

宇宙科学II (電波天文学)  
第10回

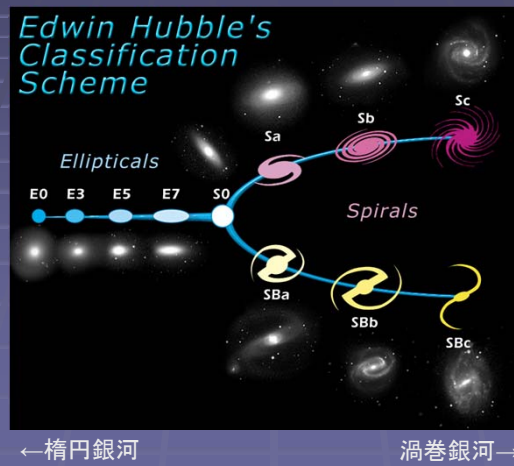
銀河／銀河系と  
ダークマター

銀河／銀河系



## 銀河の形態分類

### ■ ハッブルによる形態分類



←橢円銀河

渦巻銀河→

## 銀河の構成要素

- 電磁波で見える質量の大部分は“恒星”
- 他に冷たいガス、ダスト等星を作る元(恒星質量の10%以下程度)
- 他に、電磁波を出さない暗黒物質(= ダークマター)が大量にある(通常物質以上)

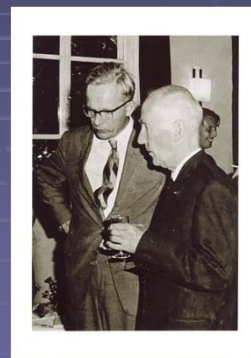
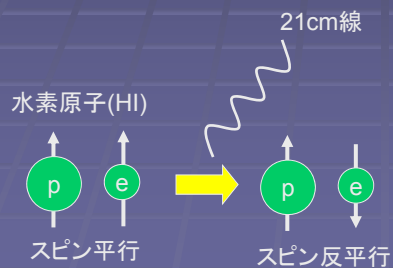


恒星成分を見るには、光や赤外線。電波では主に低温のガスやダストを見る

# 中性水素21cm線 と 円盤銀河の回転

## 中性水素21cm線

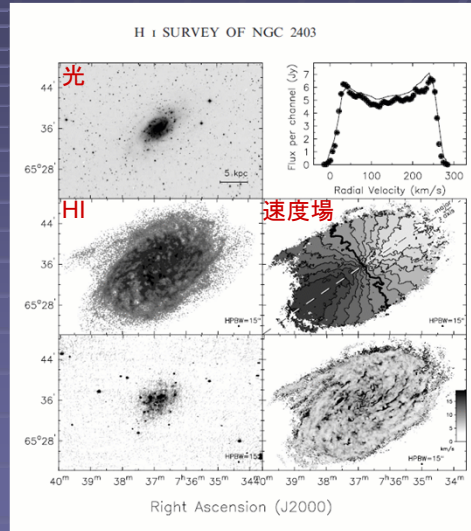
- 水素: 宇宙で最も存在量の多い元素
- 21cm線: 中性水素原子(HI)の基底状態の超微細構造遷移にともなう放射(1951年に初検出)
- $\lambda=21.1\text{ cm}$ ,  $\nu=1420\text{ MHz}$
- 円盤銀河でよく観測される。



中性水素21cmを予言した  
Jan Oort (1900 - 1992)  
Hendrik van de Hulst (1918-2000)

## 中性水素21cm線

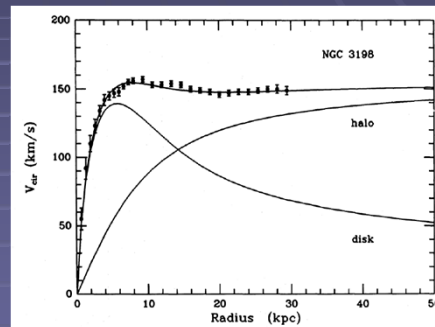
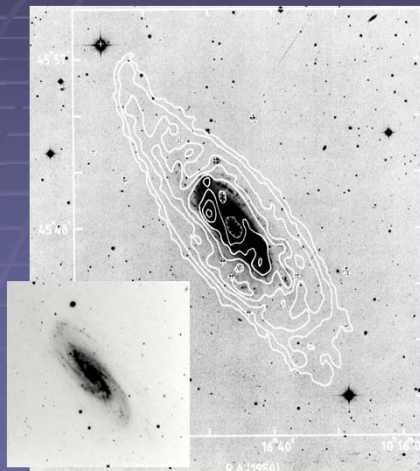
- 銀河系や系外円盤銀河で観測される
- 光学円盤に比べてはるかに大きく分布
- 回転運動が見える  
数100 km/s



NGC2403のHI観測例

## NGC 3198の例

- 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

## 銀河回転：差動回転

- 銀河の回転は、半径ごとに回転角速度 $\omega$ がことなる「差動回転」

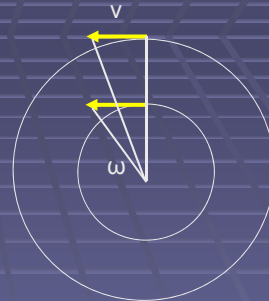
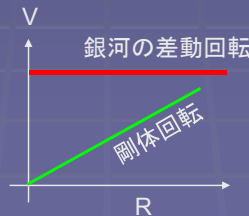
$$V \sim \text{const.}$$

$$\omega = V / R \propto R^{-1}$$

- ⇨「剛体回転」:レコードやCDの回転は、どの半径でも回転角速度 $\omega$ が等しい

$$\omega = \text{const.}$$

$$V = R \omega \propto R$$



銀河の差動回転の模式図

2つの場所で異なる回転角速度を持つ。

銀河の渦巻きはどんどん巻き込んでいくはず!?

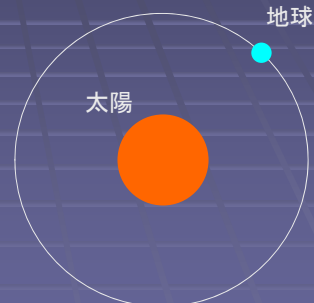
## 天体の回転と質量

- 重力と遠心力のつりあいから、天体の回転速度を用いて天体の質量を求めることができる。

- 遠心力:  $F_{\text{cent}} = mv^2 / r$

- 重力:  $F_{\text{grav}} = GMm / r^2$

よって、 $M = r v^2 / G$



例:地球の公転

$r = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ,  $v = 30 \text{ km/s}$  より  $M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

## 銀河の質量

- 銀河のある半径内の質量  $M_r$  は以下で書ける (球対称を仮定)

$$M_r = 2.3 \times 10^5 \times (R \text{ in kpc}) \times (v \text{ in km/s})^2 M_{\text{sun}}$$

- 銀河系の場合、  
 $R = 20 \text{ kpc}$ ,  $v = 200 \text{ km/s}$  とすると  
 $M_r = 2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$   
(太陽2000億個分の質量、これでも下限値)

※  $1 \text{ kpc} = 1000 \text{ pc}$ ,  $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$

## 銀河系



# 銀河系 = 天の川銀河



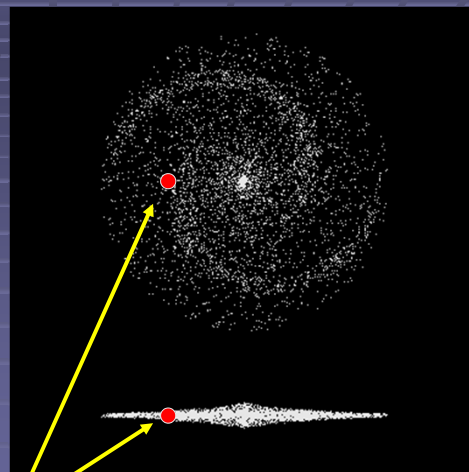
天の川銀河も宇宙に無数にある渦巻銀河のひとつ

## 現在の銀河系像

- 形
  - 円盤状
  - 渦巻きがある
  - 星の数: 約2000億



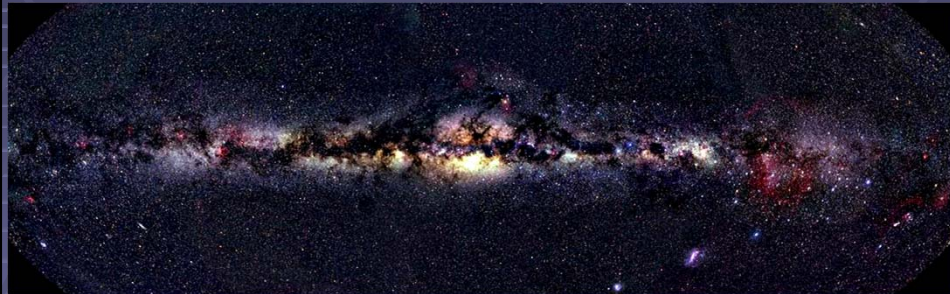
M63銀河 (銀河系もこんな形?)



太陽系



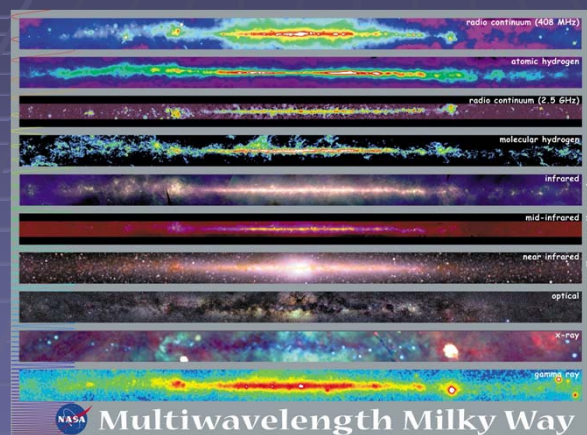
## 光で見た銀河系



- 銀河系は星のあつまりなので、光で明るい
- しかし、多くの場所でガス(暗黒星雲)によって光が遮られている。
- 電波であれば、このような吸収なしに銀河系を見通せる

## 銀河系のHI分布

- 基本的に円盤状に分布



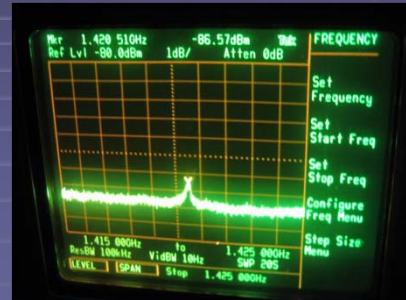
連続波  
HI  
連続波  
CO  
遠赤外  
中間赤外  
近赤外  
可視光  
X線  
γ線

## 手作り望遠鏡で見えるHI21cm

- 東北大理学部生の水沢実習(2008)



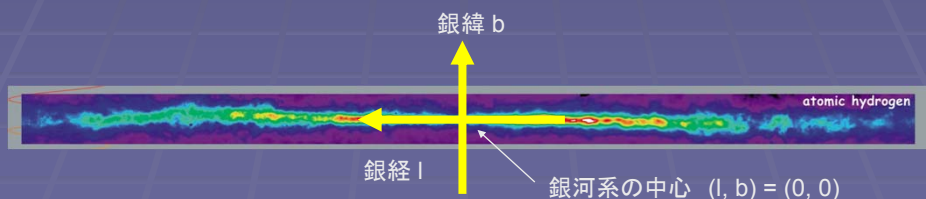
角錐ホーンアンテナを発砲スチロール  
+アルミホイルで作製し、アンプを  
つけて天の川へ向ける



HI 21cm線を見事に検出！

## 銀河座標

- 銀河座標:  
銀河系を議論するとき最も都合の良い座  
標系
- 銀河中心から銀河面に沿って「銀経 l」  
銀河面に垂直に「銀緯 b」をとる: (l, b)



# 銀河定数

- 銀河定数: 銀河の構造を与える基本パラメーター

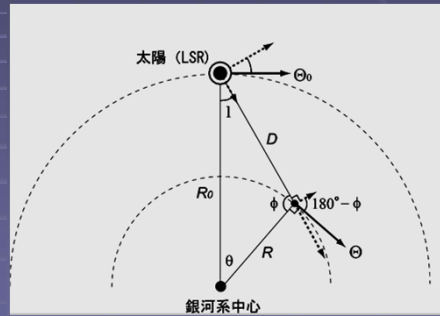
$R_0$  : 銀河中心距離

$\Theta_0$  : 太陽近傍の  
銀河回転速度

これらはすべての計測の基礎となるが、これらの値も現在10~20%程度の誤差がある。

$R_0 \sim 8 \text{ kpc} (+/-10\%)$

$\Theta_0 \sim 220 \text{ km/s} (+/-20\%)$

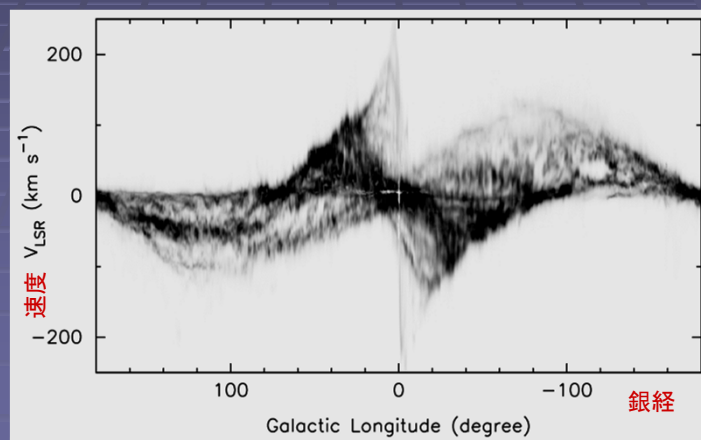


いまだ最先端の研究対象

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

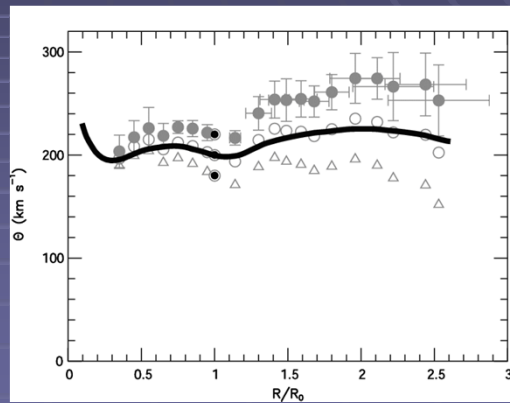


## 銀河系の回転曲線

- L-v図を回転曲線に変換すると、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、 $R_0, \Theta_0$   
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

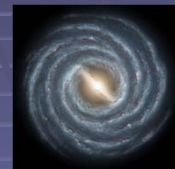
## 現在の銀河系の姿

- 大雑把な形状はわかっている  
それでも、わからないこともたくさんある  
(奥行がわからない)

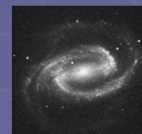
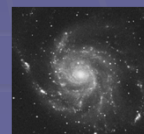
銀河系の基本スケール  
詳細な形状、構造  
(棒状銀河?)

暗黒物質の謎?

銀河系の中心はブラックホール?



Oort たちが描いた  
天の川銀河の地図



# 銀河系測量 と VERA(ベラ)

## VERA: VLBI Expolration of Radio Astrometry

4台の電波干渉計で  
銀河系の測量を行う

入来



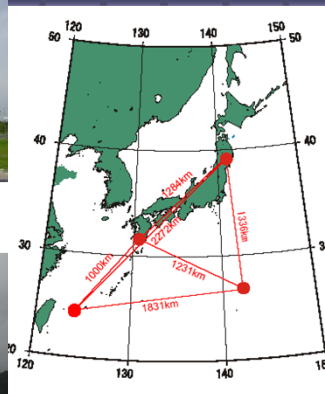
石垣島



水沢



小笠原



最長基線: 2300 km  
完成: 2002年春  
観測: 2004年～



## 天体の距離を測る

- 地球公転(年周視差)を用いる

- 視差 $\pi$ 、距離 $D$ の関係式

$$\pi = a / D$$

( $a = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$  : 1天文単位)

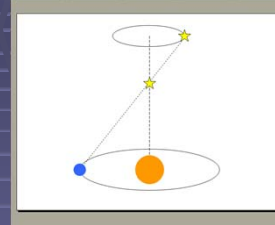
- $\pi = 1$ 秒角となる距離が1 pc(パーセク)

( $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$ )

- $\pi$ を秒角で表すと、

$$D (\text{pc}) = 1 / \pi$$

と簡単にかける。



年周視差の模式図



## 銀河系の測定の「果て」

ヒッパルコス衛星が  
測定した領域

銀河系円盤の大きさ: 約 10万光年

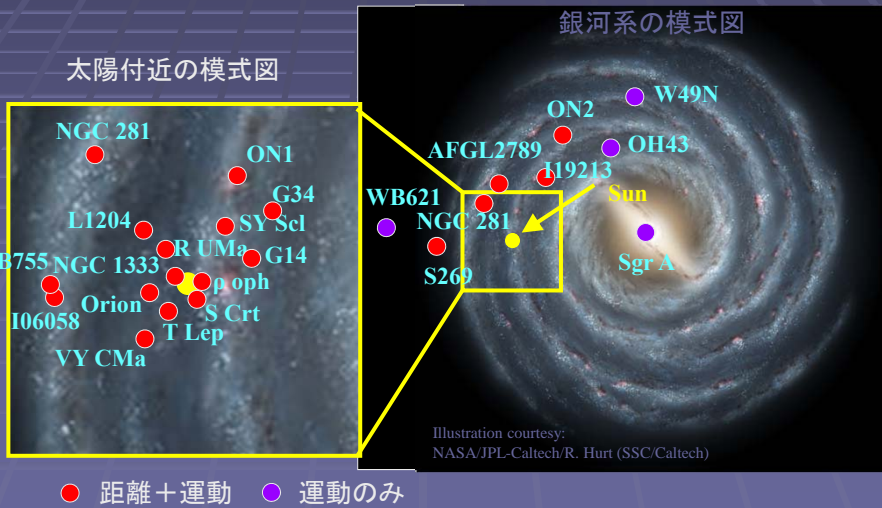


- 銀河系の中心まで距離 2万5000光年  
視差 **125 μ秒角 (3千万分の1度)**
- 銀河系の測定には、10μ秒角(4億分の1度)が測れる装置が必要

銀河系全域の直接測定は21世紀のフロンティア

# 見え始めた銀河系の奥行き

VERAで年周視差・固有運動が計測された星の分布

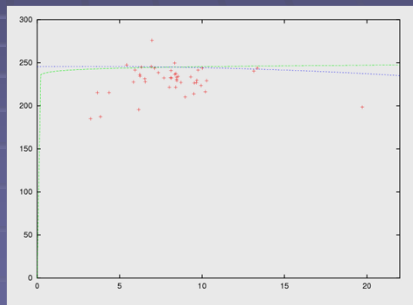
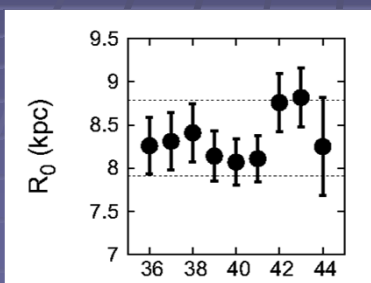


## 銀河構造の決定

- VERAの最新の計測結果に基づき銀河構造を決定(現在進行中)

銀河中心距離  $R_0 = 8.35 \pm 0.44$  kpc

回転曲線 4 ~ 13 kpcでほぼフラット



銀河系の奥行、構造が直接見える時代がやってきた！



## 銀河系測量の今後

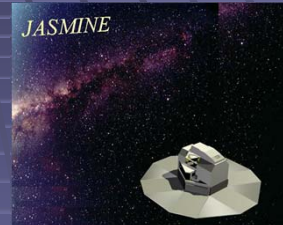
- 国際的プロジェクトが今後も続く



VERA



GAIA (ヨーロッパ)  
2013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.

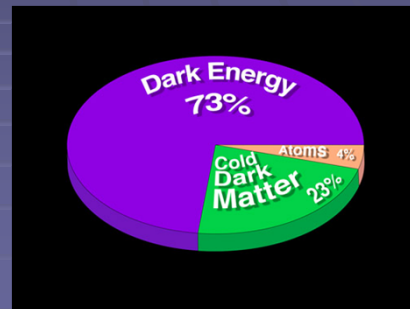
2020年までには銀河系の詳細な姿が明らかになるだろう

## ダークマター(暗黒物質)

## イントロ

- ダークマター(暗黒物質)  
電磁波を(ほとんど)出さず、その重力によって存在が確認される物質
- 宇宙の組成(WMAP衛星による)  
ダークエネルギー 73%  
ダークマター 23%  
通常物質 4%

ダークエネルギー、  
ダークマターの正体は  
現代天文学・物理学の  
大きな謎



## ダークマターの発見

- 天文学的な観測が最初の発見  
Zwickyが銀河団中の銀河の運動から質量を推定し、見えない質量の存在を指摘(1933年)



Zwicky  
(1898-1974)



かみのけ座銀河団

## 銀河団の質量の概算

- 銀河団全体の運動エネルギーと重力エネルギーのつりあいを考える

運動エネルギー

$$E_{\text{kin}} \sim M v^2$$

重力エネルギー

$$E_{\text{grav}} \sim GM^2 / r$$

これより

$$M \sim r v^2 / G \quad (\text{回転の場合と同じ式})$$

## 質量／光度比

- 質量／光度比 (Mass-to-Light ratio)  
天体の光度に対する質量を太陽で規格化した比

$$M/L = (M/M_{\text{sun}}) / (L/L_{\text{sun}})$$

例)

定義より 太陽の場合	$M/L = 1$
太陽より重い星 (相対的に明るい)	$M/L < 1$
太陽より軽い星 (相対的に暗い)	$M/L > 1$
銀河団	$M/L \sim \text{数}100 - 1000$
暗黒物質	$M/L \sim \infty$

## ダークマターを観測する

- ダークマターを観測する天文学的な方法  
直接電磁波では観測できない  
重力を使って間接的に観測する

### 1) 物体の運動を使う

強い重力に引かれた物質の運動速度は大きくなる

$$GM/r \sim v^2$$

### 2) 重力による光の屈折を使う(重力レンズ)

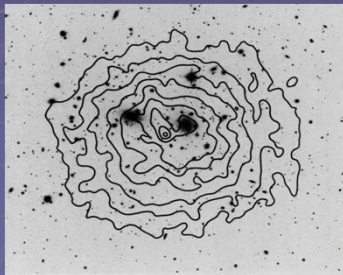
$$\alpha \sim 4GM/c^2 b$$

## 銀河団中のダークマター

- 銀河の速度分散
- プラズマガスの温度
- 重力レンズ

などからダークマターの存在が知られる

(DM ~ 80 %, Plasma ~ 15 %, Stars ~ 数%)



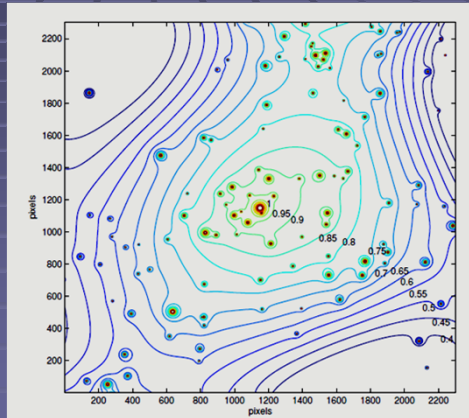
かみのけ座銀河団のX線分布



重力レンズ銀河団Abell 2218

## 銀河団におけるDM分布

- 多くは銀河団ポテンシャルを形成
- 各銀河に付随するDMも存在

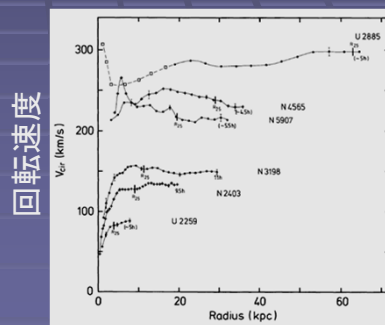
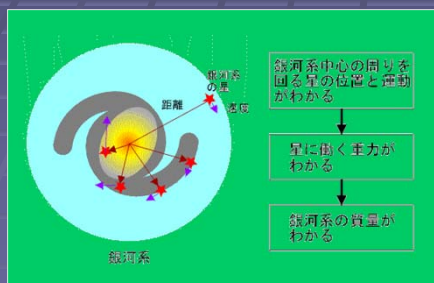


重カレンズ法による銀河団  
MACS J1149の質量分布

## 銀河の回転曲線とDM

- 円盤銀河の場所ごとの回転速度を銀河中心距離の関数として表したもの
- 渦巻き銀河の質量を測る際に用いられる

$$V^2 = GM/R$$



銀河中心距離

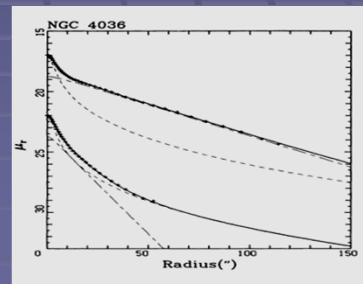
## 円盤銀河の輝度分布

- 銀河に含まれるvisible matterはほとんどが星  
(その他は原子ガス、分子ガス等)
- 星の輝度分布は指数関数的に表せる

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h) \quad (h \text{はスケール長で数kpc程度})$$

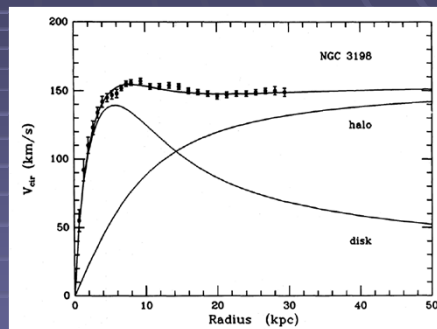
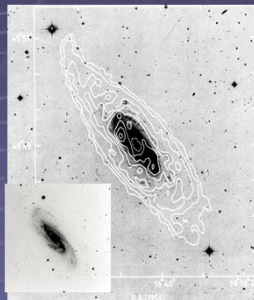


NGC4036



## NGC 3198の例

- 平坦な回転曲線を円盤+ダークハローで説明



観測を再現する円盤+ハローの組み合わせは一意ではない  
通常は円盤の寄与を最大化させ、残りをハローとする。  
(maximum disk + dark halo)

## Maximum diskで見積もったDM量

- 先のNGC3198の例の場合  
総質量( $r < 30$  kpc)  $\sim 1.5 \times 10^{11}$  太陽質量  
diskのM/L  $\sim 4$  (星として矛盾ない)  
銀河のM/L  $\sim 30$  (DMが必要)

disk成分以外がすべてDMとすると  
総質量の85%程度がDM

- 他の円盤銀河でも同様  
disk M/L = 5 ~ 10  
total M/L = 数10程度  
銀河団のM/Lよりは小さいが、DMが必要である

## 銀河系のダークマター探査



## 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)

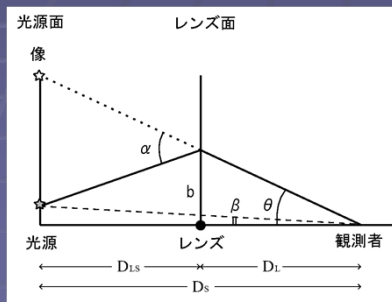
あるいはそれ以外の可能性も？

## 重力レンズ方程式

- 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

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

- 点源の重力レンズにおける光源、像、レンズの位置関係式



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

## 重力レンズ方程式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

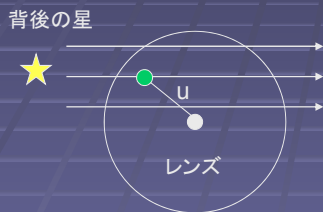


レンズあり

像のゆがみにより、増光する(面積が拡大)

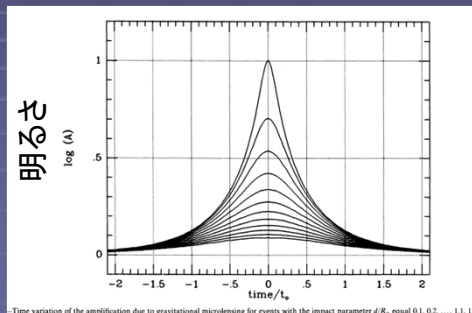
# マイクロレンズの観測

- 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)



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

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

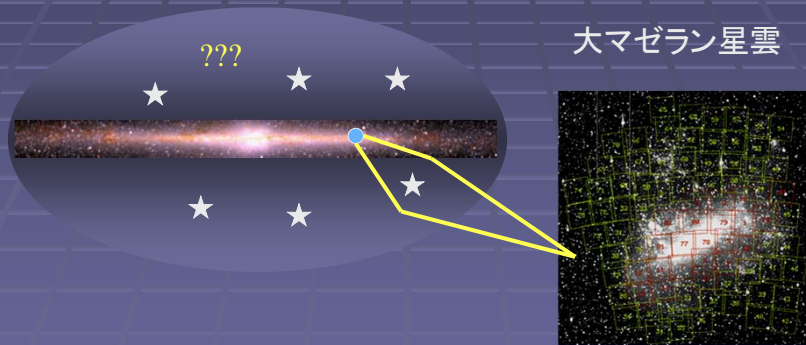


Time variation of the amplification due to gravitational microlensing for events with the impact parameter  $u_e$  equal 0.1, 0.2, ..., 1.1, 1.2.

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

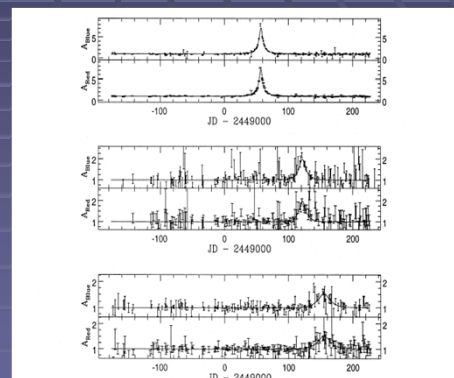


FIG. 7.—The light curves of the three candidate microlensing events. The solid lines show the best-fit microlensing curves, with the parameters shown in Table 1. Units as in Fig. 3.

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



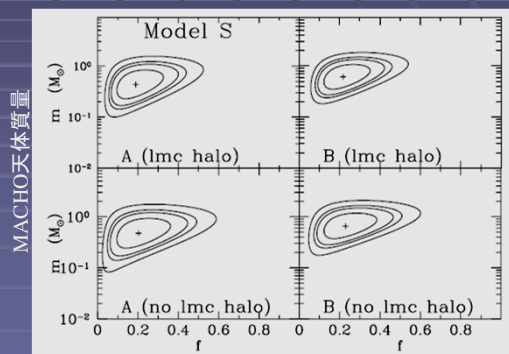
天体質量

~ 0.5  $M_{\text{sun}}$

ハローに占める割合

~ 20%

銀河系のダークマター  
を説明するのに不十分



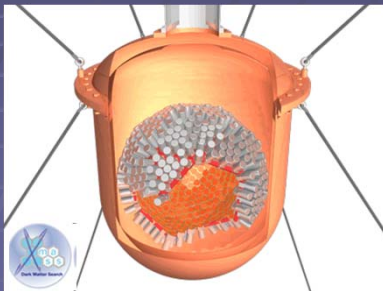
ハローに占める割合

※これらの天体が何かは興味深いが...

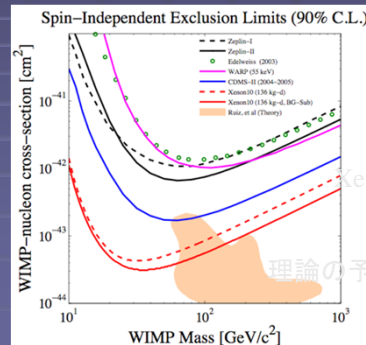
Alcock et al. 2000

## 素粒子のダークマター探査

- 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)
- 今後10~20年でダークマター粒子が地上で直接検出される可能性あり (例 米国XENON100, 神岡Xmass実験)
- その解釈には、銀河系の質量分布(回転速度)が重要な役割を果たす



Xmass検出器



Xenon10の初期結果

Xenon10の  
感度  
理論の予言領域

## 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 $\Theta_0$ は最も重要なパラメーター

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

$$(\rho_{\text{DM}} \propto (\Theta_0)^2)$$

- 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 (R0,  $\Theta_0$ を3~5%程度まで抑える)

## まとめ

ダークマター: 銀河から銀河団スケールの宇宙に大量に存在

- MACHO: 少しは存在するかも知れないが、暗黒物質すべてを説明することは困難
- WIMP: まだ未検出だが、現在のところ最有力