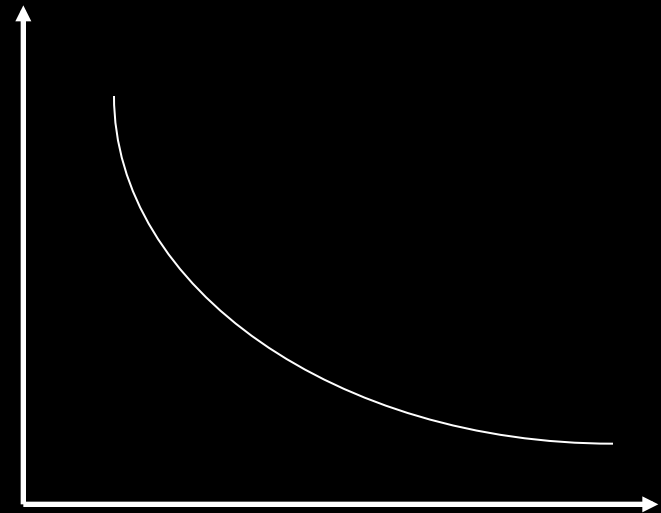
1ミリ秒角：
東京から大阪に置いた
2mmのものを見込む角度

光度-距離関係の利用



明るさは距離の
二乗に反比例する

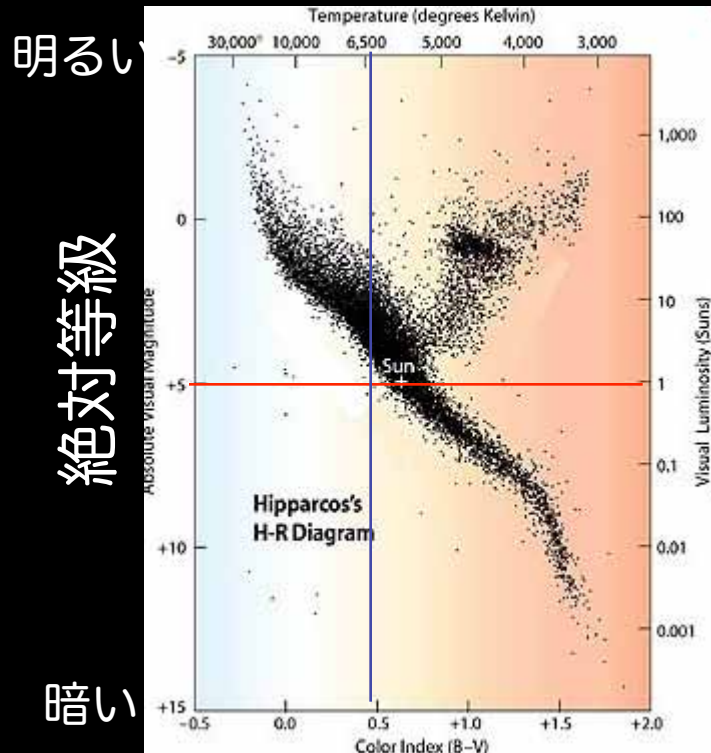
明るさ



なんらかの方法で真の明るさを知る

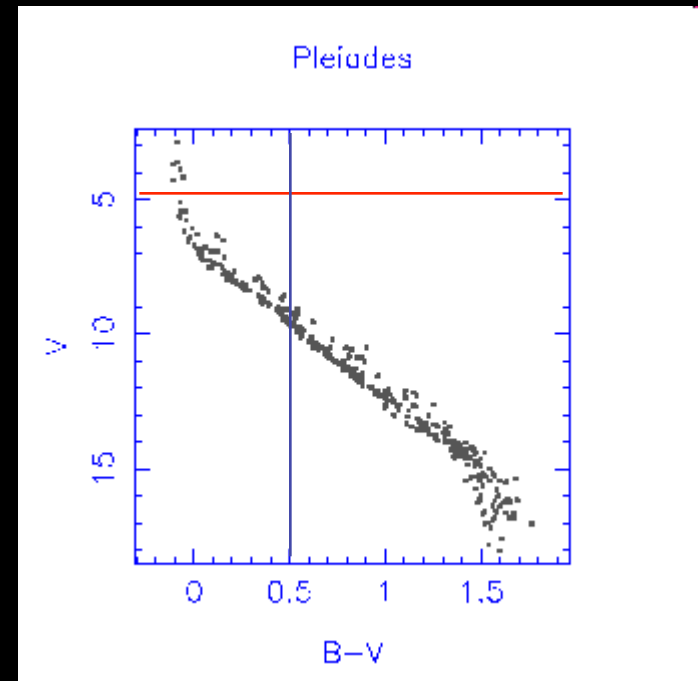
HR図の利用

主系列星の色と明るさの関係



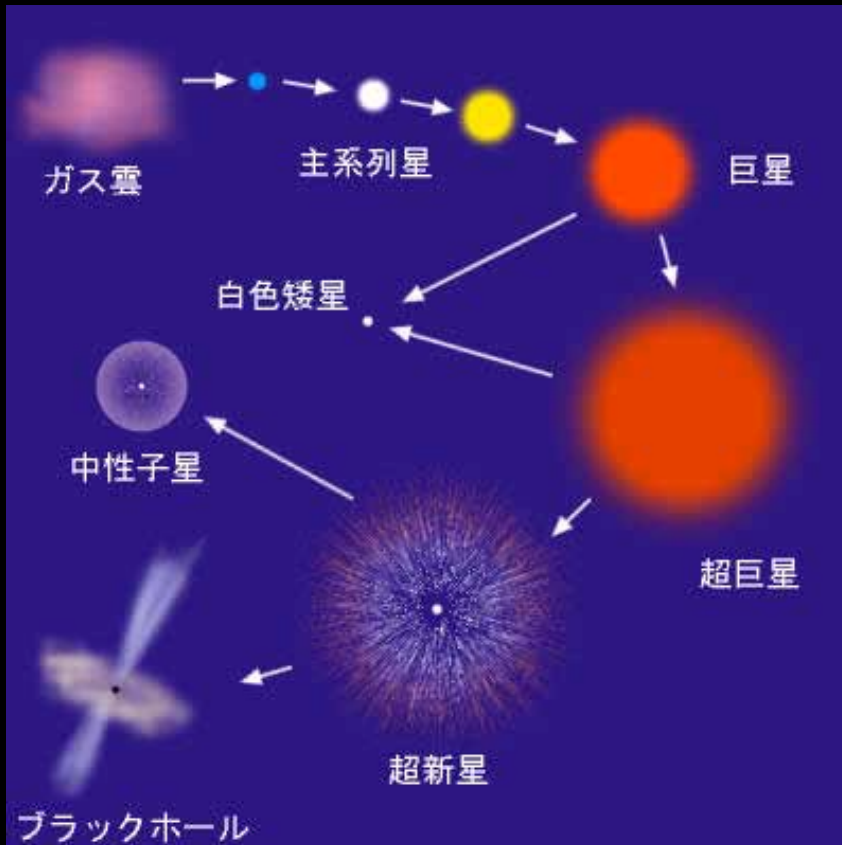
色指標： 距離と独立
明るさ： 距離に依存

見かけ等級



脈動変光星の利用

脈動変光周期と明るさの関係

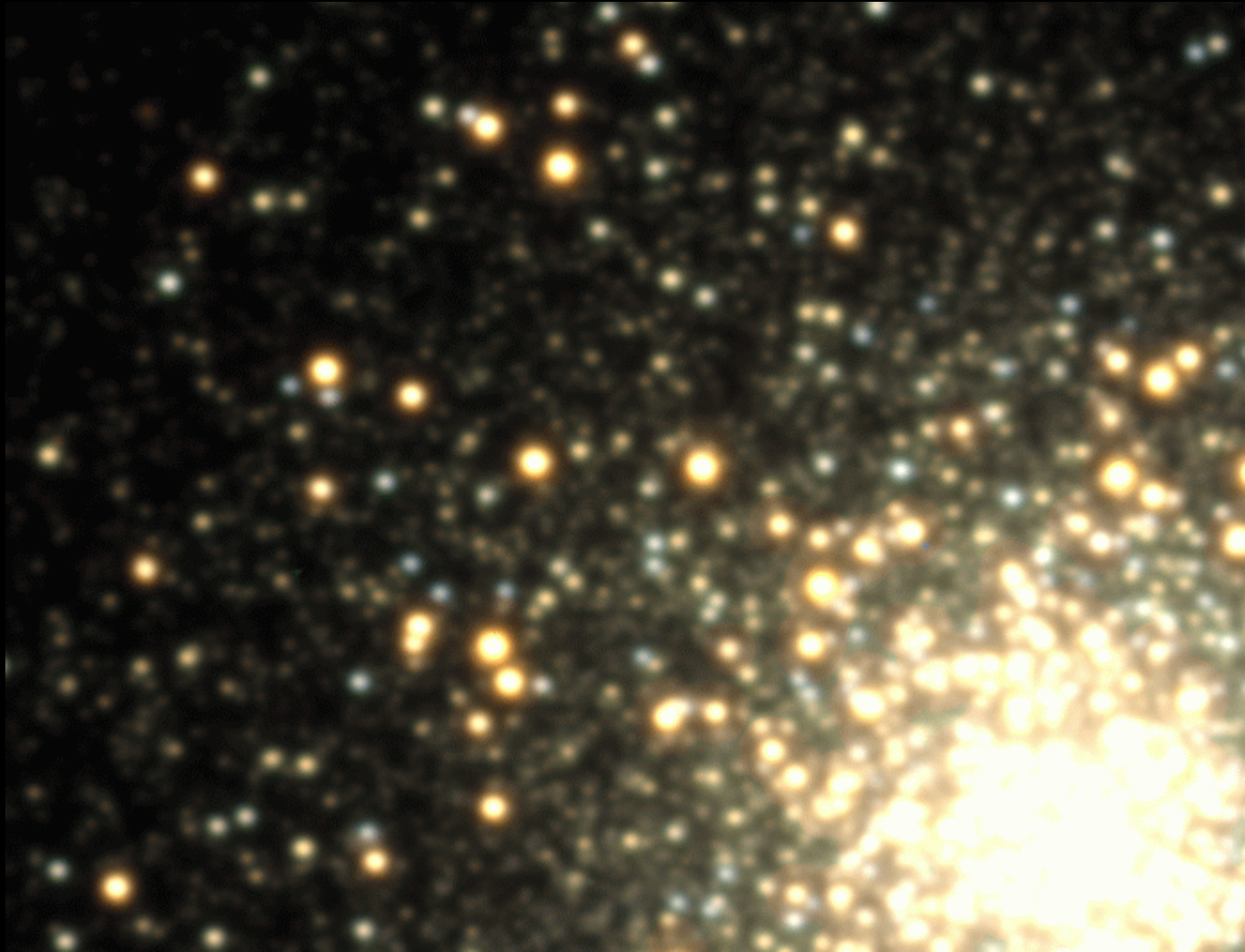


脈動変光星：
不安定な状態にある恒星

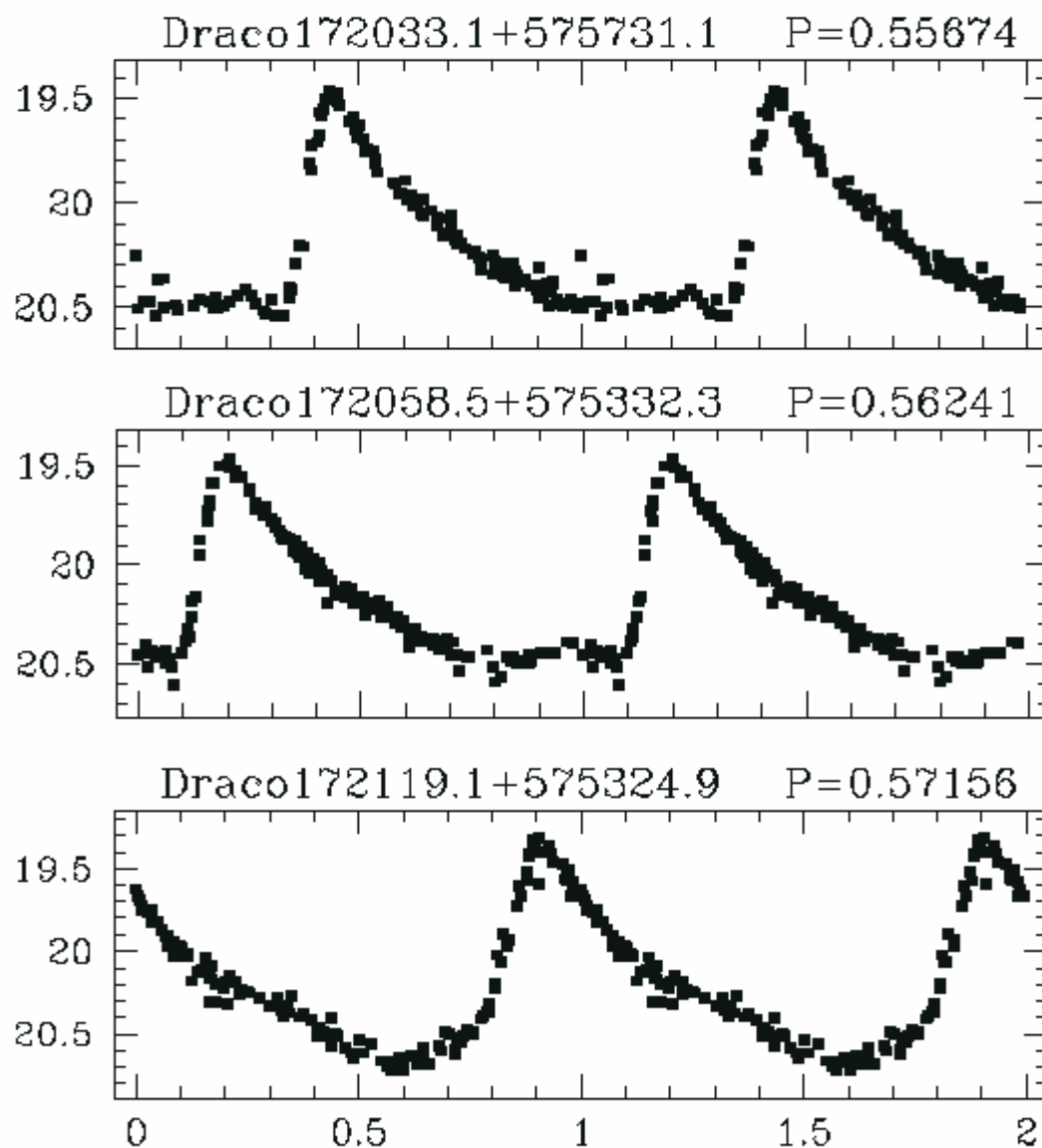
こと座RR型変光星
球状星団に多い
種族IIの天体

セファイド型変光星
銀河の腕に多い
種族Iの天体

球状星团 M3

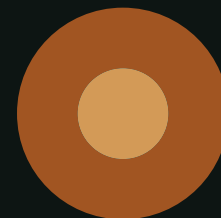


見かけ等級

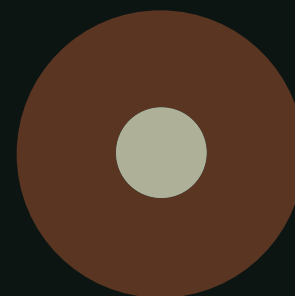


時間 (日)

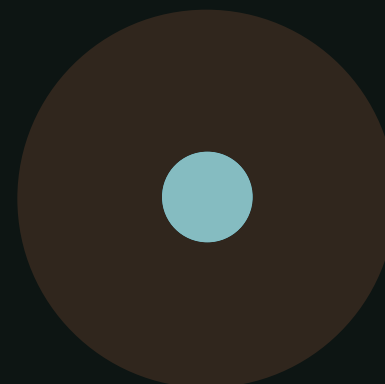
外層がイオン化して不透明



外層が膨張しつつ温度低下



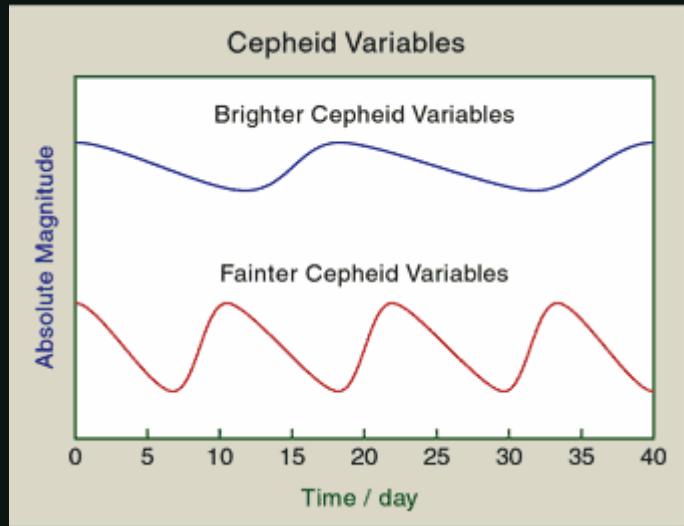
外層が中性化して透明に



急激に温度低下して収縮

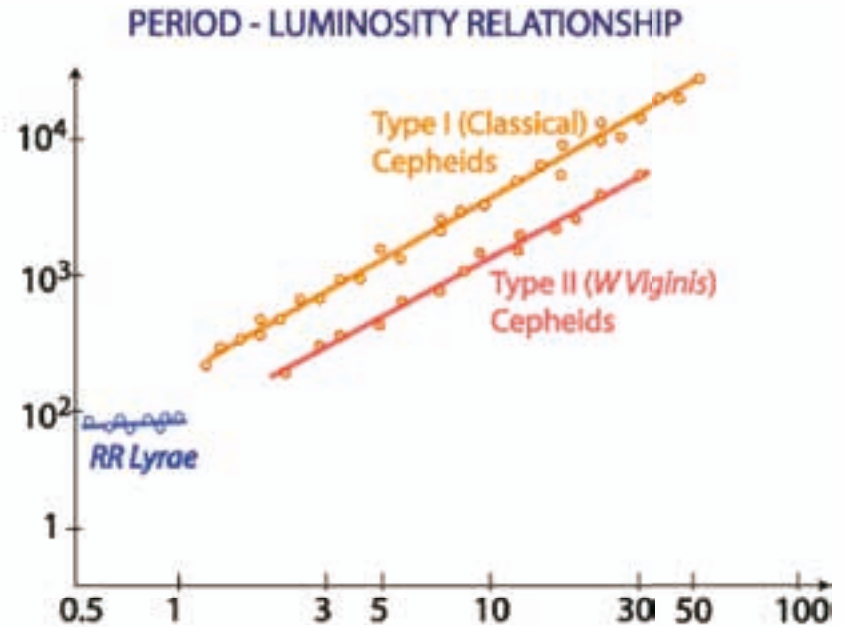
周期－光度関係

明るさ



時間

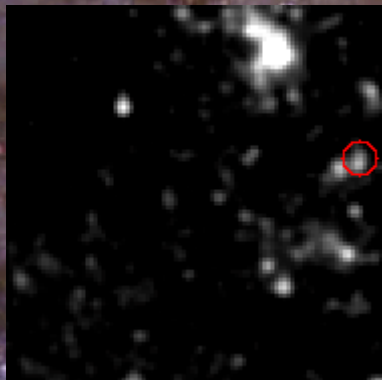
明るさ



変光周期

近傍の銀河まで距離を測定できる

M100

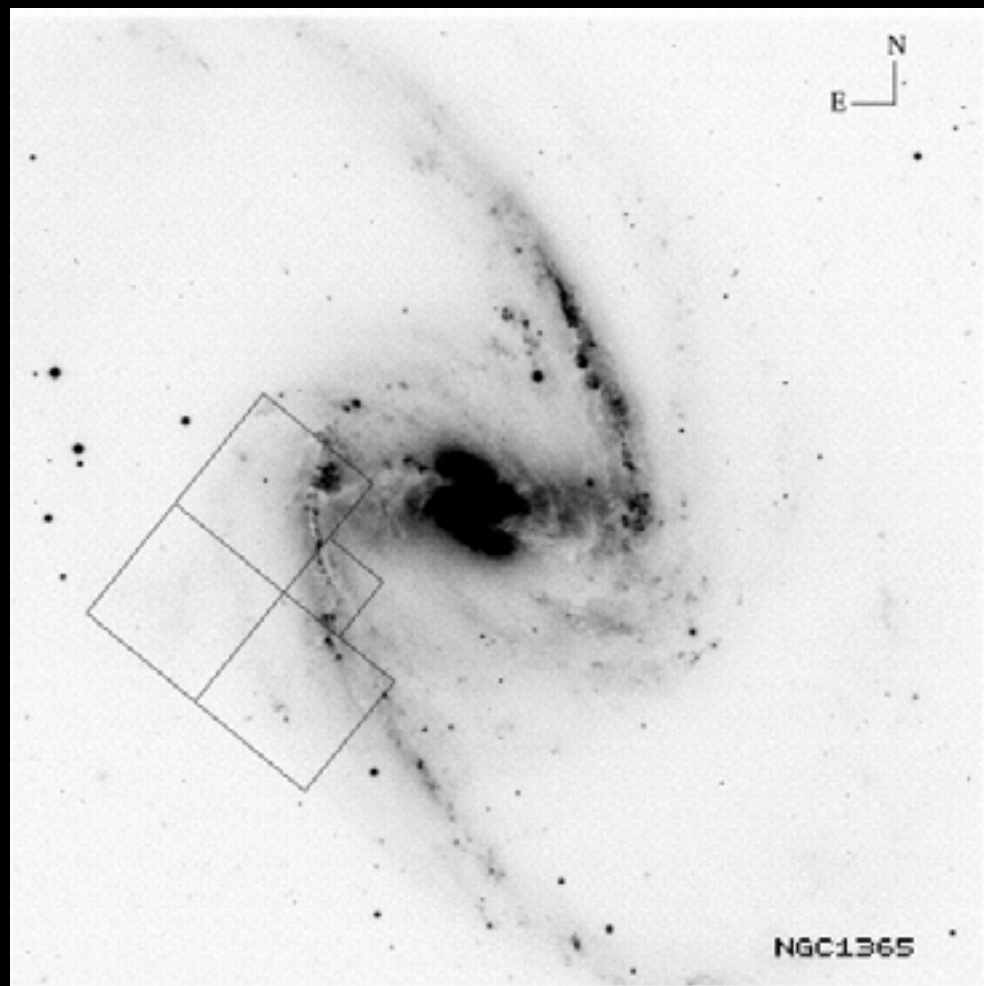


Hubble Key Project

18個の銀河までの距離
を正確に測定

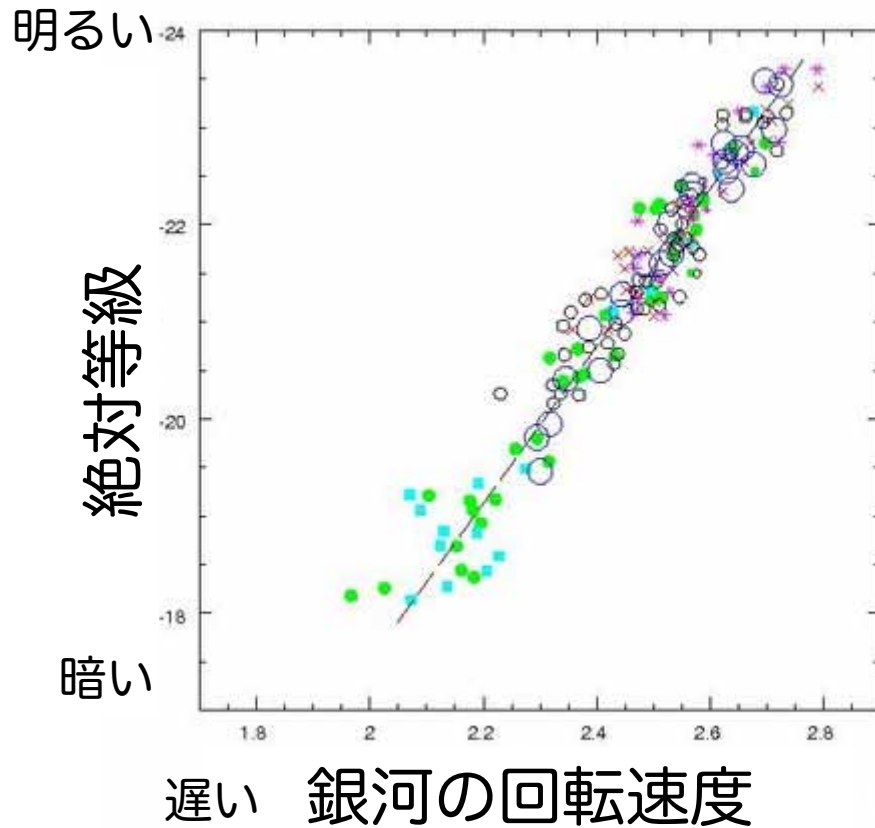


がんばって1億光年まで



Tully-Fisher Relation

銀河の回転速度と明るさの関係

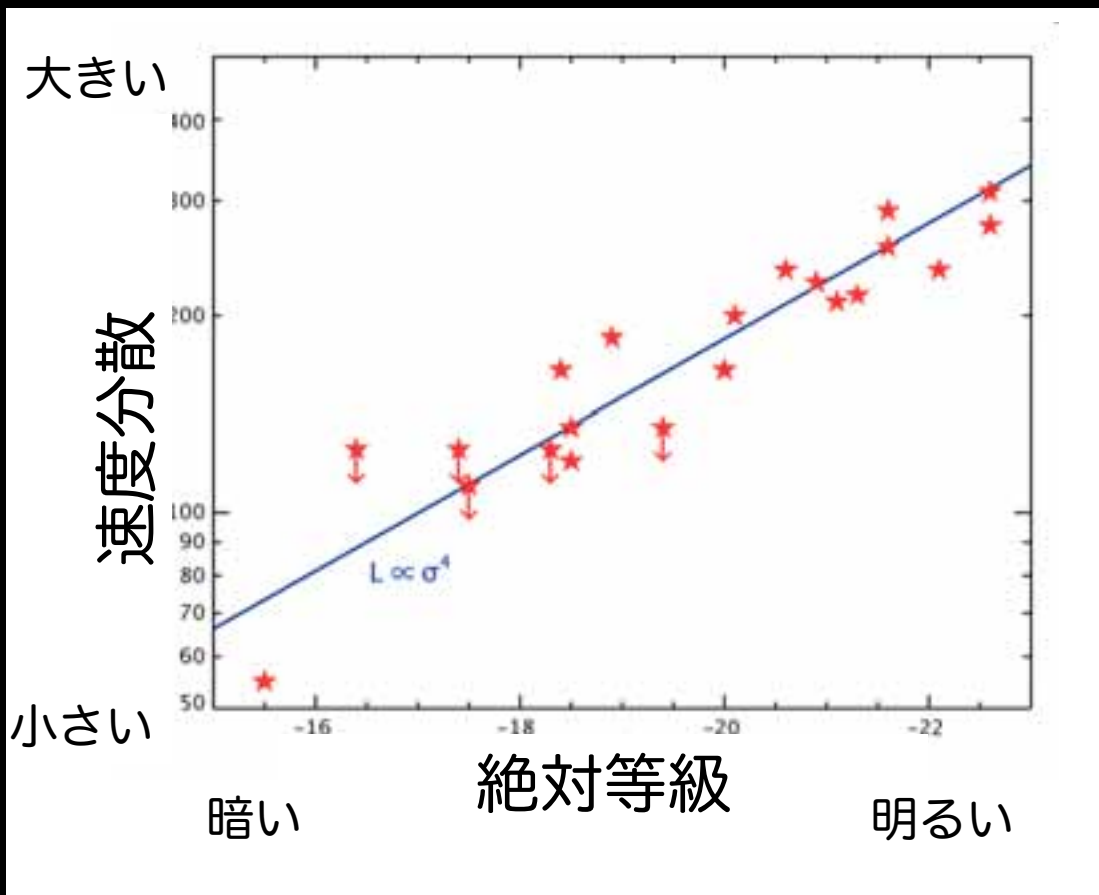


$$(\text{質量}) \propto (\text{回転速度})^2$$

$$(\text{光度}) \propto (\text{質量})^a$$

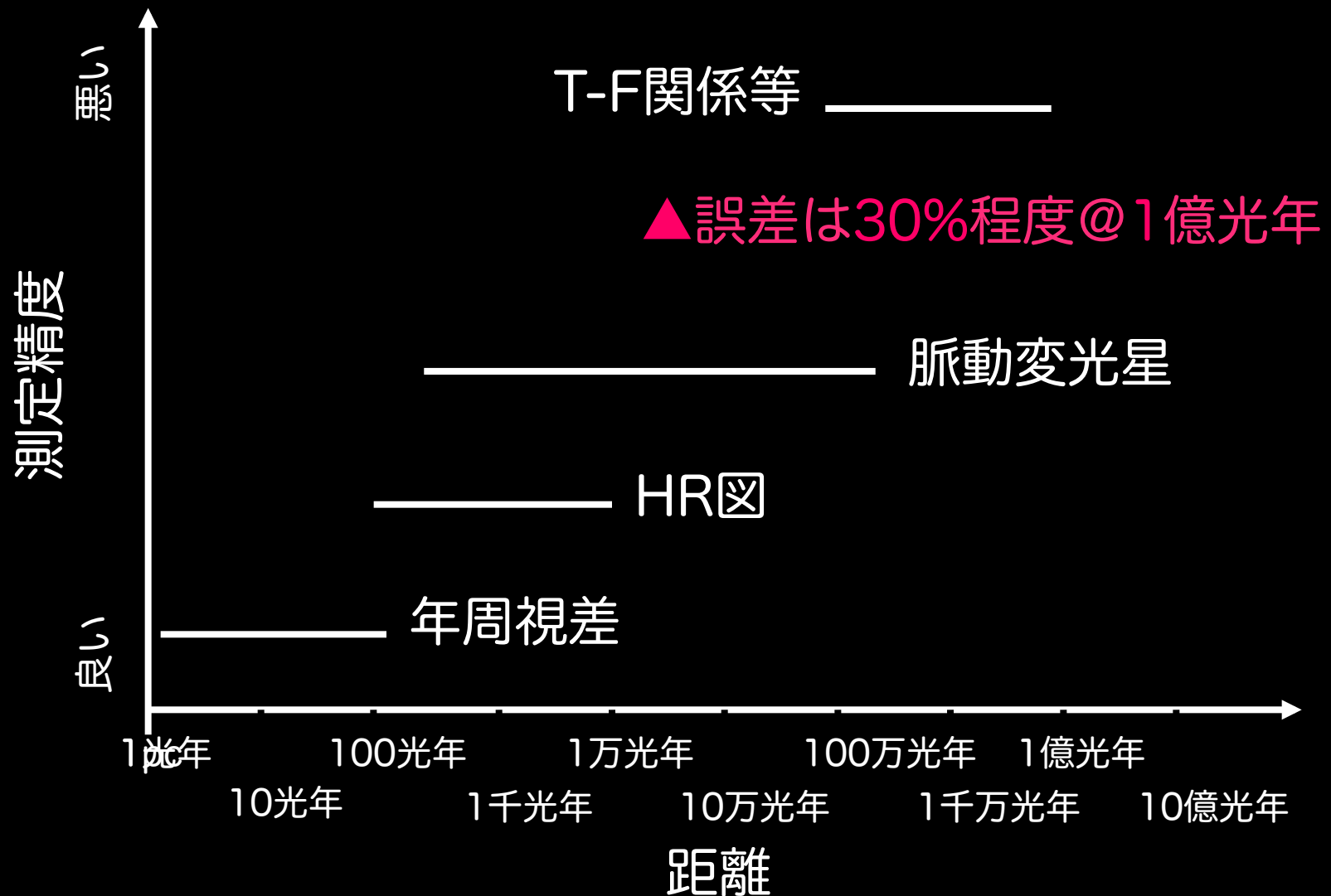
Faber-Jackson Relation

銀河の速度分散と明るさの関係



$$\begin{aligned} (\text{質量}) &\propto (\text{速度分散})^2 \\ (\text{光度}) &\propto (\text{質量})^a \end{aligned}$$

距離の決定精度



Ia型超新星による距離測定

Ia型超新星の特徴

超明るい！

ひとつの銀河と同じくらいの明るさで輝く

そっくり！

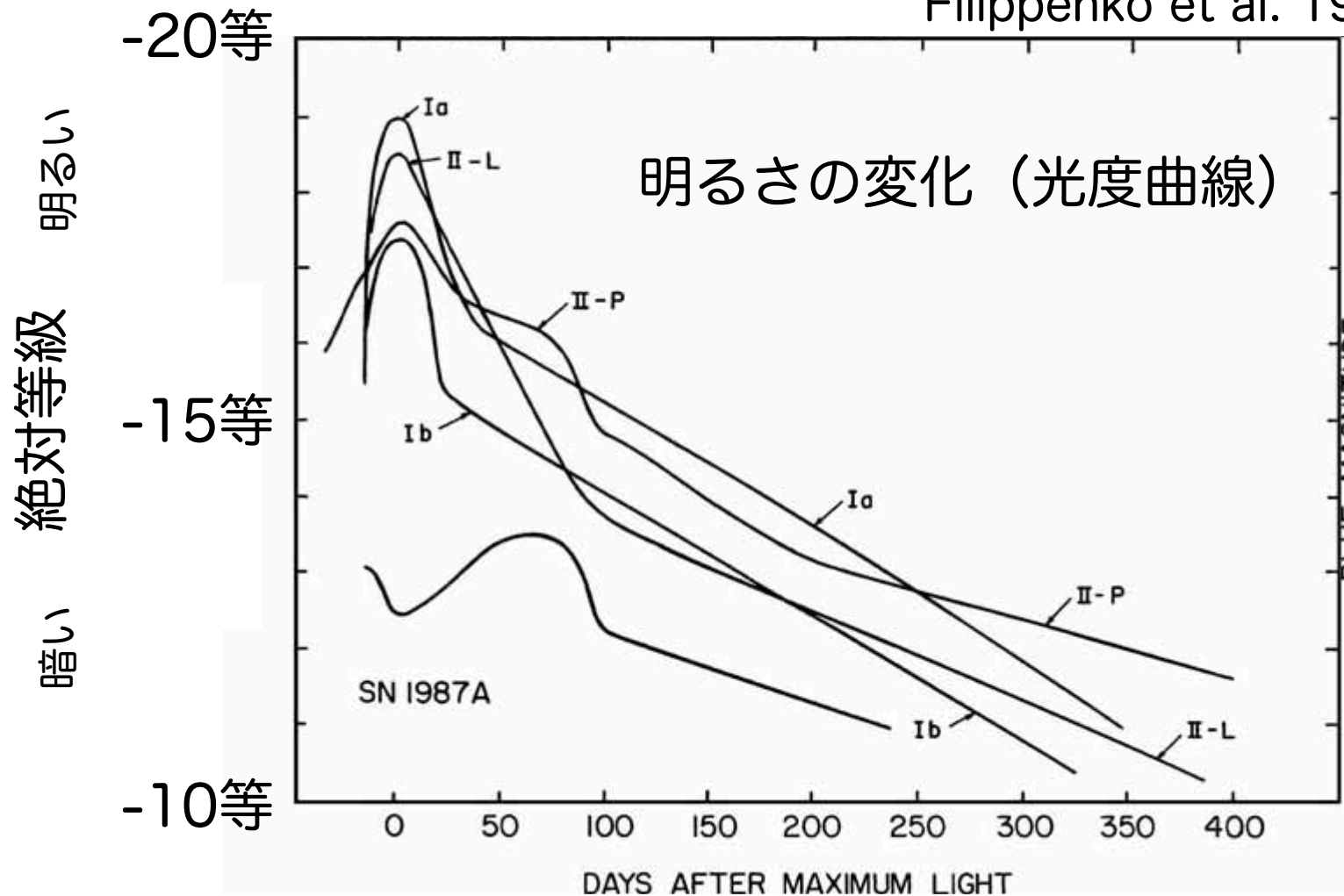
どの銀河に出現しても、性質が似ているように見える

今も昔も一緒！

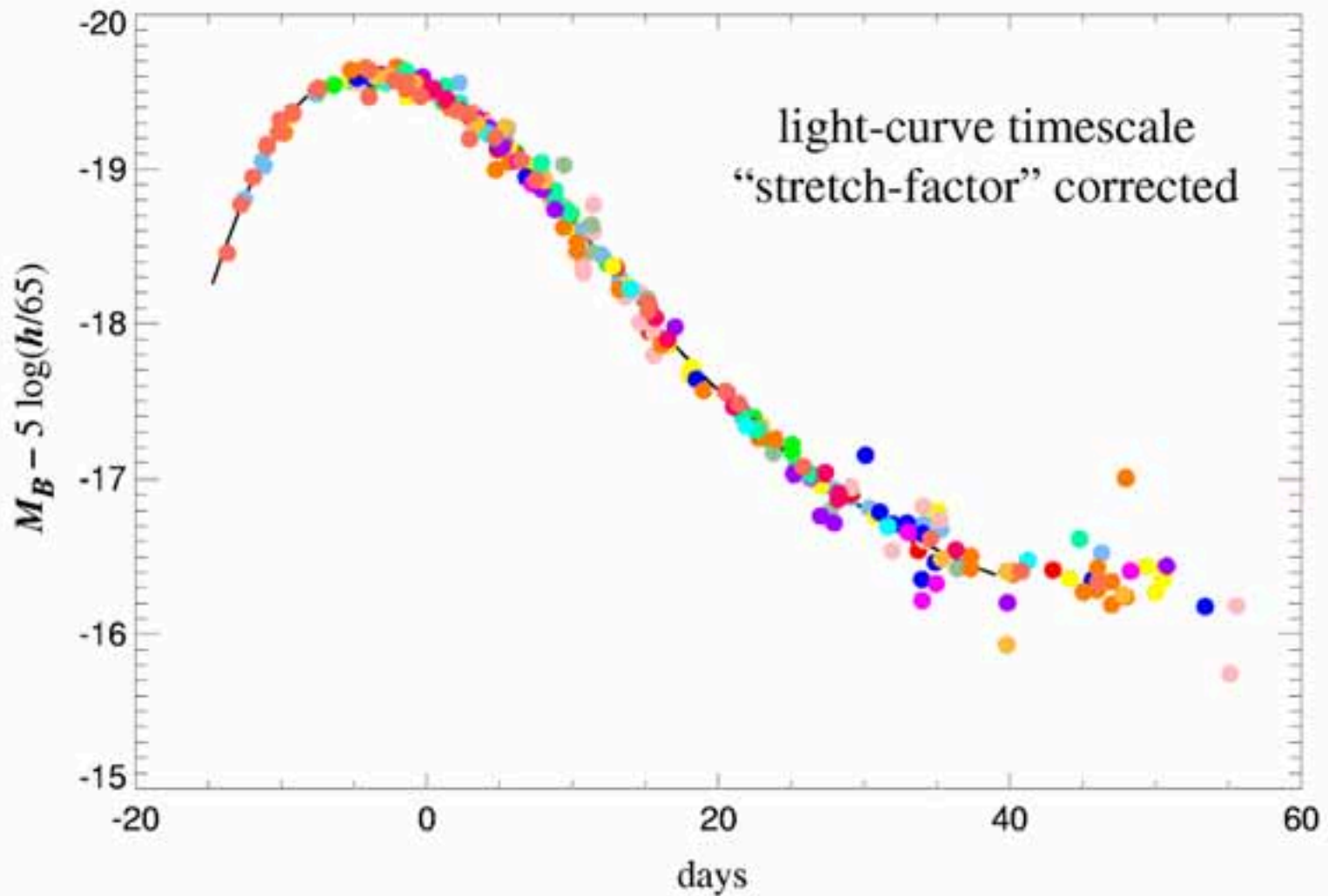
100億年前の超新星も最近の超新星も同じ性質だと思う

超新星の明るさ

Filippenko et al. 1997



(補正済) 光度曲線

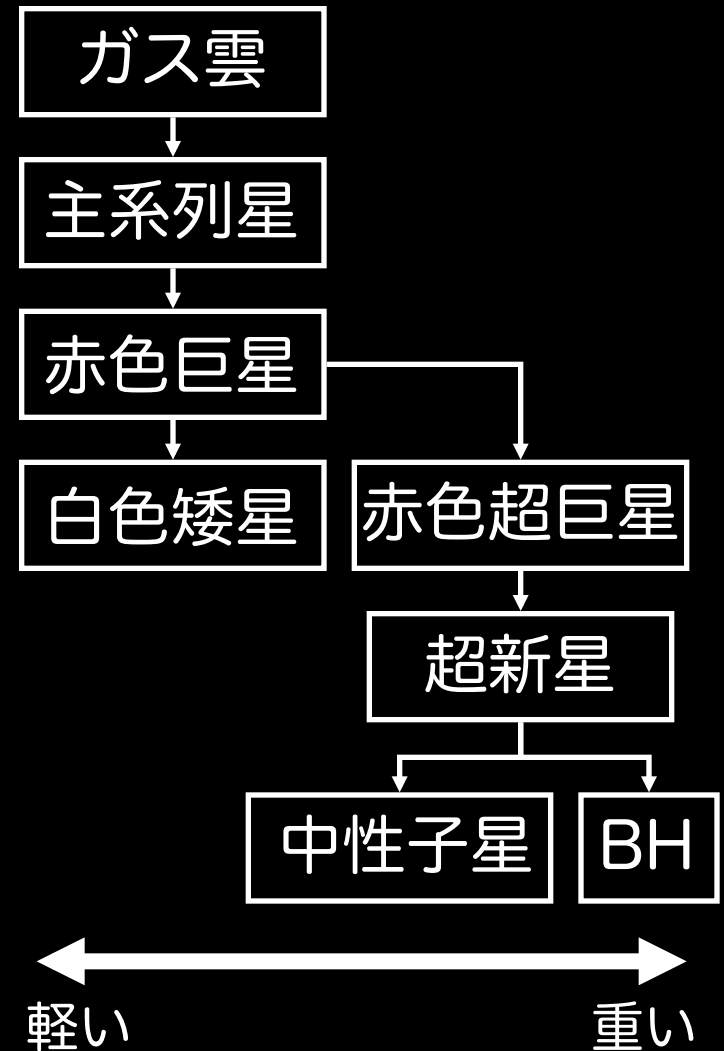
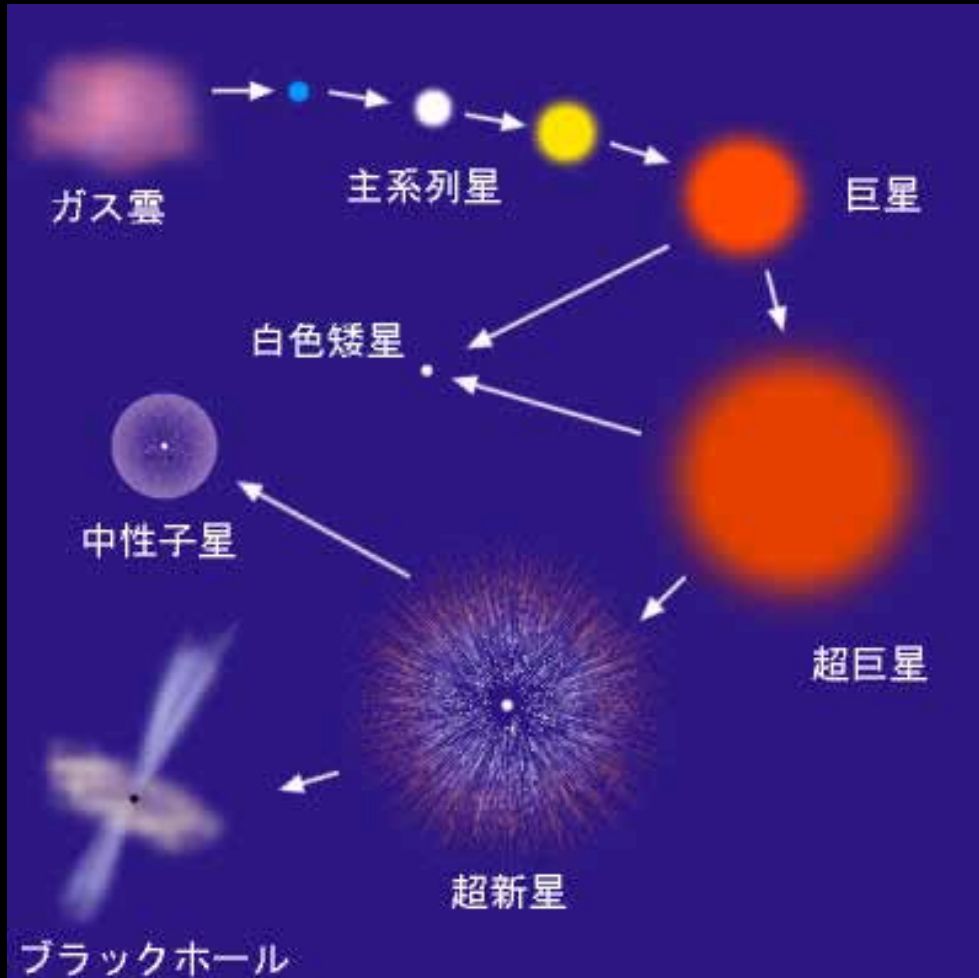


Kim, *et al.* (1997)

Ia型超新星の例



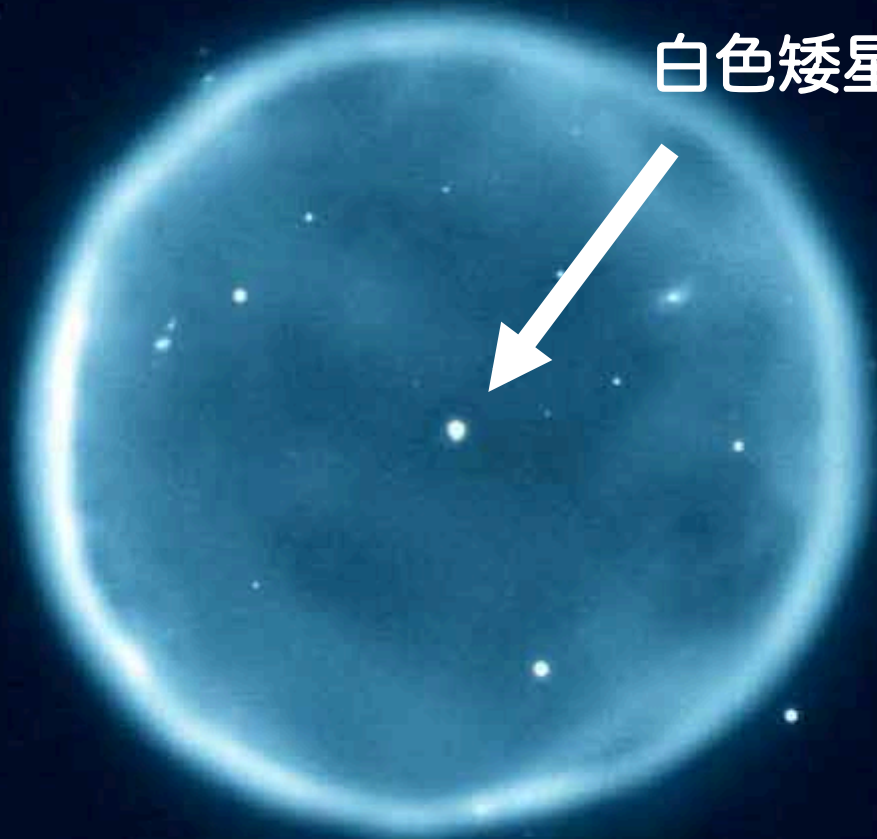
白色矮星とは



白色矮星：小さく重い、白い星

地球と同じサイズで太陽の重さ
角砂糖1個分で数トン！！

白色矮星にこれからなる星



Abell 39

特殊な条件下でのみ爆発

