

# 宇宙科学II (電波天文学)

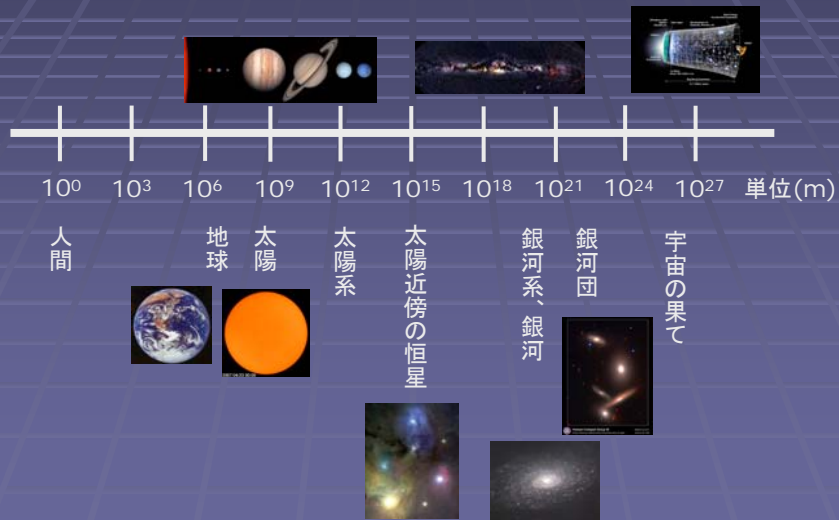
## 第8回

ダークマター

前回の復習

# 宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ



# 銀河とは

- 多数(数億～数千億)の星が重力的に束縛してできた天体
- 様々なタイプの銀河が宇宙には無数にある



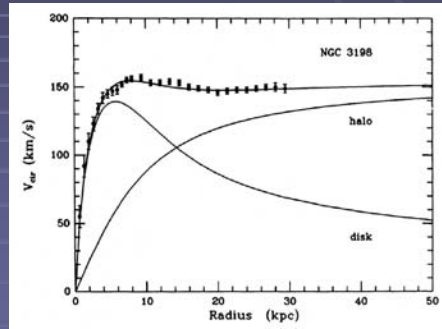
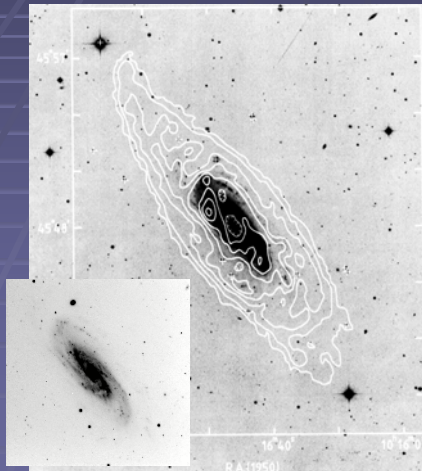
アンドロメダ銀河M31  
(銀河系の隣の銀河)



巨大楕円銀河M87  
(おとめ座銀河団の中心)

# HI21cmと銀河回転

- HIの観測から回転曲線が得られる

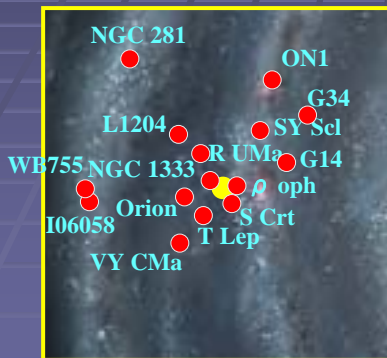


回転曲線: 銀河回転速度Vを銀河中心距離Rの関数として図示したもの

# VERAで見る銀河系構造と回転

銀河系は星の距離がまちまちなので、VERAによる精密測量が有効

太陽付近の模式図



銀河系の模式図

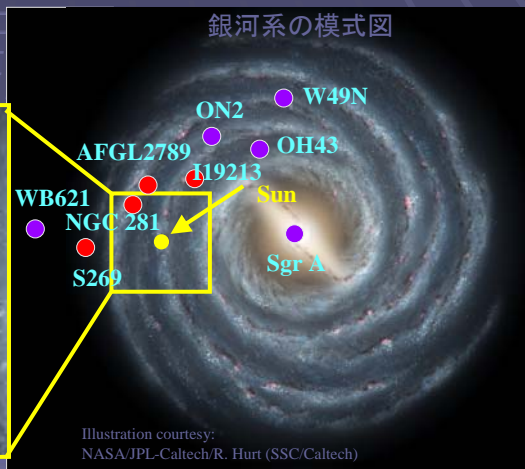


Illustration courtesy: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

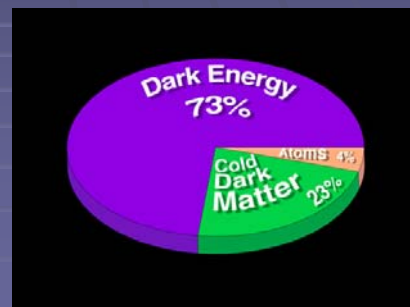
● 距離+運動    ● 運動のみ

# ダークマター(暗黒物質)

## イントロ I

- 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%

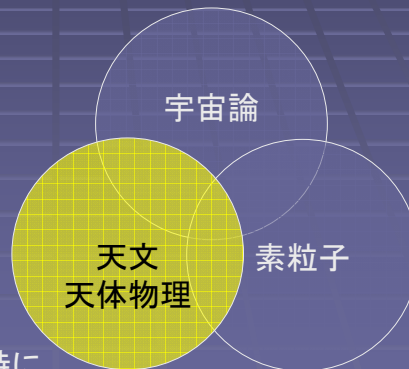
ダークエネルギー、  
ダークマターの正体は  
現代天文学・物理学の  
大きな謎



## イントロ II

- 正体:暗黒の天体 or 素粒子??
- ダークマターはさまざまな研究分野で重要

天文・天体物理  
宇宙論  
素粒子物理  
etc



この講義では、天文関連、特に銀河スケールの観測を中心に

## 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)

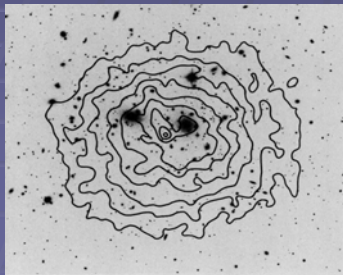
$$\alpha \sim 4GM/c^2 b$$

## 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 ~ a



かみのけ座銀河団のX線分布



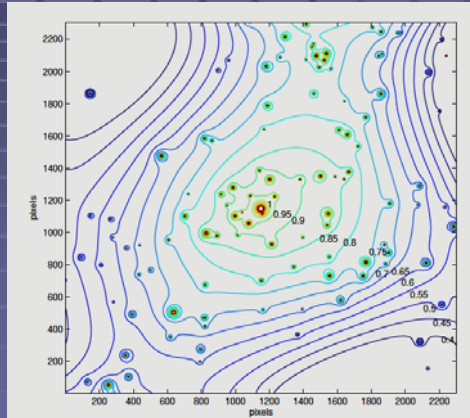
Galaxy Cluster Abell 2218  
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STS-d) • STS-d-PRC00-08 HST • WFPC2

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

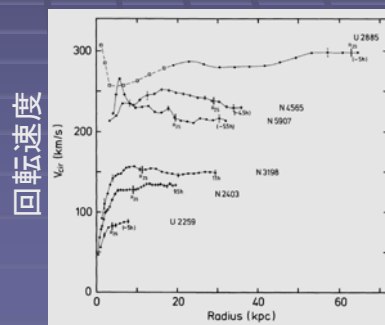
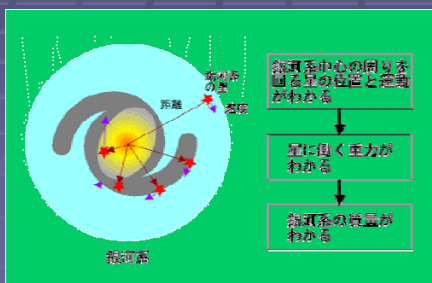


重カレンズ法による銀河団  
MACS J1149の質量分布

## 銀河の回転曲線

- 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



## 銀河の質量

- 太陽質量単位での銀河の質量  
 $M \sim 2.32 \times 10^5 \times R \text{ (kpc)} \times V^2 \text{ (km/s)}$

$R \sim 20 \text{ kpc}, V \sim 200 \text{ km/s}$  とすると

$$M \sim 2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$$

典型的な円盤銀河の重さは太陽の数千億個分

※  $1 \text{ pc} = 3.08 \times 10^{13} \text{ km}, 1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$   
 $1 M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

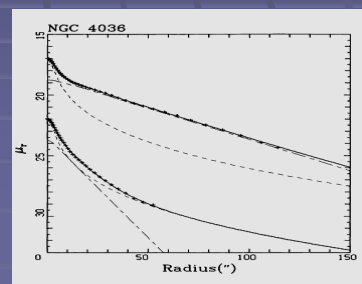
## 円盤銀河の輝度分布

- 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

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



NGC4036



# 回転曲線のモデリング

- M/L一定の指数円盤なら

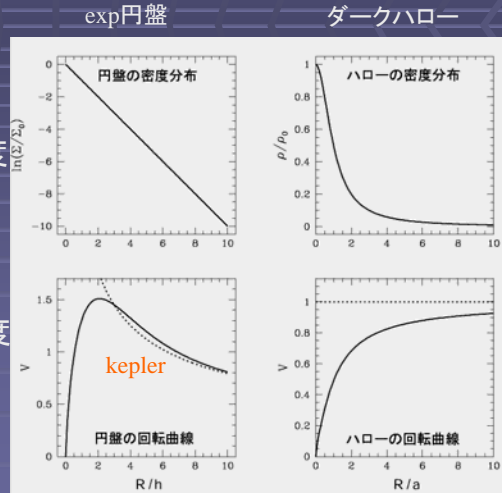
$r \sim 2.2 h$  で最大値  
外側ではケプラー的  
( $v \propto r^{-1/2}$ )

- 観測を再現するには  
ダークハローを加えて  
速度をかさ上げる  
必要がある

- とりあえず球対称なハローを  
仮定することが多い

密度

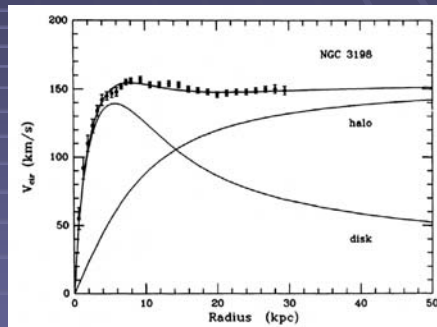
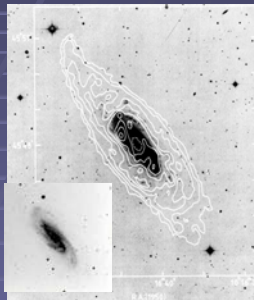
速度



$$\rho \propto 1/(r^2+a^2)$$

# 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

## ここまでのまとめ

- ダークマターは銀河団、銀河に付随している
- 円盤銀河の場合、回転曲線から質量分布が求まる。
- 回転曲線から、銀河円盤の外縁部で大量のダークマターの存在が示唆される

# 銀河系回転とダークマター

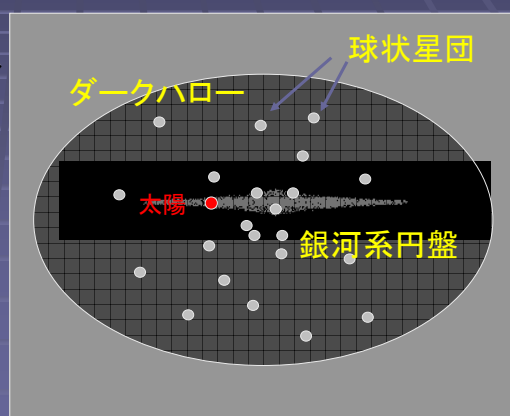
## 銀河系の外側

- 銀河系ハローのおおよその構造



円盤をとりまくように、  
球状星団とハロー  
が分布

ハローの質量の  
大部分は暗黒物質  
(謎の物質)



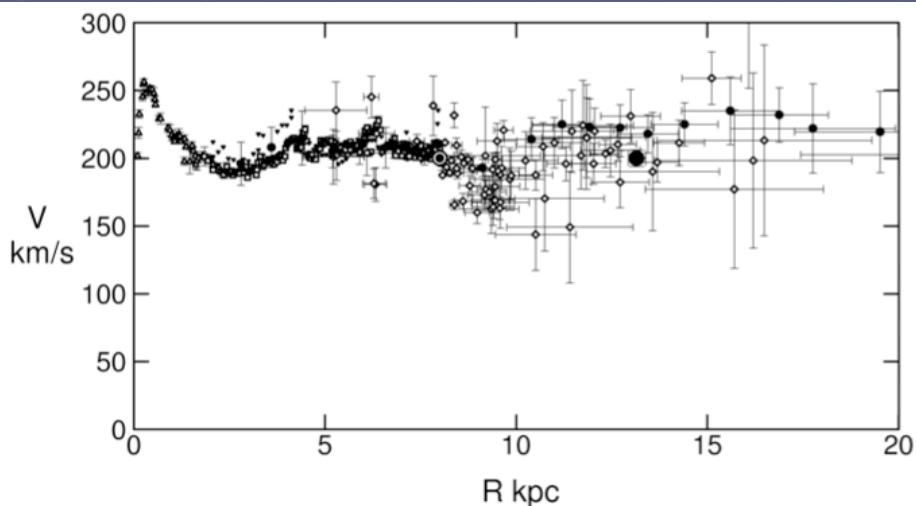
## 銀河系観測の利点・欠点

- 利点: もっとも詳細に調べることができる銀河  
ダークマター天体探査  
ダークマター粒子探査  
なども当然銀河系を対象とするのが効率的

- 欠点  
我々が中にいるために、わからないことがある

例) 銀河系の回転曲線、太陽の銀河系回転速度  
etc

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  
(天体の距離を正確に決めるのが難しい)

# 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

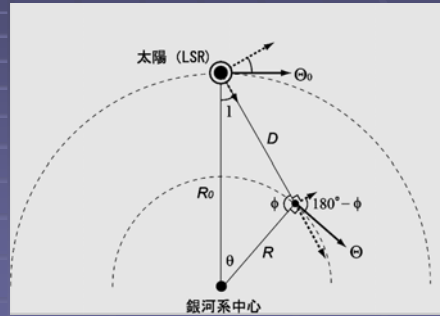
$R_0$  : 銀河中心距離

$\Theta_0$  : 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。

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

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



銀河系回転の模式図

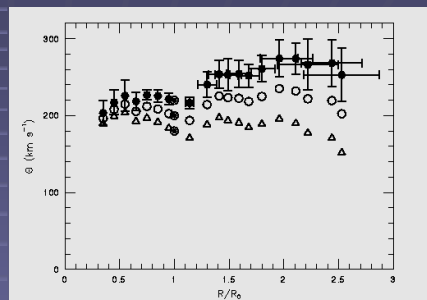
# 銀河定数と回転曲線

- 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

$R_0$ 、 $\Theta_0$ といった足場を固めることも重要



$\Theta_0 = 180, 200, 220 \text{ km/s}$   
の場合の回転曲線

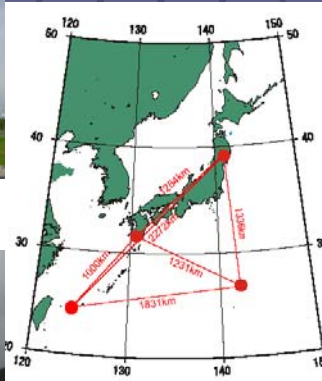
→ 銀河定数を決めるためにも、天体の距離と運動を精密に計る必要が有る

# 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

水沢



石垣島

小笠原

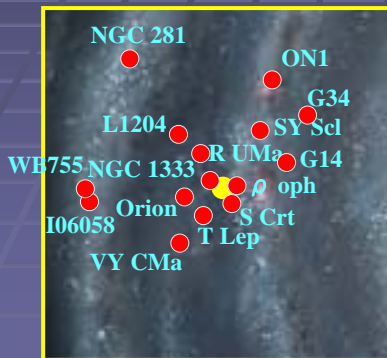


最長基線: 2300 km  
完成: 2002年春  
観測: 2004年~

## 見え始めた銀河系の奥行き

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

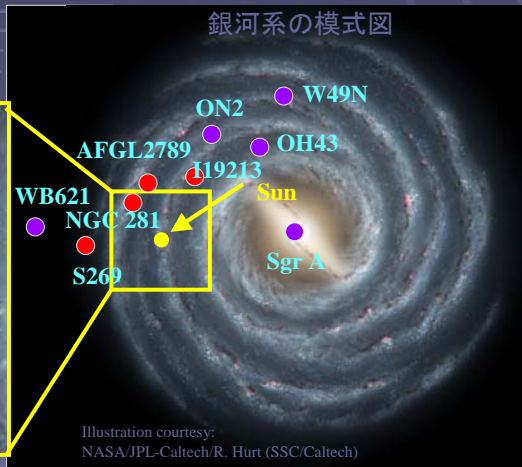


Illustration courtesy:  
NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

● 距離+運動    ● 運動のみ

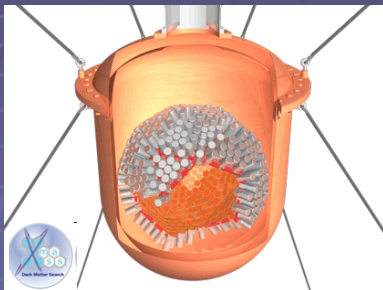


## 銀河系回転計測の今後

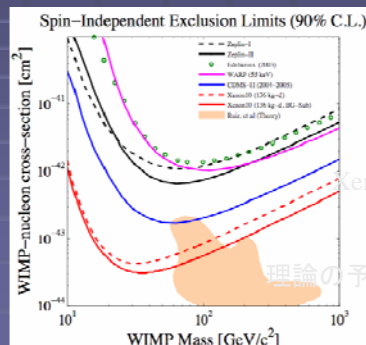
- VERAによって銀河系スケールの位置天文観測が可能な時代がいよいよ到来
- 今後15年程度で~1000個の一等三角点を銀河系に設置
- 2020年ごろには VERAと共に、GAIA, SIMなどとあわせて銀河系の理解が飛躍的に進むと期待
  - 正確な銀河回転、暗黒物質の分布

## ダークマター研究へ

- 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XENON10, 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

$$\begin{aligned} \text{WIMP検出率} &\propto \rho_{\text{DM}} \times v_{\text{DM}} \sim (\theta_0)^3 \\ (\rho_{\text{DM}} &\propto (\theta_0)^2) \end{aligned}$$

- 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  
( $R_0$ ,  $\theta_0$ を3~5%程度まで抑える)

## 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)

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

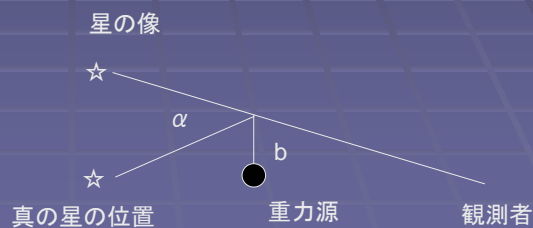
## 重力レンズ

- 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

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

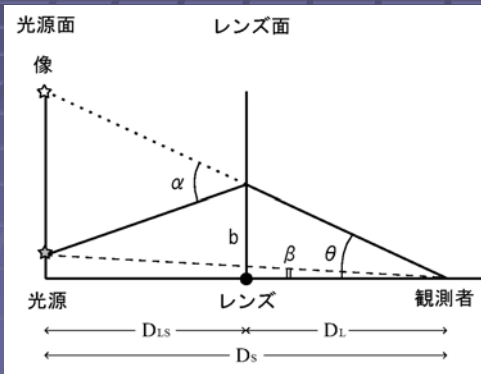
$\alpha$  : 屈折角

$b$  : 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

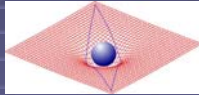


レンズあり

像のゆがみにより、増光する(面積が拡大)

# 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



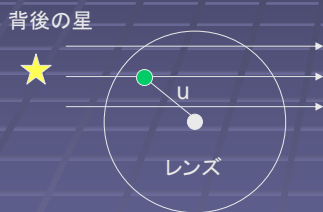
- 星による重力レンズ  
多重像の離角が小さく分解不可能  
> マイクロレンズ



※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

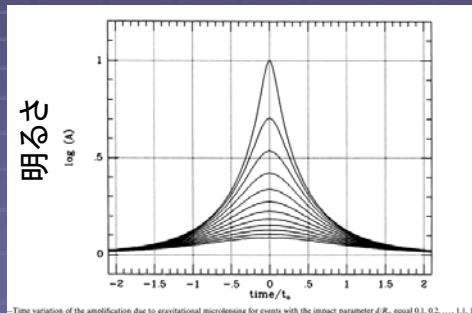
# マイクロレンズの観測

- 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)



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

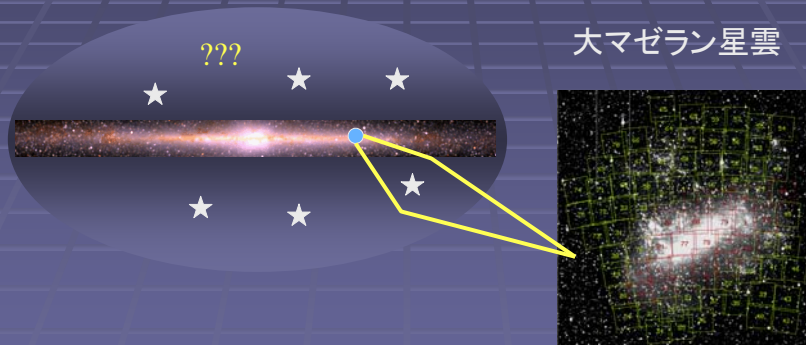
$$A = |A_1| + |A_2| = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$



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）

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

（ $\rho$  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



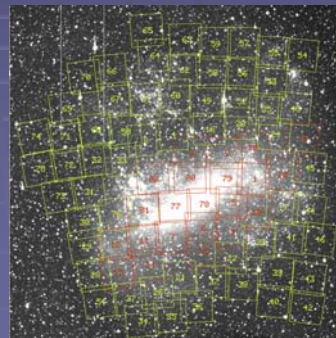
## MACHO と EROSによる観測

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

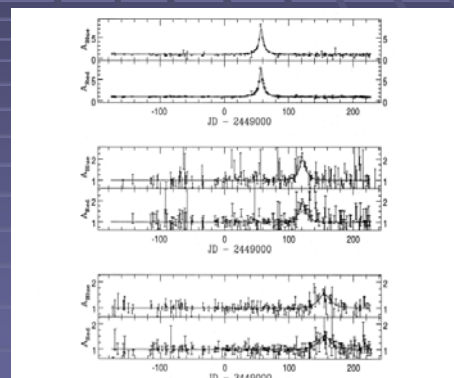


FIG. 7.—The light curves of the three candidate microlensing events. The solid lines show the best-fit microlensing curves, with the parameters shown in Table 1. (Units as in Fig. 1.)

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



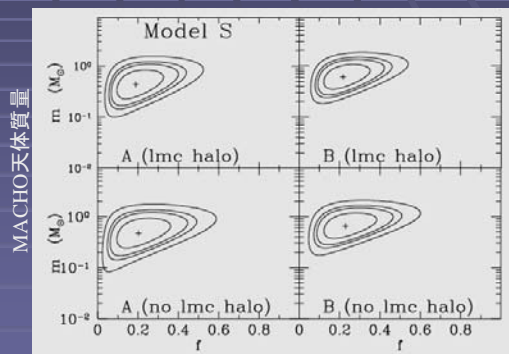
天体質量

~ 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



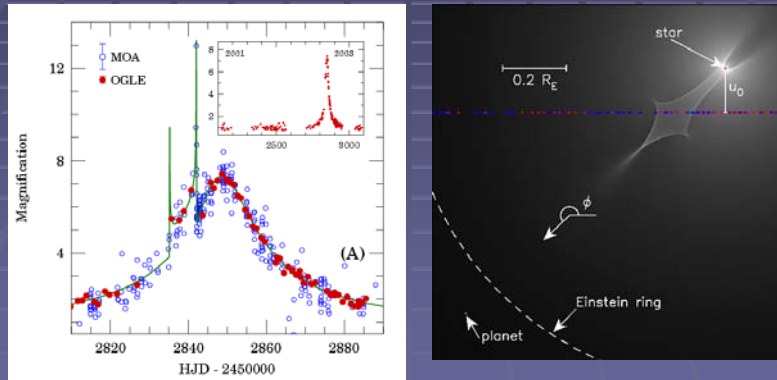
ハローに占める割合

※これらの天体が何かは興味深いが...

Alcock et al. 2000

## 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



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

## まとめ

- 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
- 代替理論: おそらく×

## まとめ

- 銀河の回転: 銀河のDMを探る重要なツール
- 銀河系の回転: 精密計測が重要。今後10年の進歩に期待。WIMP探査の解釈にも重要
- MACHOや修正理論で暗黒物質を説明するのは難しい。現在はWIMPが最有力