

天の川の正体

天の川＝無数の星の集まり

- 銀河と星団はどう違う？



星団

● 恒星の集団：同時に誕生し重力で束縛

✓ 散開星団

- 数百～1万個の恒星
- 比較的若い：50億年以下
- 太陽より重い星も多い



時間が経てば
ばらばらになる
ものも

星団

- 恒星の集団：同時に誕生し重力で束縛

- ✓ 球状星団

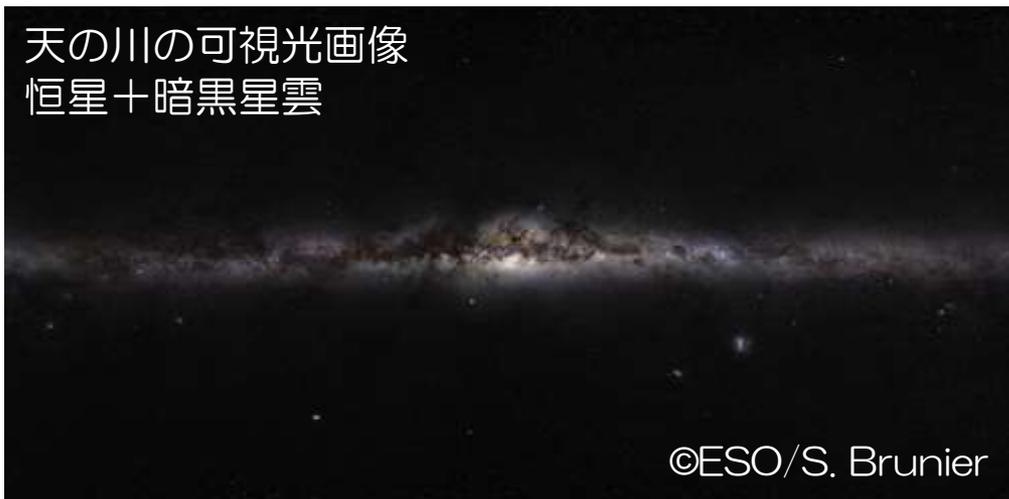
- 数十万個の恒星
- 古い：100億年以上
- 太陽より軽い星がほとんど



銀河系（天の川銀河）

- 星団以上に沢山の恒星の集団：銀河
- 太陽系が所属している銀河
- 2000億個の恒星＋星間物質（＋暗黒物質）
- 渦巻銀河の構造

天の川の可視光画像
恒星＋暗黒星雲

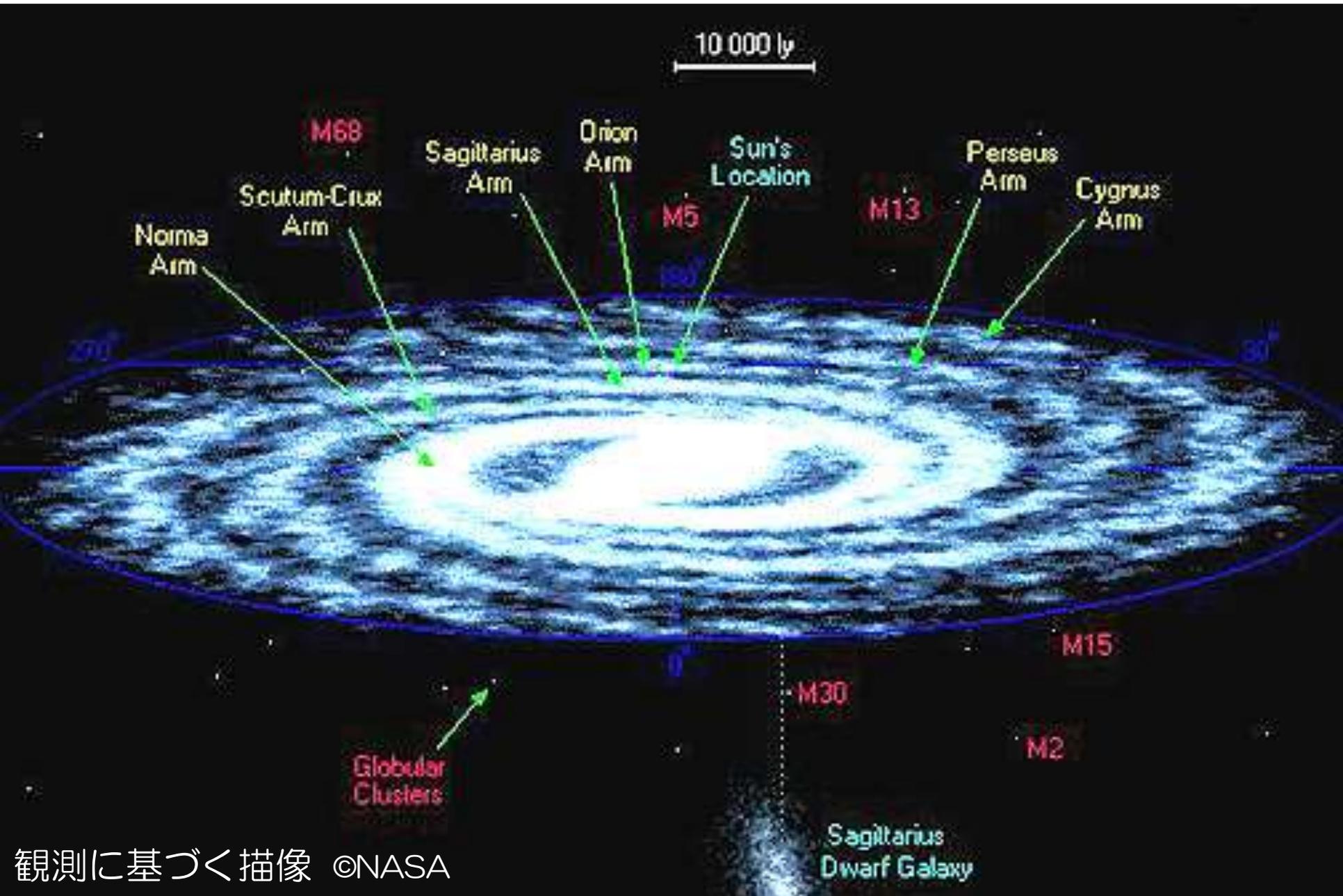


©ESO/S. Brunier

COBE衛星による銀河面の赤外画像
星間物質



©NASA

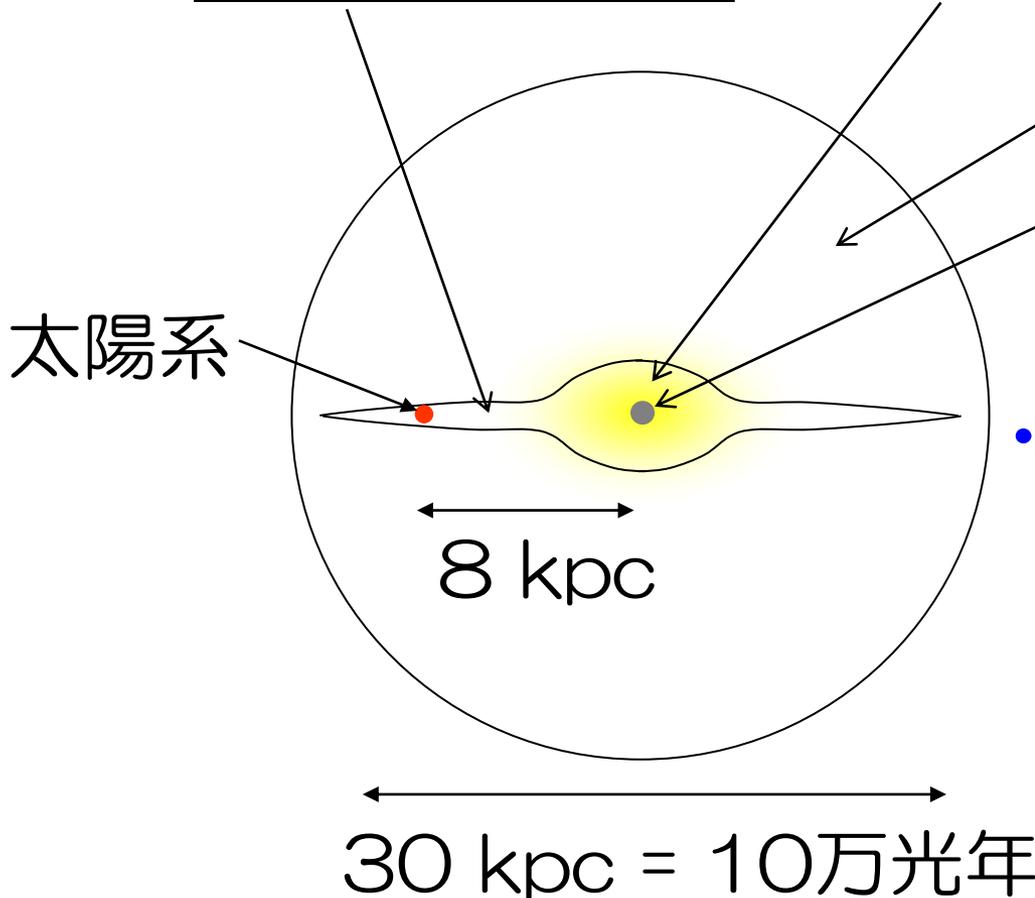


観測に基づく描像 ©NASA

銀河系の構造

● 渦巻銀河の構造

✓ 円盤部（渦巻腕）、バルジ、ハロー、中心領域



● 円盤部：中心周りに回転

太陽は220km/sで
回転

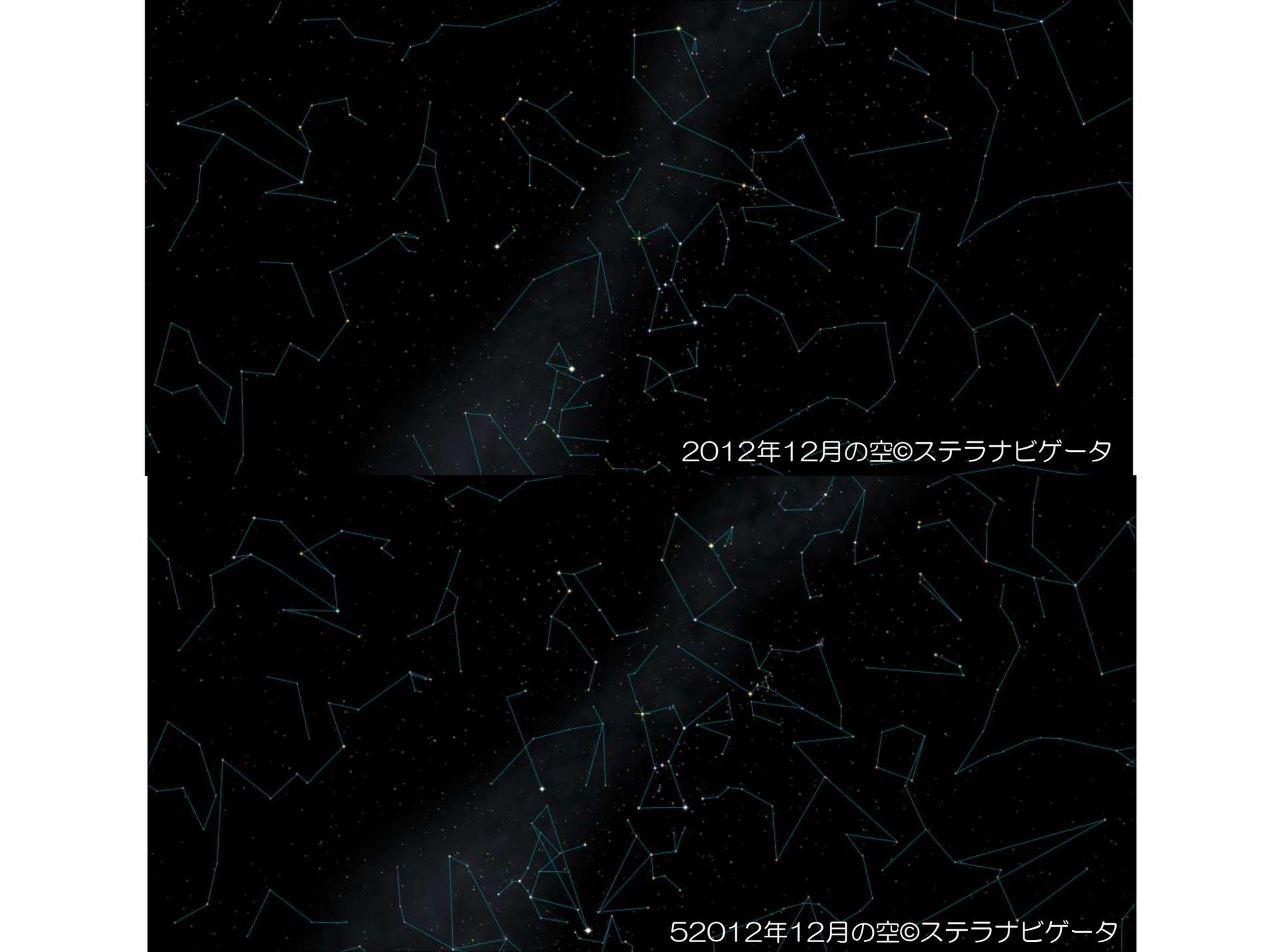


回転周期約2億年

星の固有運動

- 星座の形は永遠不滅？
- 星は銀河系の中を動きまわっている
- バーナード星は1年に10秒角移動

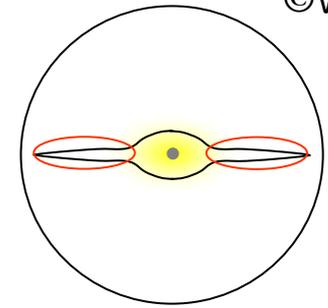




2012年12月の空©ステラナビゲータ

2012年12月の空©ステラナビゲータ

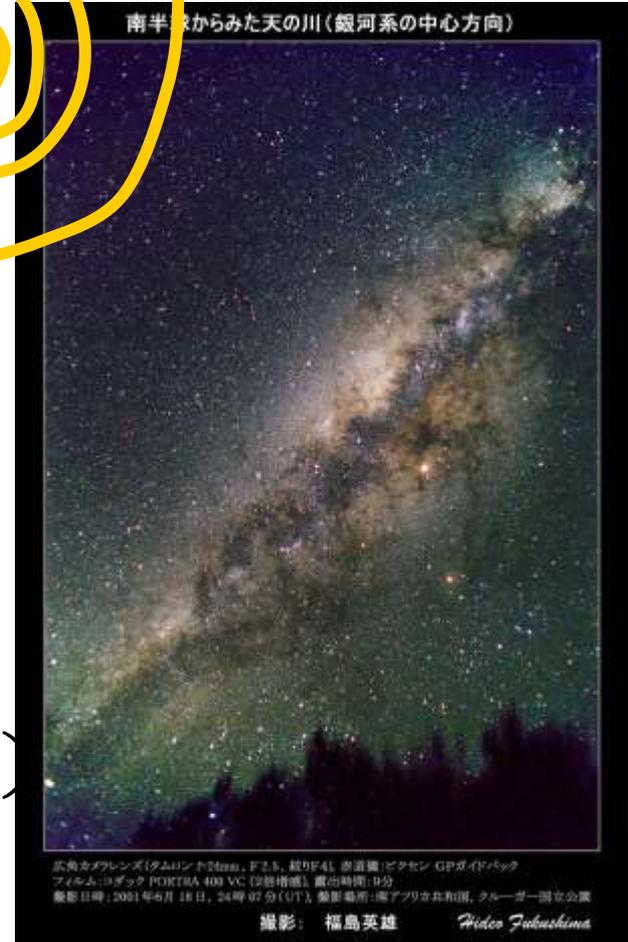
円盤部と渦巻腕



- 天の川として見える 太陽
- 渦巻き状で回転
- 散開星団・星間ガスが集中
→ 星形成が盛ん

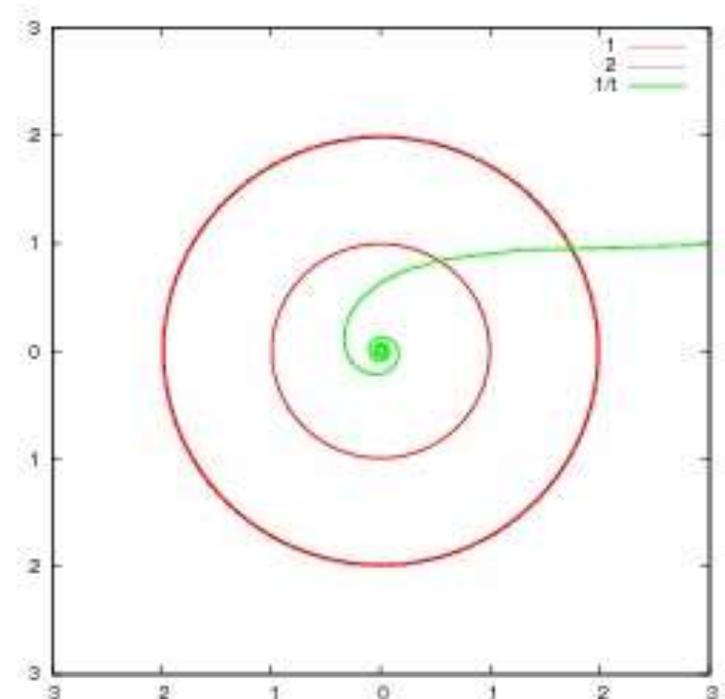
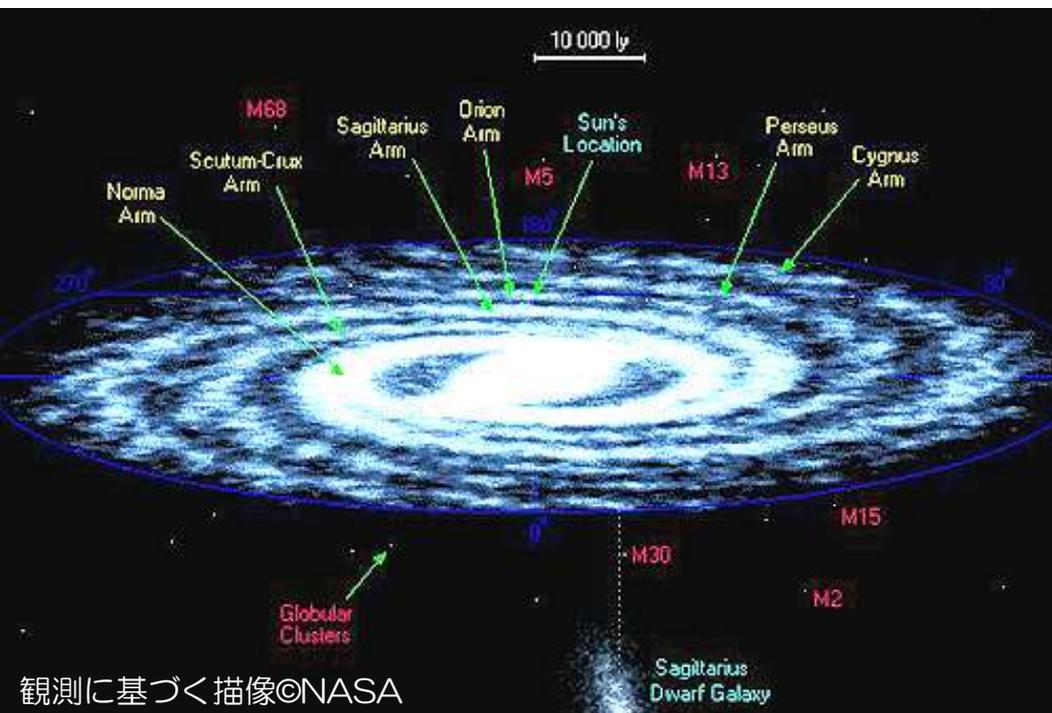
暗黒星雲で隠されるため、
銀河面が平行な2列に見える

種族 I 若い天体 (数十億年以下)
円盤部に集中
金属量多い (~1%)



なぜ渦巻きになるのか？ ～巻き込みのシレンマ～

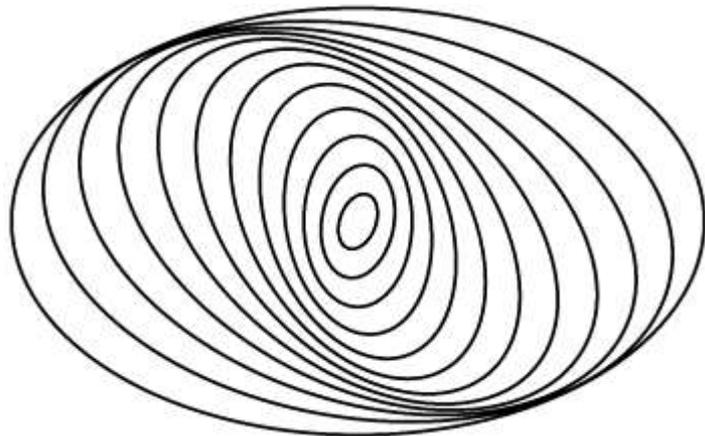
- 銀河は何十回転もしてはるはず
 - 銀河の回転周期：約数億年
 - 銀河の年齢：百億年以上



なぜ渦巻きになるのか？

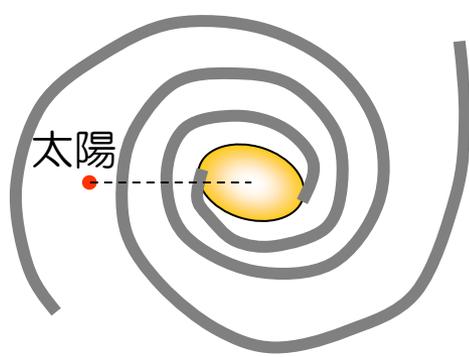
●密度波理論

- 渦巻きをつくるのは特定の星ではない
- 重力不安定と差動回転⇒渦巻き
- 密度の疎密波
 - 楕円軌道の重ね合わせ

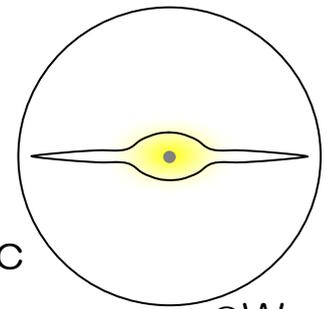
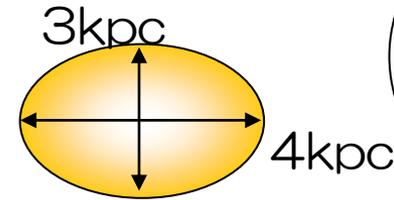


星の渋滞

t=0	★	★	☆	★★★	★	★	★
t=1	★	★	★	☆★★	★	★	★
t=2	★	★	★	★★☆	★	★	★
t=3	★	★	★	★★★	★	★	★
t=4	★	★	★	★★★	☆	★	★



バルジ



©Wada

- 円盤部の中心付近の膨らみ（楕円体）
- 銀極から見るとやや非対称
- 星間ガスはほとんどない
- 古くて小さな恒星が多い

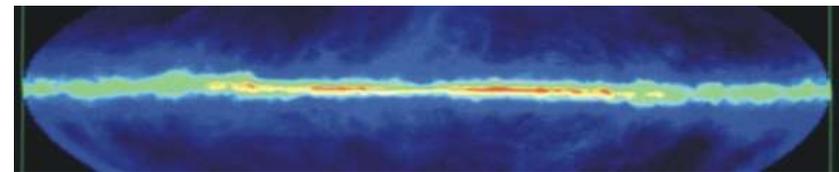
→星は形成されていない

恒星分布

©NASA



中性水素の分布



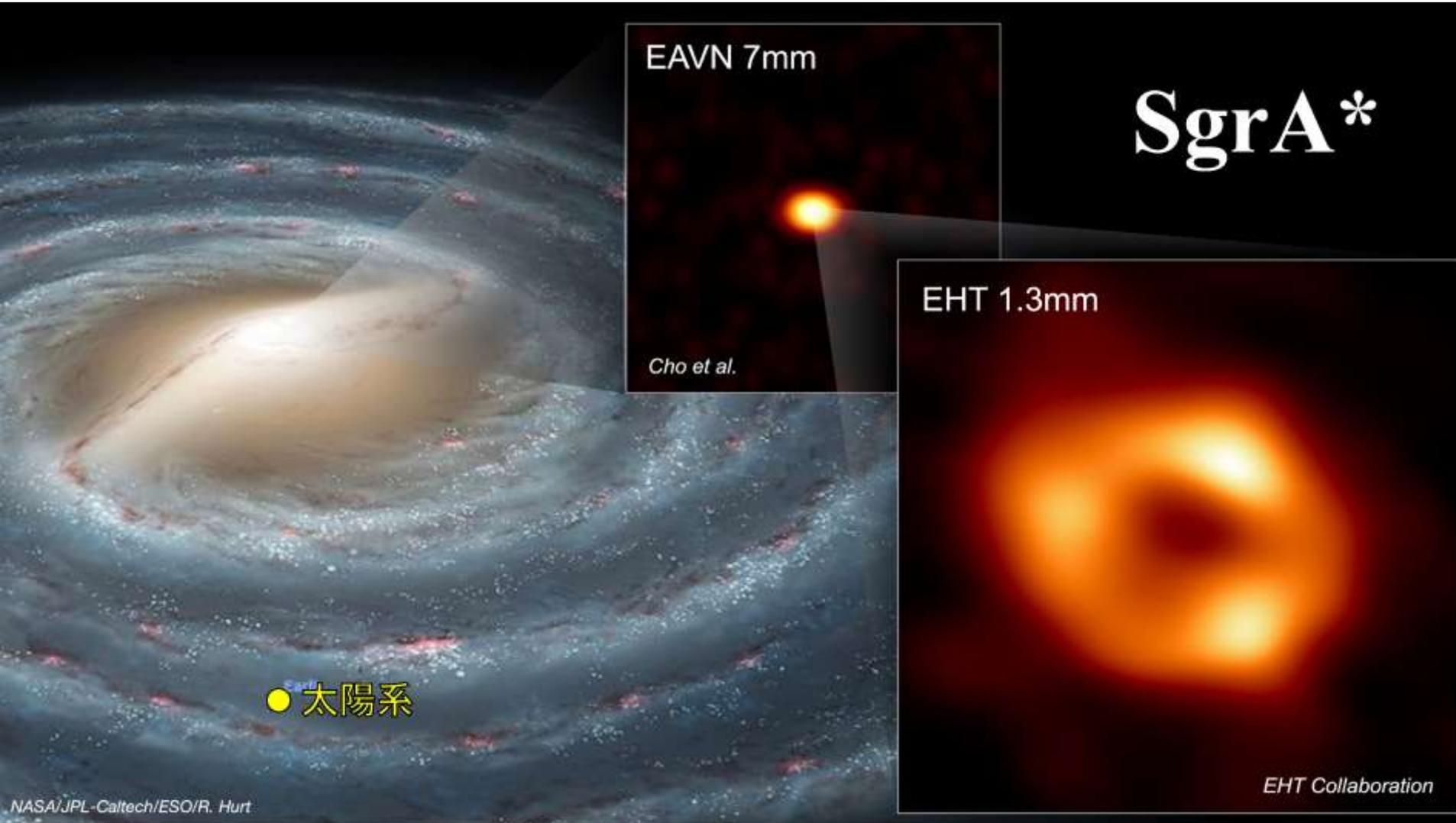
©NRAO/AUI/NSF

種族 II

古い天体（100億年以上）

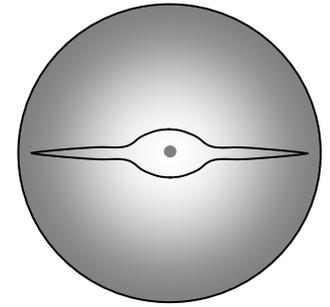
バルジの天体の金属量は太陽と同程度

銀河系中心ブラックホール

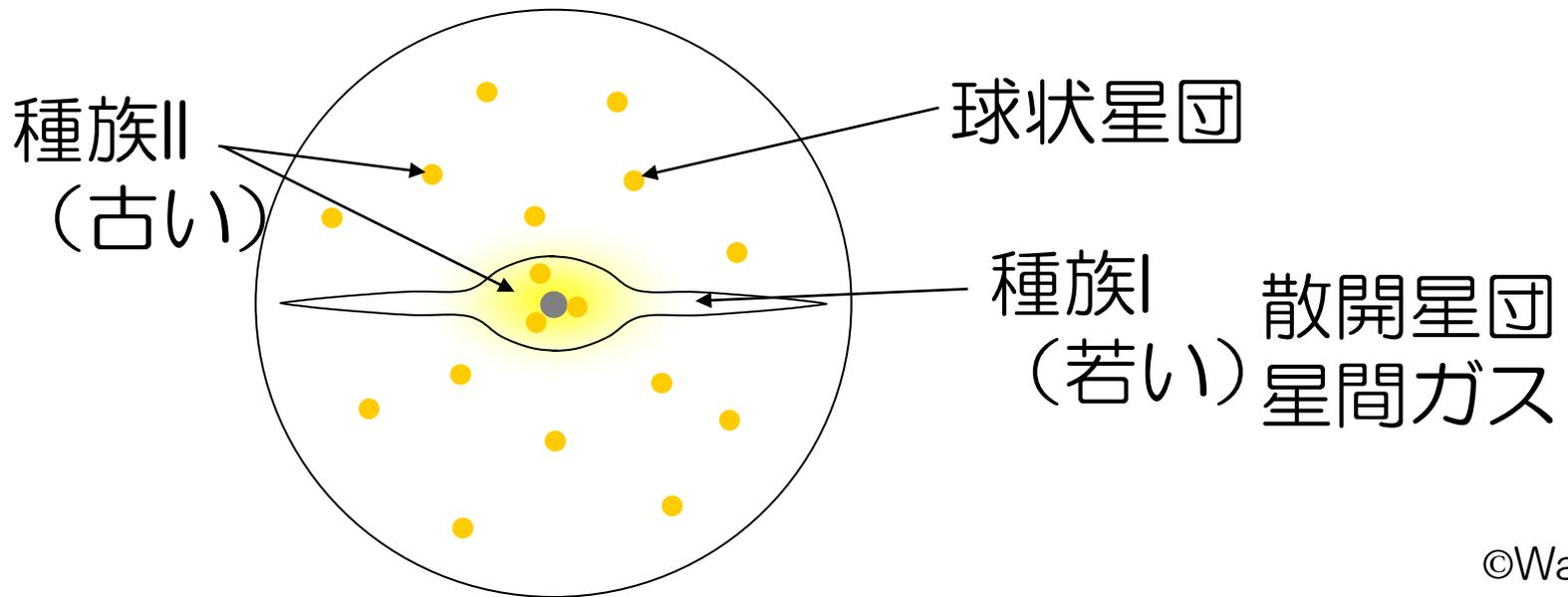


©NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt (天の川銀河の想像図)、
Cho et al. (EAVNの画像)、EHT Collaboration (EHTの画像)

ハロー

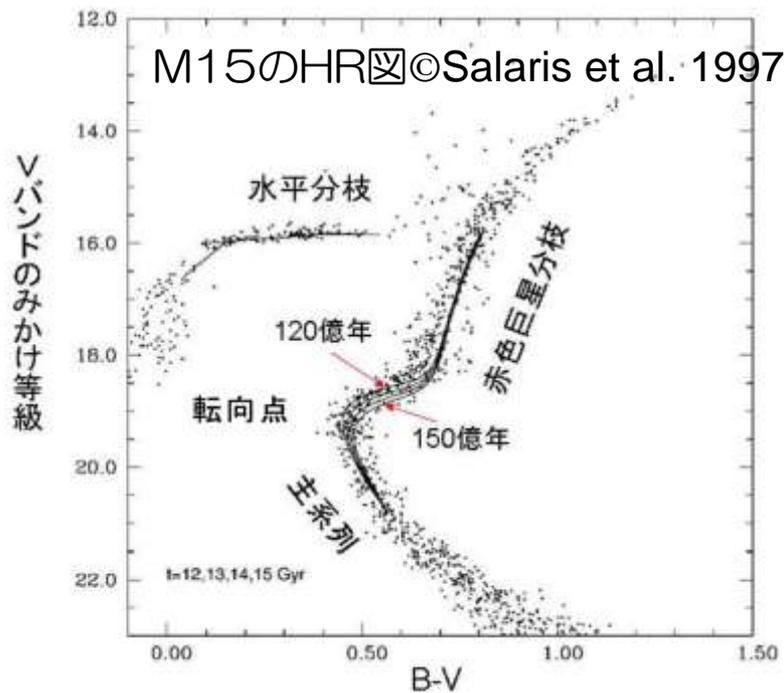


- 中心から25 k p c以上まで球状に広がる
- 星間物質はほとんどない
- 球状星団が散在：種族II（古い、低金属量）
- 暗黒物質（ダークマター）が存在



銀河系の形成

- 銀河系の年齢
 - 最古の天体は球状星団
 - 100億年以上（HR図から）

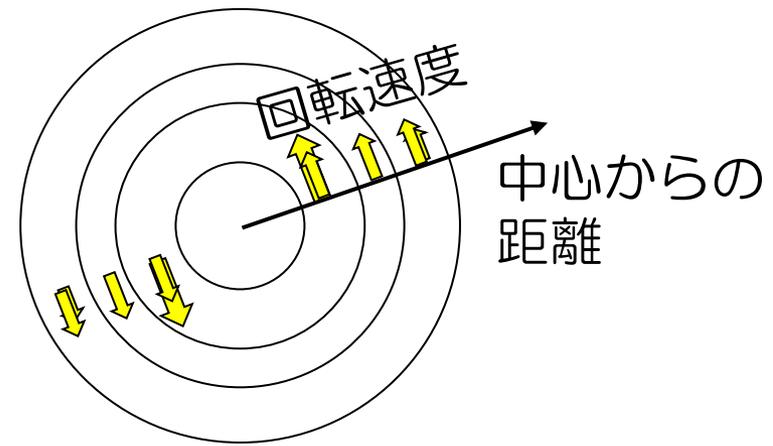
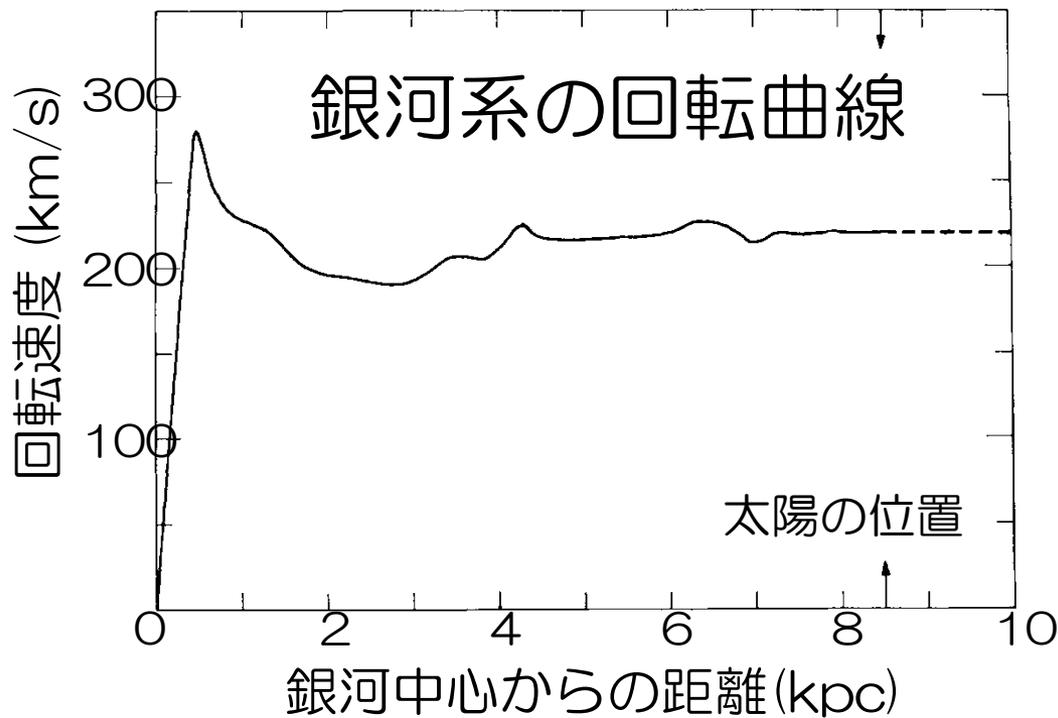


渦巻銀河の回転速度

ドップラー効果を利用して回転速度を測る

©Wada

(Gunn et al. 1979)



平坦回転曲線：

回転速度は距離に依らず
ほぼ一定

銀河の質量分布と回転速度

回転速度は重力と遠心力がつりあうように決まる

$$G \frac{mM_r(r)}{r^2} = \frac{mV(r)^2}{r}$$

G : 重力定数

M_r : 半径 r より内側にある質量

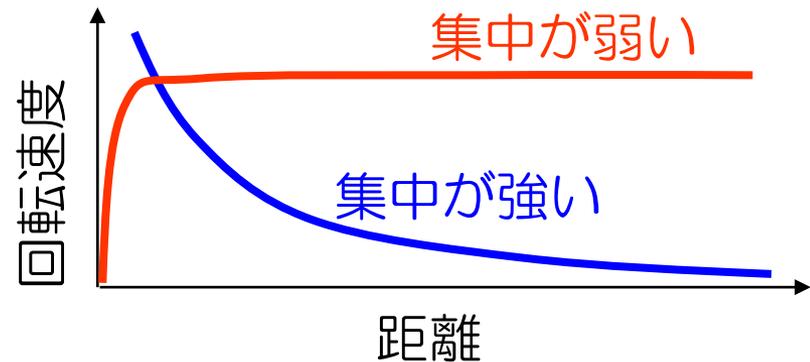
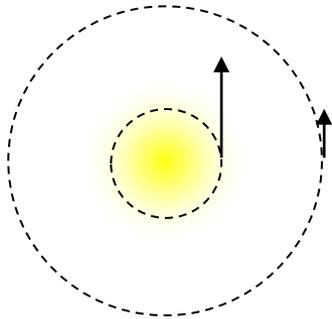
V : 回転速度

$$M_r(r) = \frac{rV(r)^2}{G} \Rightarrow M_r(r) \propto r$$

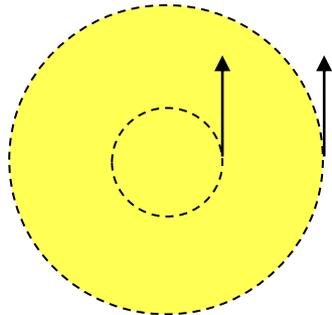
銀河の質量分布と回転速度

回転速度は重力と遠心力がつりあうように決まる
重力が強い（距離小・質量大）→ 回転速度 大

▶ 銀河の質量が中心に集中している場合



▶ 集中が弱い場合



回転速度一定 → $M(r) \propto r$

(距離 r の内部にある質量 M は r に比例)

銀河系の質量

太陽の銀河まわりの公転周期から求めてみる

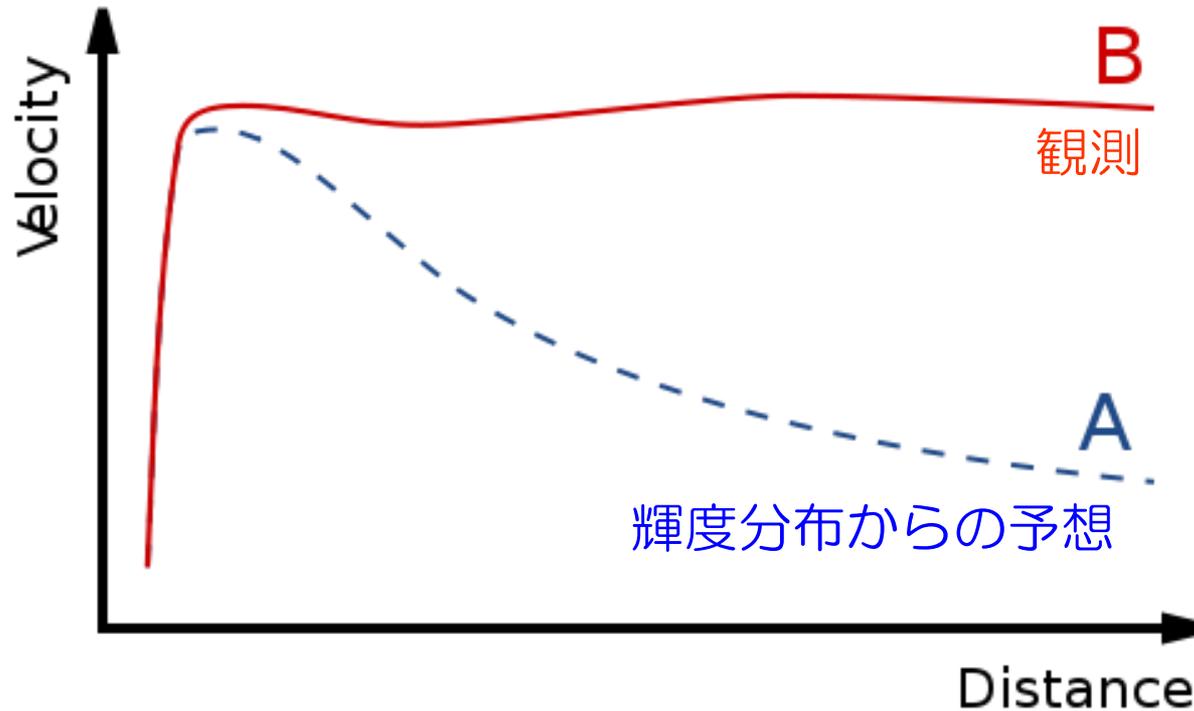
$$G \frac{mM_r(r)}{r^2} = mr\omega^2$$

公転周期： 2.2×10^8 年

距離： 3×10^4 光年= 1.9×10^9 AU

$$M_r(r) = 1.4 \times 10^{11} M_{\odot}$$

暗黒物質（ダークマター）の存在



質量が足りない？
見えない物質が？
暗黒物質？

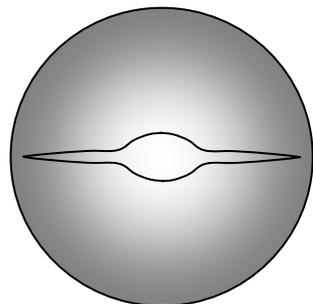
暗黒物質（ダークマター）の存在

- 回転曲線から要請される銀河の質量（力学質量）
太陽より内側に $\sim 10^{11} M_{\odot}$ 〔 M_{\odot} = 太陽質量〕
銀河中心から半径20kpc以内に $(1\sim 3) \times 10^{11} M_{\odot}$
200kpc以内: $\sim 10^{12} M_{\odot}$

→ 星や星間ガスだけでは足りない！

円盤成分の質量は銀河中心に集中（10kpc以内に85%）

ハローの球状星団や衛星銀河を足しても足りない



ハローには大量の暗黒物質
通常物質の10倍程度の質量？

ダークハロー

候補：褐色矮星、白色矮星、ブラックホール、相互作用をほとんどしない素粒子？

まとめ

- 天の川は銀河系（2000億個もの星）
- 円盤＋バルジ＋ハロー
 - 円盤：若い天体、活発な星形成
 - バルジ：古い天体
 - ハロー：古い天体（球状星団）
 - 銀河中心には巨大ブラックホール
- 暗黒物質の存在

様々な銀河

The Whirlpool Galaxy and Companion — M51  HUBBLESITE.org

銀河の主な分類

巨大銀河

渦巻銀河・棒渦巻銀河

レンズ状銀河

楕円銀河

不規則銀河

矮小銀河

矮小楕円（体）銀河

矮小不規則銀河

その他、活動度による分類



銀河の衝突

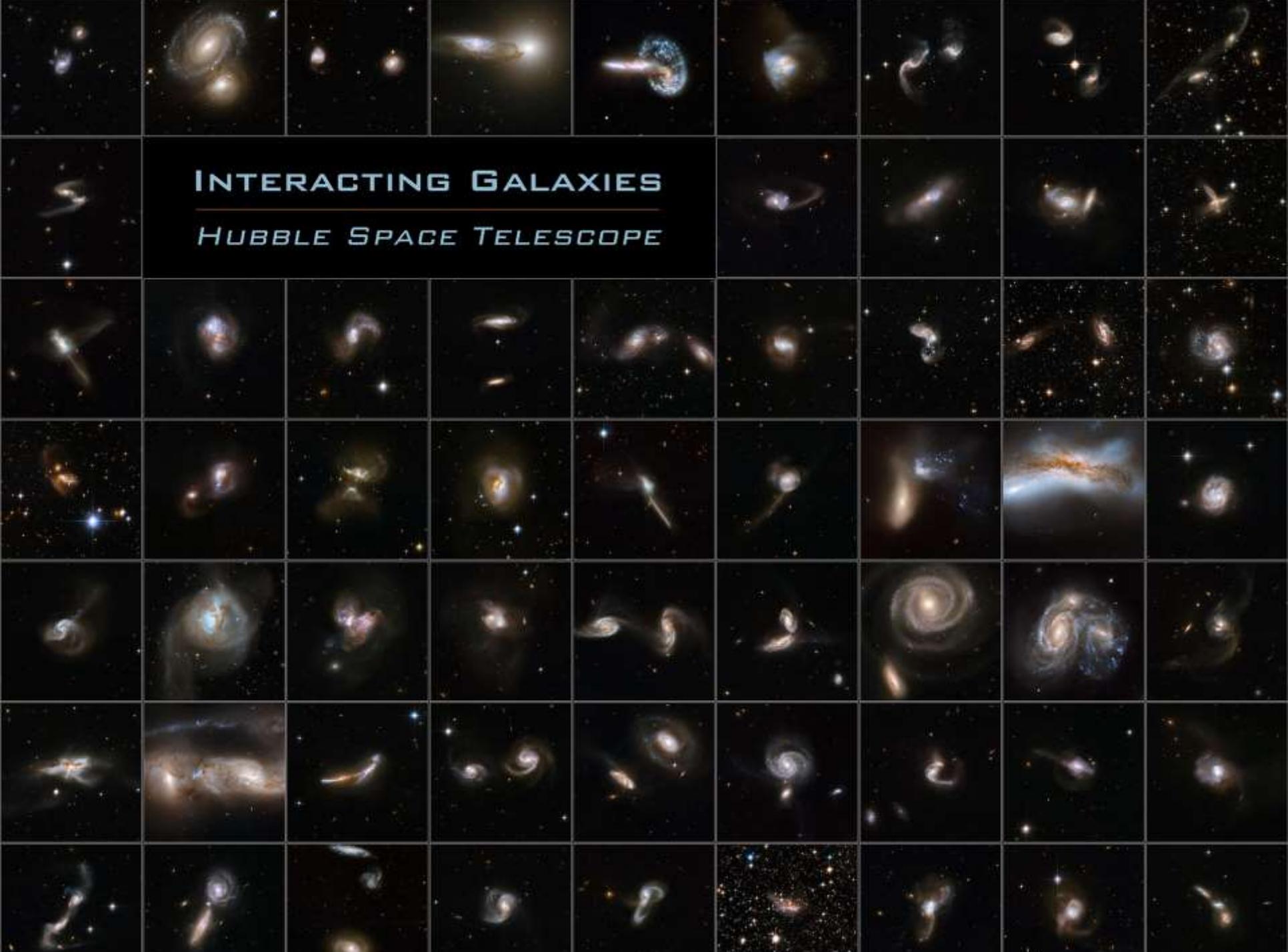
- 銀河間距離は銀河サイズの10~100倍
(恒星間距離は恒星サイズの300万倍以上)
→ 銀河同士の接近・衝突は珍しくない
重力相互作用 (潮汐力) による変形



©国立天文台



©国立天文台



INTERACTING GALAXIES
HUBBLE SPACE TELESCOPE

銀河の集団

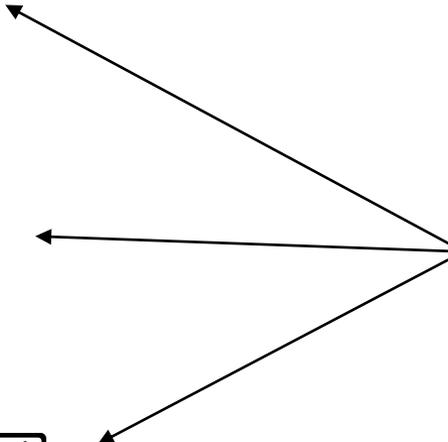
● 銀河群

● 銀河団

● 超銀河団

● 大規模構造

それぞれ重力で束縛
されてまとまっている



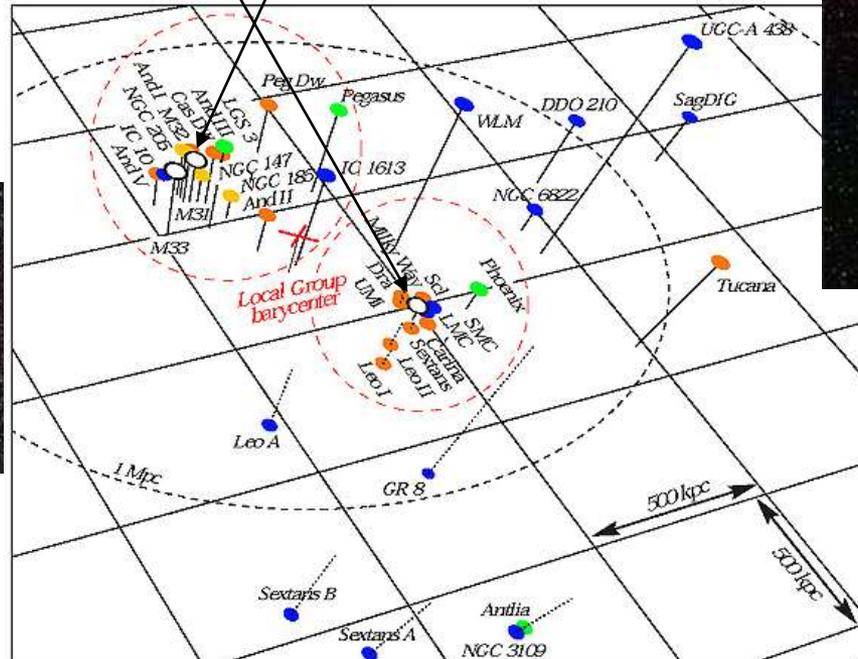
局所銀河群

- 天の川銀河が属する銀河群
- 天の川銀河とアンドロメダ銀河がメイン
- 全部で40個程度の銀河
→ ほとんどが矮小銀河

アンドロメダ銀河



©NASA



半径~1 Mpc以内

(Grebel 1998 ,
astro-ph/9812443)

銀河群

- 3～数10個程度の銀河の集まり
- 広がり：約0.5～1 Mpc $[M_{\odot} = \text{太陽質量}]$
- 力学質量（含暗黒物質）： $10^{12} \sim 10^{13} M_{\odot}$
- 銀河はランダム運動（ $\sim 100 \text{ km/s}$ ）



M81銀河群

コンパクト銀河群
HCG40



©国立天文台

Hickson Compact Group 40
Dulles Telescope, National Astronomical Observatory of Japan
CISCO (J & K)
January 28, 1999

銀河団

- 数10個～数1000個の銀河の集まり
- 広がり：数～10Mpc
- 中心には楕円銀河が多い（巨大楕円銀河）

おとめ座銀河団中心



©NOAO/AURA/NSF

かみのけ座銀河団

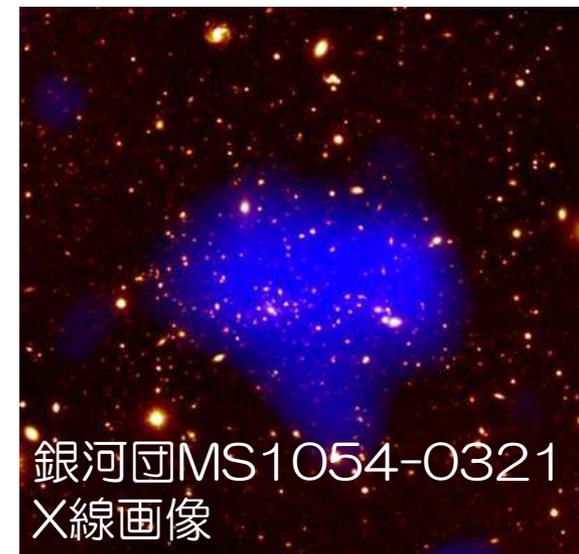
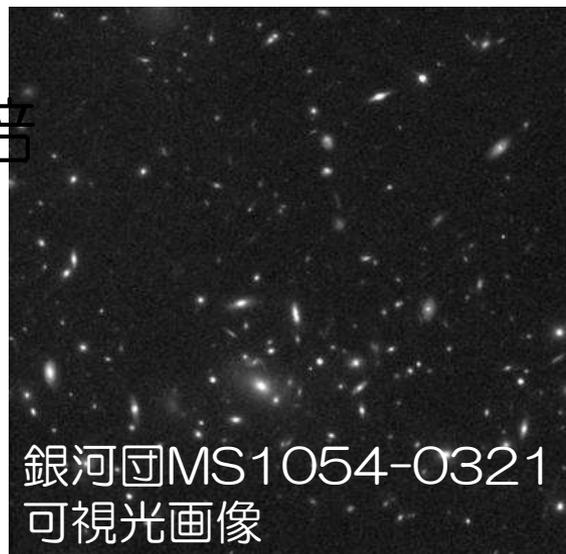


©国立天文台

銀河団

- 力学質量： $10^{14} \sim 10^{15} M_{\odot}$ 〔 M_{\odot} = 太陽質量〕
- 銀河はランダム運動 (~ 1000 km/s)
- 銀河団内ガス
高温度：数千万 \sim 1億K \rightarrow 電離してX線放射
低密度： $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 個/cm³
 \rightarrow 銀河内より1万倍以上薄い
量は多い
 \rightarrow 銀河の約10倍

©NASA



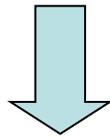


JWSTが撮影したAbell 2744©NASA

銀河団の暗黒物質

● 高速運動する銀河、高温のガス

→ 繋ぎとめるためには、銀河やガス質量では足りない!

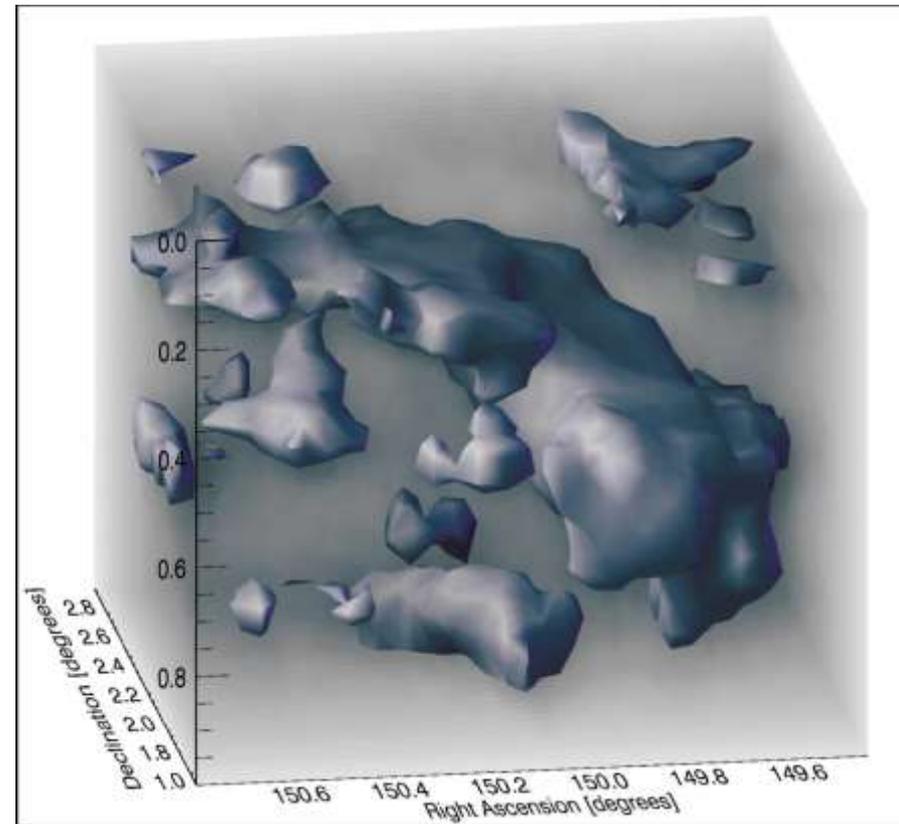
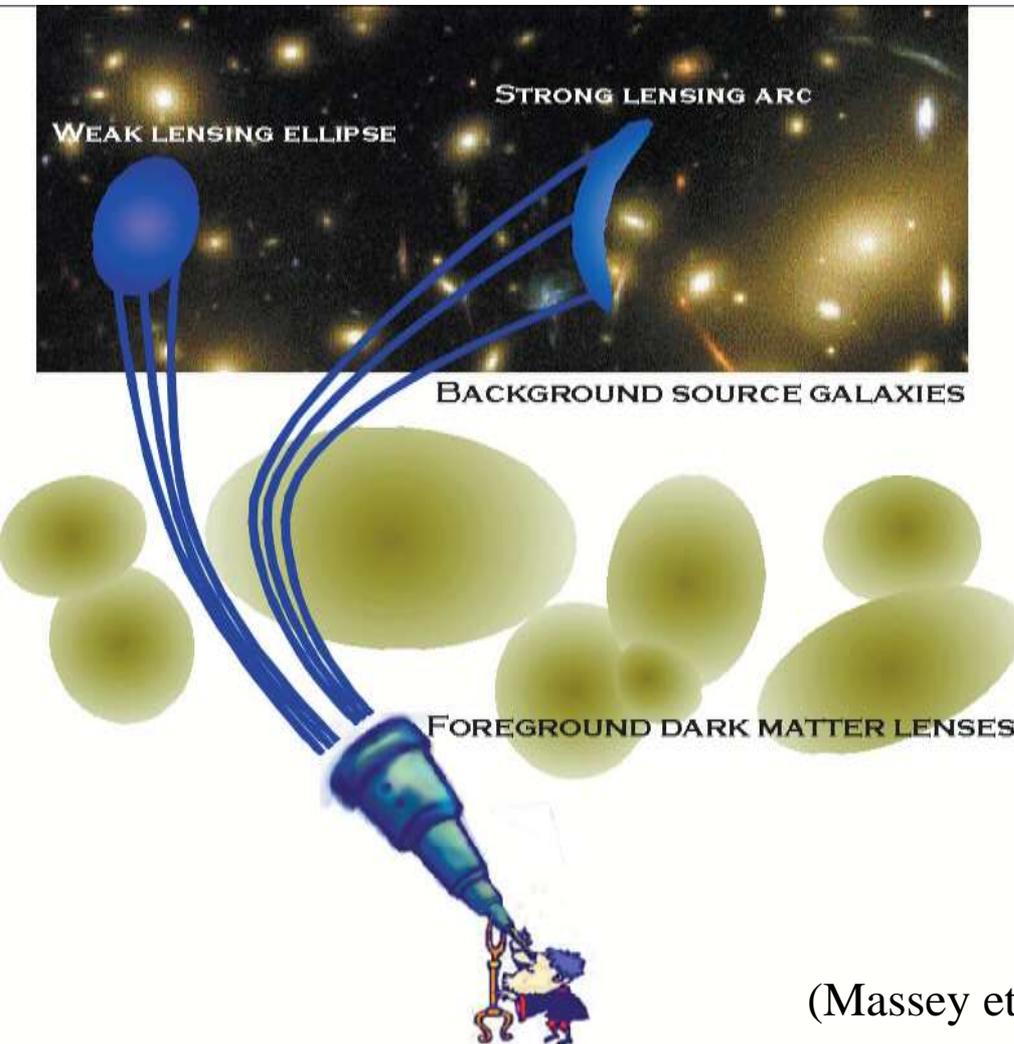


暗黒物質（ダークマター）の存在

暗黒物質	：	高温ガス	：	恒星	=	85	：	13	：	2
------	---	------	---	----	---	----	---	----	---	---

暗黒物質の分布

「重カレンズ」法

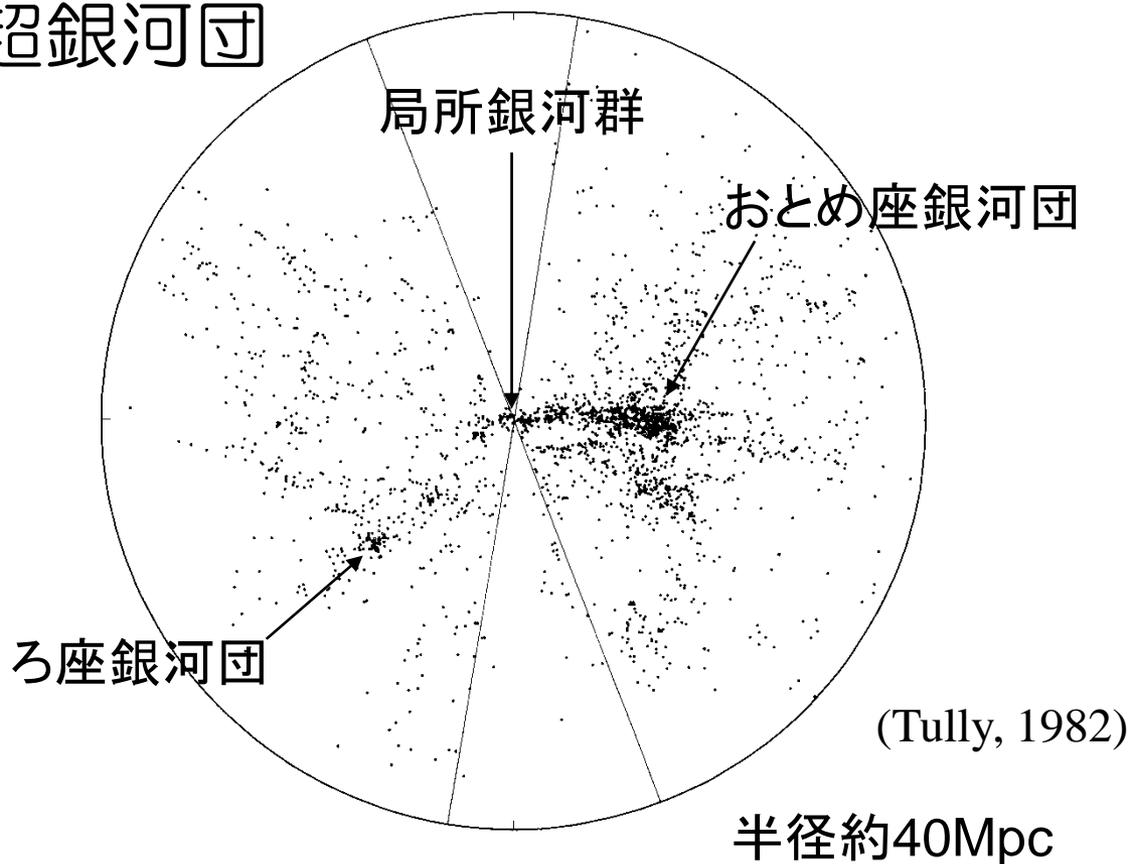


(Massey et al. 2007)

超銀河団

- 銀河群・銀河団の集まり
- 広がり: $\sim 50\text{Mpc}$ 、質量: $\sim 10^{15}M_{\odot}$ (M_{\odot} = 太陽質量)

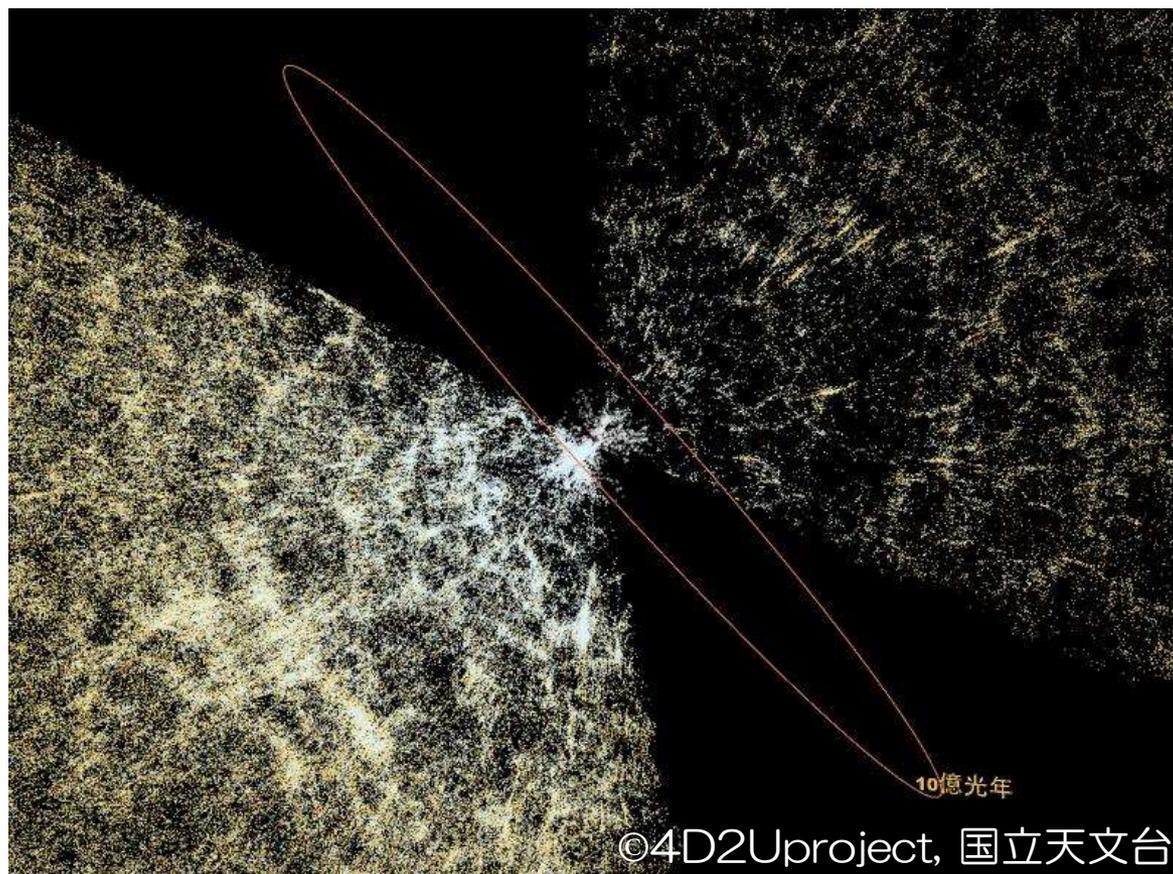
局所超銀河団



宇宙の大規模構造

銀河のつながり（フィラメント構造）と空洞（ボイド構造）

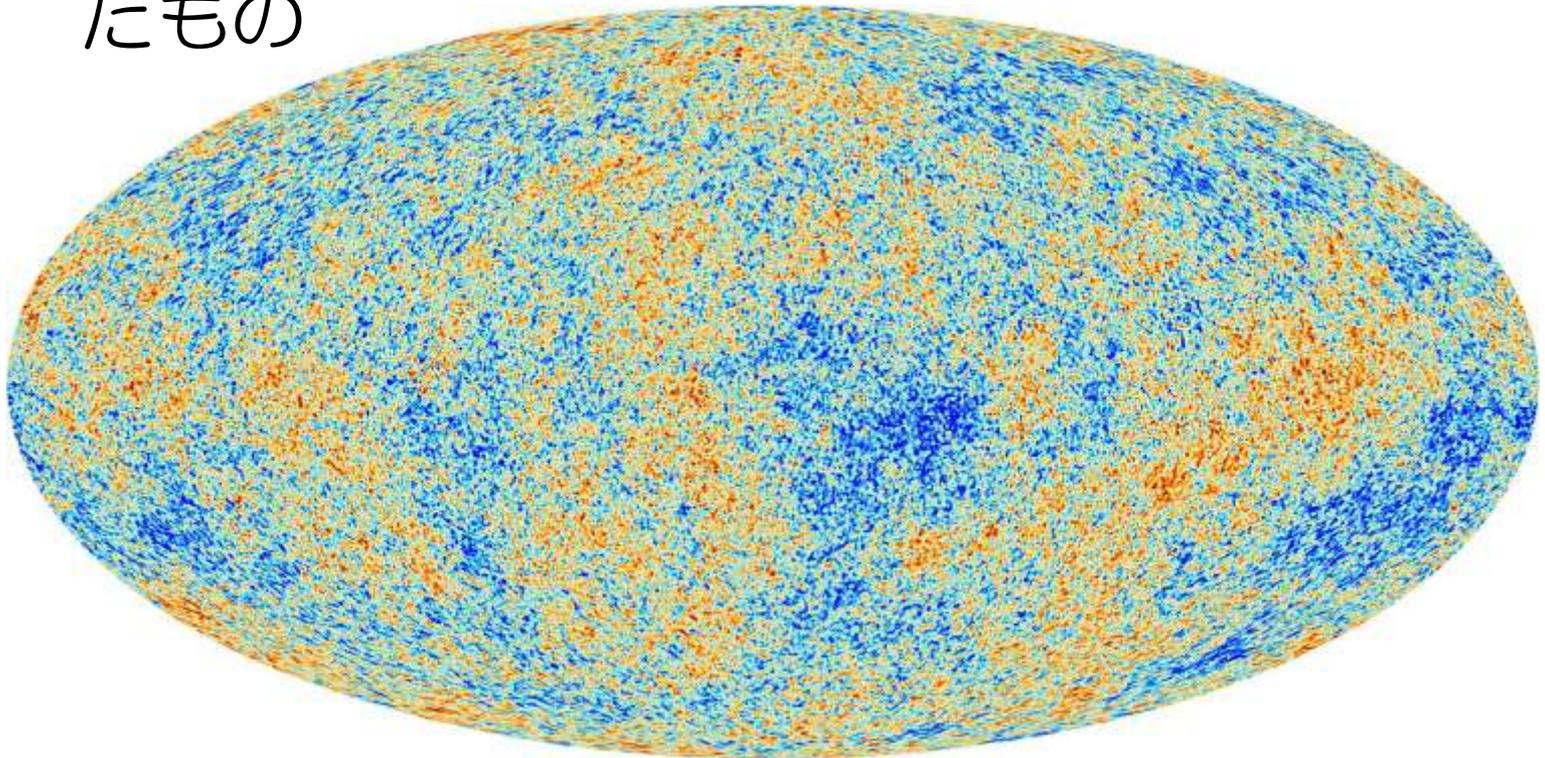
スローンデジタルスカイサーベイ（SDSS）の観測結果



宇宙初期の密度ゆらぎが成長？

宇宙の構造形成

- 宇宙背景放射
 - 宇宙空間はマイクロ波で満たされている。
 - 初期宇宙の光が宇宙膨張により引き延ばされたもの



The Cosmic Microwave Background as seen from the Planck satellite (Credit:ESA).

宇宙の加速膨張

- 宇宙はビッグバンによって始まり、その後、加速膨張している。
- 宇宙はなにでできているのか？
 - 物質：4%
 - 暗黒物質：23%
 - 暗黒エネルギー：73%
 - 通常物質だけだと膨張は減速するはず

まとめ

- 様々な型の銀河がある
- ダークマターの存在
- 銀河同士の衝突
- 銀河系は局部銀河群の一員
- 銀河が集まって銀河団ができる
- 銀河団が集まると超銀河団ができる
- 大規模構造には宇宙初期の名残が。