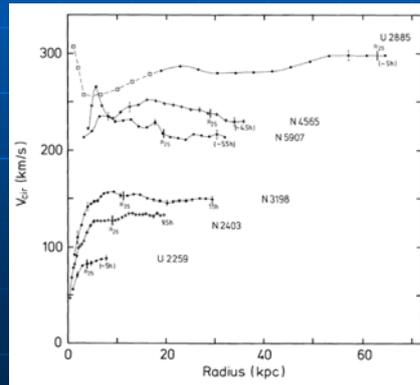


HIでみた回転曲線

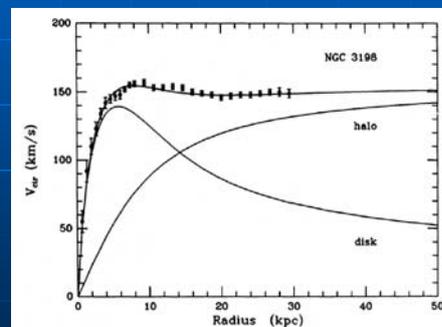
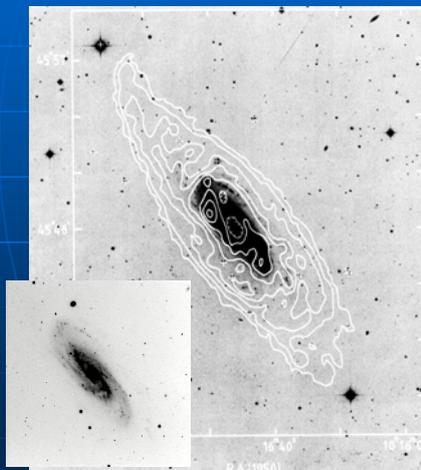
- 平らな回転曲線が多く見つかる
- 円盤よりも大きいところでも平坦性を維持

大量のダークマターの存在を示唆



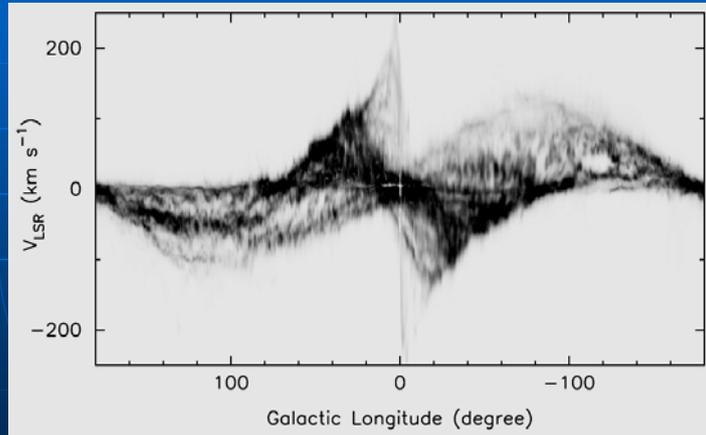
NGC 3198の例

- 広がったHIと平坦な回転曲線



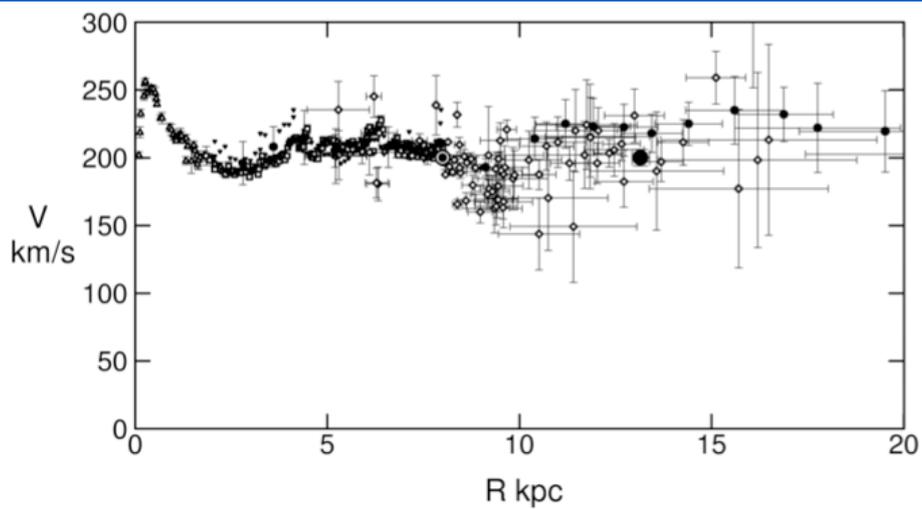
銀河系のHIのI-v図

- 中心対称な分布→銀河系の回転を示唆



銀河系回転の回転曲線

$R_0 = 8 \text{ kpc}$, $V_0 = 200 \text{ km/s}$



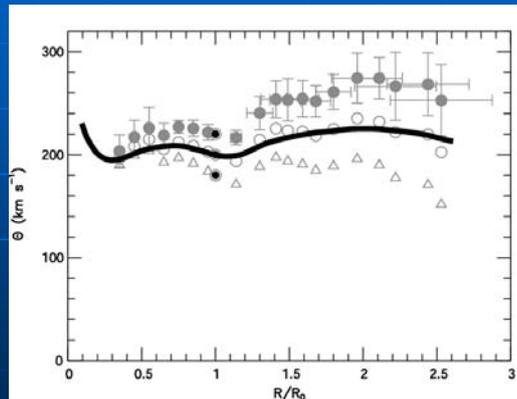
さまざまな天体について、視線速度と距離の推定値から回転速度を求めたもの

銀河系の回転曲線

- 平坦な回転曲線として矛盾はない
- しかし、精度は悪い

特に、外側
また、 R_0, Θ_0
の依存性も大

銀河系の回転曲線決定は現在も重要な研究対象である



銀河系構造、ダークマター分布、ダークマターの正体

VERA: VLBI Exploration of Radio Astrometry

4台の電波干渉計で
銀河系の測量を行う

入来



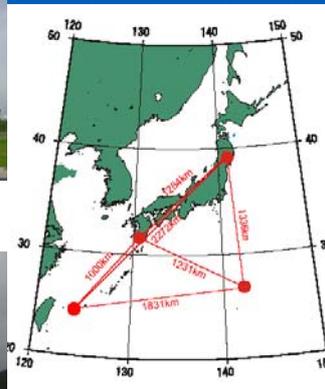
水沢



石垣島



小笠原



最長基線：2300 km
完成：2002年春
観測：2004年～

VERAの目標: 銀河系測量

銀河系の大きさ: 約 30 kpc



銀河系の中心まで 距離 8 kpc
視差 125 μ 秒角
銀河系の測量には、10 μ 秒角が測れる装置が必要

銀河系全域の直接測量は21世紀のフロンティア

銀河系測量の新時代

■ 銀河系規模の測量を目指したプロジェクト



GAIA (ヨーロッパ)
2012年打ち上げ



SIM (アメリカ)
2015年打ち上げ?



JASMINE (日本)
2018年打ち上げ?

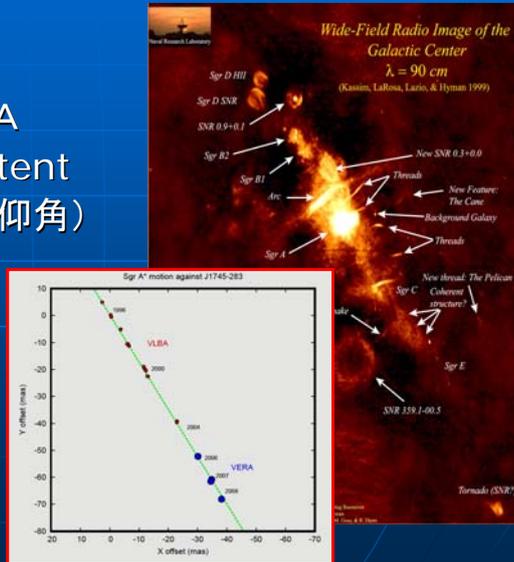
目標はいずれも、銀河系の測量

VERAの利点: 早くから観測開始、電波
VERAの難点: 天体数が少ない.

銀河系中心観測

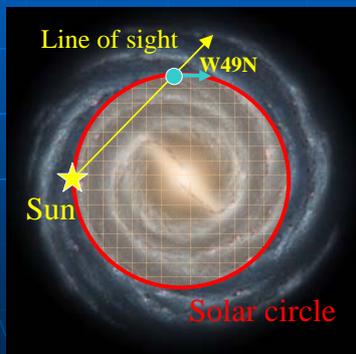
- Sgr A*
固有運動は検出、VLBA
(Reid et al.)とconsistent
視差は難しい(感度、低仰角)

基本的には太陽の
銀河回転を見ている

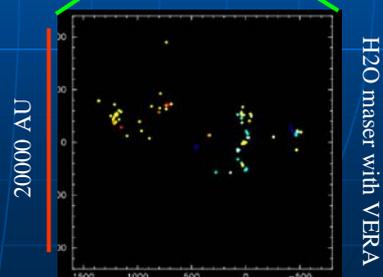


W49Nによる銀河定数計測

- W49N: nearly on the Solar circle
Massive SFR at $D \sim 11$ kpc



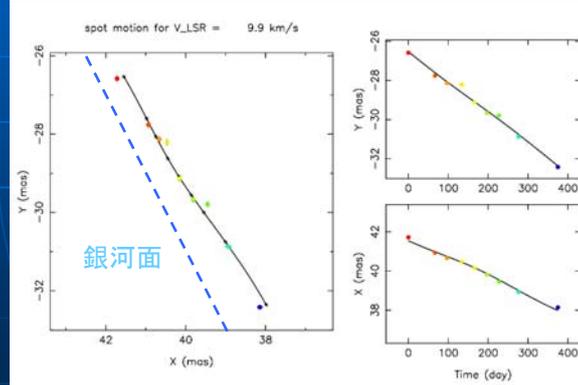
HII regions with VLA



W49Nの固有運動

- 2005年10月から1年間の運動
(位置基準: J1905+0952)

最も明るく、分子雲の視線速度に近いスポットの動き



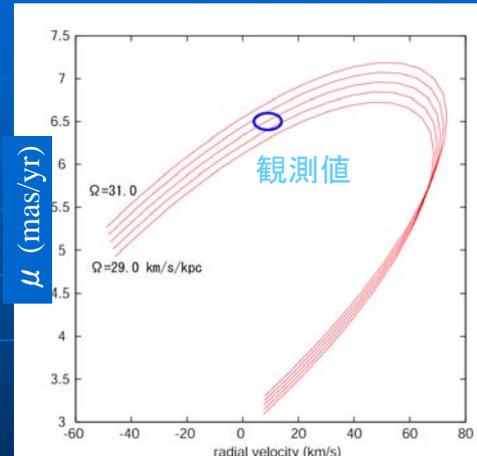
銀河面に沿った動きが見える → 銀河回転を検出

W49Nの固有運動と銀河回転速度

今回の観測から、
 $\mu = 6.5 \pm 0.1 \text{ mas/yr}$
 分子雲の観測から
 $V_r = 9 \pm 5 \text{ km/s}$

この観測を再現する
 $\Omega (= \Theta_0/R_0)$ は、

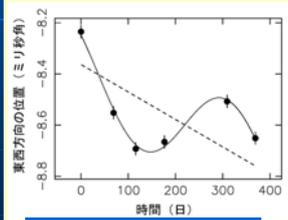
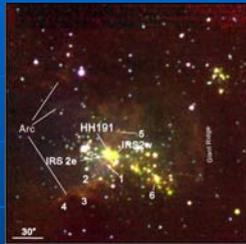
$$\Omega = 30.0 \pm 0.6 \text{ (km/s/kpc)}$$



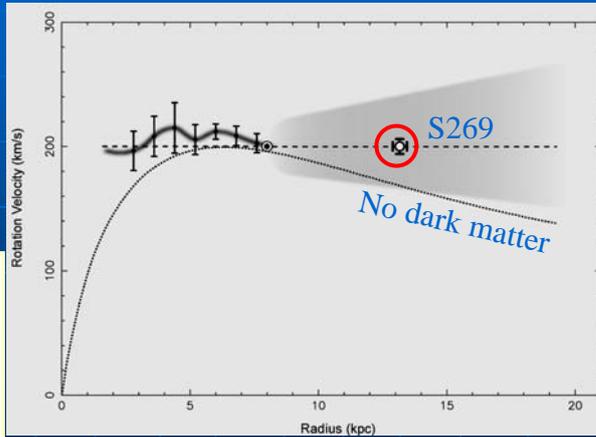
($R_0 = 8.0 \text{ kpc}$ を仮定、依存性は弱い) $V_r \text{ (km/s)}$
 Sgr A* (Reid ら)に次ぐ、2例目の銀河系スケールでの銀河
 回転計測

S269 と銀河回転曲線

- S269の位置天文計測から、回転曲線に強い制限



D: 5.28 +/- 0.24 kpc

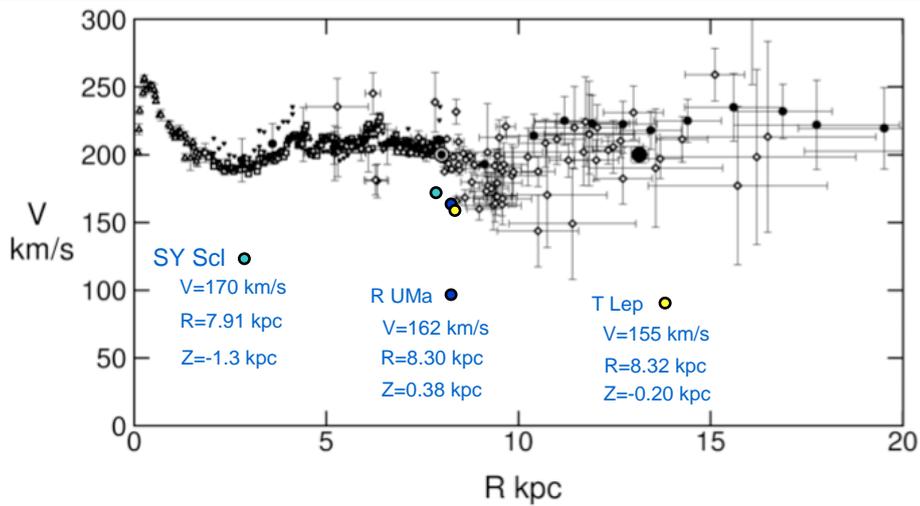


13 kpc までフラットな回転曲線を強く支持

Honma et al.(2007)

銀河系回転の回転曲線

$R_0 = 8 \text{ kpc}$, $V_0 = 200 \text{ km/s}$

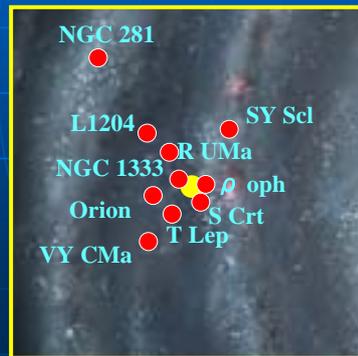


速度分散の大きい天体がゆっくり銀河回転する
Asymmetric driftが見える

銀河系上の分布

年周視差・固有運動が計測された星の分布

太陽付近の模式図



銀河系の模式図

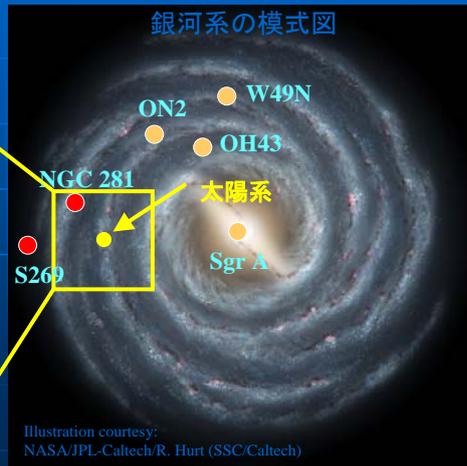


Illustration courtesy:
NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

● 視差＋固有運動 ● 固有運動のみ

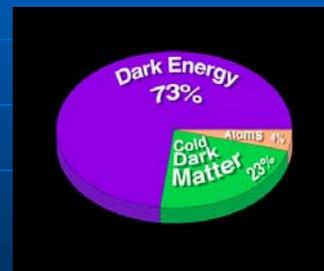
ダークマター問題

- 現代天文学、物理学における最大の謎の一つ
- 銀河系はその重要な実験場
分布、質量、直接探査etc ...

- 天文学的なアプローチ
銀河回転、重力レンズ、...

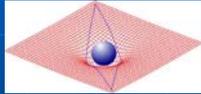
- 素粒子的なアプローチ
LHCによるDM粒子生成、
太陽系近傍DMの直接探査、...

宇宙の構成比



重力マイクロレンズ

- 銀河や銀河団による重力レンズ
多重像を分解可能 > マクロレンズ

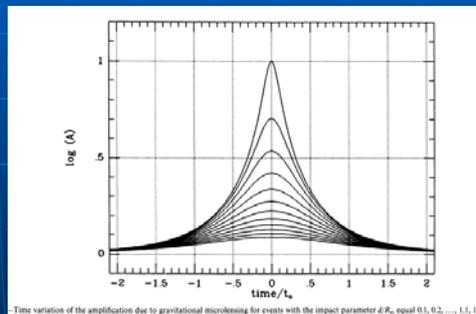


- 星による重力レンズ
多重像の離角が小さく分解不可能
> マイクロレンズ



マイクロレンズの観測

- 多重像は分解できないが、像の明るさの変化を捉えることは可能 (Paczynski 1986)



Time variation of the amplification due to gravitational microlensing for events with the impact parameter b/R_s equal 0.1, 0.2, ..., 1.1, 1.2

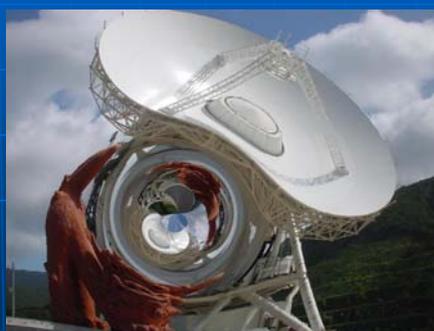
時間

重力レンズによるイメージ

重力レンズを受けたVERA石垣島局



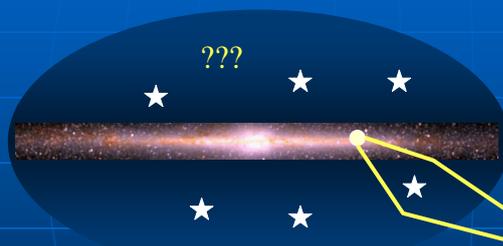
レンズなし



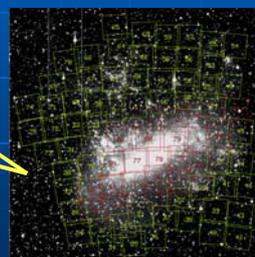
レンズあり

マイクロレンズを用いた暗黒物質の探査

- 暗黒物質：光を出さない謎の物質
天の川中にも大量にある（ダークハロー）



大マゼラン星雲



- マゼラン星雲の星の前を、暗黒物質天体が横切ると、マイクロレンズ現象が発生 > これを用いて暗黒物質を探す

マイクロレンズ現象の検出

- マゼラン雲の星の前を横切る天体を検出
(Alcock et al. 1993)

星の明るさが変化する様子

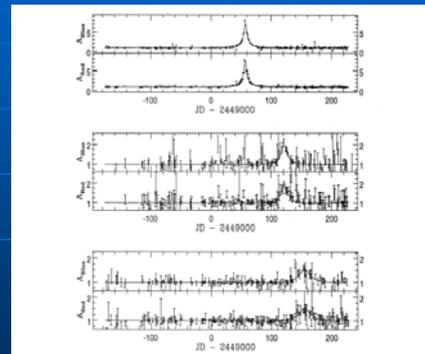


FIG. 7.—The light curves of three candidate microlensing events. The solid lines show the best-fit microlensing curves, with the parameters shown in Table 1. Scale as in Fig. 5.

マイクロレンズ天文学の幕開け

DM ≠ MACHO

- LMC方向のMACHOグループの5年間の結果
 $\tau \sim 1 \times 10^{-7}$
(haloやLMCの星も含まれる?)

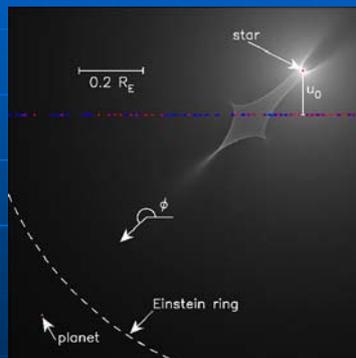
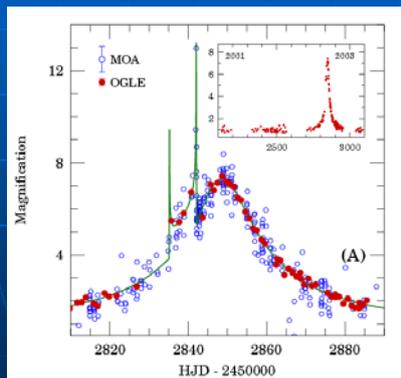
ダークマターがMACHOの場合の期待値

$$\tau_e \sim 4 \times 10^{-7}$$

MACHOでハローのDMを説明するのは難しい

マイクロレンズによる惑星探査

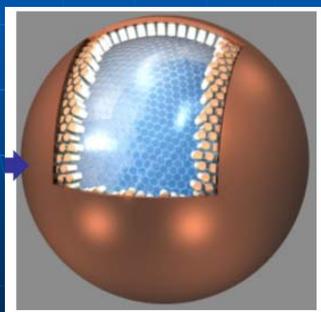
- マイクロレンズ法はその後惑星探査に活躍している



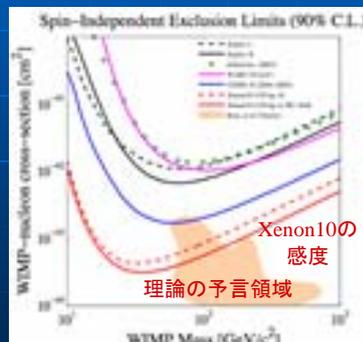
主星の質量 0.36太陽質量、惑星の質量 1.5木星、距離3AU

ダークマター研究の展望

- 現在のダークマター最有力候補: 相互作用をほとんどしない素粒子 WIMP (ニュートラリーノなど)
- 今後10~20年でダークマター粒子(WIMP)が地上で直接検出される可能性あり (例 米国XENON10, 神岡Xmass実験)



Xmass検出器



Xenon10の結果 (Angle et al. 2008)

ダークマター粒子と銀河回転

- ダークマターが検出された際、素粒子の性質を決めるのに、銀河回転速度 Θ_0 は最も重要なパラメーター

$$\text{WIMP検出率} \propto \rho_{\text{DM}} \times V_{\text{DM}} \sim (\Theta_0)^3$$

$$(\rho_{\text{DM}} \propto (\Theta_0)^2 \sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3)$$

- VERA等の位置天文学観測による銀河回転計測がダークマター問題の解決にも貢献可能