

銀河系の基本構造 II

銀河円盤、回転、ダークマター

銀河回転運動

- 銀河回転により、天体はLSRに対して運動速度を持つ

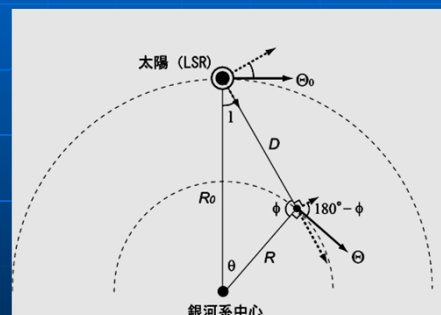
視線速度 V_r

接線速度 V_t

$$V_r = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \sin l,$$

$$V_t = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \cos l - \frac{\Theta}{R} D,$$

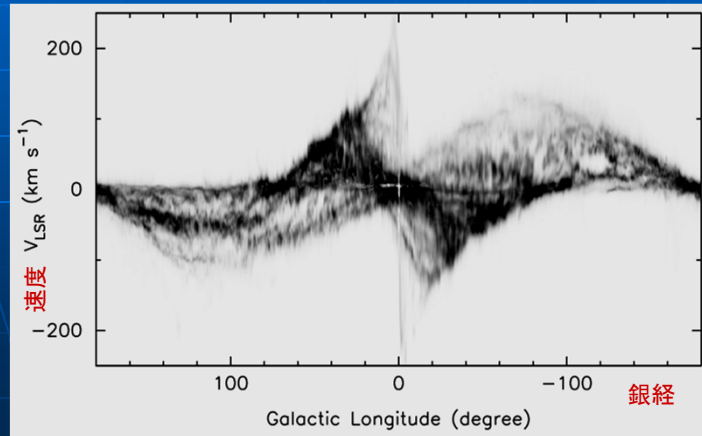
いずれもLSRに対する相対値



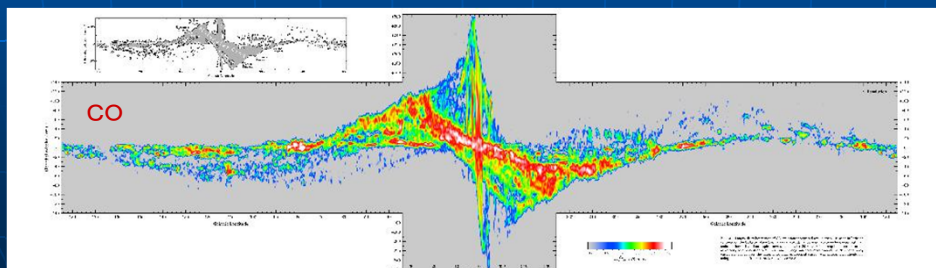
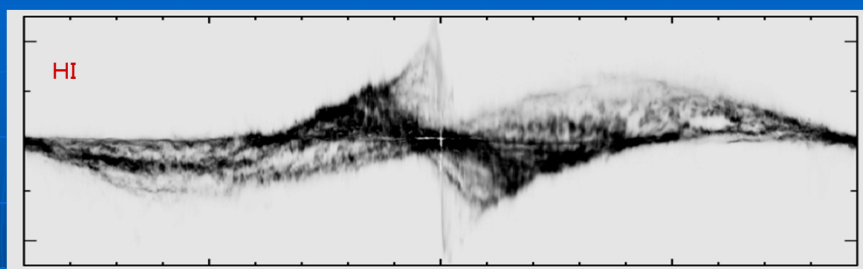
銀河系回転の模式図

銀河系のHIのI-v図

- I-v図: $b=0$ のガスの視線速度を図示したもの
- 中心対称な分布→銀河系の回転



COとHIのI-v図



銀河系構造I: 渦状腕

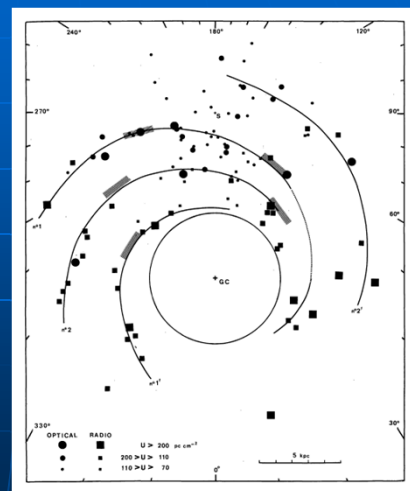
銀河系の渦状腕を見る方法

- 位置速度図をマップに焼き直す
(回転曲線を仮定し運動学的距離を使用)
- シミュレーションと比較
- 腕に付随する天体の分布
(OB星、HII領域、星形成領域など)

HII 領域の分布

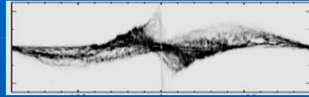
- Georgelin+(1976)

HII領域の距離を求め
銀河地図を作成
(距離の不定性大)



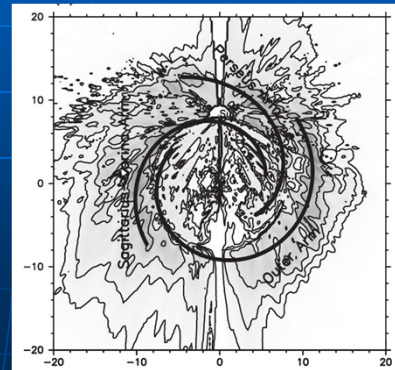
HIで見た渦状腕

- Nakanishi & Sofue (2003)



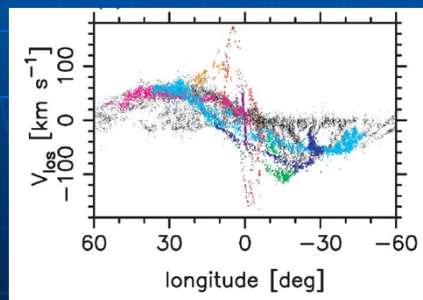
HIの位置速度図から
銀河系マップを作成
(速度の不定性の影響有)

何本かの腕が見える

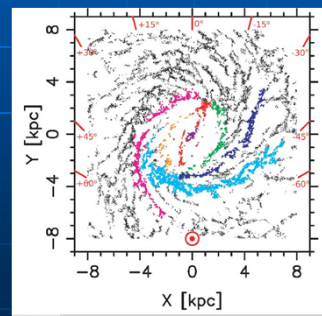


l-v図: 観測とシュミレーションの比較

- Baba+(2010)
銀河系のl-v図を再現するようなモデルを数
値シュミレーションで計算



l-v 図

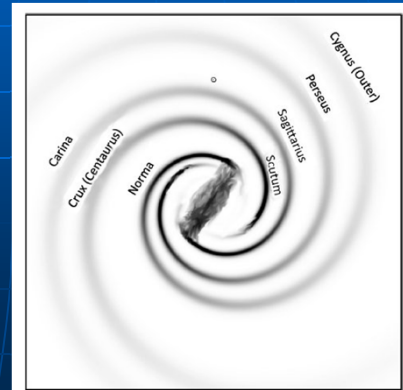
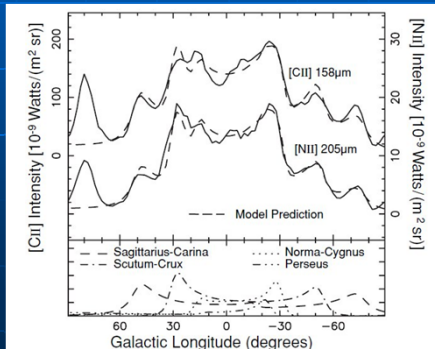


map

赤外線で見た渦状腕

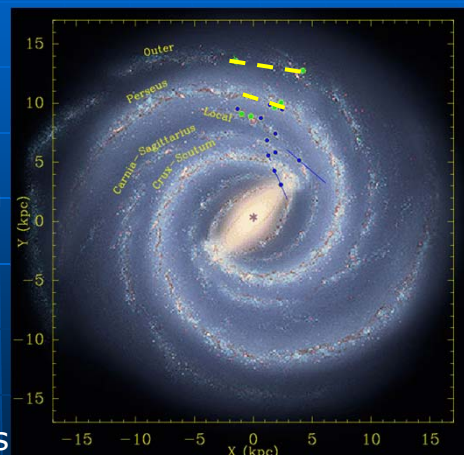
- Steiman-Cameron(2010)

COBEのCII, NII強度分布を再現する渦状腕モデルを作成(log-spiral を仮定)



Combined analysis of VLBA/VERA

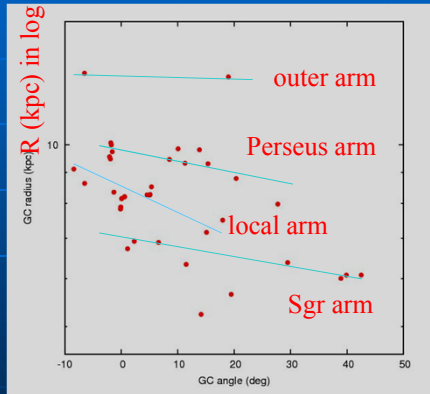
- 18 sources published by 2008
 - 10 VLBA Methanol maser project (Reid+)
 - 4 VERA H₂O maser
 - 4 others from VLBA
- Pitch angle of Perseus arm
 - 16 +/- 3 deg
 - four arm spiral ?
- Galactic constants
 - $R_0 = 8.4 \pm 0.6$ kpc
 - $\Theta_0 = 254 \text{ km/s} \pm 16 \text{ km/s}$
 - $(\Omega = 30.3 \pm 0.9 \text{ km/s/kpc})$



Reid+ 2009

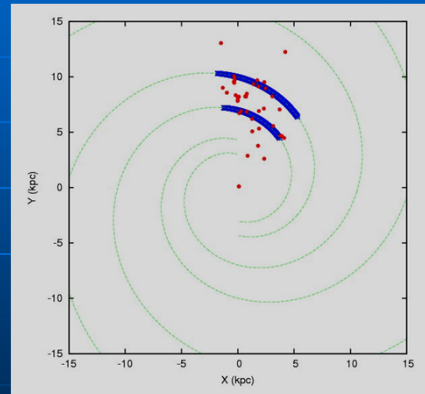
MWG Spiral structure with VLBI

- modeling with log spiral arms



GC angle (deg)

Perseus is more prominent than Sgr



extrapolation of symmetric arms
A plan view of MWG ??

棒状構造

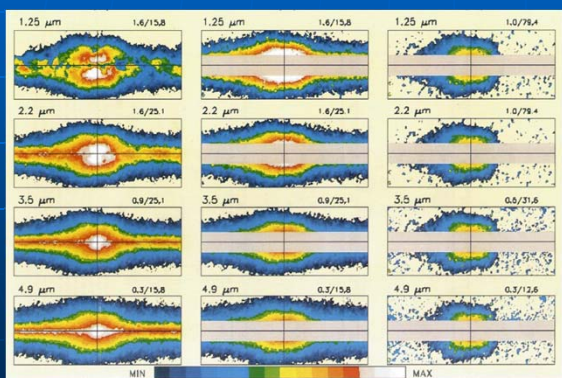
銀河系棒状構造に関する議論



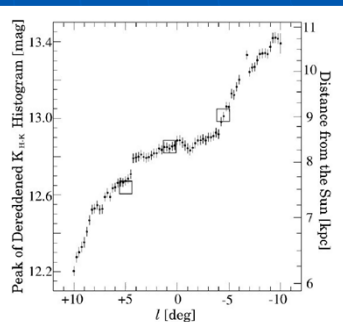
- 測光学的 (星分布の非対称性など)
- $I-v$ 図の非対称性など (運動学的)
- シュレミーシオン

測光学的研究

- 星の分布の非対称 ($l > 0$ 側が明るい)



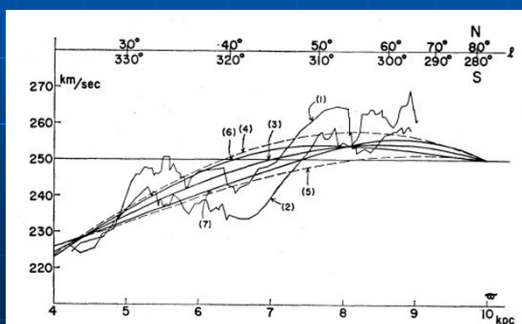
Weiland+(1994) with COBE/DIRBE



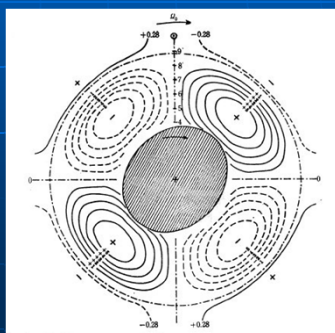
Nishiyama+(2006)
with IRSF 1.4m

l-v図に基づく運動学的議論

- Manabe & Miyamoto (1975)
HI回転曲線の非対称性からバーの存在を示唆



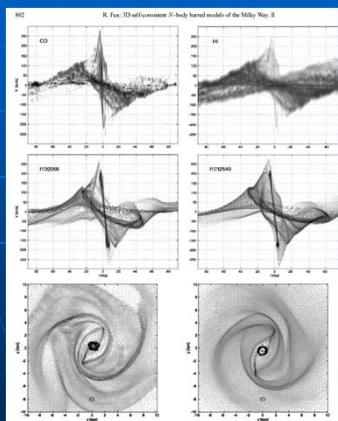
回転曲線の南北差



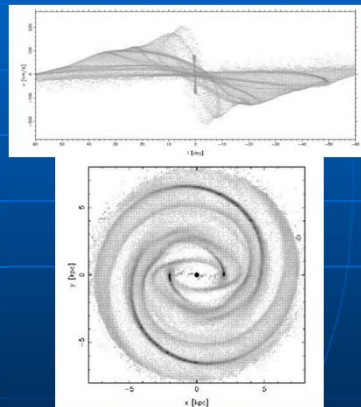
バーによる非円運動成分

棒状構造のシミュレーション

- 数値計算で*I-v*図を再現



Fux (1999)

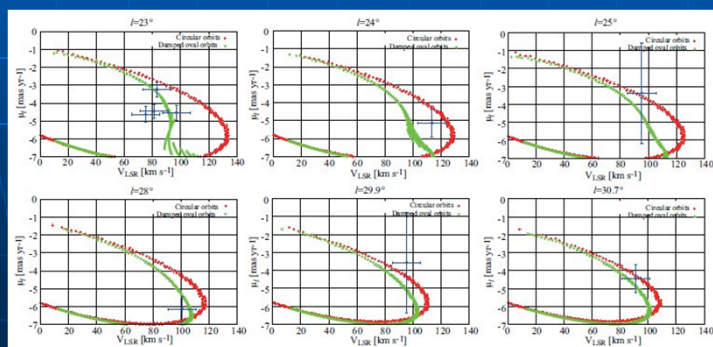


Bissantz+(2003)

前出のBaba+(2010)も同様

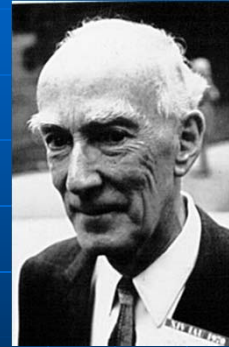
VLBIアストロメトリとバー

- Matsumoto+(2011)
VERAによる視線速度+固有運動計測
固有運動もバー有の方がよりよく説明可能



銀河系の回転

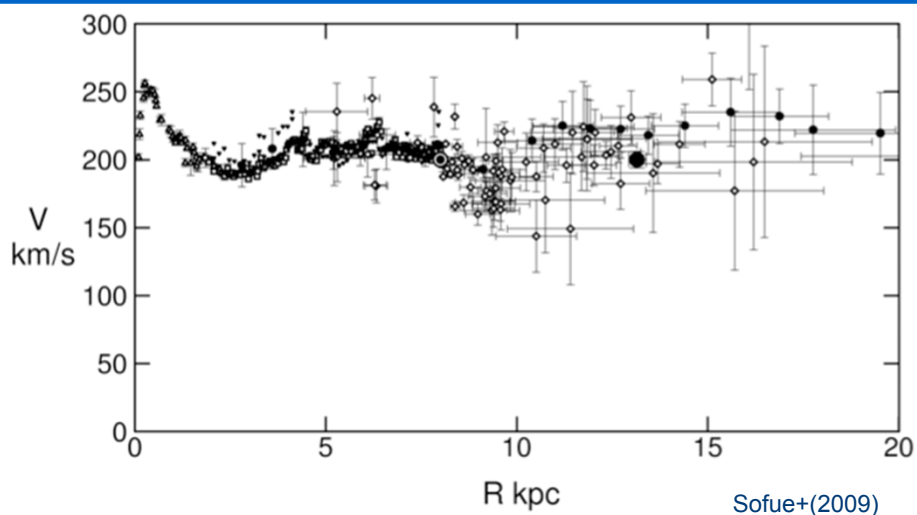
- 銀河回転の発見者はOort
- 前出のOort定数に基づく
- $A, B = 0$ でないことから、
銀河系の回転を確認 (1927)



Jan Oort (1900-1992)

Galaxy rotation curve

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



銀河系回転曲線の決定精度は太陽よりも外側で非常に悪い
(視線速度および推定距離を用いるため)

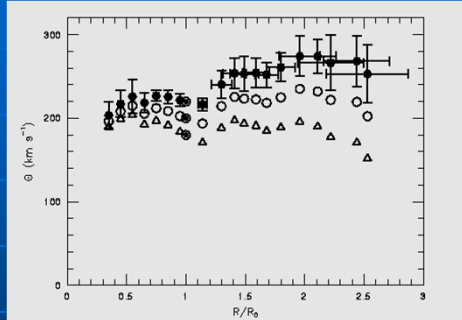
銀河定数と回転曲線

- 銀河定数が変わると回転曲線の形も大きく変わる

↓
質量も不定性大

R0、 Θ_0 といった足場を固めることも重要

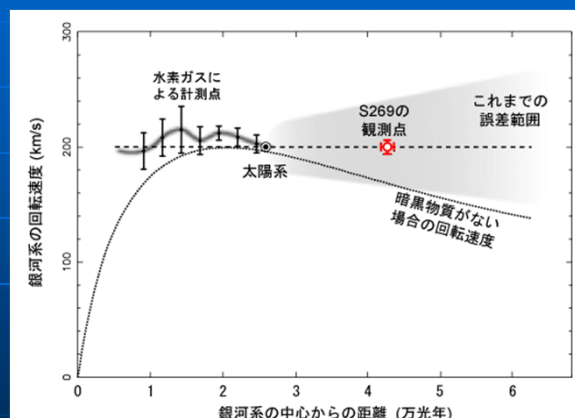
→ 銀河定数を決めるためにも、天体の距離と運動を精密に計る必要が有る



$\Theta_0 = 180, 200, 220 \text{ km/s}$ の場合の回転曲線
Honma & Sofue (1997)

銀河回転曲線と暗黒物質

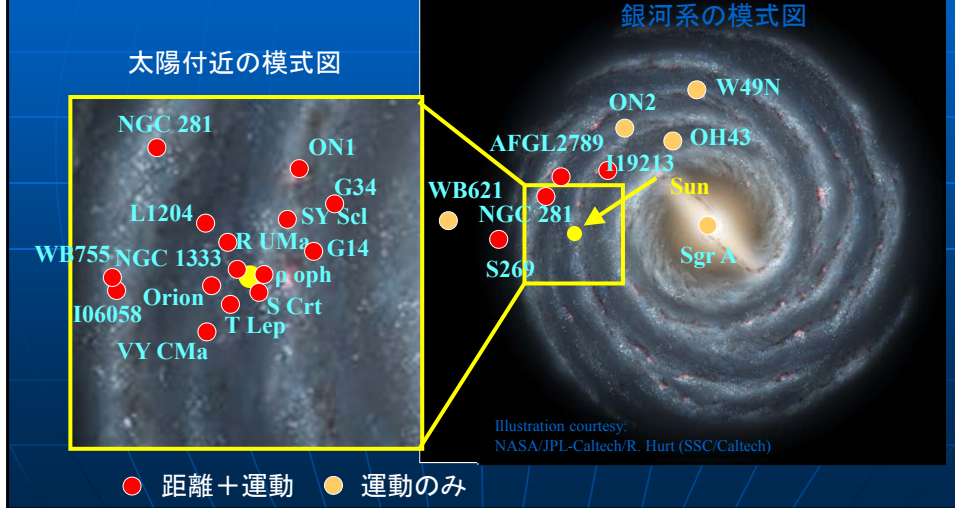
- 銀河回転曲線： 銀河系の場所と回転速度の関係



銀河回転：暗黒物質の分布を調べる大事な情報
S269の観測から、その内側の少なくとも30%が暗黒物質

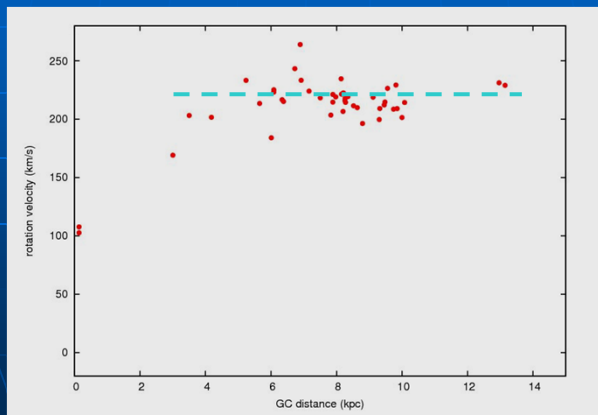
VERAによる位置天文計測

年周視差・固有運動が計測された星の分布



Rotation curve with VLBI astrometry

- Rotation curve obtained from 3D motions (not from radial velocities)

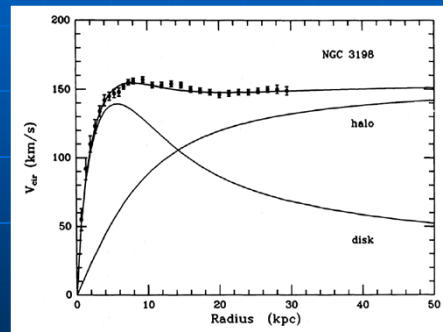
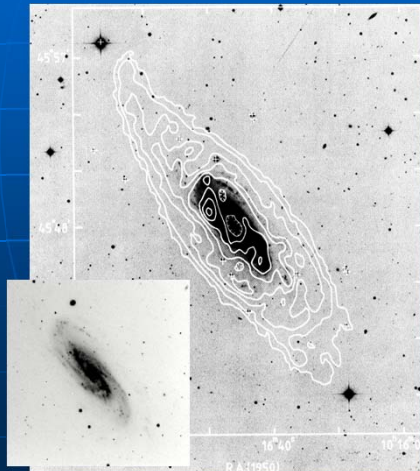


$\Theta_0=220$ km/s & IAU solar motion are assumed

Basically consistent with flat rotation between 4 to 13 kpc

系外銀河の例: NGC 3198

- 広がったHIと平坦な回転曲線

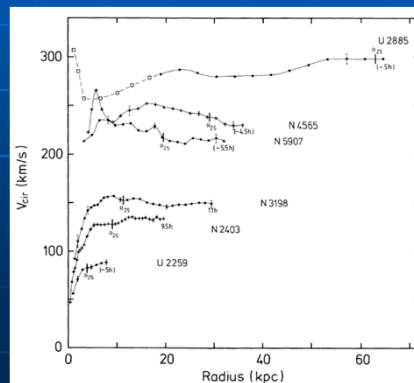


回転曲線: 銀河回転速度 V を銀河中心距離 R の関数として図示したもの

HIでみた回転曲線

- 平らな回転曲線が多く見つかる
- 銀河の質量を見積もると、銀河内の星よりもずっと大きい値になる。

→ ダークマター
(暗黒物質)の存在



ダークマターの種類

- 大きくわけて2種類

MACHO : Massive Astrophysical Compact Halo Object

重力で束縛された天体的なダークマター

WIMP : Weakly Interacting Massive Particle

素粒子的なダークマター

- 天体的なダークマター(MACHO)は1990年代から勢力的に探査が行われたが、銀河系のダークマター総量を説明することは難しい → 現在はWIMPが有力候補

MACHO候補天体

- ブラックホール
- 白色矮星(太陽質量程度の星の燃えかす)
- 中性子星(大質量星の残骸)
- 褐色矮星、惑星(核反応が起こらない天体)

or something more exotic (e.g.,
Boson star etc)

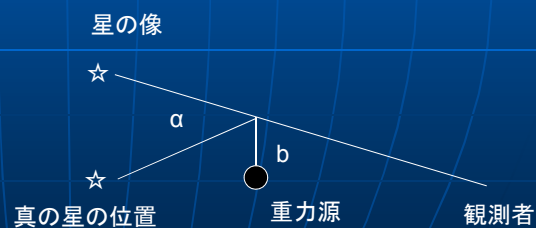
重力レンズ

- 一般相対性理論によれば、重力源の傍を通過する光線の屈折角は以下で書ける

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}$$

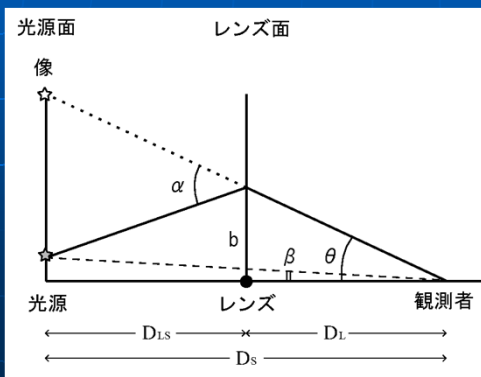
α : 屈折角

b : 最接近距離



重力レンズ方程式

- 点源の重力レンズにおける光源、像、レンズの位置関係式



$$\theta - \beta = \alpha \frac{D_{LS}}{D_s}$$

ただし、

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}$$

重カレンズ方程式2

- 前頁の式において

$$R_E \equiv \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{1/2}, \quad r \equiv \frac{D_L}{R_E} \theta, \quad u \equiv \frac{D_L}{R_E} \beta,$$

とすると、

$$r^2 - ur - 1 = 0,$$

$$r_{1,2} = \frac{u \pm \sqrt{u^2 + 4}}{2}$$

普通、点源レンズの場合2個の像ができる

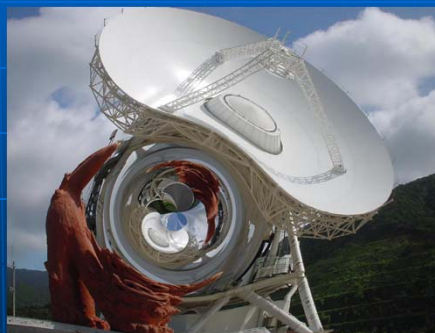
R_E はアインシュタインリング半径といわれ、レンズの大きさを与える。

重カレンズによるイメージ

重カレンズを受けたVERA石垣島局



レンズなし

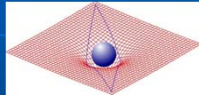


レンズあり

像のゆがみにより、増光する(面積が拡大)

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



※1太陽質量、レンズ距離10 kpc、光源の距離50 kpcの重力レンズの場合、 $R_E \sim 1$ ミリ秒角

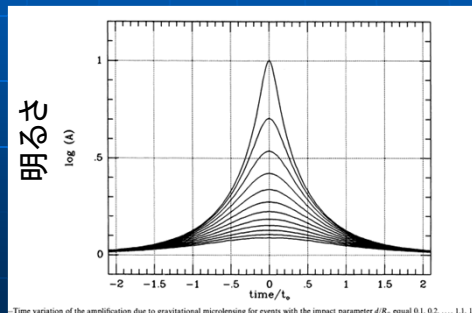
マイクロレンズの観測

- 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)



$$A_{1,2} = \left| \frac{r_{1,2} dr_{1,2}}{u du} \right| = \left| \frac{r_{1,2}^4}{r_{1,2}^4 - 1} \right|$$

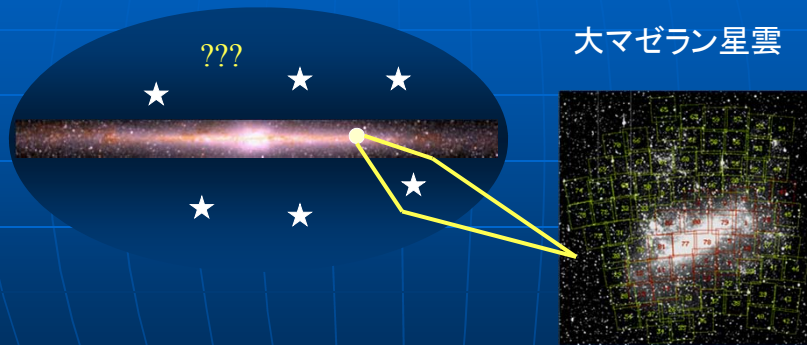
$$A = |A_1| + |A_2| = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$



時間

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）



- 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

マイクロレンズの発生確率

- アインシュタインリングサイズ

$$R_E \equiv \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{1/2}$$



- 光学的厚み(光源がレンズを受ける確立)

$$\tau = \int \pi R_E^2 \frac{\rho}{M} dD,$$

(ρ はMACHO天体の密度, M は質量)

典型的なハローを仮定すると、

$$\tau = 4 \times 10^{-7}$$

数百万個に1個の割合でレンズが起こる

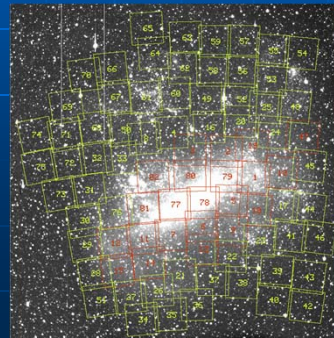
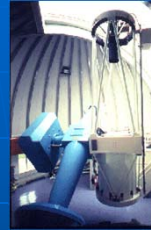
MACHO と EROSによる観測

多数の星のモニターを開始

- MACHO (米豪)
- EROS (仏)

マゼラン雲方向: 900万個
バルジ方向: 数千万個

ほぼ毎日、数年間観測



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

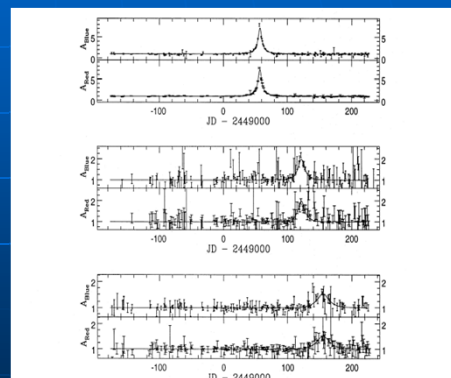


FIG. 7.—The light curves of the three candidate microlensing events. The solid lines show the best-fit microlensing curves, with the parameters shown in Table 1. Units as in Fig. 3.

マイクロレンズ天文学の幕開け

マイクロレンズ観測の国際競争

- MACHO、Super-MACHO (米豪)
- EROS (仏)
- OGLE (ポーランド)
- MOA (日本、ニュージーランド)

- PLANET (国際協力)
- GMAN (国際協力)

いずれも1mクラスの小口径望遠鏡を占有して観測

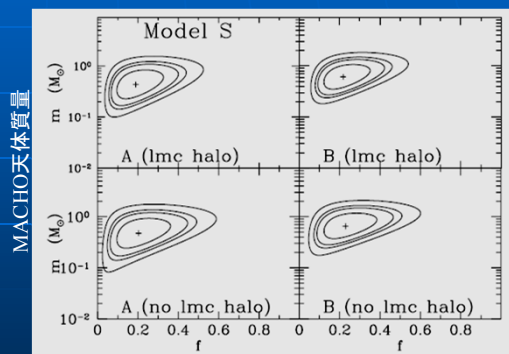
DM≠MACHO

- LMC方向のMACHOグループの6年間の結果
1200万個の星のモニター、15イベント



天体質量
 $\sim 0.5 M_{\text{sun}}$
 ハローに占める割合
 $\sim 20\%$

銀河系のダークマター
 を説明するのに不十分



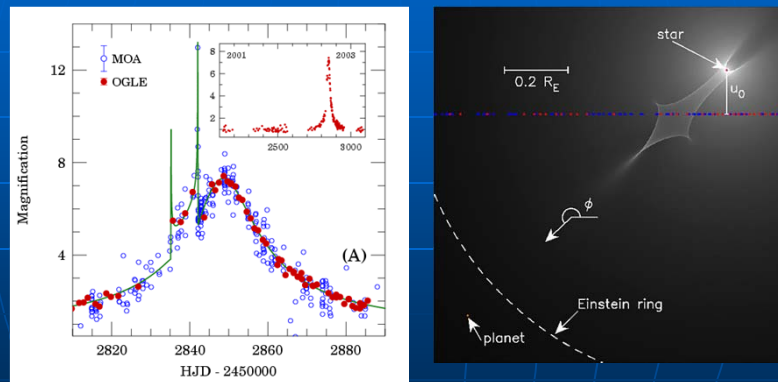
ハローに占める割合

※これらの天体が何かは興味深いが...

Alcock et al. 2000

余談: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を国際観測で検出した例

別の可能性:MOND

- MOND : MOdified Newtonian Dynamics
ニュートン力学を修正し、kpcスケールで
 $f \propto r^{-1}$
としたもの(暗黒物質なしに平坦な回転曲線を説明できる)

ただし、これを自然に説明する理論的バックグラウンドはない

衝突銀河団とダークマター

- 衝突銀河団の観測からダークマターの存在を検証

2つの銀河団が衝突し
プラズマがラム圧によって
銀河団から離されている

一方、背景天体の重力レンズ
からは質量の中心は各銀河団
の中心に一致

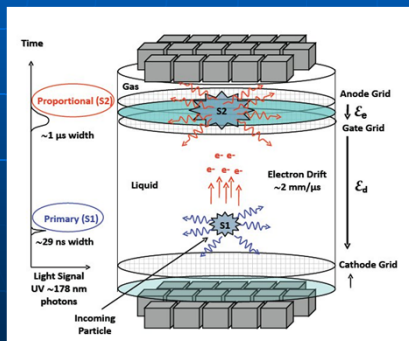


Clowe+(2006)

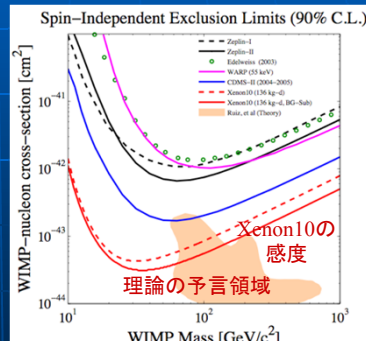
→DMは確かに存在する(MONDは×)
(DM質量 >> プラズマ質量 >> 銀河団中の星の質量)

WIMP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)



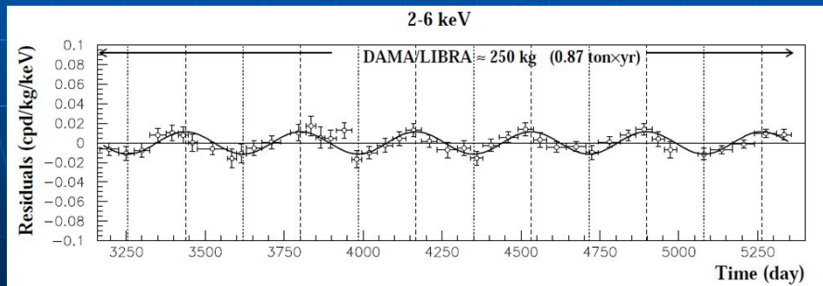
Schematic view of Xenon 10



Xenon10の結果 (Angle et al. 2008)

DAMAの結果

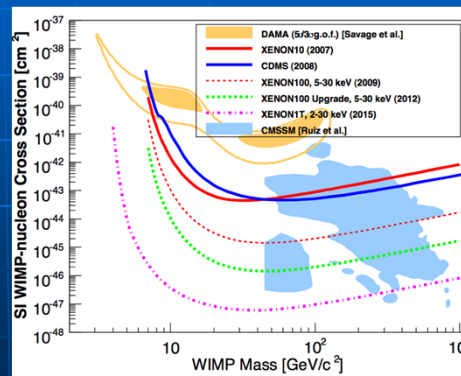
- イタリア／中国のグループがダークマターのシグナルをとらえたと言張(DAMA)
- シンチレーション数に1年周期の変動
 >地球公転によるDMの“風”の変化？



Results from DAMA/LIBRA : Bernabei+(2010)

Xenon 100 の結果

- Xenon100の最新結果 (2010)
- No signal
- DAMAの結果と矛盾している...



Aprile+(2010)

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

銀河系構造のまとめ

円盤構造

- 棒状構造を持つ
- 渦状腕を持つ。4 arm (2 major + 2 minor ?)
- 回転曲線はほぼ平坦

ハロー

- 大量の暗黒物質
- 正体は不明。MACHOよりはWIMPが優勢