

宇宙惑星科学入門 (No. 2)

# 銀河系と銀河

羽部朝男

北大理学研究院物理学部門

理学院宇宙理学専攻

宇宙物理学研究室

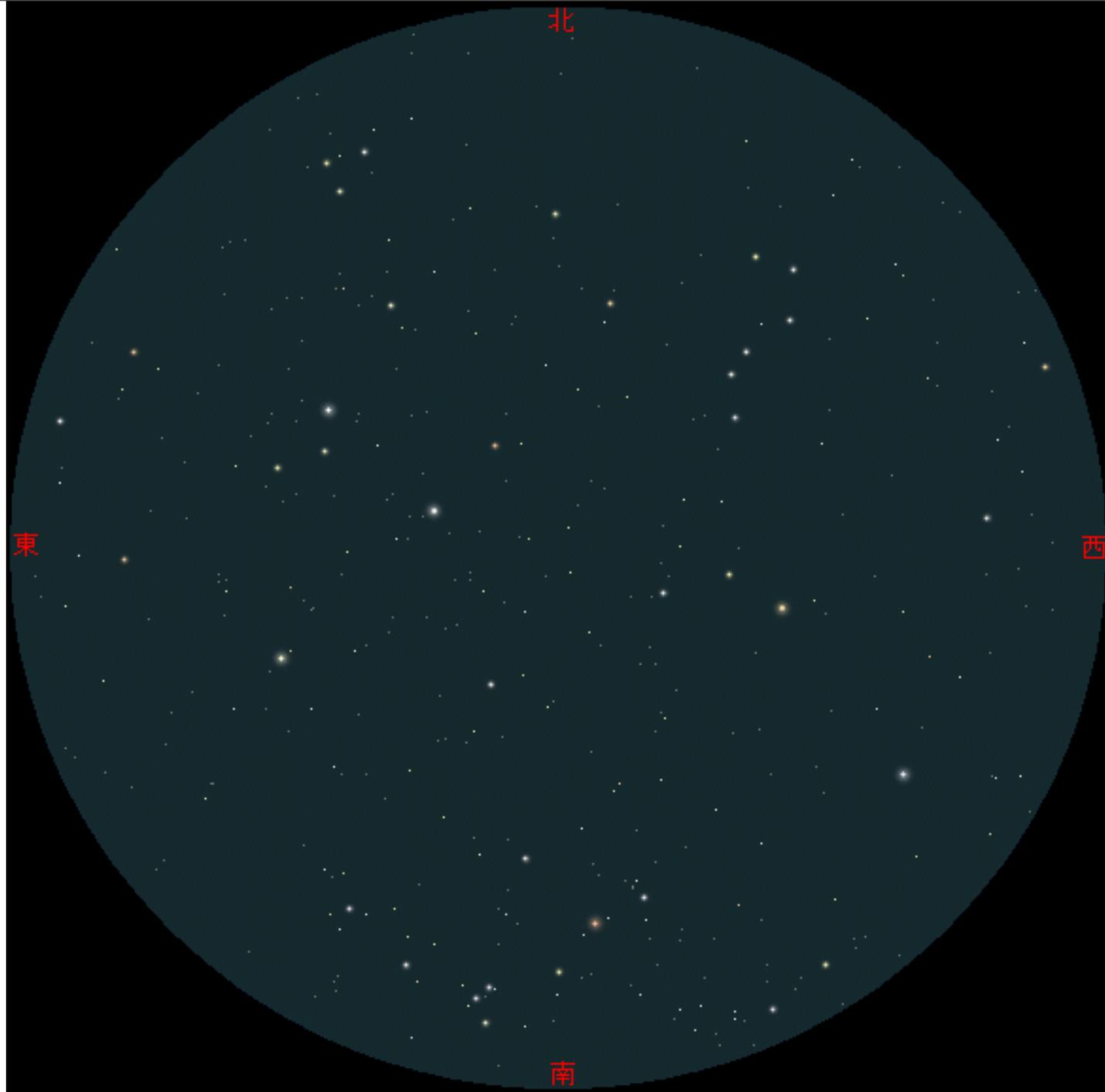
- 前回 恒星のお話
- 今回 銀河のお話
  - 銀河は恒星の大きな集団
  - 我々の銀河のことを特に銀河系と呼ぶ
  - 銀河を通して宇宙全体を研究できる
  - 銀河の中心には巨大なブラックホールがある

# 目次

1. 銀河への道
2. 宇宙が膨張していることを示した銀河
  - 銀河と宇宙論
3. 銀河を観測して宇宙のでき方を探る
4. 怪物が住む銀河
  - 活動的銀河と巨大ブラックホール
5. まとめ

# 1. 銀河への道

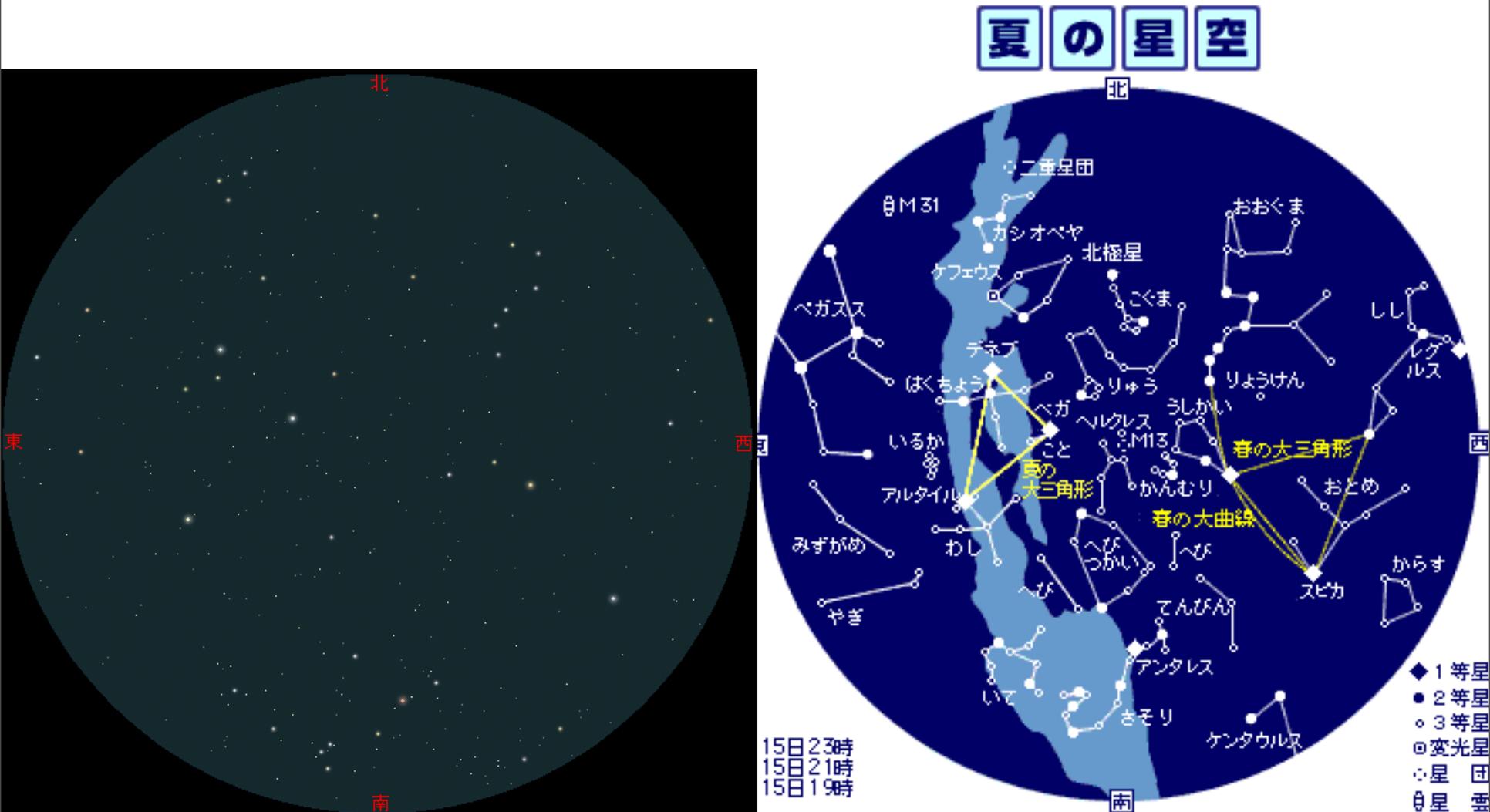
- 夜空には、月と星と天の川
  - 宇宙はどれくらい大きいのだろうか
  - 宇宙の果てはどうなっているのか
  - 宇宙の過去はどうなっていて未来はどうなるのか
- 月や太陽、恒星までの距離を測ることにより
  - 天の川は多数の星 = 我々の銀河
  - 我々の天の川以外にも多数の銀河
- 銀河を多数観測することが、宇宙を解き明かすきっかけとなった



# 夏の夜空と星座



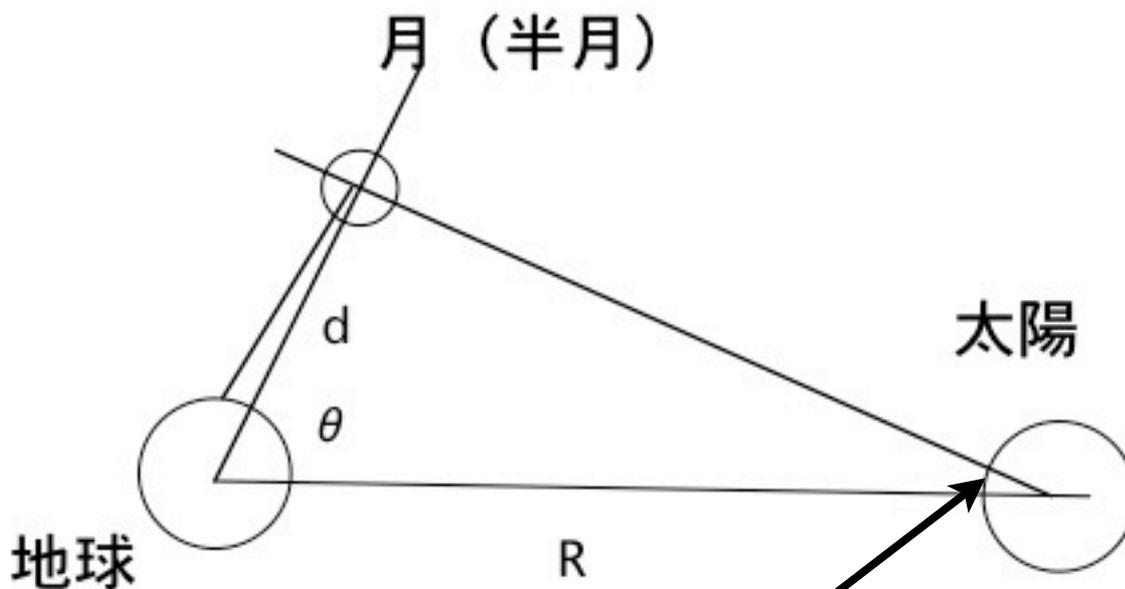
# 夏の夜空と星座





# 宇宙はどれくらい大きいのだろうか？(1)

- 太陽までの距離は？(以下は歴史的な方法)
  - 三角測量、たとえば古代ギリシャのアリスタルコスの方法
  - 地球が太陽の周りを回転していることを利用した方法
    - 光行差から地球の公転速度を求める
    - 公転速度と地球が一年で太陽の周りを回ることから地球と太陽との距離を求められる



$$d = R \sin(\pi/2 - \theta)$$

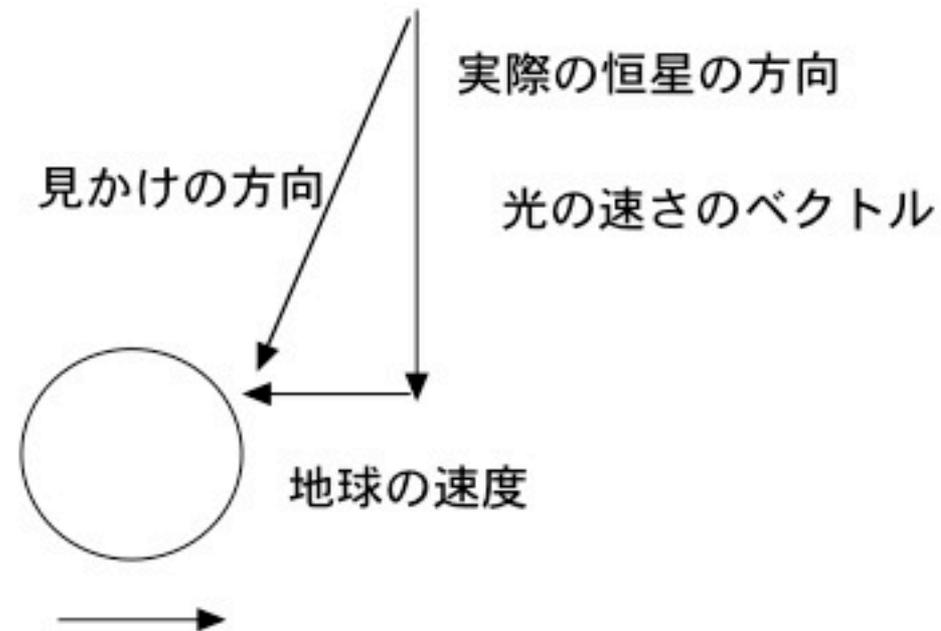
アリストアルコス (古代ギリシャ) が考えた方法

地球と月の距離は月食の時の月面の地球の影から推測

# 宇宙はどれくらい大きいのだろうか？(1)<sup>10</sup>

- 太陽までの距離は？(以下は歴史的な方法)
  - 三角測量、たとえば古代ギリシャのアリスタルコスの方法
  - 地球が太陽の周りを回転していることを利用した方法
    - 光行差から地球の公転速度を求める
    - 公転速度と地球が一年で太陽の周りを回ることから地球と太陽との距離を求められる

## 光行差



恒星が見える方向が地球の運動でずれることから、  
地球の速度を推定する

## 宇宙はどれくらい大きいのだろうか？(2)

- 光行差から地球の公転速度 30km/s
- 地球は太陽の周りをほぼ円軌道で回っている。これを使って、地球が太陽のまわりを1年で1周することから、太陽と地球の距離を知ることが出来る。
- 地球と太陽の距離は1億5千万km

# レポート

- 1) 地球が太陽の周りの円軌道を運動しているとする。円軌道の周期 $T$ は、太陽と地球の距離を $r$ 、地球の速度を $v$ と

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

の関係がある。観測から $v$ と $T$ がわかれば、

$$r = \frac{vT}{2\pi}$$

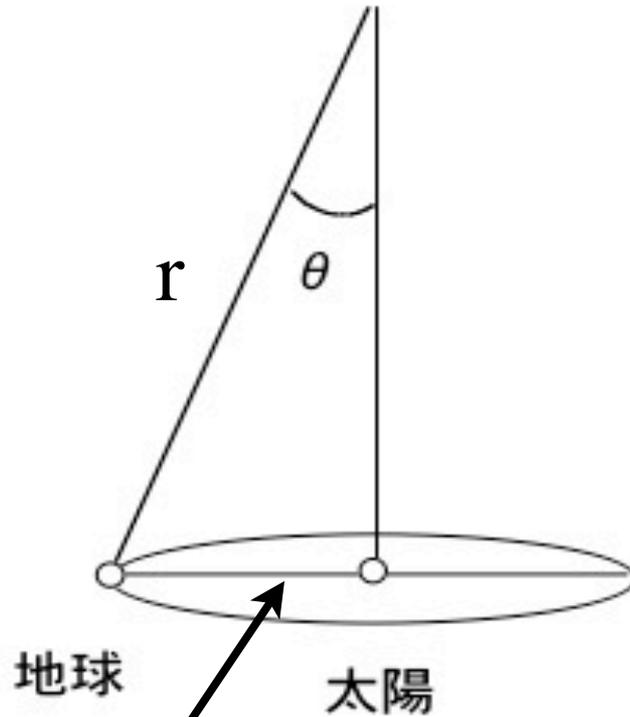
と太陽と地球の距離を求めることが出来る。 $T$ は1年、地球の速度を約 $v = 30\text{km/s}$ として $r$ を求めよ。

- 2) この講義を聞いて理解したことを書きなさい

# 恒星までの距離を求める主な方法

- 年周視差
  - 地球が公転することによって恒星の見かけの方向が変わることから距離を求める
- セファイド変光星の光度周期関係を利用する
  - 光度周期関係を使って周期を測定して光度を求め、見かけの明るさと比較から距離を求める

年周視差  $\theta$

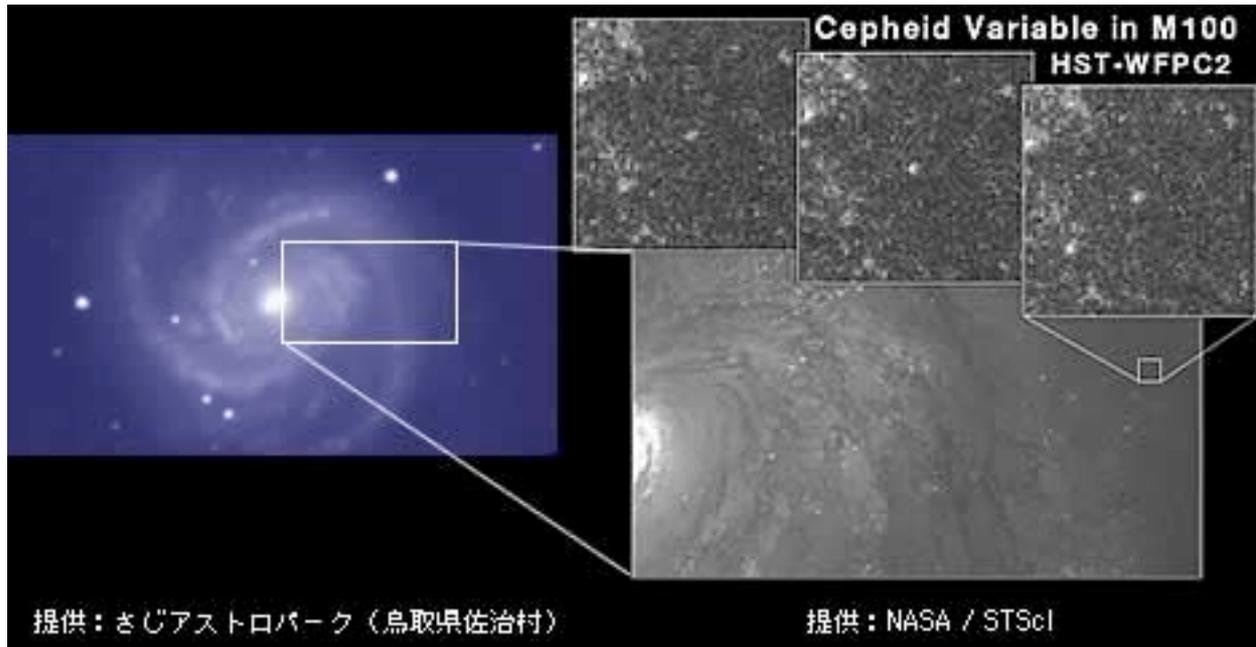


$$r \sin \theta = \text{地球と太陽の距離}$$

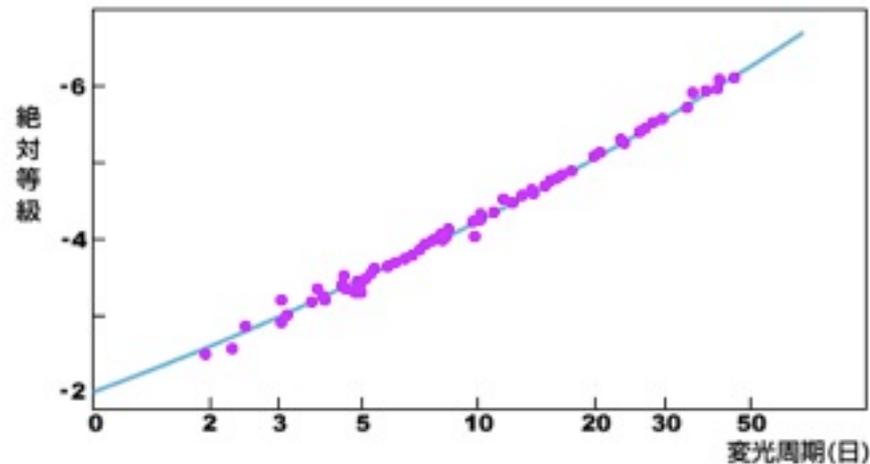
天文単位(AU)と言う

# 恒星までの距離を求める主な方法

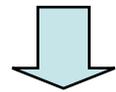
- 年周視差
  - 地球が公転することによって恒星の見かけの方向が変わることから距離を求める
- セファイド変光星の光度周期関係を利用する
  - 光度周期関係を使って周期を測定して光度を求め、見かけの明るさと比較から距離を求める



# セファイド 変光星 周期光度関係



変光星の周期  
を測って,光度  
周期関係から  
光度を知り,  
見かけの明る  
さと比較



距離を知る

[http://www.kahaku.go.jp/education/program/i\\_pgm/tenmon/space/galaxy/galaxy05.html](http://www.kahaku.go.jp/education/program/i_pgm/tenmon/space/galaxy/galaxy05.html)より

# 天の川銀河

- 恒星の距離を測定することが可能になり, 天の川銀河の構造が明らかになった
  1. 恒星が円盤状に分布
  2. 真ん中が少し膨らんでいる
  3. 銀河の中心の周りを回転
    - 回転速度は約 $200\text{km/s}$
  4. 直径 10万光年
  5. 恒星の質量  $2 \times 10^{44}$  乗グラム
  6. 恒星の数 約1千億個



天の川銀河( NASA COBE衛星による観測)

# 銀河は巨大な恒星の集団

- 銀河に関する20世紀初めの論争
  - 銀河は、太陽系のように恒星の周りを回転するガス円盤なのか、我々の銀河と同じものなのか
  - 銀河が恒星の周りのガスなら、大きさが天の川銀河よりも非常に小さい。銀河の大きさを知ることが重要
- 銀河の大きさを知るには、見かけの大きさ(視直径)と、距離が分かれば良い
- セファイド変光星を使って銀河の距離を測定した、
- その結果、銀河は天の川と同じような大きさ
- 宇宙は天の川銀河の大きさより大きなことが分かった

# 銀河には2種類

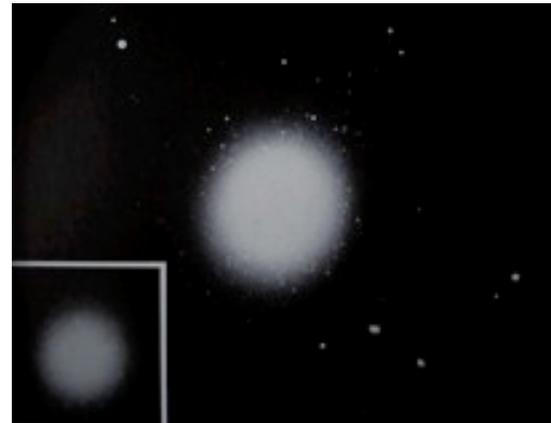
- 円盤銀河

- 円盤は星の集団  
(10億から1000億個)とガス、
- 大きさは10万光年
- 円盤は全体として回転
- 星形成が活発



- 楕円銀河

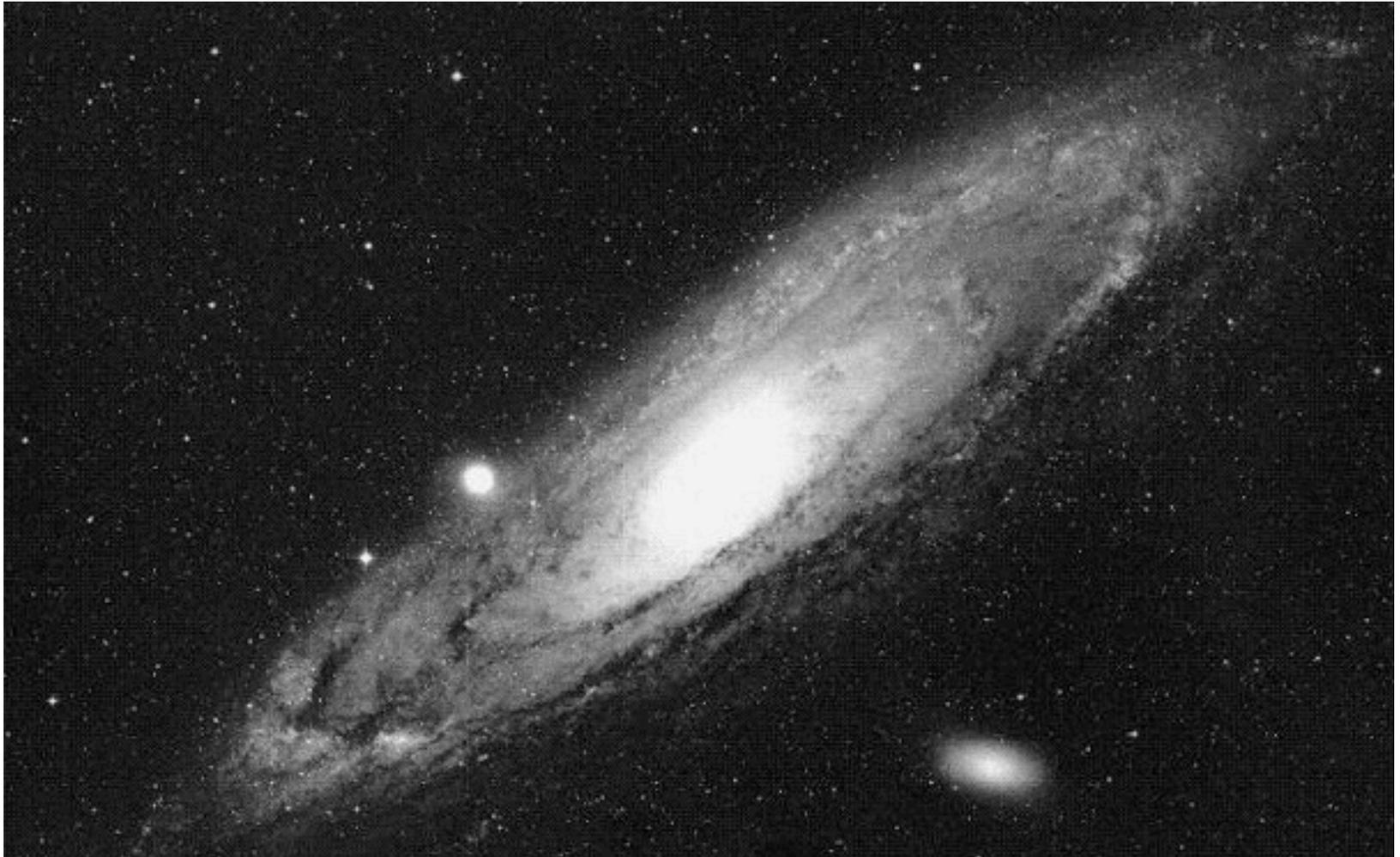
- 楕円状に星が分布
- 星形成は起きていない



(NASA提供)

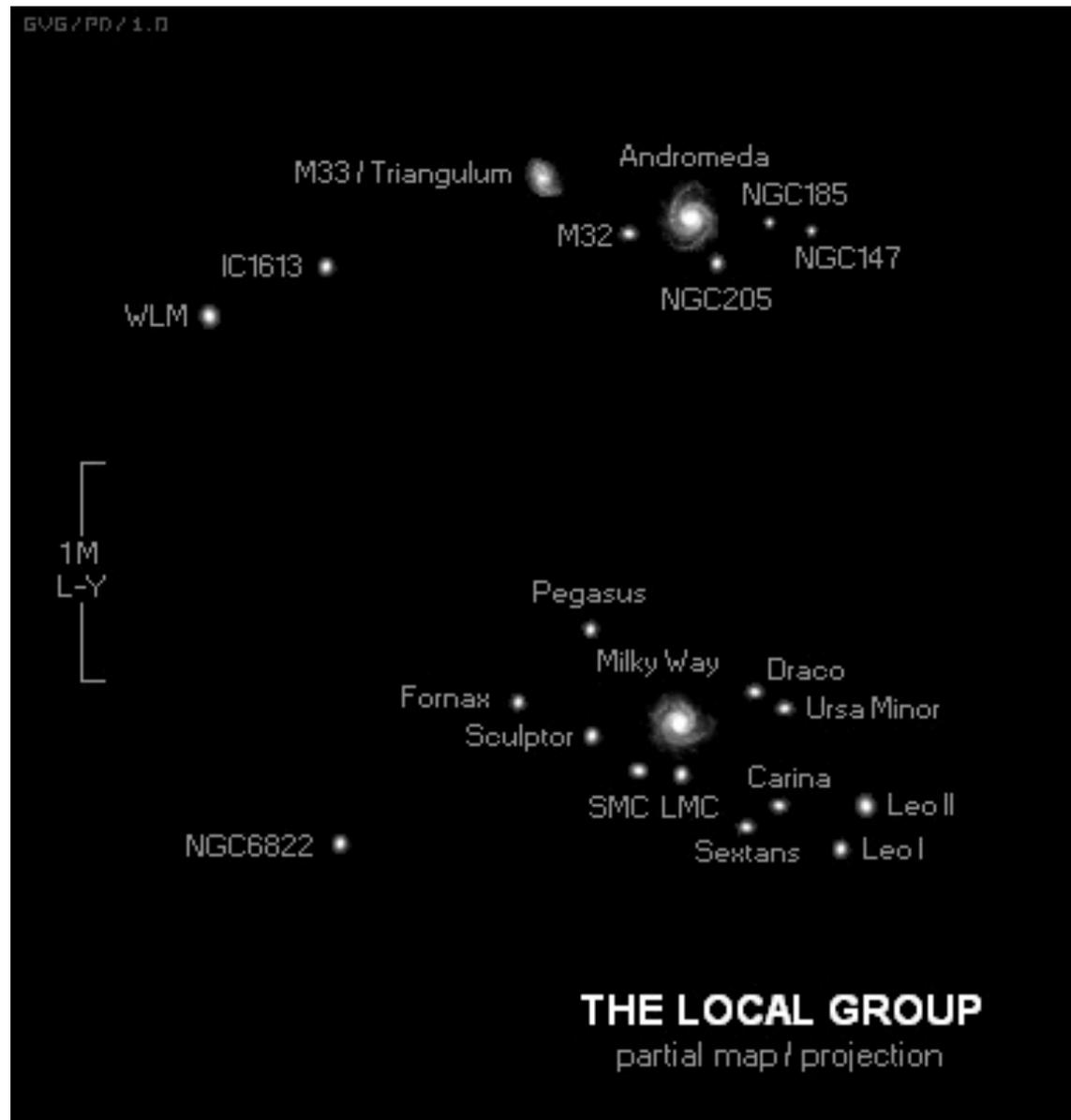
# M31 (距離は200万光年)

22



the Crossley Reflector of Lick Observatory

天の川銀河と  
アンドロメダ  
銀河(M31)  
の位置(距離  
は200万光年)



<http://en.wikipedia.org/wiki/Image%3ATastga73.gif>

M83

距離

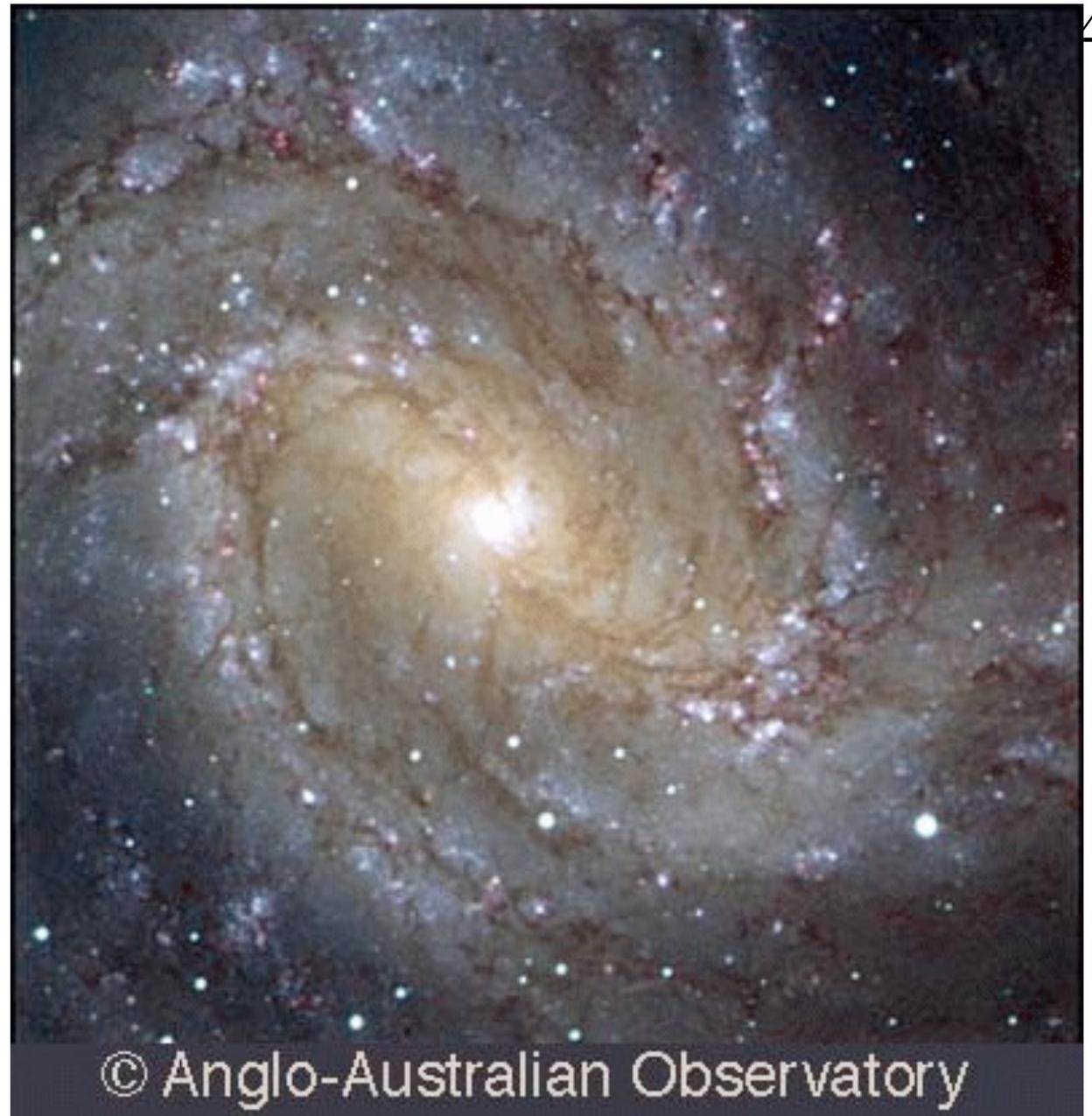
1600万光年

銀河の例

M83

距離

1600万光年



## 2. 宇宙の膨張を示す銀河 —銀河と宇宙論—

- ほとんどの銀河は天の川銀河から遠ざかるように動いている
- その速度は銀河までの距離に比例している
- この関係は一般相対論的宇宙モデルと一致
- このことから宇宙は膨張していると言える

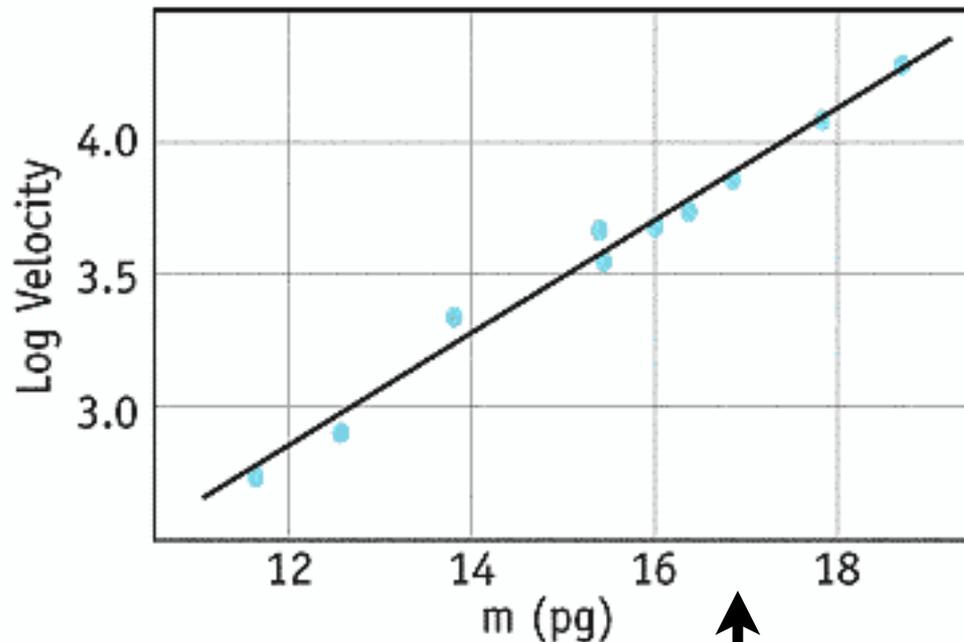
# 銀河の距離と速度の関係

- 銀河の速度と距離を測定すると、互いに比例して大きくなることがわかった(ハッブル 1929)
- 銀河の速度と距離の比例関係は、宇宙は膨張していることを示している
- この関係から、遠くの銀河は速度を測定して、距離を推定することができる

# DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE 27



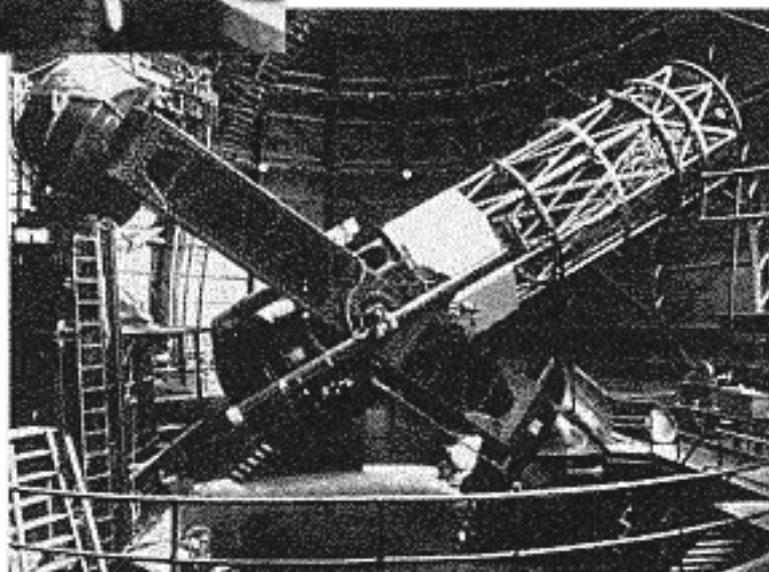
Edwin Hubble



この関係の最近の測定値

330万光年はなれると  
70km毎秒の速度

$$v = Hd$$



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

# 一般相対論的膨張宇宙モデル

- 宇宙は一様に膨張し、その速度は距離に比例（ハッブルの関係と一致）

$$v=Hd$$

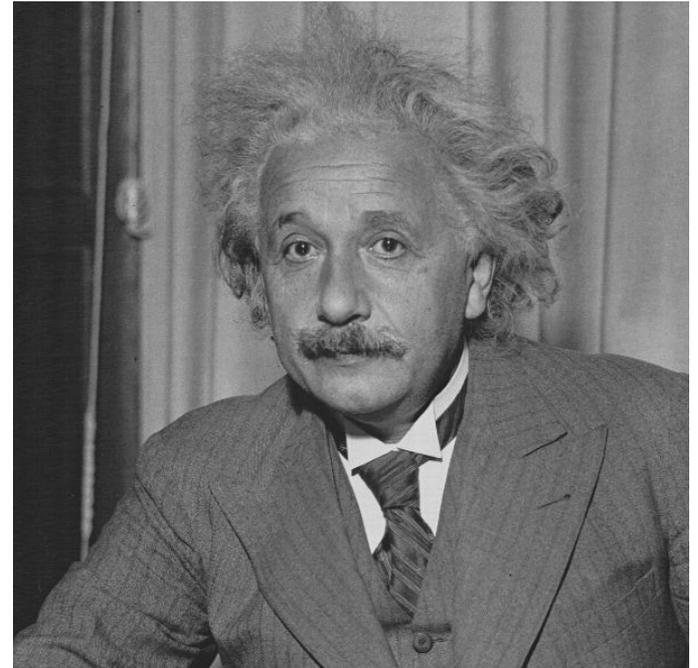
$$H = 70\text{km/s} / 330\text{万光年}$$

- 宇宙の膨張速度と距離の関係から宇宙の年齢が推定できる

$$t=d/v=1/H$$

$$t = 140\text{億年となる}$$

宇宙のはじめはどのようなものか？ **ビックバン宇宙論**  
(宇宙初期は高温高密度で物質の生成)



一般相対論を造った  
アインシュタイン  
はじめは、宇宙は膨張して  
いると思っていなかった

# 一般相対論的宇宙モデル (フリードマン方程式)

- アインシュタイン方程式

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu}$$

フリードマン方程式(一様等方な宇宙のモデル)

$$\frac{1}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{4\pi R^3 \rho G}{3R} = -\frac{1}{2} \frac{kc^2}{R_0} + \frac{1}{6} \lambda R^2$$

k : 宇宙の曲率パラメータ, R : 宇宙のスケールファクター

$\rho$  : 宇宙の物質密度,  $\lambda$  : ラムダパラメータ

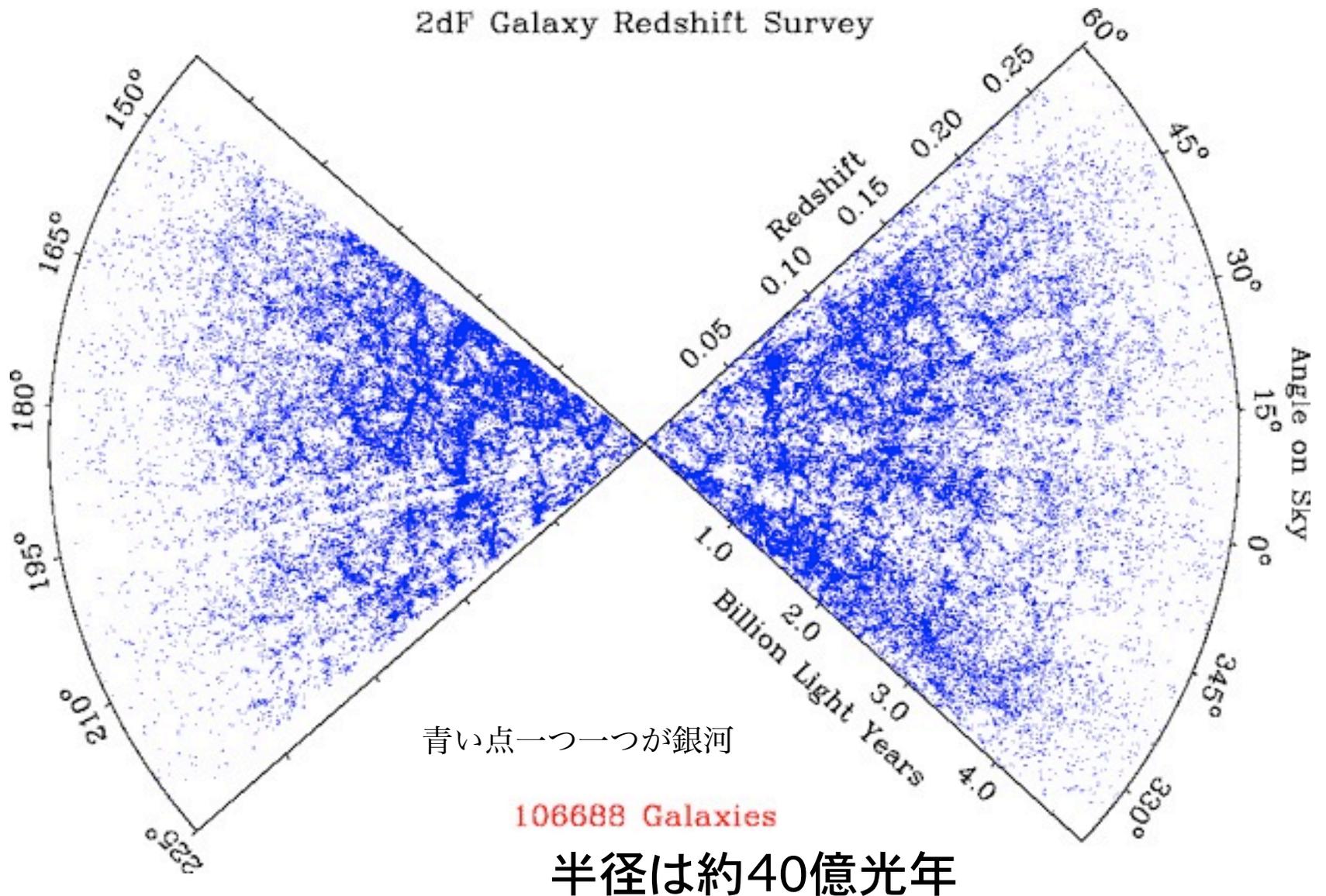
# 銀河の後退速度から距離を求めて描いた 銀河分布の地図(宇宙の大規模構造)

30

青い点一つ一つが銀河

半径は約40億光年

# 銀河の後退速度から距離を求めて描いた 銀河分布の地図(宇宙の大規模構造)



# 3. 遠くの銀河を観測して 宇宙のでき方を探る

- 遠方の宇宙を見ることは、過去の宇宙を見ること
- ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡が遠方宇宙の観測で活躍している

# 遠方の宇宙を見ることは、過去の<sup>32</sup> 宇宙を見ること

130億光年の距離は  
光の速度(30万km/s)  
で130億年

130億年前に  
でた光



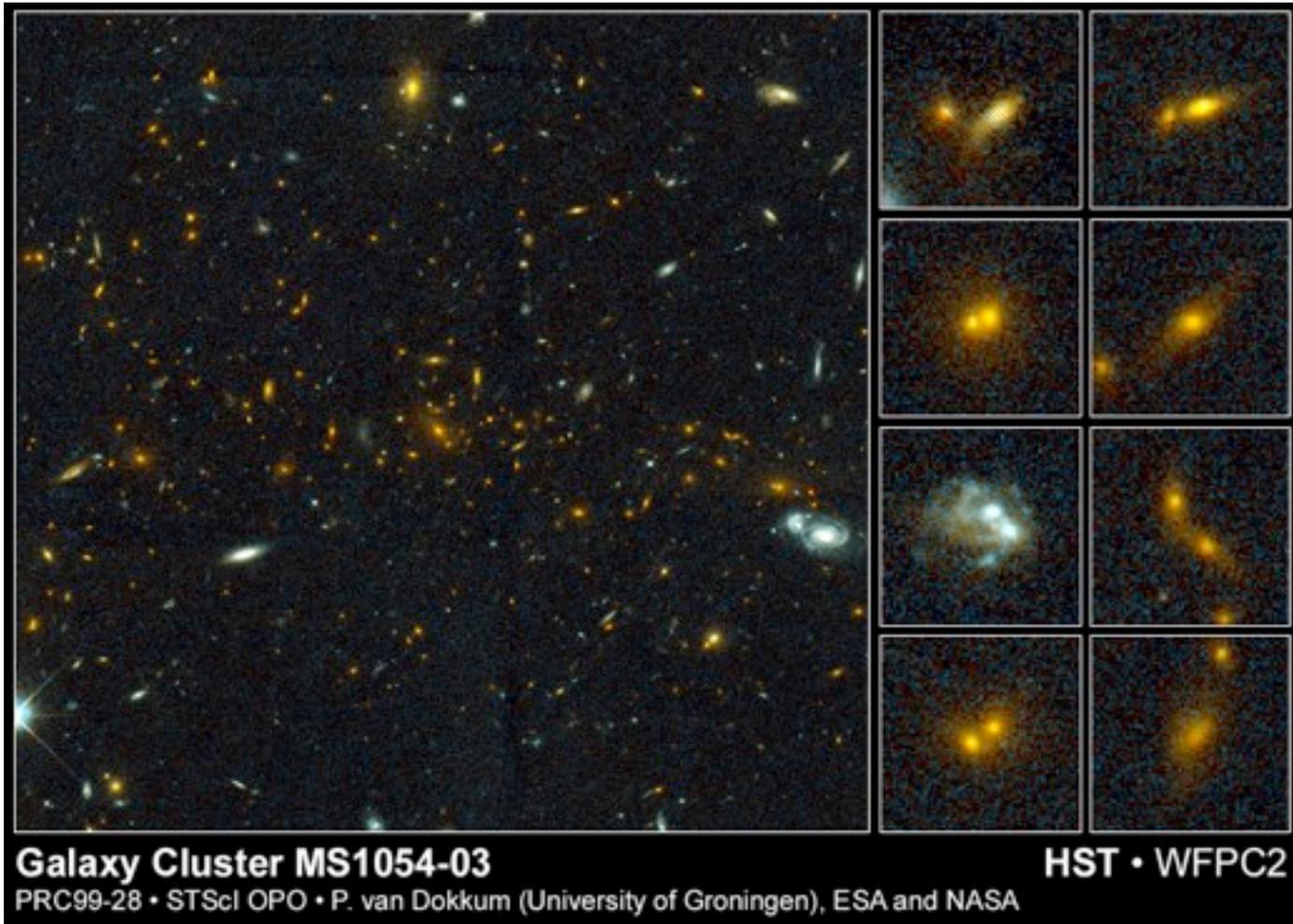
(国立天文台すばる)



# 遠方宇宙の最近の観測例

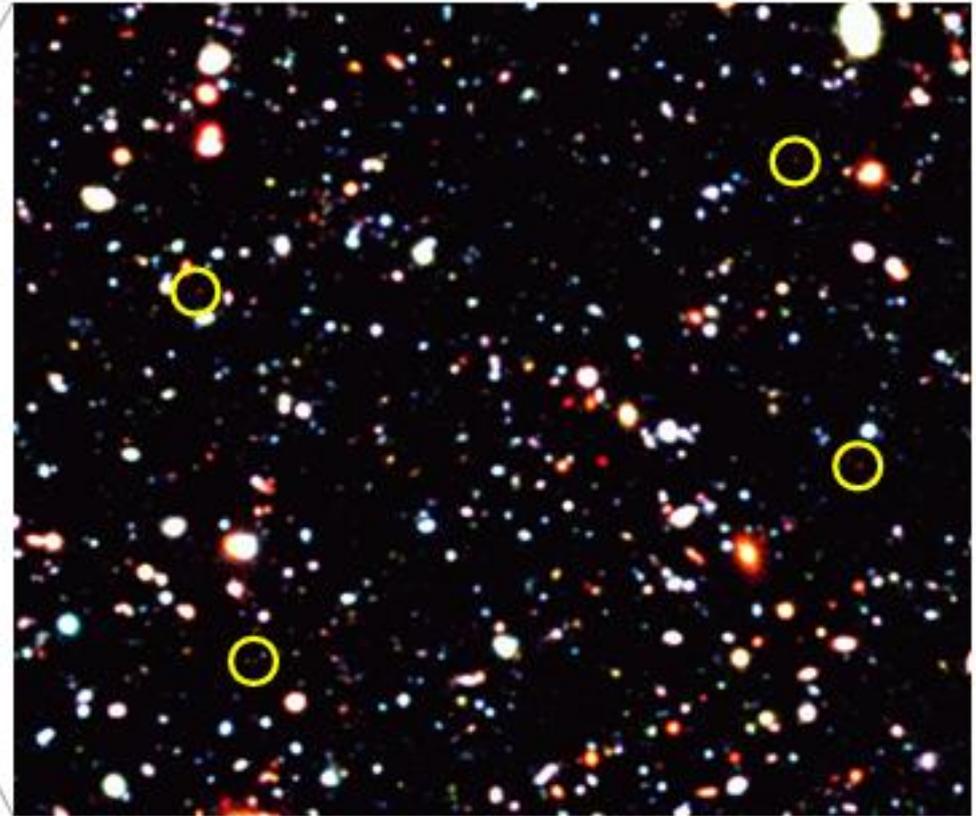
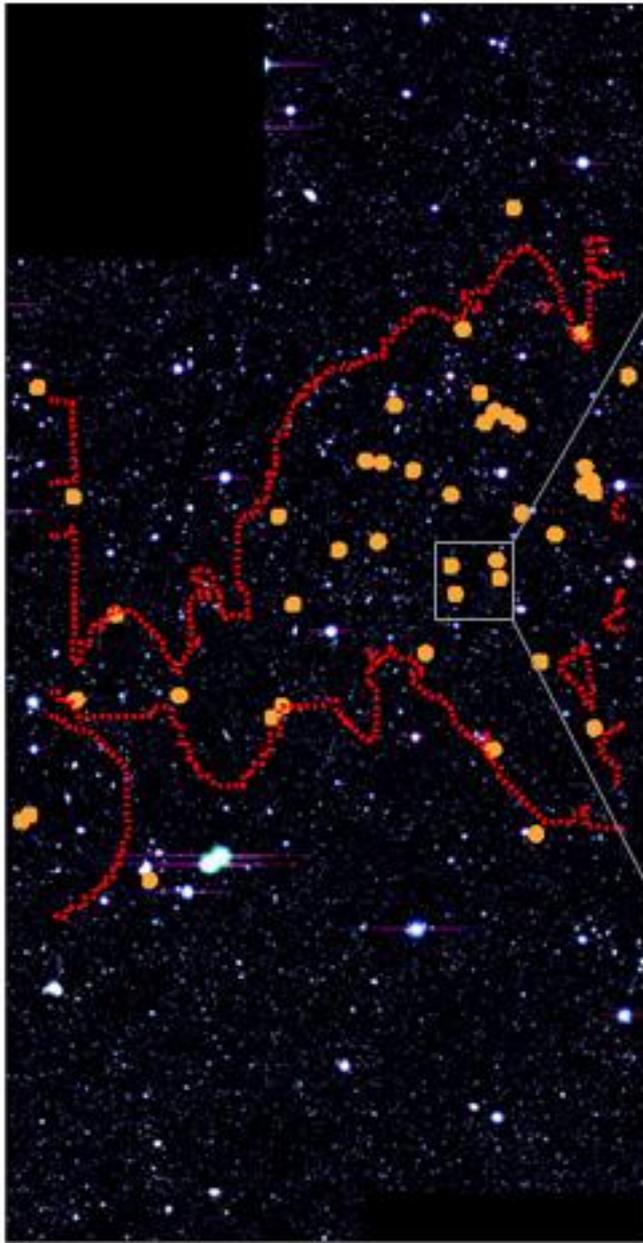
- 宇宙年齢の1/2のころの銀河
  - 現在の銀河の形態と異なった形態の銀河が多数観測されている
  - 年齢の若い銀河の性質は今の銀河と異なり、形がはっきりしない
- 宇宙年齢の1/5のころの銀河
  - 銀河の大きな集団が形成され始めている
  - 質量の大きな銀河がすでに形成されつつある
- 宇宙の構造形成過程が見え始めている

# 遠方銀河團(70億光年)



すばる望遠鏡による百億光年  
彼方の宇宙の構造(国立天文台)

一億光年



左図:発見した大構造。黄色丸は銀河の位置を示し、赤線は銀河の密度を示す等高線。

## 4. 怪物が住む銀河

### 活動的銀河と巨大ブラックホール

- 強力な光を中心から放射する銀河
  - セイファート銀河、QSO
- 強力な電波を放射する銀河
  - 電波銀河
- 中心から強いメーザー電波を放出する銀河
  - NGC4258
  - 我々の銀河の中心にも巨大なブラックホール

# 活動的な銀河M82



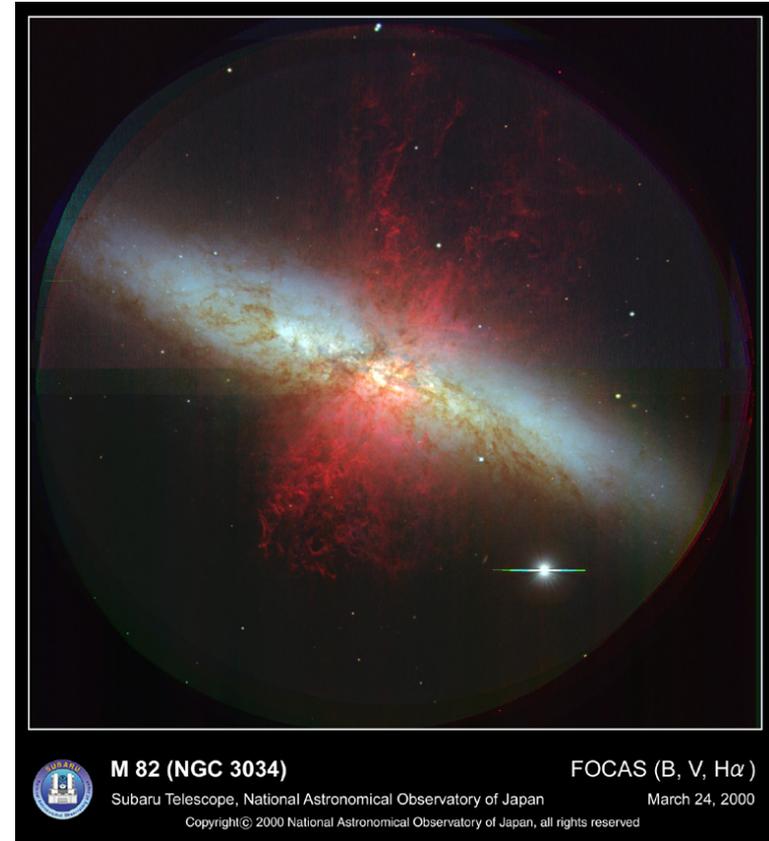
1200万光年  
かなたの銀河

すばる望遠鏡  
銀河の中心からガスが放出

# 活動的な銀河M82

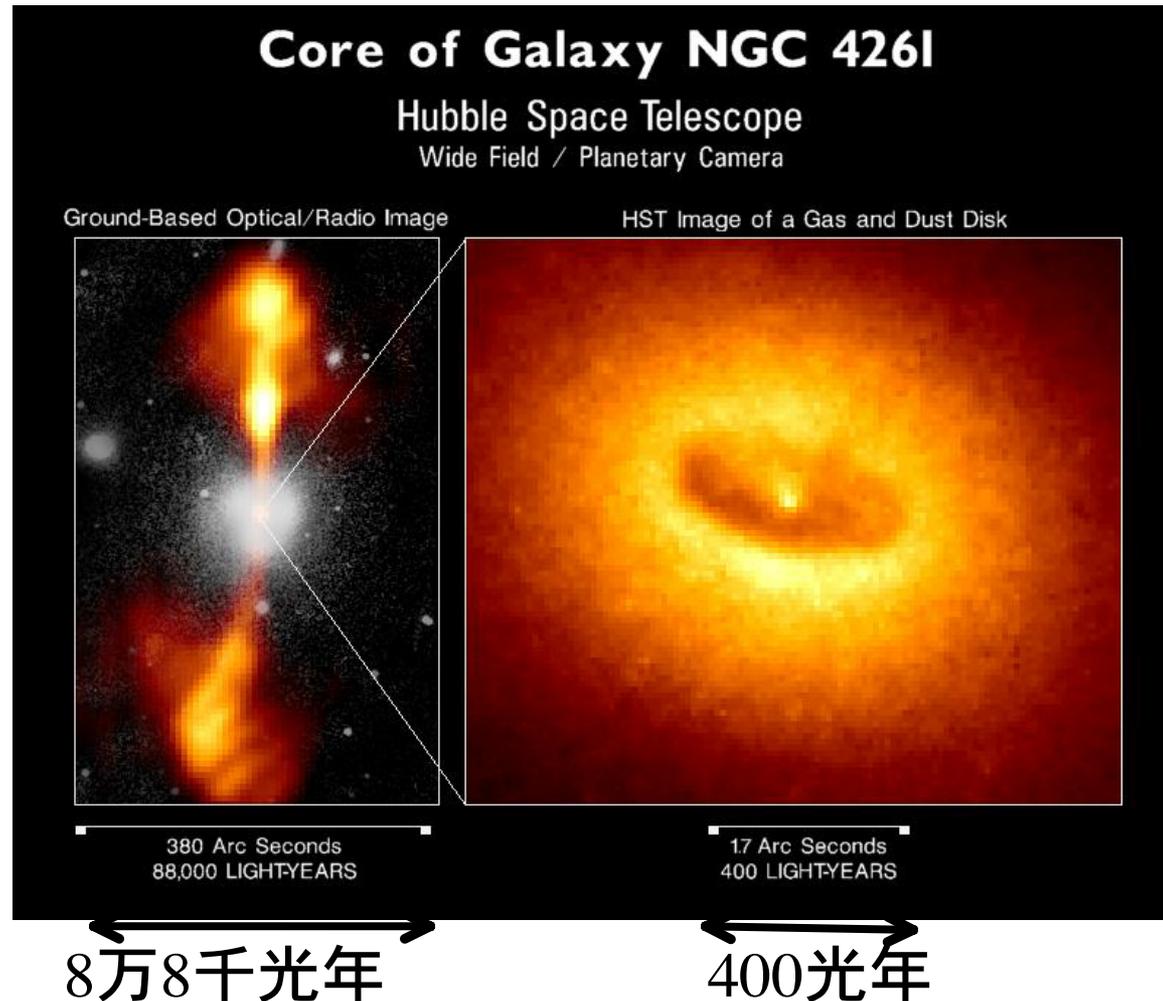


1200万光年  
かなたの銀河



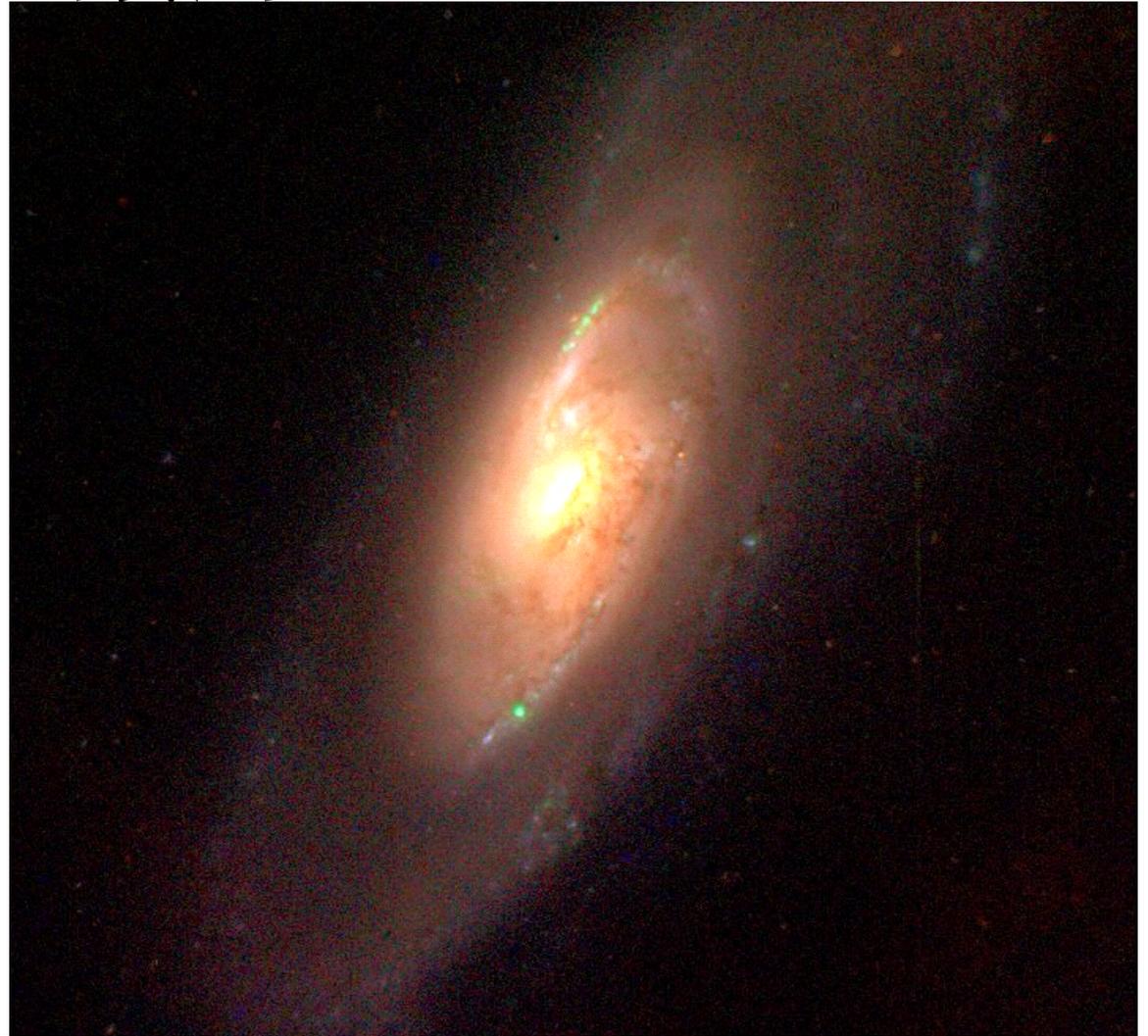
すばる望遠鏡  
銀河の中心からガスが放出

# 電波銀河の巨大な電波領域(左)と 銀河中心の巨大ブラックホールの周りのガス 円盤(右)



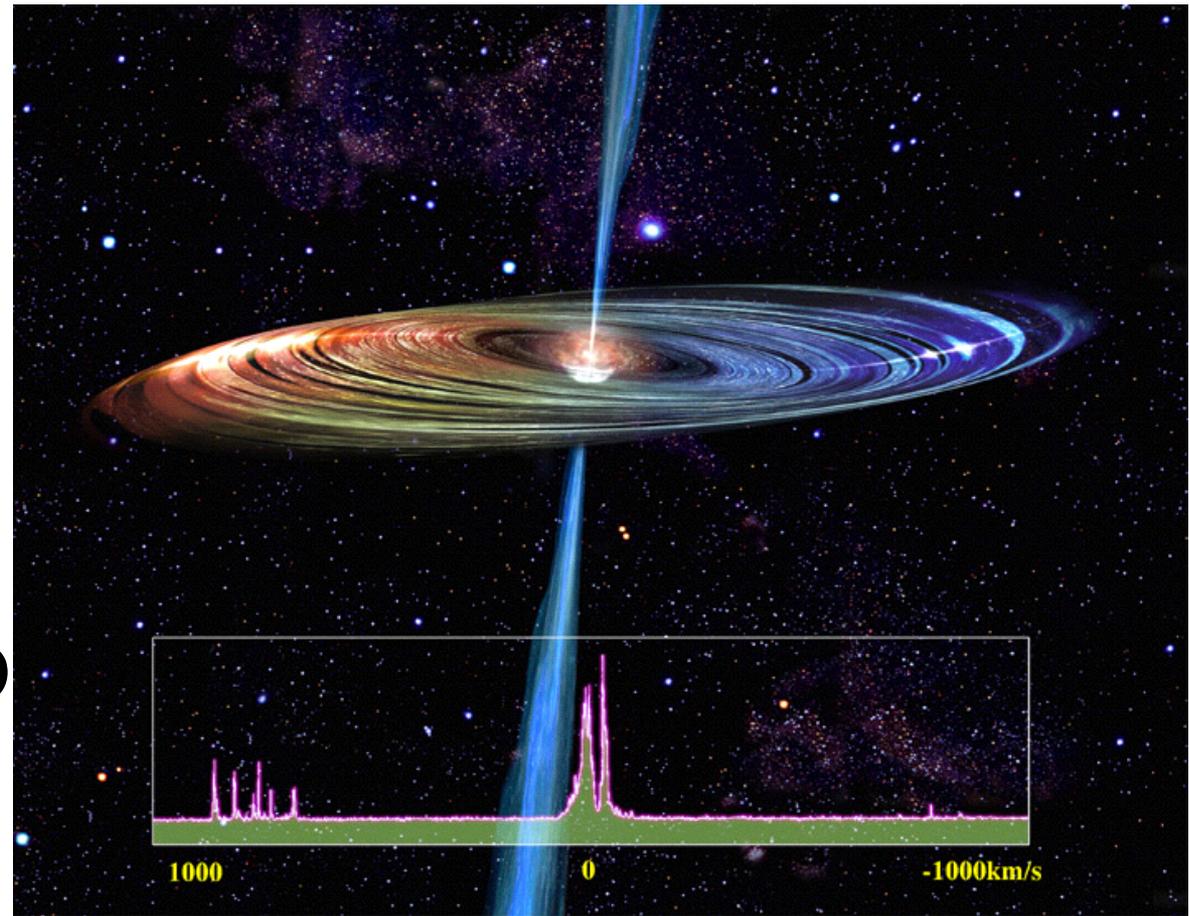
# 中心から強力なメーザー電波を放射<sup>39</sup> する銀河NGC4258

直径3万光年



# NGC4258のメーザー源の 模式図

半径0.1光年の  
ガス円盤が  
秒速1000km  
で回転  
0.1光年内の  
質量は、太陽の  
2千万倍



(国立天文台提供)

半径0.1光年

# 活動的な銀河の中心には巨大な ブラックホール

- 小さな領域から膨大なエネルギーの放出は、ブラックホールへガスが流入する際に重力エネルギーの解放によると考えられる

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$r$ が  $\frac{2GM}{c^2}$  に近づくと  $v$  は光速に近づく

ブラックホールへ流入する物質は静止エネルギーに匹敵するエネルギーを持ち、それが外に放出される

# 5. まとめ

1. 天の川銀河は1千億個の恒星からなる半径10万光年の巨大な円盤
2. 天の川銀河の外にも同程度の大きさの銀河が多数見つかった
3. ほとんどの銀河は、我々から遠ざかる速度を持ち、その速度は銀河の距離に比例している
4. この観測結果は宇宙が膨張していることを示している
5. 遠方の宇宙は、宇宙の過去の姿であり、銀河が形成途中にあるように見える
6. 宇宙の年齢は137億年である