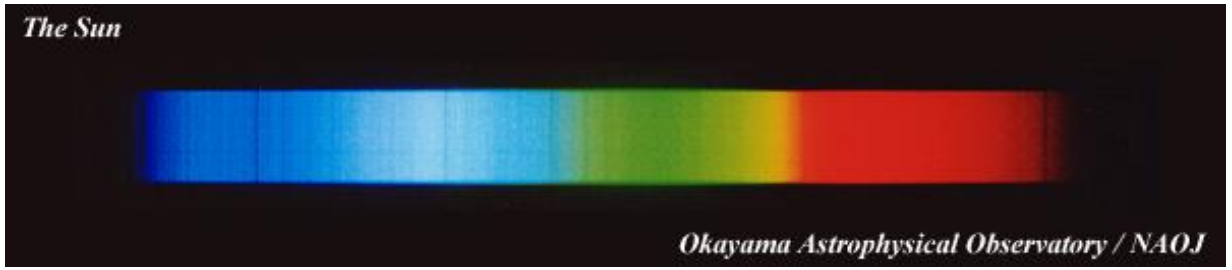
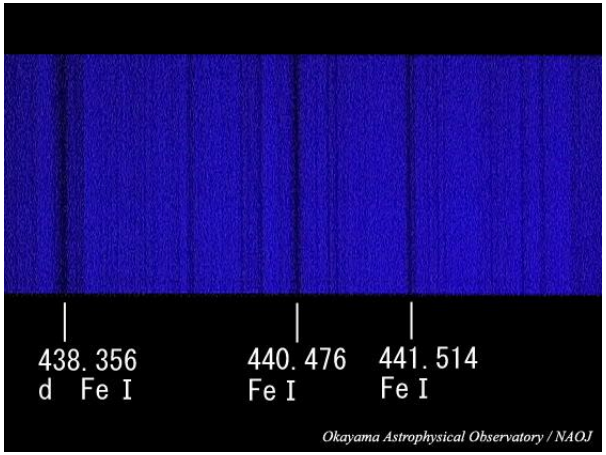
地球惑星科学Ⅱ

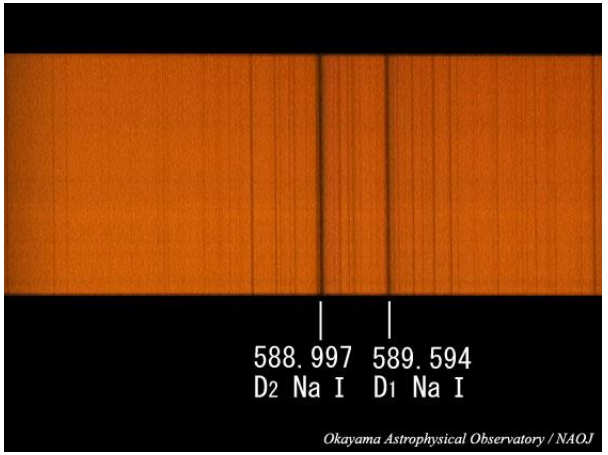
(1)　大気の構造と地球の熱収支
(2)　地球大気の循環
(3)　大気の運動
(4)　大気の熱力学と雲・降水形成過程
(5)　海洋の組成と構造
(6)　海洋の循環
(7)　地球環境変動
(8)　宇宙とその進化
(9)　太陽系の成り立ちと運動
(10) 惑星と衛星
(11) 太陽
(12) 宇宙空間

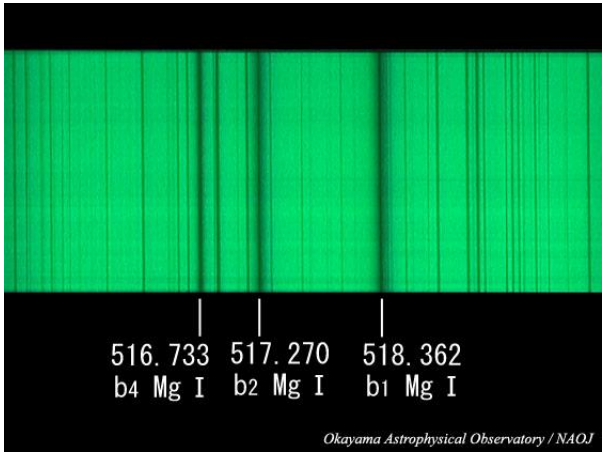
http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~shw/space2/

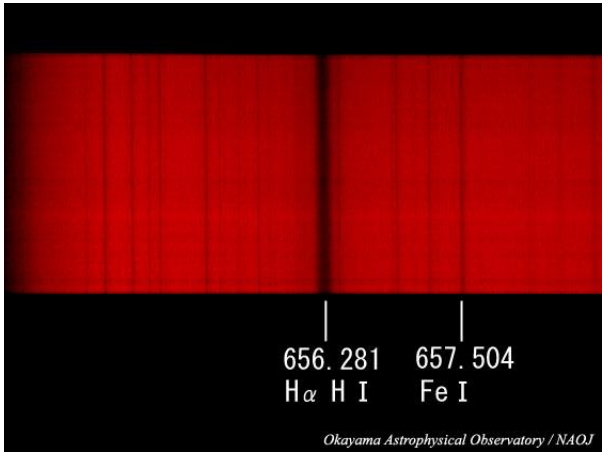
太陽スペクトルとフラウンホーファー線



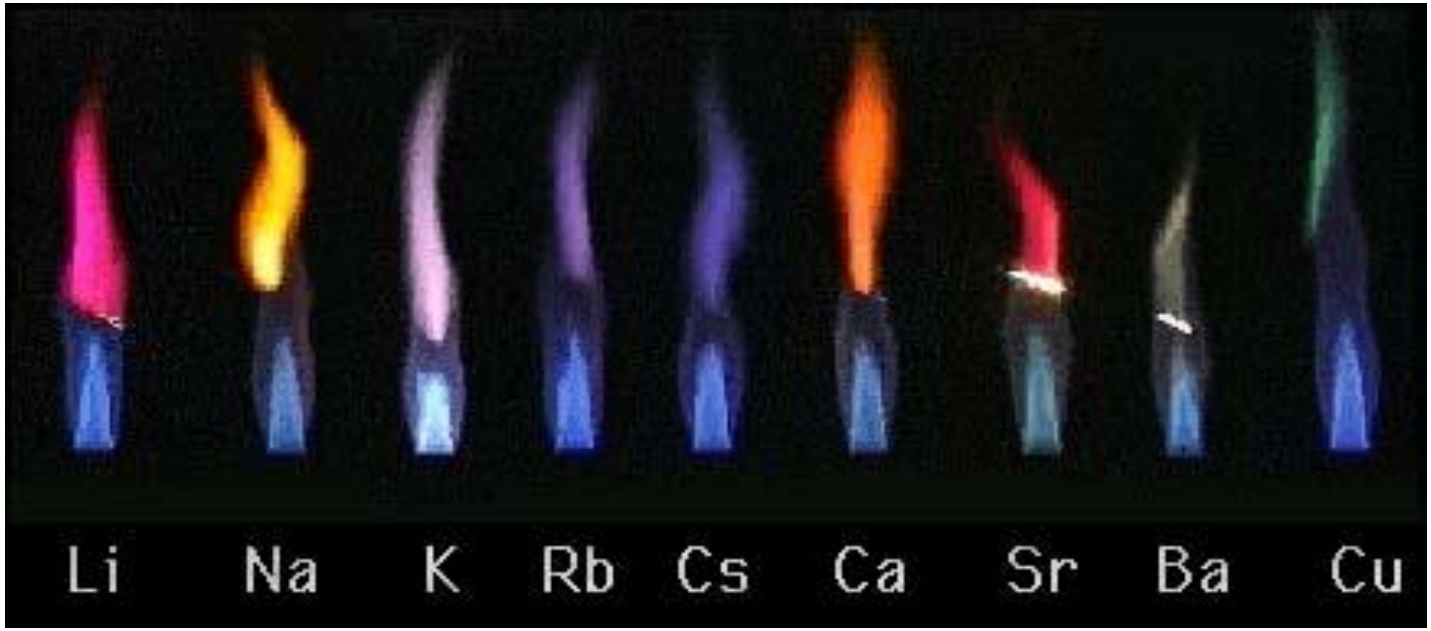


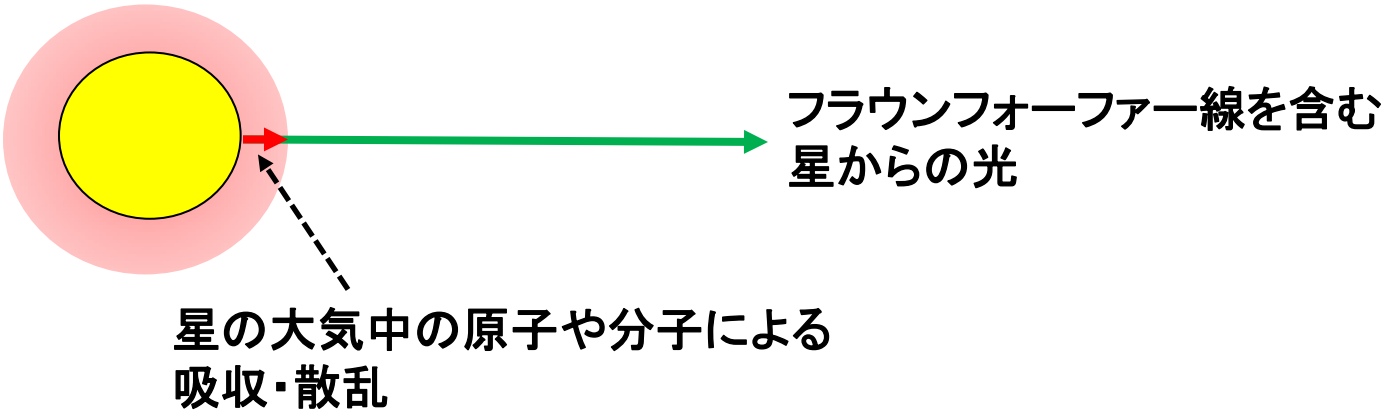




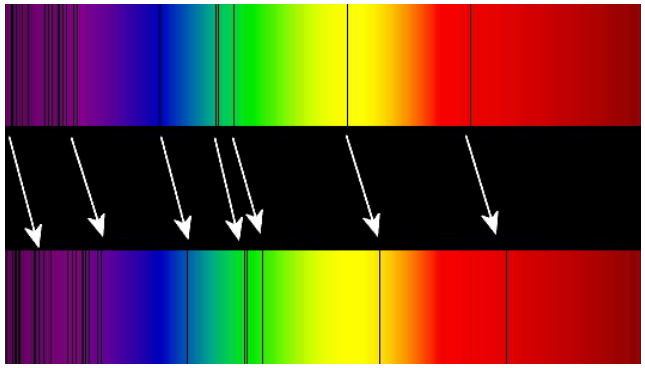


炎色反応


Li
Na
K
Rb
Cs
Ca
Sr
Ba
Cu


フラウンフォーファー線を含む
星からの光
星の大気中の原子や分子による
吸収・散乱

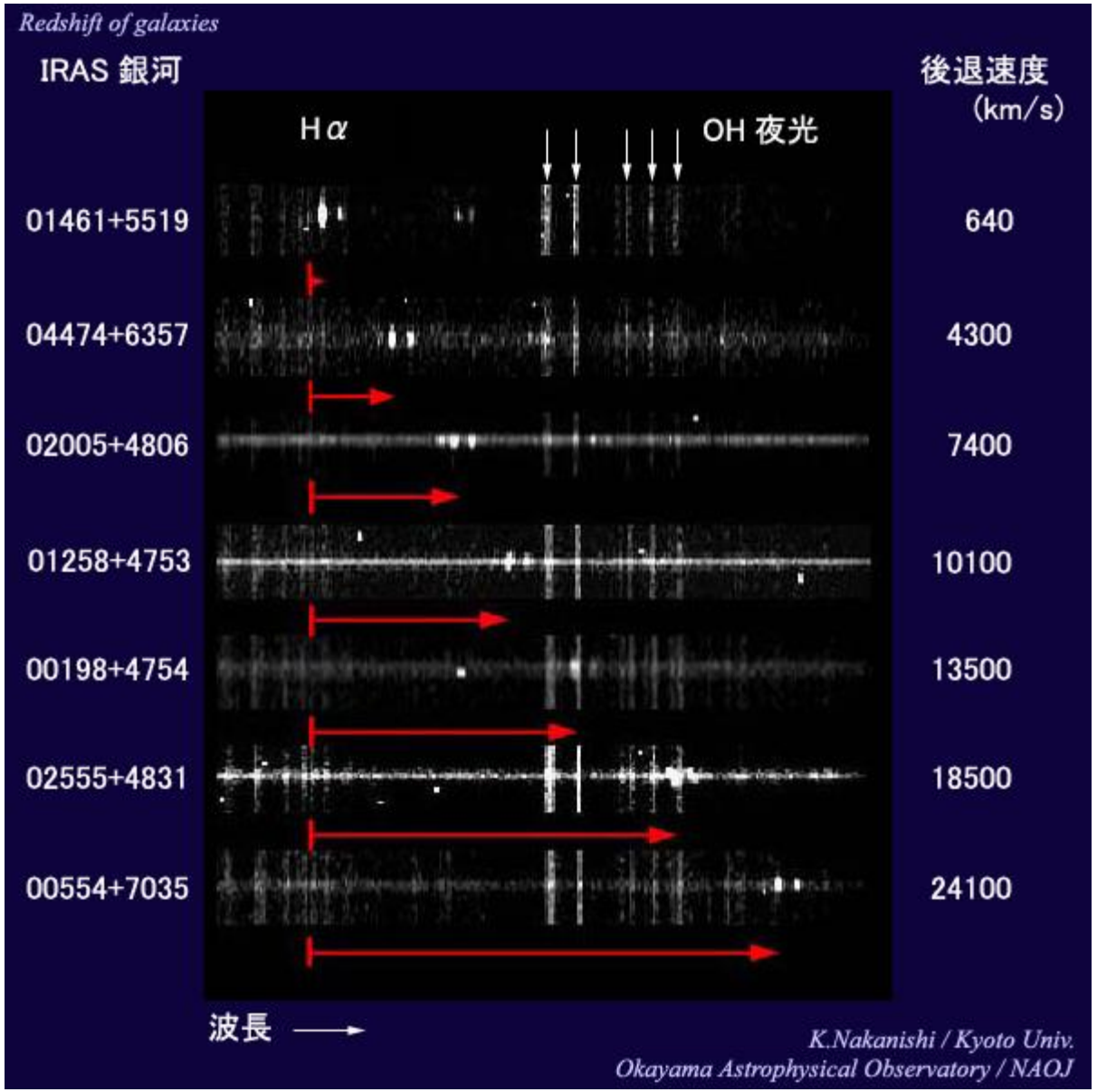
赤方偏移



短い　　長い

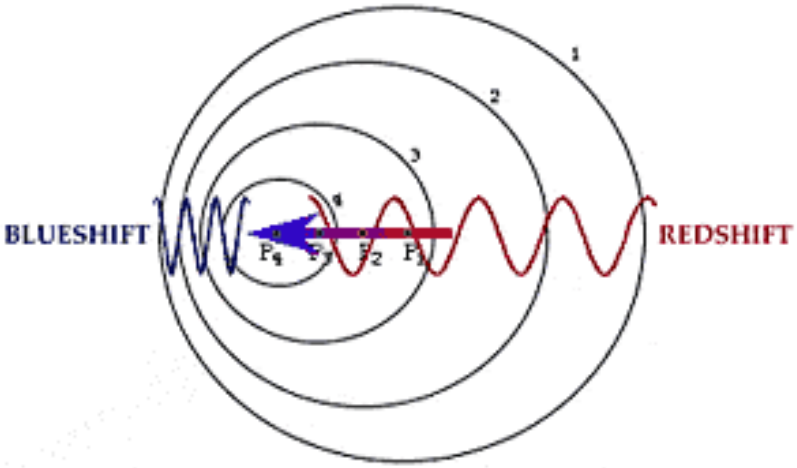
波長

Hα (656nm)



短い ←　波長　→ 長い

ドップラー効果



$$\lambda' = \frac{c + \mathbf{v}}{\nu}$$

$$\lambda' = \lambda + \frac{\mathbf{v}}{\nu}, \qquad \Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{\mathbf{v}}{\nu} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}\lambda$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{c}}$$

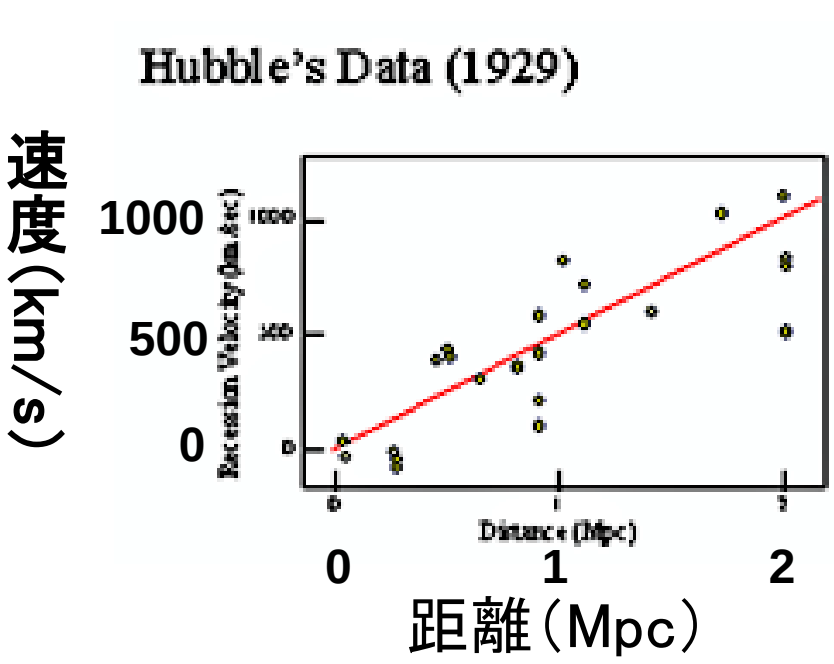
光を出しながら私たちに
近付くと波長が短くなる，
遠ざかると波長は長くなる．

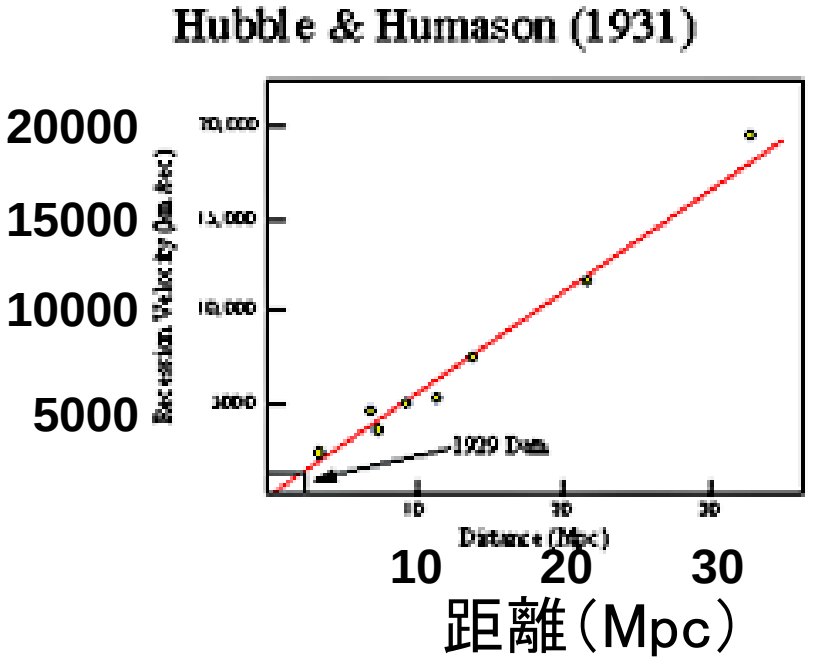
λ： 波長
ν： 振動数
$\mathbf{v}$： 星・銀河の速度
$\mathbf{c}$： 光速度

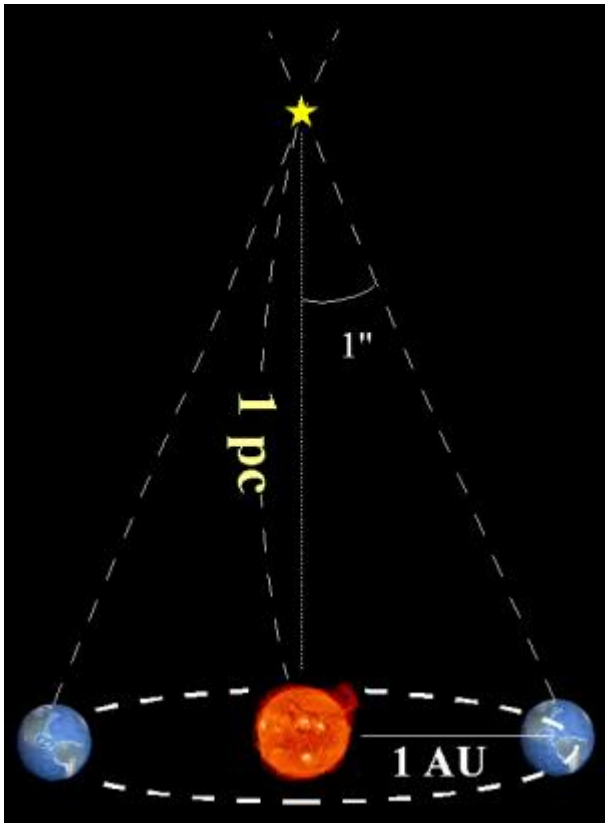


Hubble,Edwin Powell （1889 - 1953） USA

1929年，銀河スペクトルの赤方偏移によって視線速度と距離との間に一定の比例関係が成立する事を発見



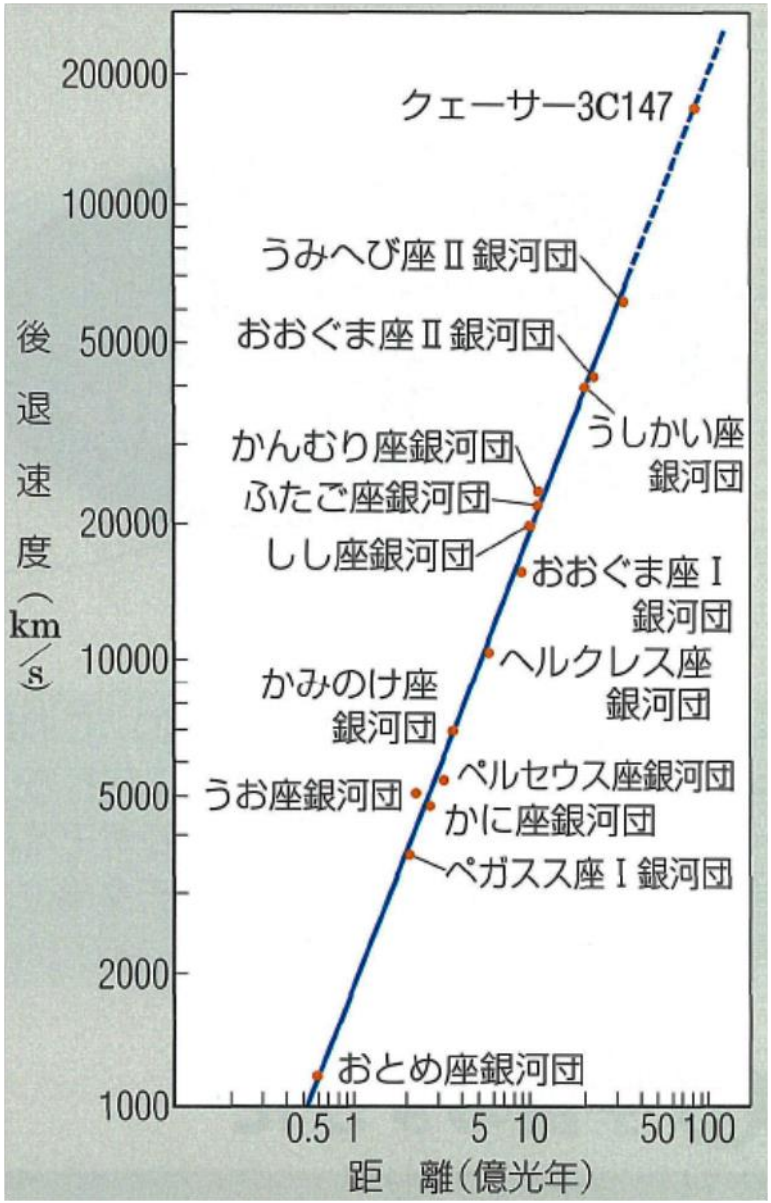




地球から見て視差が1秒となる太陽と星の間の距離を 1 pc（パーセク）とする.

1度＝60分
1分＝60秒

1 pc=~3.08568×10^{16} m= ~2.06265×10^{5} AU=3.26156 ly（光年）



セファイド型変光星から求めた距離

$$\mathbf{v = Hr}$$

H ハッブル定数

$$\mathbf{H = 75 km/s/Mpc}$$

宇宙の年齢

$$\frac{1}{\mathbf{H}} = \frac{\mathbf{r}_{horizon}}{\mathbf{c}} = \mathbf{T}$$

宇宙の年齢 → 宇宙の大きさ
現在は～460億光年

セファイド型変光星

光度が2日から100日程度で周期的に変動.
周期が長いほど見かけの明るさが明るい.

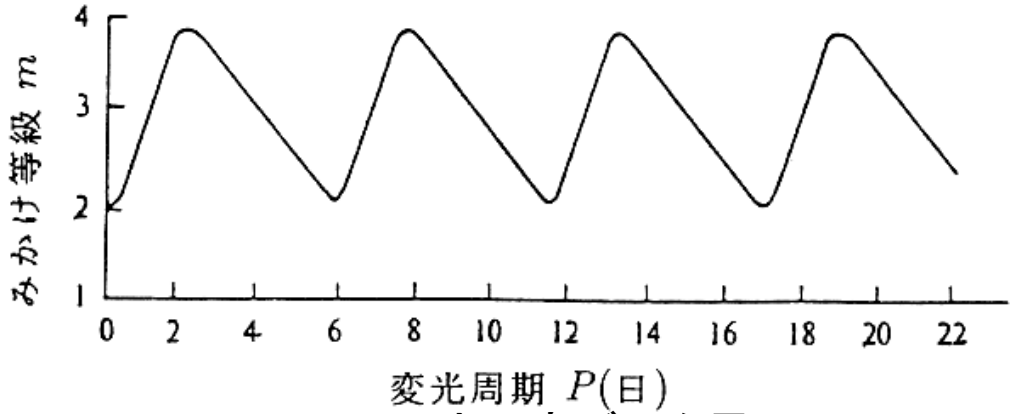
●セファイド型変光星の周期(t)と絶対等級(M)の関係

種族Ⅰ(若い星)　M＝−1.371−2.986 Log t

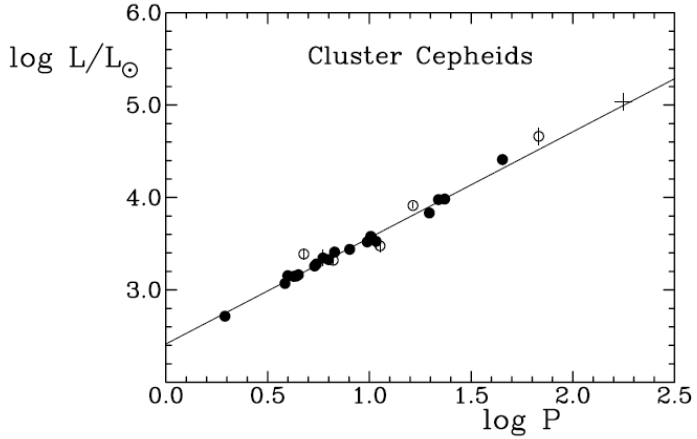
種族Ⅱ(古い星)　M＝0.1＋3.0 Log t

●実視等級(m)を測定して距離(D:パーセク)を求めることができる.

$$\mathrm{Log}D = 0.2(m - M) + 1$$



ケフェウス座デルタ星



Astrophys Space Sci (2010) 326: 219–231

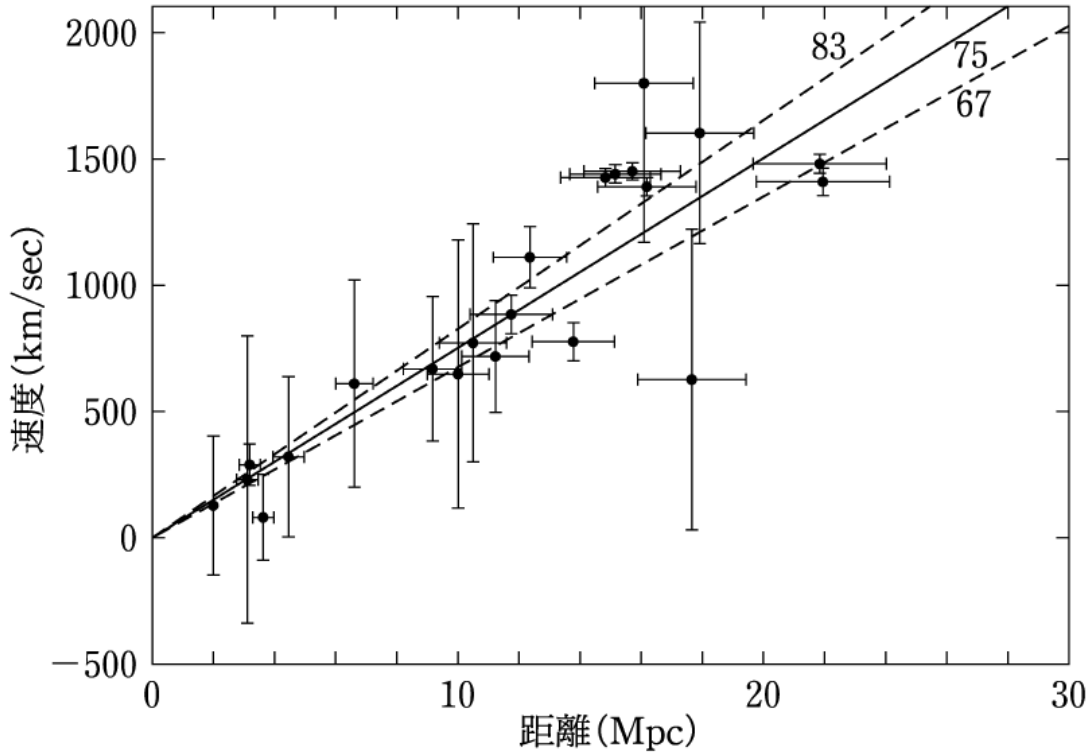


図 30.1　セファイド変光星を標準光源として得られた近傍銀河の距離と後退速度の関係 (Freedman *et al.*, 2001 より)。3 つの数字はハッブル定数 H_0 (km s^{-1} Mpc^{-1}) を表す。この結果得られたハッブル定数の最適値は $H_0 = 75 \pm 10$ km s^{-1} Mpc^{-1}

アインシュタイン方程式（重力場方程式）

1916年 $$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

アインシュタインテンソル　アインシュタインの重力定数　エネルギー・運動量テンソル

時空の曲率　＝　物質場の分布

1917年 $$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

宇宙定数　計量テンソル（時空の2点間の距離を表すときの各座標の重み）

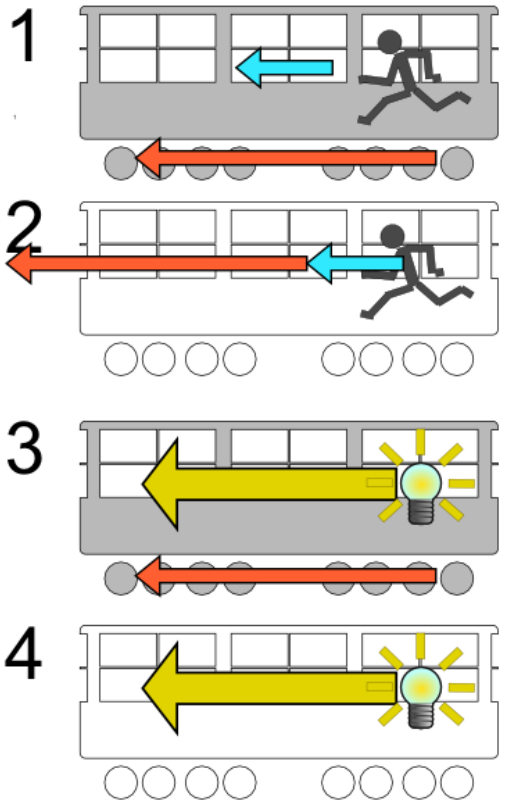
一般相対性原理:
　物理法則は，すべての観測者にとって同じでなければならない.
一般共変性原理:
　物理法則は，すべての座標系において同じ形式でなければならない.
慣性系での自由粒子運動は測地線であるという原理:
　物理的な力を受けない粒子の描く世界線は時空の時間的または光的測地線である.
局所的ローレンツ共変性原理:
　特殊相対性理論の法則は，すべての慣性系の観測者に適用される.

時空は曲がっている:　重力の発生原因として考える。
時空の曲率は物質に起因する

特殊相対性理論　1905年

- 力学法則はどの慣性系においても同じ形で成立する（**相対性原理**）
- 真空中の光の速さは光源の運動状態に無関係に一定である（**光速不変の原理**）

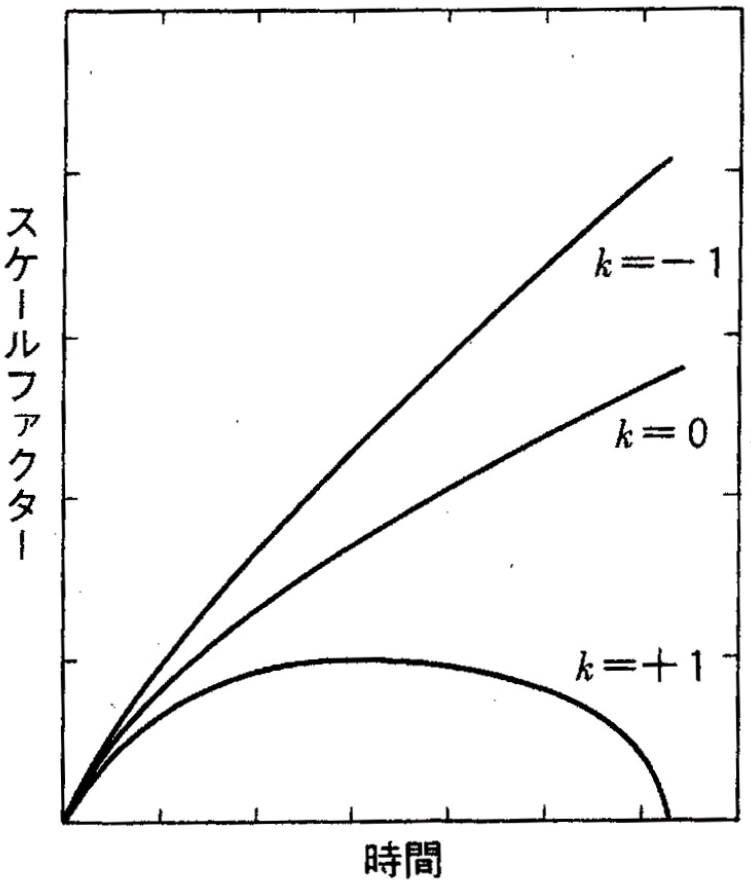
アインシュタインの答えは「**時間の進み方が遅くなる**」



相対論的補正が必須のGPSシステム運用

GPS衛星の速度は約4 km/s:　特殊相対論によって時間の進み方が遅くなる
GPS衛星の高度は約2万 km:　地球の重力場の影響が小さく，一般相対論によって地上よりも時間の進み方が速くなる
相対論的補正をしないと，1日で約11 kmずれる時刻差になる

フリードマン方程式　1922年



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

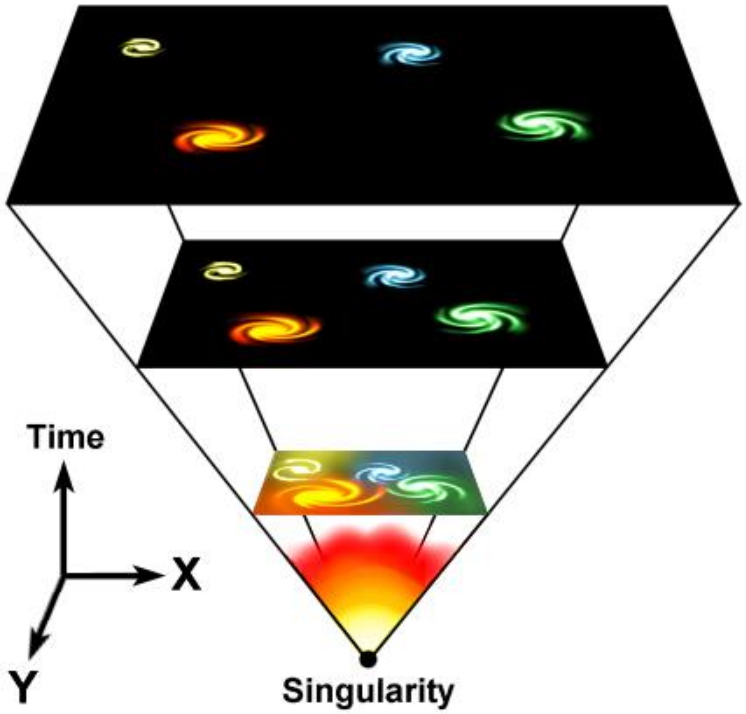
$H = \frac{\dot{a}}{a}$　ハッブル定数

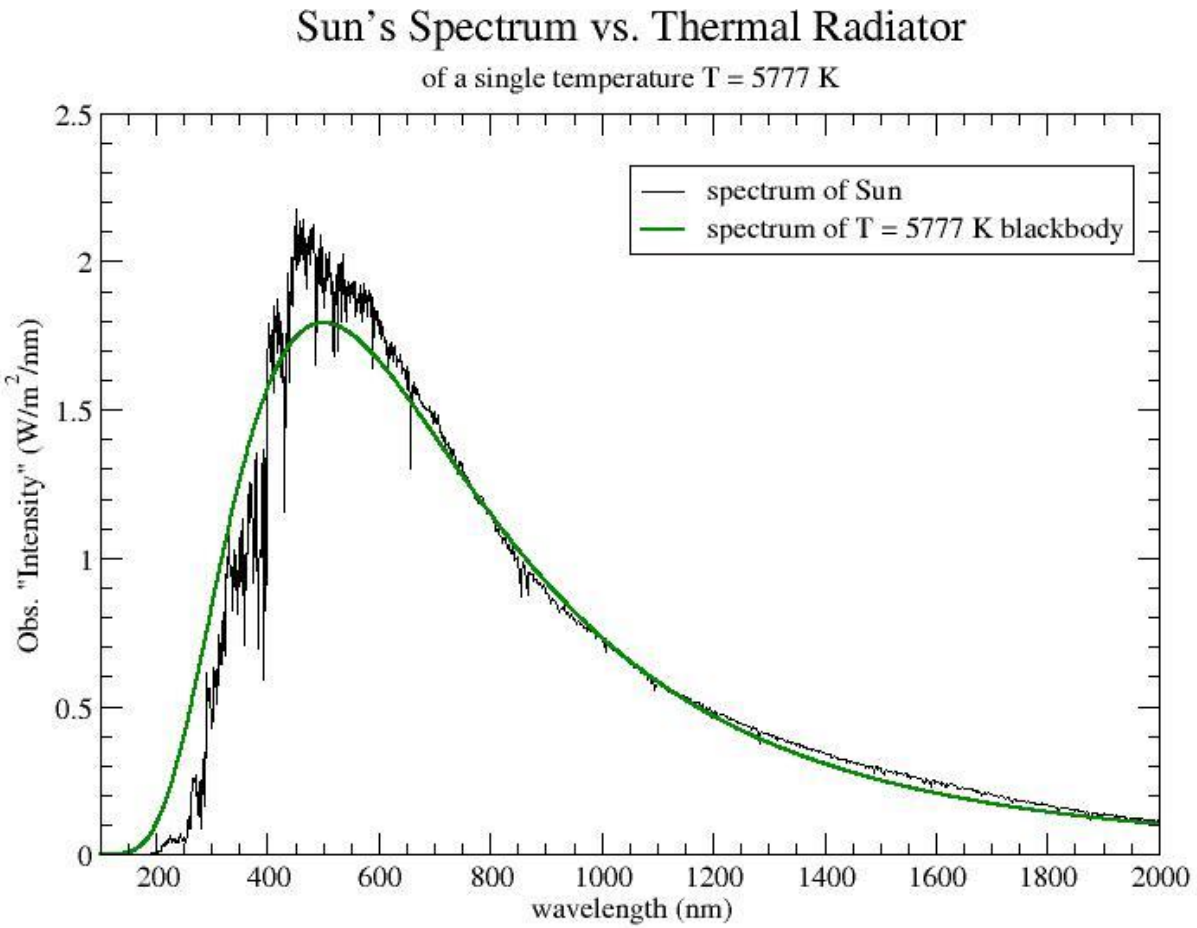
Λ　宇宙項

僅かな摂動で膨張または収縮に転じる
（静止宇宙とならない！）

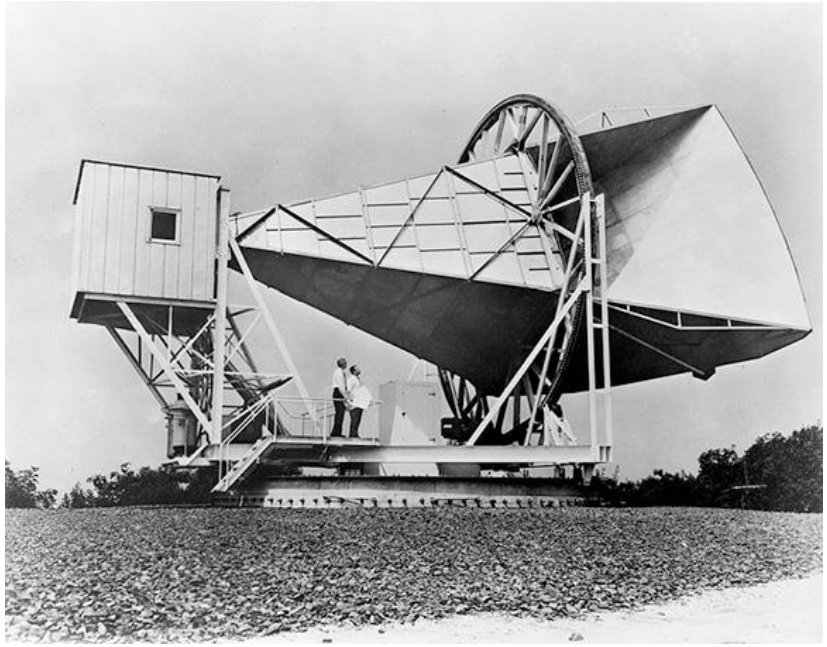


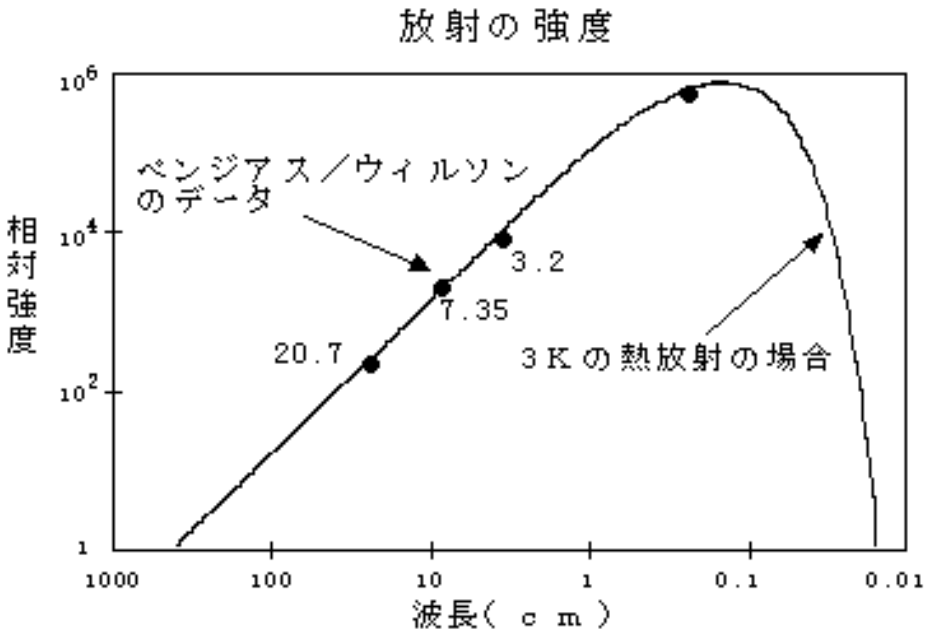
George Gamow（1904 – 1968）
ジョージ・ガモフ，ラルフ・アルファー，ロバート・ハーマン
ビッグバン宇宙論を提唱し，宇宙背景放射の存在を予言した.



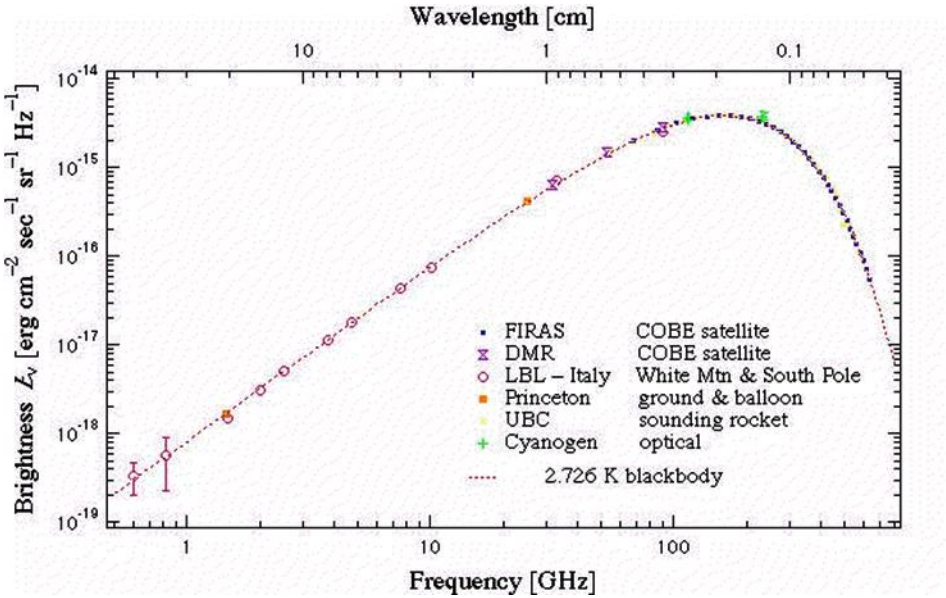


プランクの法則 $I(\lambda) = \dfrac{2hc^2}{\lambda^5} \dfrac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$



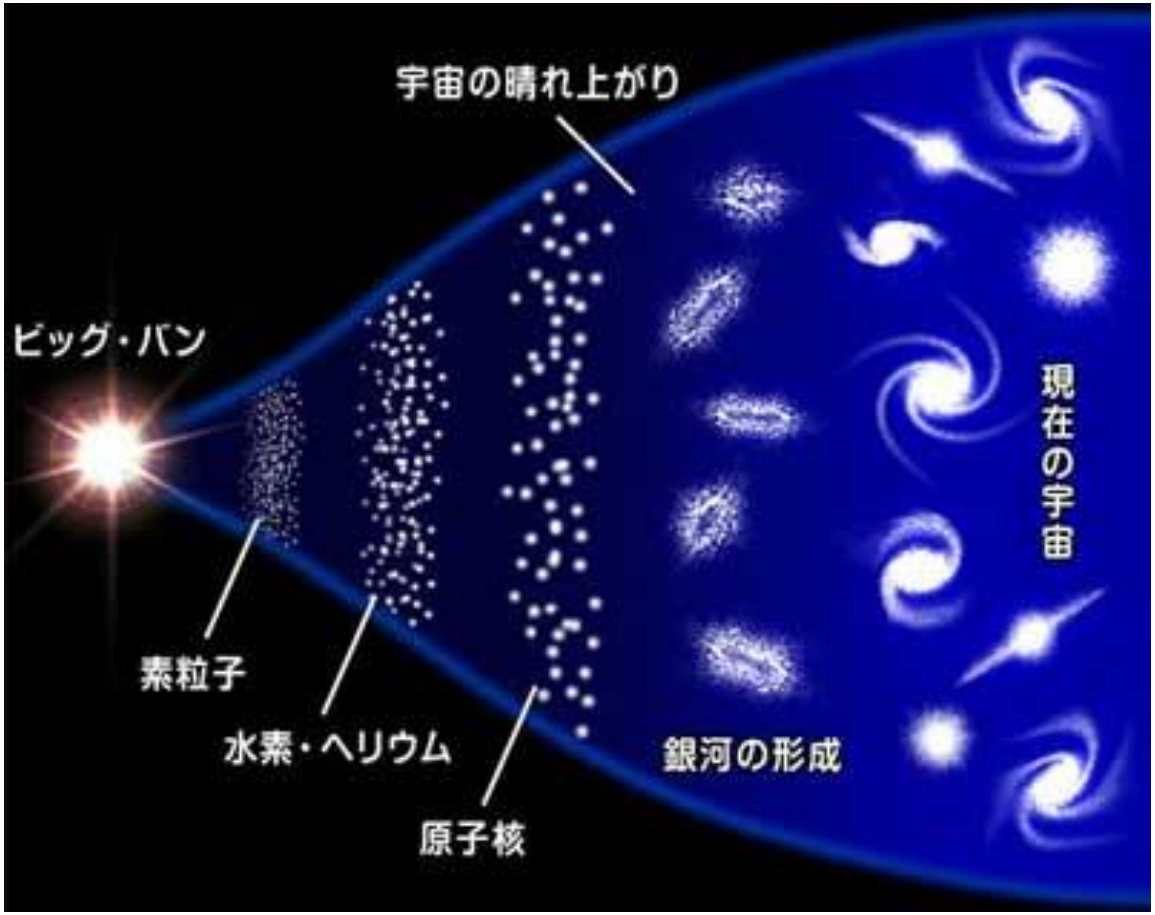


1965年にペンジャスとウィルソンによってマイクロ波（波長が1mm程度の波長の短い電波）を偶然発見
1978年ノーベル賞



宇宙の晴れ上がり（透明な宇宙）（t=38万年）

光は電子に散乱されることなく自由に動きまわれる

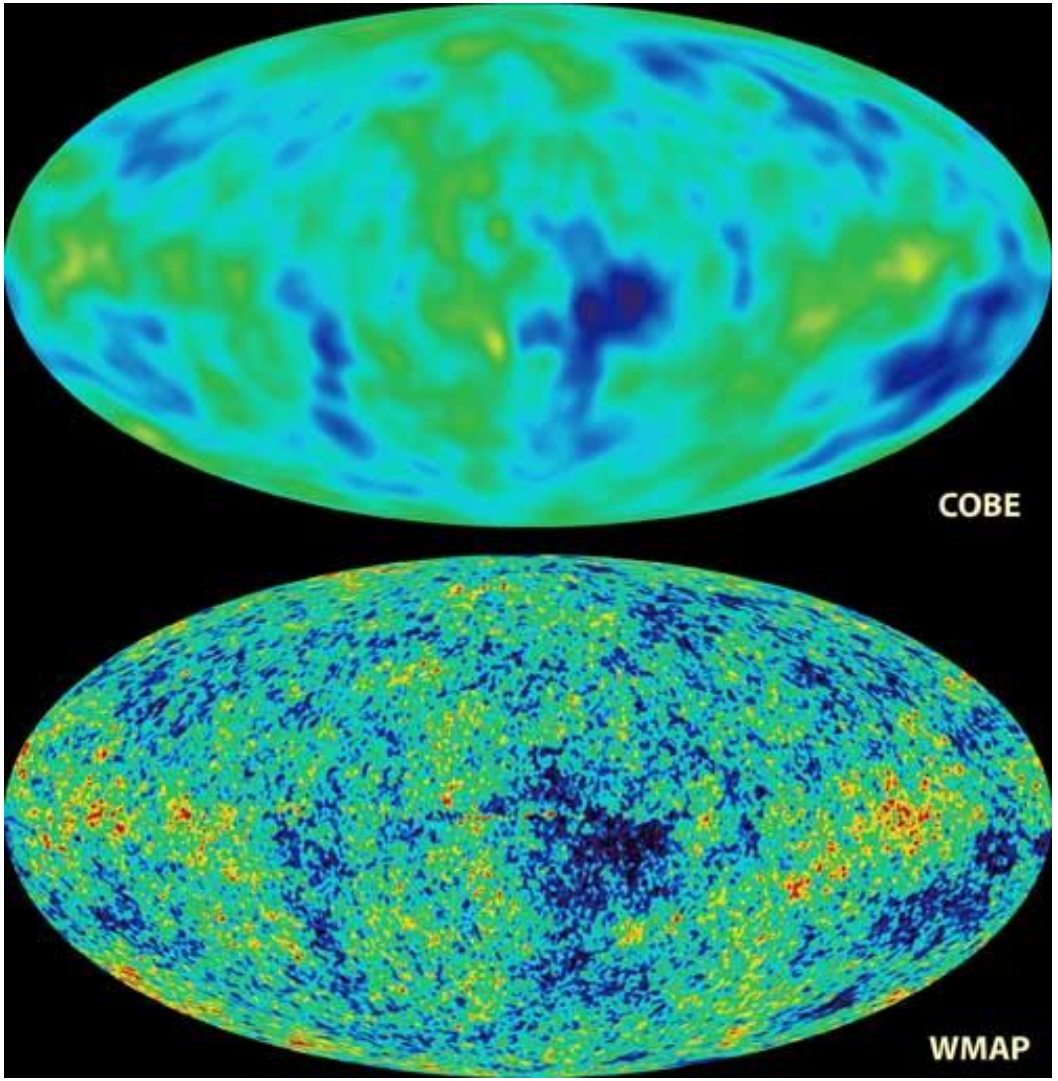


電子が原子核に取り込まれ宇宙が中性化した

マイクロ波背景放射

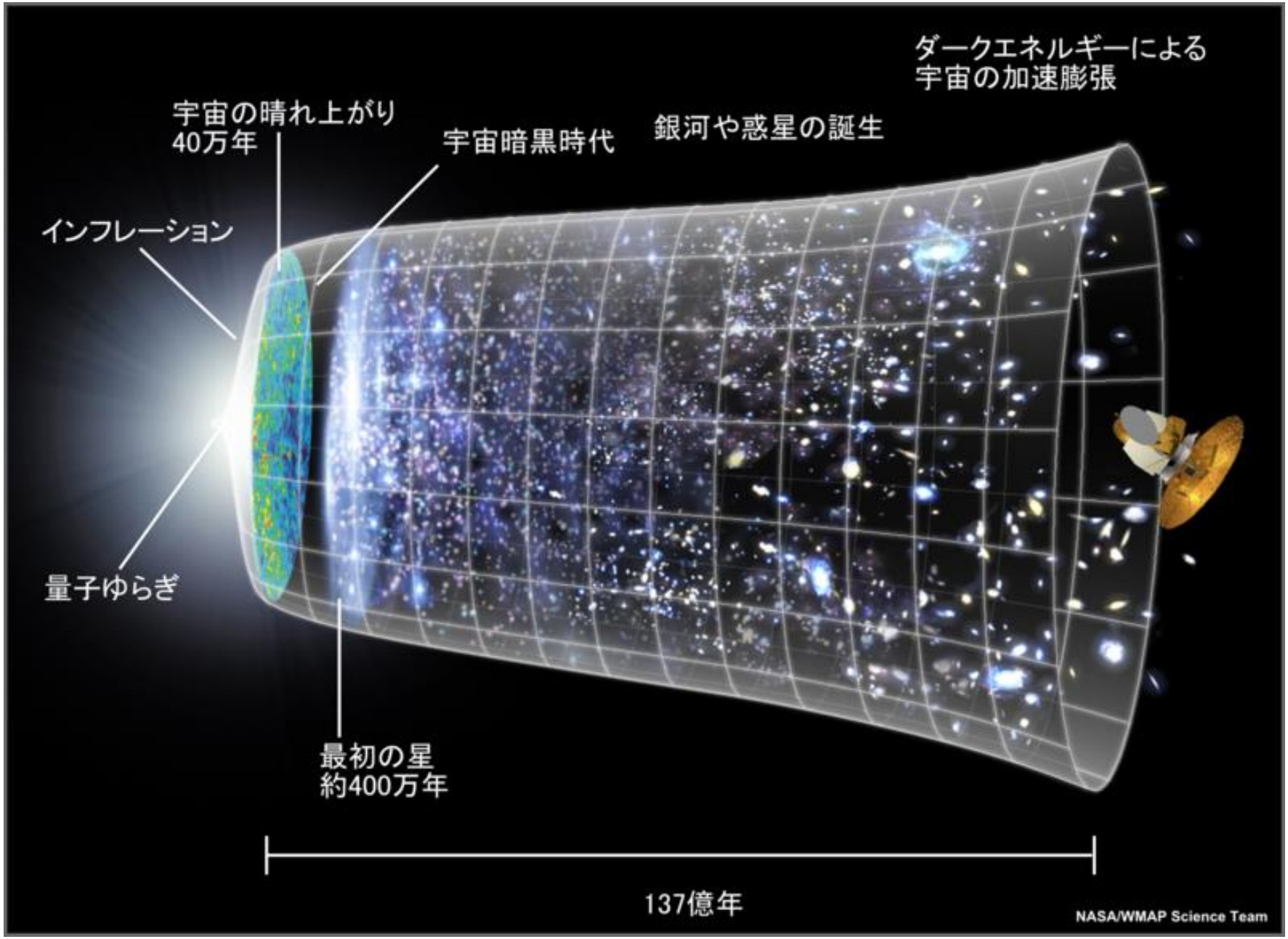
1992年　COBE

2003年　WMAP

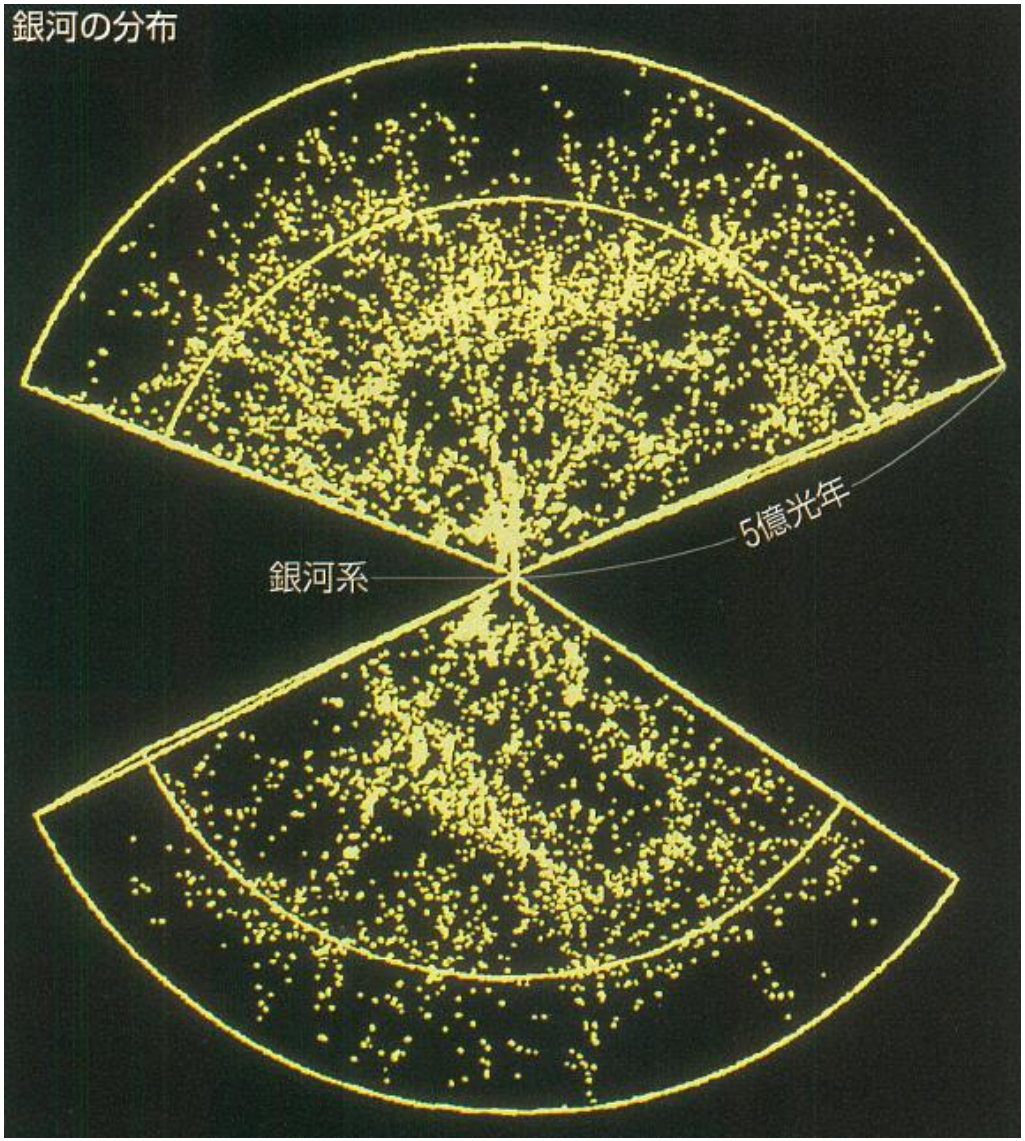


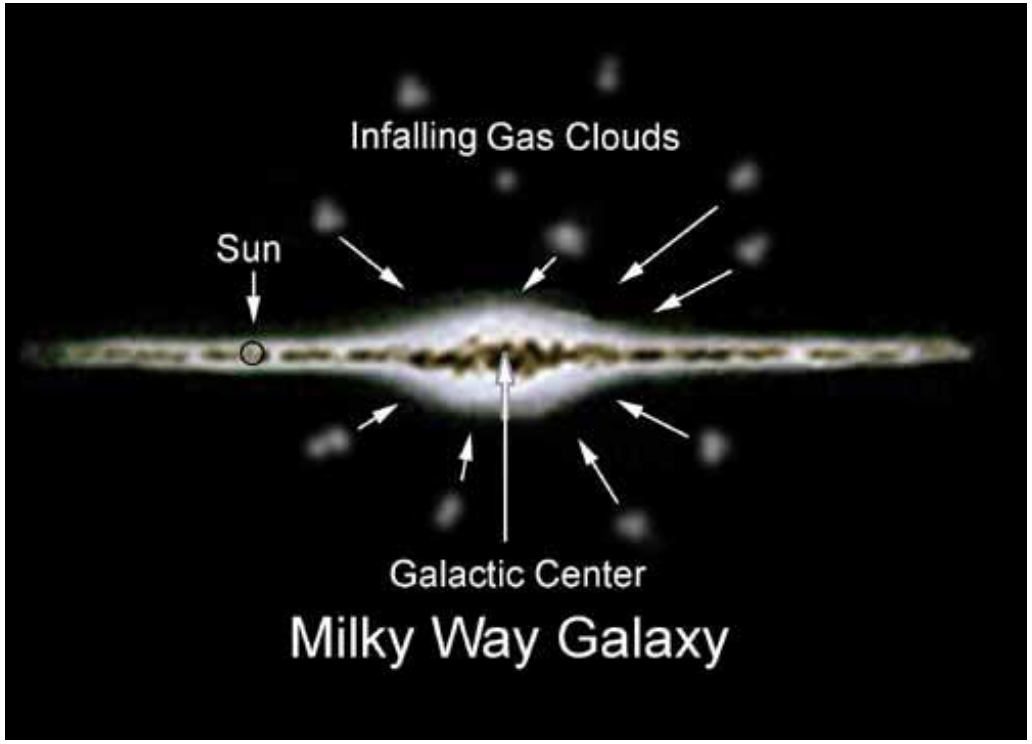
微小な密度揺らぎが重力不安定性により現在の宇宙の構造をつくる

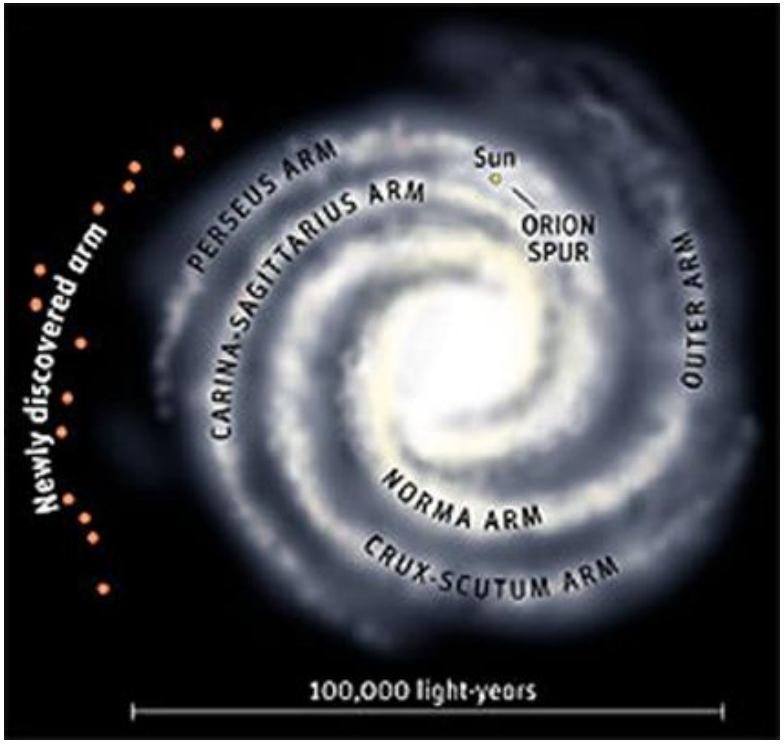
2006年，ジョージ・スムートとジョン・マザーにノーベル賞


ダークエネルギーによる
宇宙の加速膨張
宇宙の晴れ上がり
40万年
宇宙暗黒時代
銀河や惑星の誕生
インフレーション
量子ゆらぎ
最初の星
約400万年
137億年
NASA/WMAP Science Team

宇宙の大規模構造
（Large-scale structure of the cosmos）



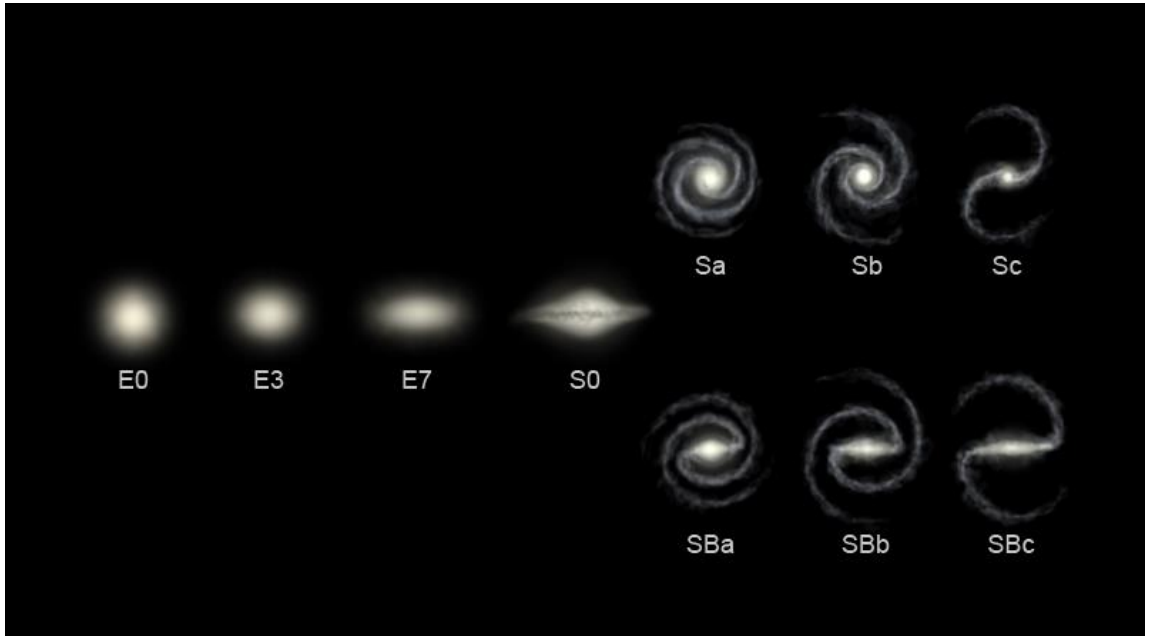

Infalling Gas Clouds
Sun
Galactic Center
Milky Way Galaxy

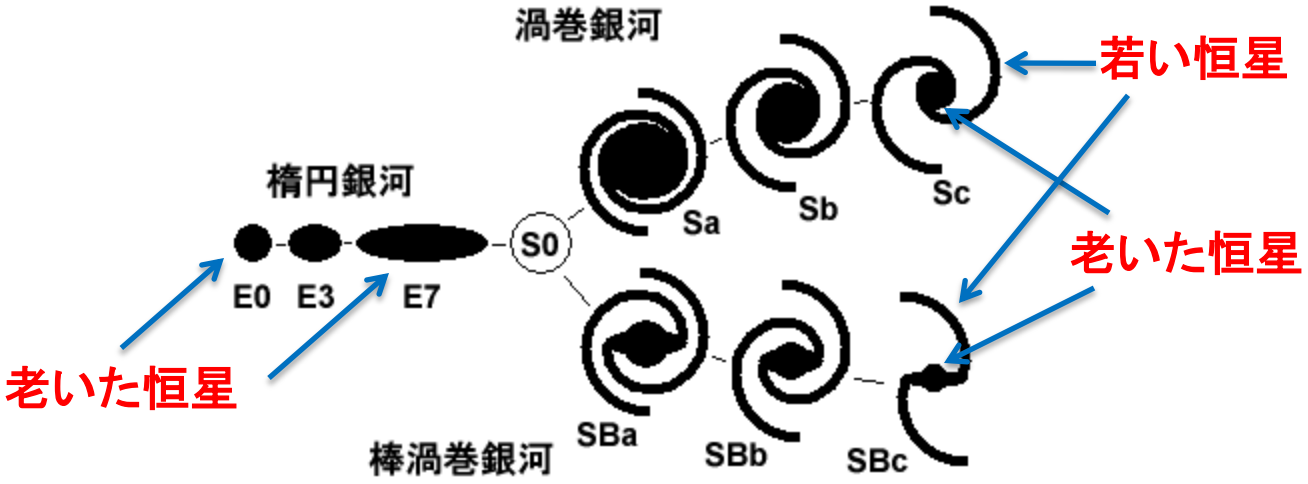

Newly discovered arm
PERSEUS ARM
CARINA-SAGITTARIUS ARM
Sun
ORION SPUR
OUTER ARM
NORMA ARM
CRUX-SCUTUM ARM
100,000 light-years

天の川（私たちの銀河）

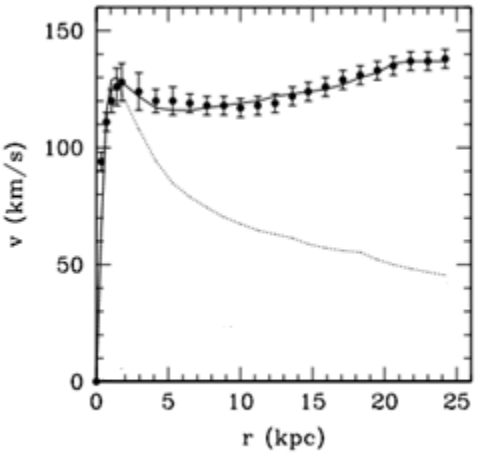


銀河の系列


E0
E3
E7
S0
Sa
Sb
Sc
SBa
SBb
SBc

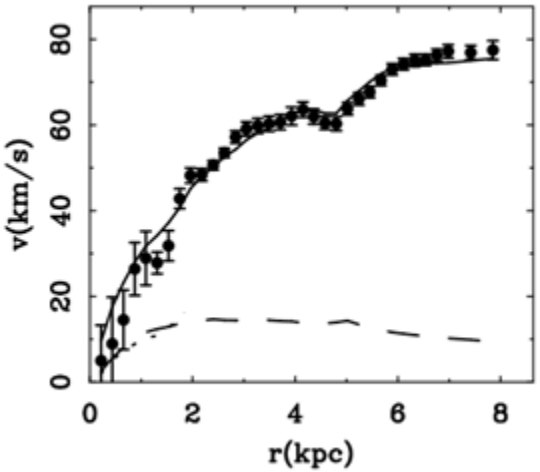

渦巻銀河
若い恒星
楕円銀河
S0
Sa
Sb
Sc
老いた恒星
E0
E3
E7
老いた恒星
SBa
SBb
SBc
棒渦巻銀河

ダークマター（非バリオン物質），ダークエネルギー



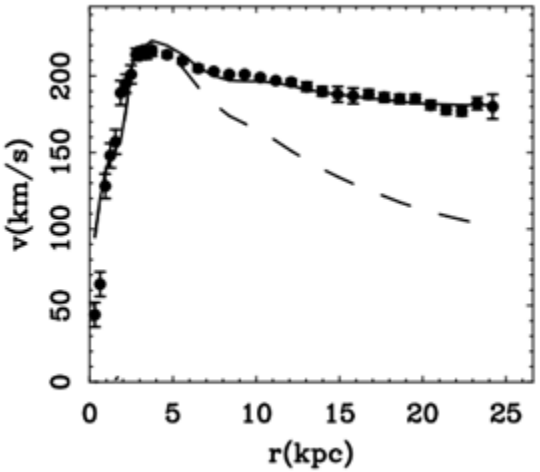
NGC 3675





NGC 1560





NGC 2903



銀河の回転曲線問題（galaxy rotation problem）

1980年代に発見：銀河の「目に見える」（電磁波を放射・吸収している）物質分布から想定される回転速度と異なり，銀河の周縁部でも回転速度が低下せず平坦な速度分布をしている．未知の物質が銀河の質量の大半を占めている？この未知の物質を暗黒物質（ダークマター）

バリオン（陽子，中性子）

ビッグバン宇宙論の問題点

•観測される宇宙が極めて平坦である（平坦性問題）

•因果律的に結び付きを持たないほど大きなスケールにわたって宇宙が極めて一様である（地平線問題）

→ **インフレーション宇宙モデル**

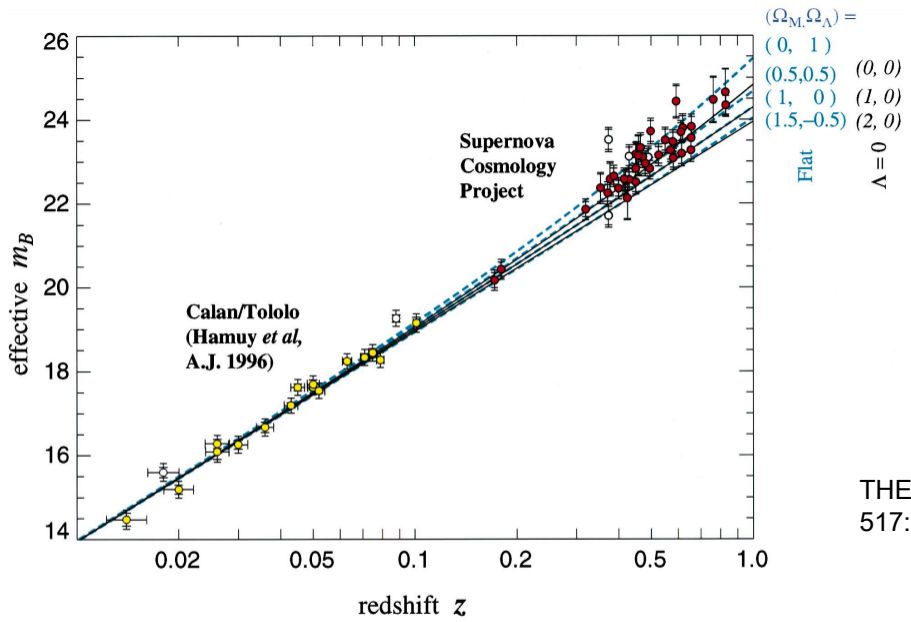
•微視的な量子揺らぎから巨視的なスケールまで指数関数的に加速膨張する

観測

•遠方のIa型超新星の観測により**宇宙は加速膨張をしている！**

•現在の宇宙の全エネルギーの7割をダークエネルギーが占める.

•2011年ノーベル物理学賞：パールムッター，シュミット，リース

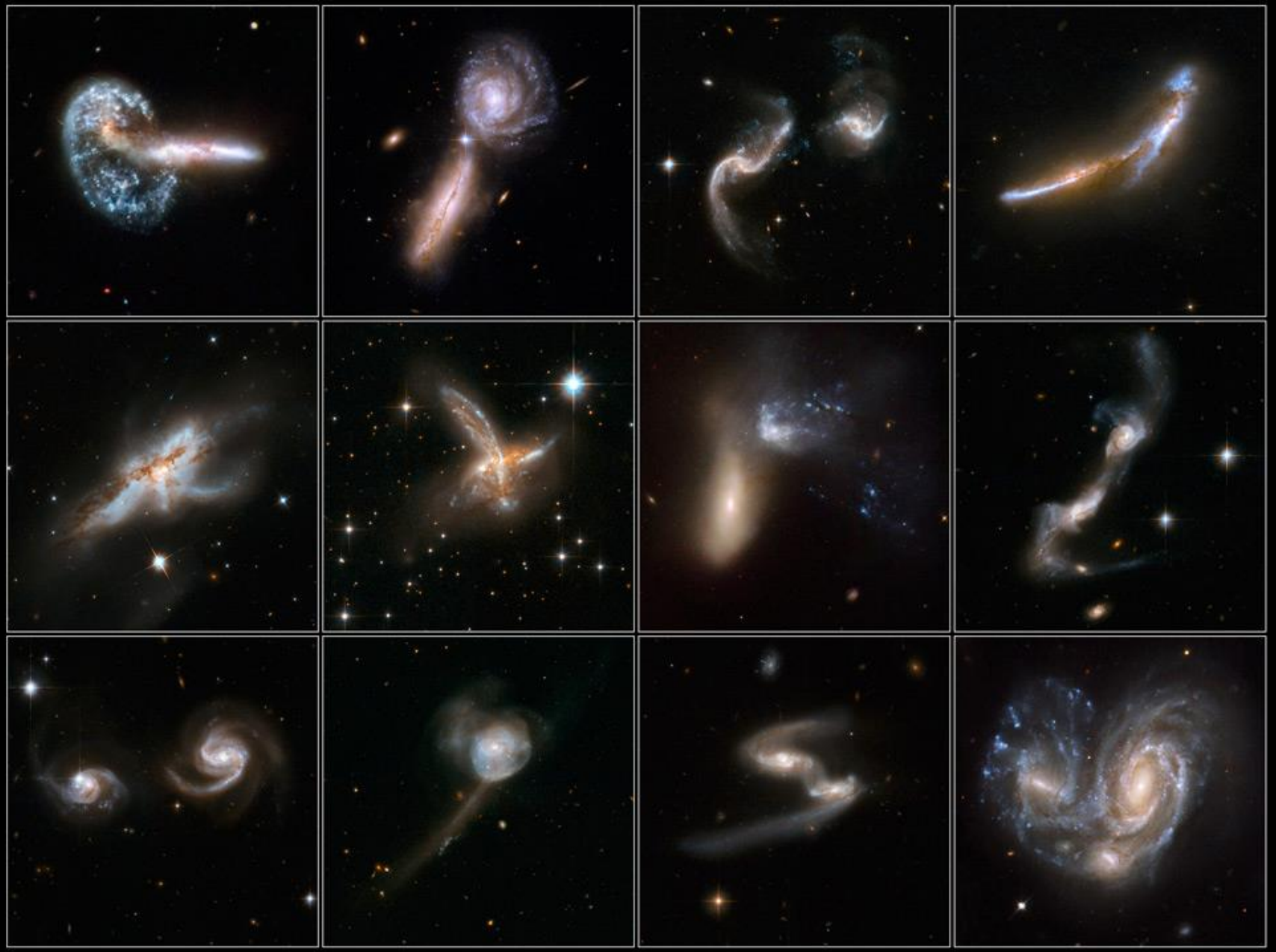


THE ASTROPHYSICAL JOURNAL
517:565-586, 1999.

FIG. 1.—Hubble diagram for 42 high-redshift type Ia supernovae from the Supernova Cosmology Project and 18 low-redshift type Ia supernovae from the Calán/Tololo Supernova Survey after correcting both sets for the SN Ia light-curve width-luminosity relation. The inner error bars show the uncertainty due to measurement errors, while the outer error bars show the total uncertainty when the intrinsic luminosity dispersion, 0.17 mag, of light-curve–width-corrected type Ia supernovae is added in quadrature. The unfilled circles indicate supernovae not included in fit C. The horizontal error bars represent the assigned peculiar velocity uncertainty of 300 km s^{-1}. The solid curves are the theoretical $m_B^{eff}(z)$ for a range of cosmological models with zero cosmological constant: $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 0)$ on top, (1, 0) in middle, and (2, 0) on bottom. The dashed curves are for a range of flat cosmological models: $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0, 1)$ on top, (0.5, 0.5) second from top, (1, 0) third from top, and (1.5, −0.5) on bottom.

Interacting Galaxies

Hubble Space Telescope • ACS/WFC • WFPC2

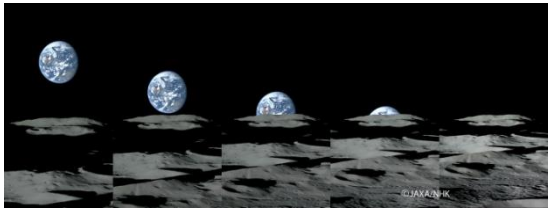


NASA, ESA, A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), and the Hubble Heritage (AURA/STScI)-ESA/Hubble Collaboration

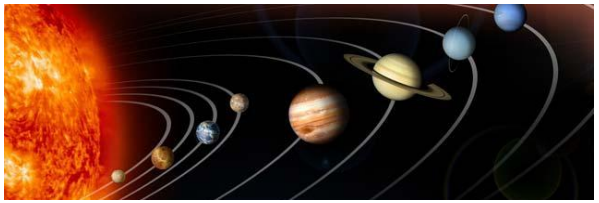
STScI-PRC08-16a

宇宙の階層構造

地球/月



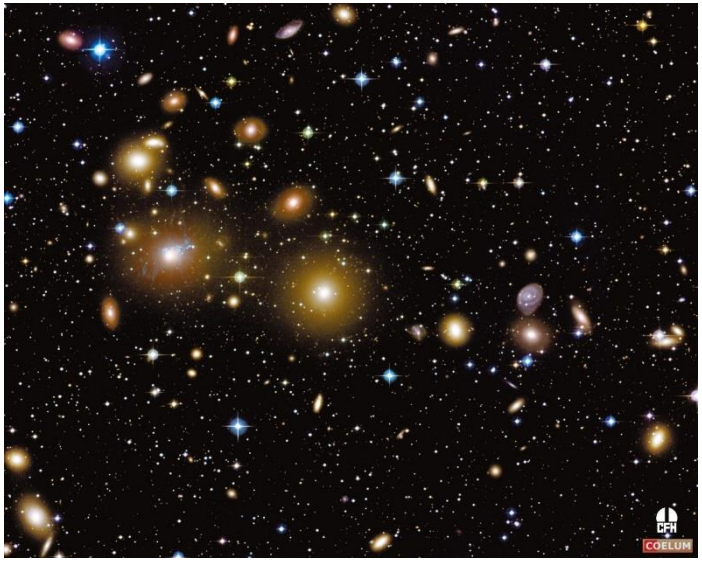
太陽系



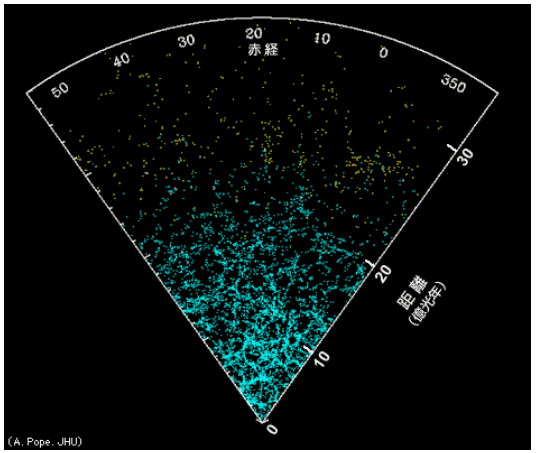
銀河



銀河団



宇宙の大規模構造



問題

ハッブル定数（$H = 70\mathrm{km/s/Mpc}$）
から宇宙の年齢を求めよ.

$$T = \frac{1}{H}$$

1 pc=~3.08568×10^{16} m= ~2.06265×10^{5} AU=3.26156 ly（光年）
1Mpc=10^{6}pc

我々の宇宙の進化と誕生を調べるために,
遠くの宇宙を観測している. その理由を述
べよ.