

宇宙科学II（電波天文学） 第7回

銀河／銀河系

前回の復習

星には一生がある

- 星は人間と同じように生まれて死ぬ

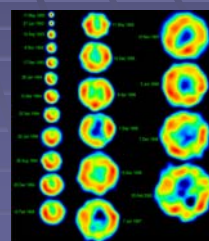
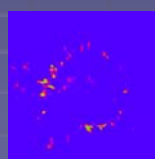
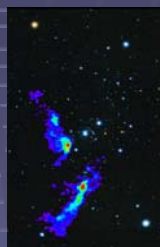
星間ガスが重力収縮して星が誕生



核融合反応で恒星として輝く(主系列)



核融合の燃料が無くなると燃え尽きる

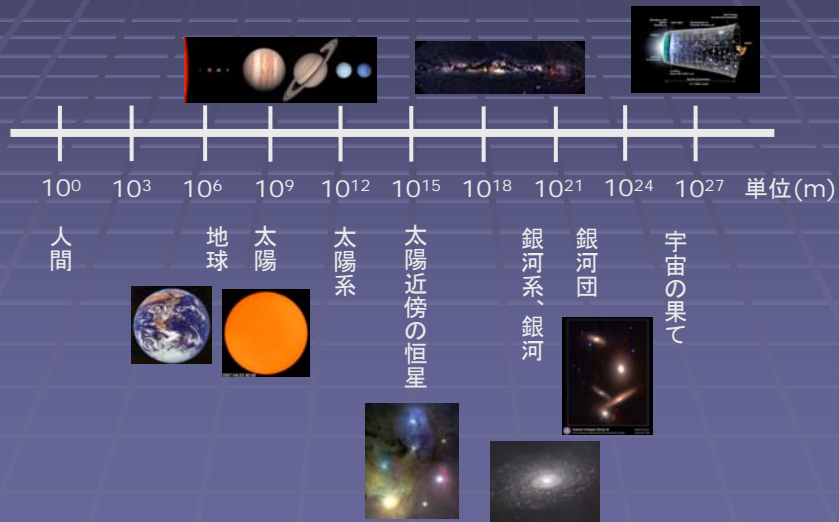


主系列星は可視光で最も明るく、電波天文学の対象として取り上げられることは少ない。しかし、星の誕生と死は電波天文学でも重要な観測対象

銀河／銀河系

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



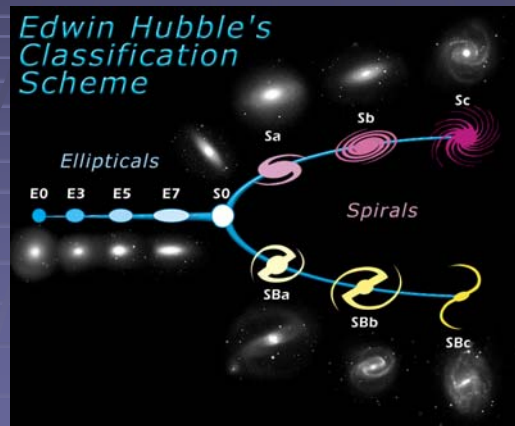
アンドロメダ銀河M31
(銀河系の隣の銀河)



巨大楕円銀河M87
(おとめ座銀河団の中心)

銀河の形態分類

■ ハッブルによる形態分類



棒状構造無

棒状構造有

←楕円銀河

渦巻銀河→

銀河の集まり

- 銀河は通常複数群れをなして存在する。
- 銀河団では数100～数1000個もの銀河がお互いの重力で束縛されている
- 銀河が集まっているところでは衝突もおきる！



銀河団 Abell 2218



触角銀河 NGC4038/4039

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

銀河の認識

■ シャープレーとカーチスの論争（1920年）



シャープレーの宇宙
渦巻星雲は、銀河系
に属する天体と考えた

カーチスの宇宙
渦巻星雲は、銀河系の外
にある別の銀河と考えた

その後1924年ハッブルらによって渦巻銀河の距離決定から銀河系外の天体と確立

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)

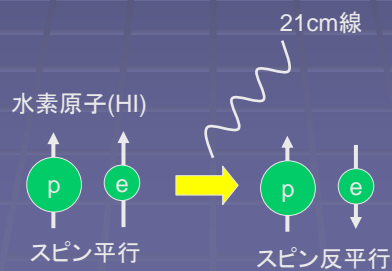


恒星成分を見るには、光や赤外線。電波では主に低温のガスやダストを見る

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
- $\lambda = 21.1 \text{ cm}$, $\nu = 1420 \text{ MHz}$
- 円盤銀河でよく観測される。



中性水素21cmの発見

- オールト (Jan Oort 1900-1992)
ライデン大学教授

宇宙で一番多い物質である水素から、電波が出るかを弟子のファンデフルストと計算

1944年、中性水素(HI)の21cm線が観測可能なことを予言

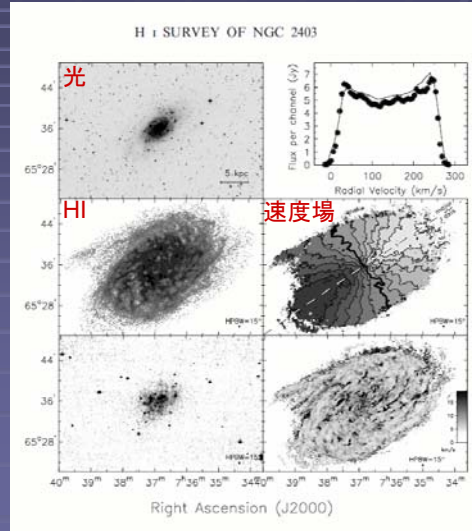
1951年、米国、オランダ、オーストラリアの3グループがそれぞれ検出



Jan Oort (1900 – 1992)
Hendrik van de Hulst (1918-2000)

中性水素21cm線

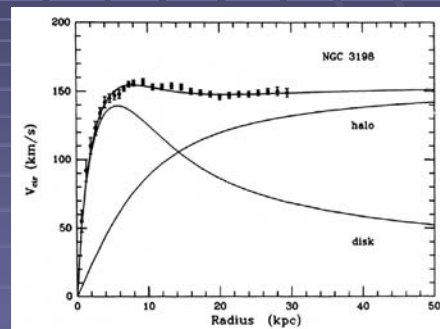
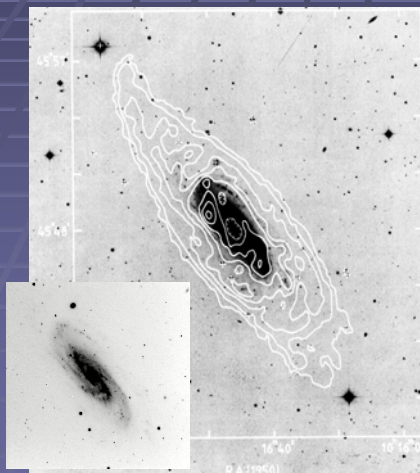
- 銀河系や系外円盤銀河で観測される
- 光学円盤に比べてはるかに大きく分布
- 回転運動が見える
数100 km/s



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 ω がことなる「差動回転」

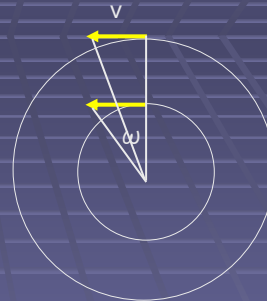
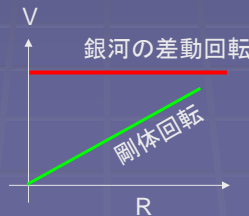
$$V \sim \text{const.}$$

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

- ⇨ 「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 ω 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!?

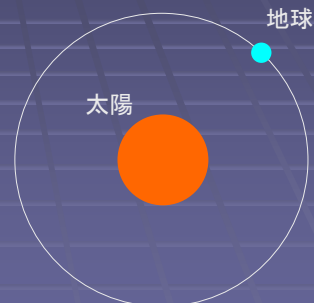
天体の回転と質量

- 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)

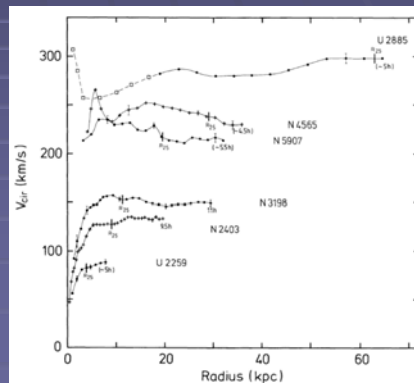
※ $1 \text{ kpc} = 1000 \text{ pc}$, $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$

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

詳しくは次回



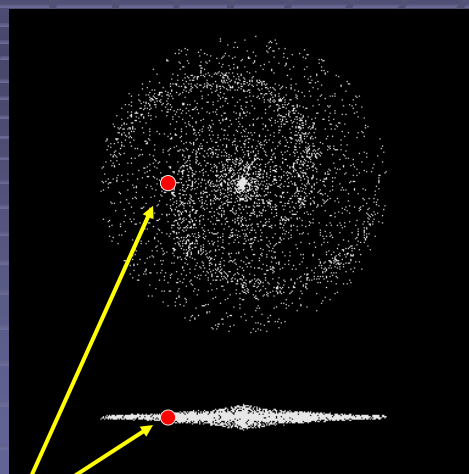
銀河系

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

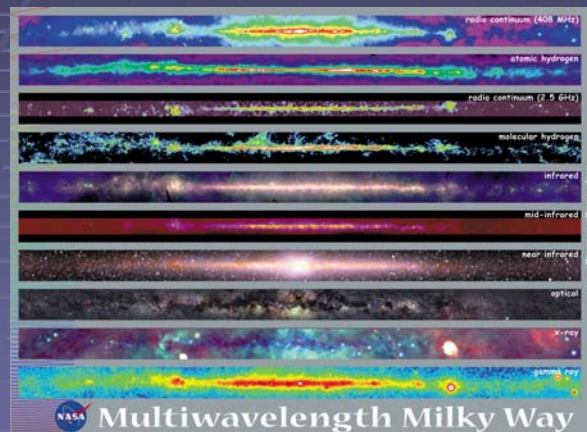
光で見た銀河系



- 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



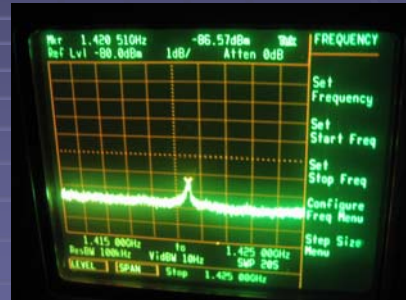
連続波
HI
連続波
CO
遠赤外
中間赤外
近赤外
可視光
X線
γ線

手作り望遠鏡で見えるHI21cm

- 2008年度の東北大理学部生の水沢実習



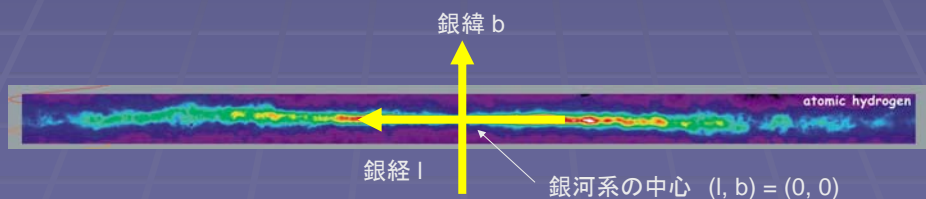
角錐ホーンアンテナを発砲スチロール
＋アルミホイルで作製し、アンプを
つけて天の川へ向ける



HI 21cm線を見事に検出！

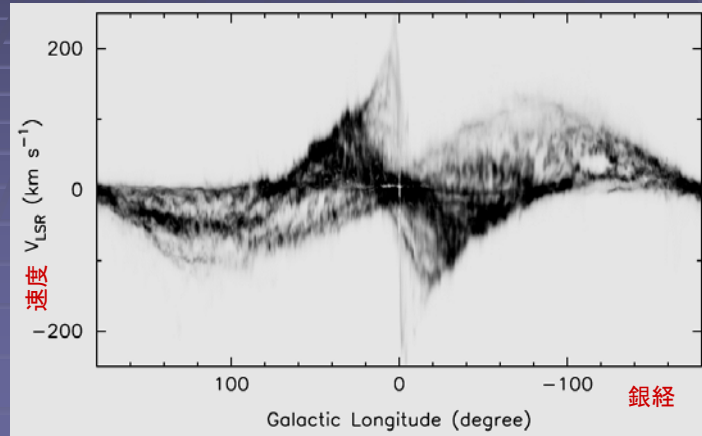
銀河座標

- 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)



銀河系のHIのl-v図

- l-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

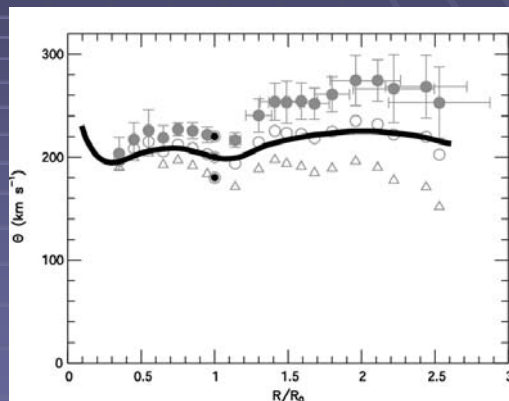


銀河系の回転曲線

- 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, 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

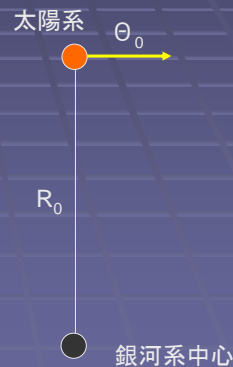
銀河定数：銀河系のスケール

- 銀河定数：銀河系のスケールを決める重要な定数

1) 銀河中心距離
 $R_0 \sim 8.5 \text{ kpc}$

2) 太陽近傍の銀河回転速度
 $\Theta_0 \sim 220 \text{ km/s}$

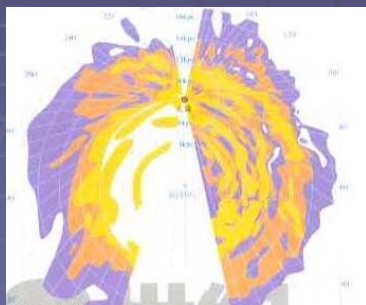
これらも10%程度の誤差があり
いまだ最先端の研究対象



銀河系を上空から見た模式図

銀河系の形

- HIガスの運動速度から距離を推定して、銀河系の地図が作られている → 渦巻きの存在
- 正しい形状には、精密測量で距離を求める必要がある



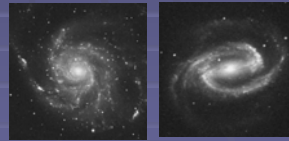
Oort たちが描いた
天の川銀河の地図



天の川の本当の形は？(想像図)

現在の銀河系の姿

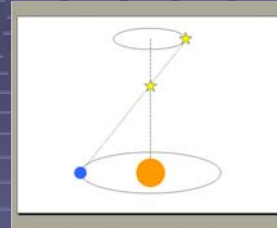
- 大雑把な広がりや形状はわかった
それでも、わからないこともたくさんある
- 銀河系の基本スケール
- 詳細な形状、構造
(棒状銀河?)
- 暗黒物質の謎?
- 銀河系の中心はブラックホール?



銀河系測量
と
VERA(ベラ)

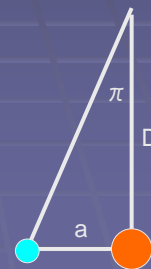
天体の距離を測る

- 地球公転(年周視差)を用いる
- 視差 π 、距離 D の関係式
 $\pi = a / D$
($a = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$: 1天文単位)



年周視差の模式図

- $\pi = 1$ 秒角となる距離が1 pc(パーセク)
($1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{13} \text{ km}$)
- π を秒角で表すと、
 $D (\text{pc}) = 1 / \pi$
と簡単にかける。

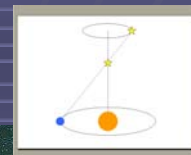


星の距離は遠い！

太陽に最も近い星：ケンタウルス座 α 星

距離 4.3 光年
(=27万天文単位)
視差 0.7 秒角
(1/5000 度)

距離が遠い
→ 視差が小さい
→ 観測が難しい



八重山諸島からみた南天の星

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、10 μ 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

位置天文衛星 ヒッパルコス (ESA, 1989~1993)



口径約30cmの光学望遠鏡を搭載。大気のゆらぎがない宇宙空間に出ることで、1ミリ秒角の位置計測精度を達成。

VERA: VLBI Expolration of Radio Astrometry

4つの電波干渉計で
銀河系の測量を行う

入来



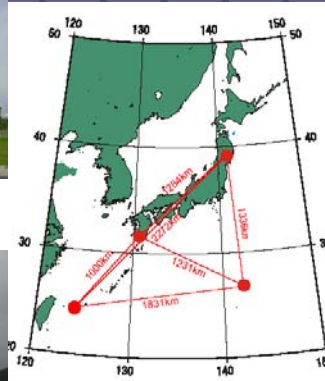
石垣島



水沢



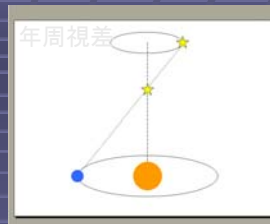
小笠原



最長基線: 2300 km
完成: 2002年春
観測: 2004年~

VERAが実際にやること

- 星の位置(角度)を1年にわたって計測
目標数: 約1000個の星



つまり VERA = 「超高精度分度器」



これによって、天体の距離と3次元運動が計測できる

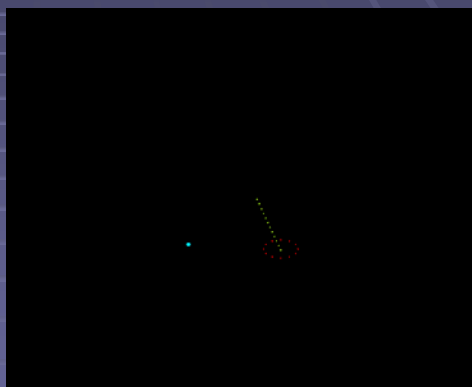
視差と運動の計測

- 位置の精密計測から、

視差(天体距離)
に加えて

天体の運動速度も
わかる

- VERAによって銀河の
構造と運動がわかる

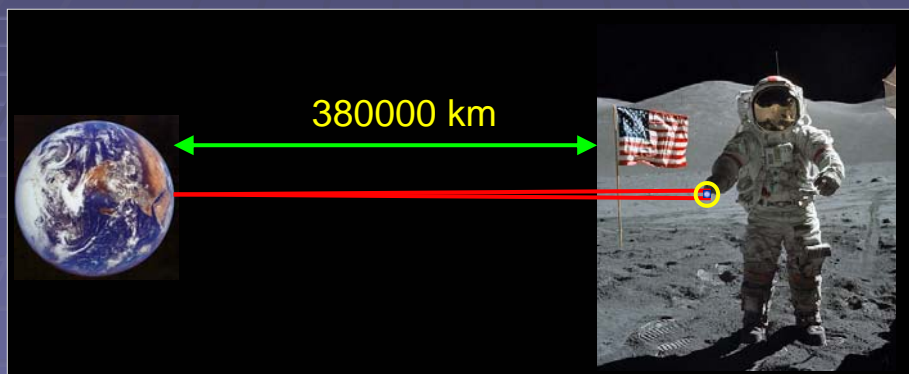


天体運動の模式図(視差+固有運動)

VERAのすごさ

目標精度: $10\ \mu$ 秒角 (約4億分の1度)

— 月面上の1円玉を地球から見たときの大きさ.

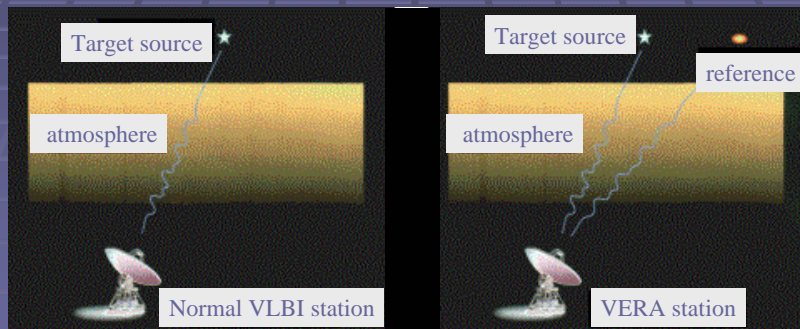


VERAの新技术:2ビームアンテナ

2ビームアンテナ:焦点面上に2つの受信機を設置

2天体を同時に観測することで大気揺らぎをキャンセル

目標精度:10マイクロ秒角



通常のVLBI局とVERA局の模式図

2ビーム受信システム



2ビーム受信機台

(2ビーム離角:0.3~2.2 deg)

2ビーム受信機

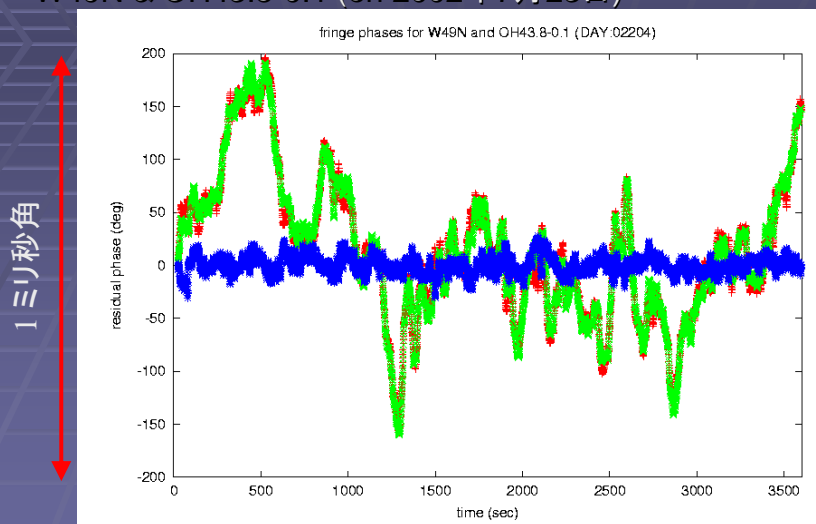


(22GHz & 43GHz)



2ビームで大気の揺らぎをとる

W49N & OH43.8-0.1 (on 2002年7月23日)



10マイクロ秒角が実現可能であることが実証された

日常でも2ビームはありがたい？

- 衛星放送用にも2ビームアンテナが存在
- 東経124・128度CSデジタル衛星(スカパー)を一台で観測可能



マスプロの2ビームCSアンテナ

料金も倍？、テレビ見る時間も倍？

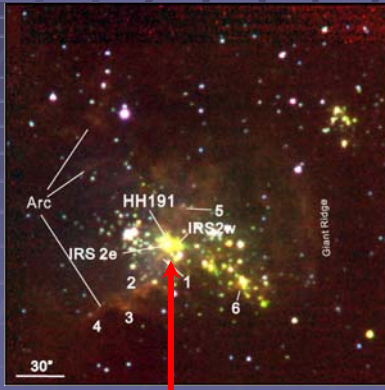
VERAの最新の成果

VERAのあゆみ

2000年	予算承認
2001年3月末	3局でアンテナ完成
2001年4月～	調整、立ち上げ
2002年2月	干渉計として初観測
2002年4月	全4局完成
2003年～	試験観測
2004年頃～	位置天文観測開始
2007年	最初の測量結果
2009年	～70天体ほど観測終了

S269 (シャープレス269)の年周視差

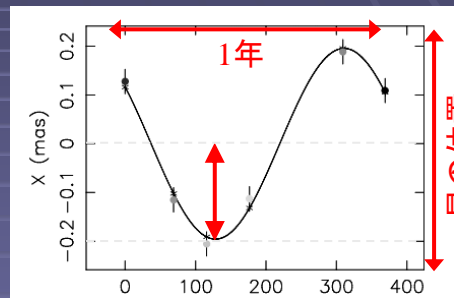
■ S269の電波源の動き



電波を出す星

人類が三角測量で計測した、最も小さい視差(の一つ)

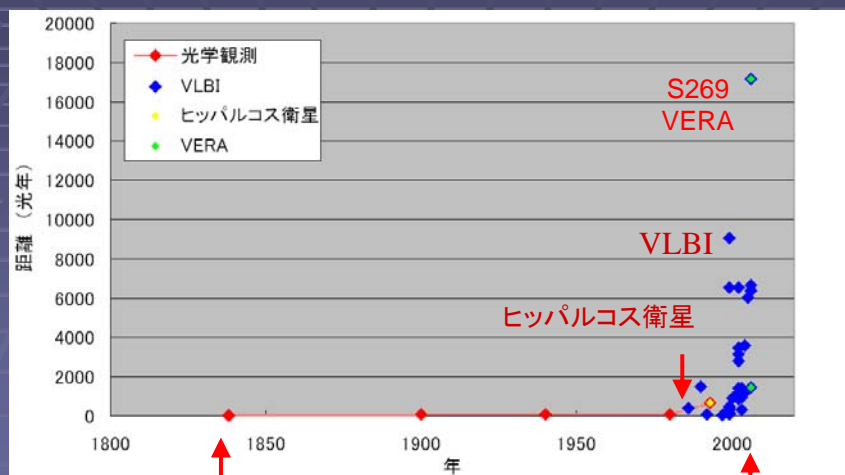
東西方向への星の動き(1年)



視差: 約2000万分の1度
距離: 1万7000光年

年周視差の記録

■ 1838年~2007年の代表的な記録

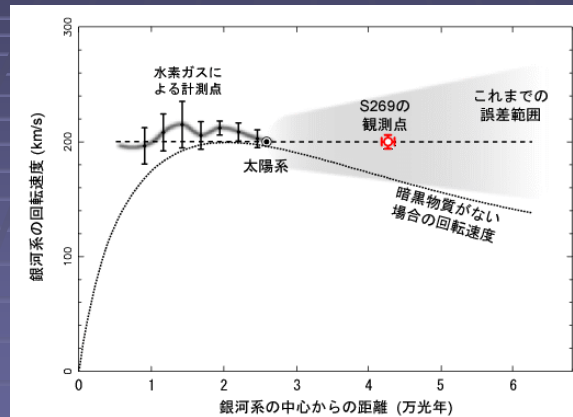


ベッセル (1838)

2007年

銀河回転曲線と暗黒物質

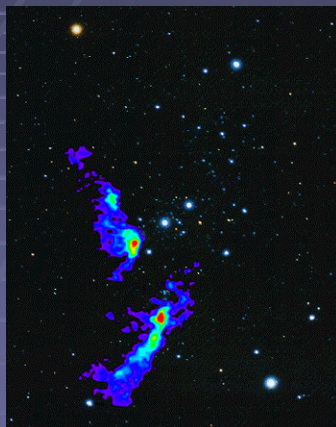
- 銀河回転曲線： 銀河系の場所と回転速度の関係



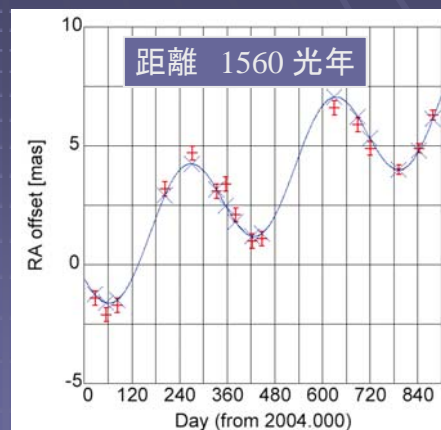
銀河回転: 暗黒物質の分布を調べる大事な情報
S269の観測から、その内側の少なくとも30%が暗黒物質

オリオン分子雲の観測

オリオン分子雲： 太陽に最も近い、大質量星形成領域
分子ガスがつぶれて星になっている現場



オリオン座と分子雲



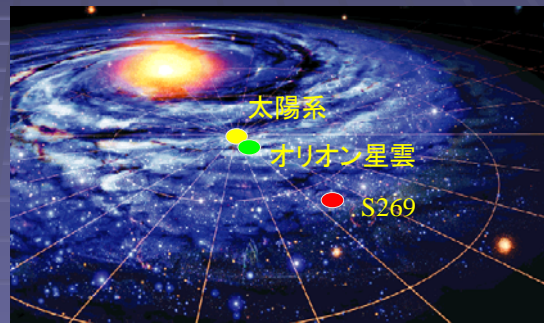
VERAでみた天体の動き

見え始めた銀河系の奥行き

- オリオン星雲、S269ともオリオン座にあるが、距離は全然ちがう > 天の川に奥行きがある



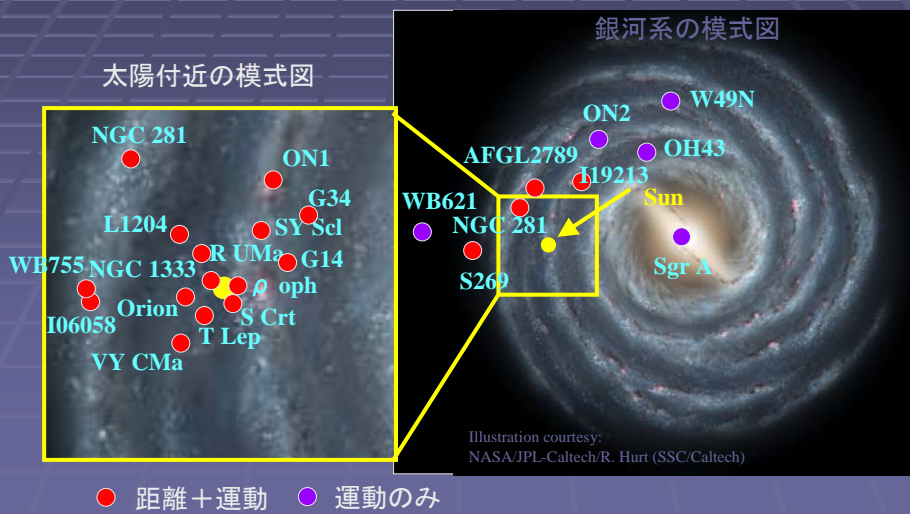
オリオン座



天の川を上から見ると

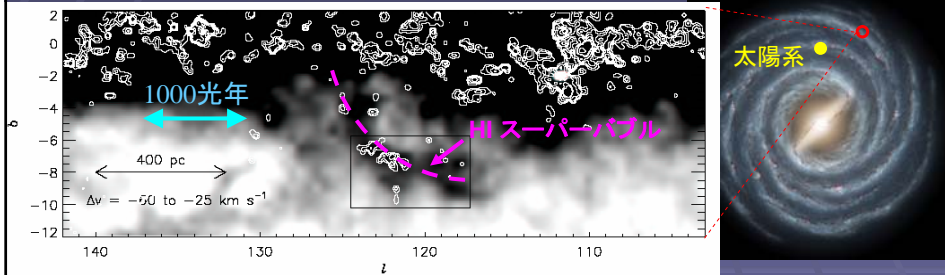
見え始めた銀河系の奥行き

年周視差・固有運動が計測された星の分布



スーパーバブル: 銀河系の噴火?

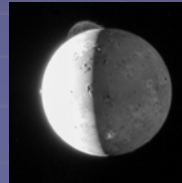
- スーパーバブル: ガスが銀河面から吹き上げられているように見える構造 (直径1000光年以上)



地球の
火山噴火

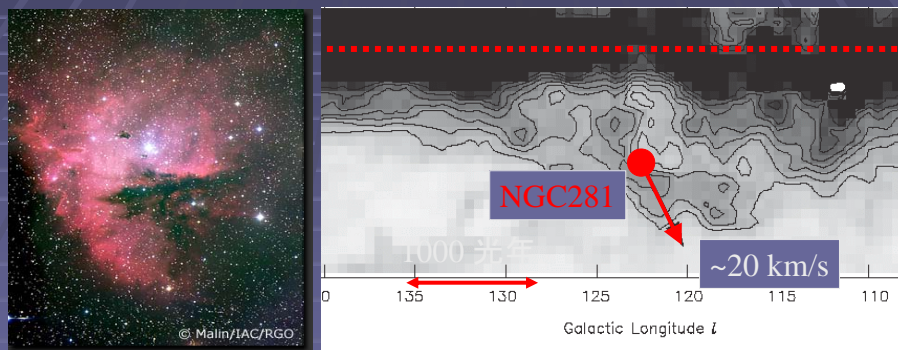


イオの
火山噴火



NGC 281 の運動

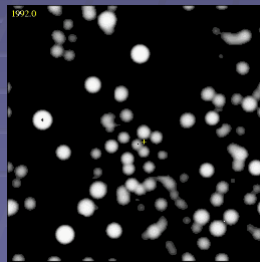
NGC 281: 銀河面から出るスーパーバブル上の星形成領域



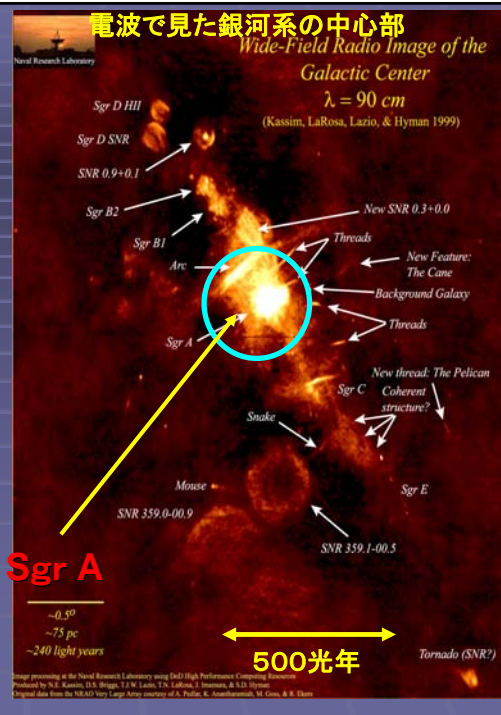
VERAによって、銀河面から離れる運動を検出
一千万年前の超新星爆発によって吹き飛ばされた証拠

Sgr A* : 銀河系中心の巨大ブラックホール

- Sgr A* (射手座A星)
 - 銀河系中心にある巨大ブラックホール
 - 太陽の4百万倍の質量



赤外線で見えたSgr A*の星の運動

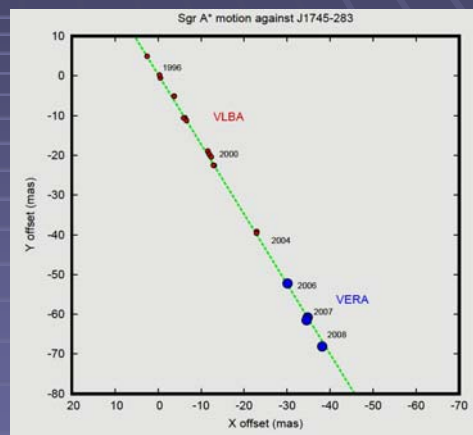


銀河は確かに回っている

- アメリカのVLBAおよびVERAで観測したSgr A*の運動

太陽の銀河回転によりSgr A*が銀河面に沿って動いて見える。

太陽系の銀河回転速度の精密な値を与える



銀河の回転による、日々の天体の動きが見える時代も近い