

北大集中講義

前半分のスライド

電磁波と電波

電磁波と電波

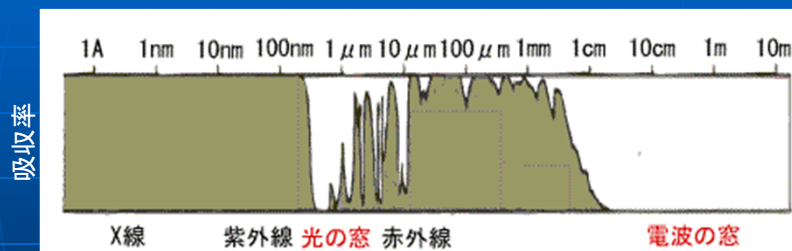
- 電波も光も、電磁波の一種
ただし、波長(周波数)が大きく異なる



人間の目が可視光に感度があり、電波に感度がないのは、太陽が光で最も明るいため、進化の過程でその波長の電磁波に特化した目ができたと考えられる

大気之窗

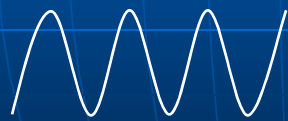
地表から観測できるのはごく一部の電磁波のみ



地上から観測可能な帯域
光、電波、(赤外の一部)

電磁波の特徴

- 電磁波は波であり粒子(光子)である
(electro-magnetic wave / photon)
電磁気学および量子力学的性質を持つ
(詳しくは 電磁気学、量子力学を参照)



電場、磁場の振動としての波



あるエネルギーをもった粒子(光子)

電磁波の特徴(波として)

- 光速度で伝播する(真空中)
 $c=299792458 \text{ m/s}$: 長さの定義数

- 周波数 ν と波長 λ の関係
 $c = \nu \times \lambda$
(ex. $\nu=1 \text{ GHz}$ なら $\lambda=30 \text{ cm}$)

垂直成分



水平成分



伝播方向: 紙面に垂直

- 横波で2つの偏波が存在する
直交2偏波 または 左右円偏波

2つの偏波を利用した例: 立体映画



電磁波の性質(粒子として)

- 光子のエネルギーと周波数の関係

$$E = h \times \nu$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s} \quad (\text{プランク定数})$$

周波数が高いほどエネルギーが高い
(周波数の高い光子(電磁波)を出すには
高いエネルギーを要する)

電波天文学の特徴

- 特徴1) 観測できる天体種族が多い
極低温の宇宙背景放射や星間分子ガスから超
高エネルギー現象(超新星爆発やブラックホー
ルジェット)まで
- 特徴2) 干渉計により極めて高い分解能が得
られる(その究極の例がVLBI)

単一鏡と干渉計

望遠鏡の分解能

- 分解能を決める要因： 波長と望遠鏡の口径

$$\theta = \lambda / D$$

θ : 分解能

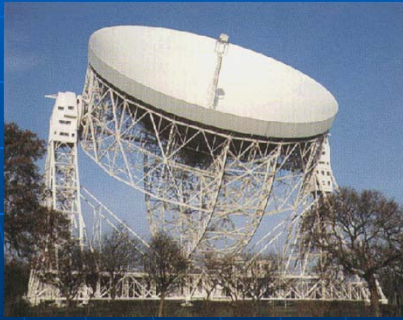
λ : 波長、 D : 望遠鏡口径

望遠鏡を大きくすると、より細かくものが見える
また、集光力も増えるので感度も向上する

大きい望遠鏡ほど分解能、感度とも良い
(その分建設費も高いが...)

巨大望遠鏡: 1

- Jodrel bank 76m
(1957年建設)



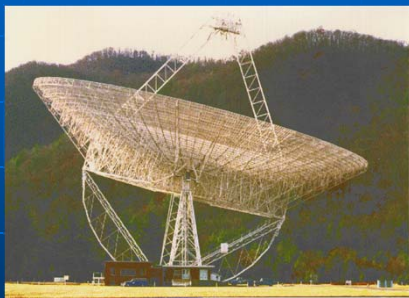
もともとは宇宙線の電波を検出するために建設された(検出できなかった)

- Effelsberg 100m
(1972年建設)



巨大望遠鏡: 2

- グリーンバンク91m(米 WV)



1988年11月15日 崩壊した
写真は崩壊の当日、崩壊直前に
とられたもの

- 100m鏡を再建 (GBT)
(2000年完成)



巨大望遠鏡：3

- アレシボ305m鏡
コーネル大学がプエルトリコに建設(1963年)

地形を利用して建設
世界最大の面積を持つ
(ただし、動かない)



レーダーの出力も世界最大
(1Mワット: 100Vなら10000A)



単一望遠鏡の限界

望遠鏡の分解能

- 電波望遠鏡
直径 $D = 100 \text{ m}$ 、波長 $\lambda = 3 \text{ cm}$ なら
分解能 $\theta \sim 1$ 分角程度(人間の視力1に相当)
- 光学望遠鏡
直径 $D = 1 \text{ m}$ 、波長 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ なら
分解能 $\theta \sim 1$ 秒角程度

単一鏡の場合、電波望遠鏡の分解能は光学望遠鏡に比べて大きく劣る

この問題を解決するのが、電波干渉計

干渉計とは

- 複数の電波望遠鏡を離して配置し、受信された電波を干渉させることで実効的に高い分解能を得る観測方法 (Radio Interferometer)

単一鏡



干渉計



- 干渉計の分解能
 $\theta = \lambda / D$
ただし、Dは干渉計の広がり(最大基線長)

電波環礁計の例

VLA (25m x 27台、
最長基線~30 km)

米国 ニューメキシコ州



映画「コンタクト」
(1997年)

4ヶ月に1回程度アレイ
配列(干渉計の広がり)
を変更する。
→ 分解能が変えられる



VLAの中心部

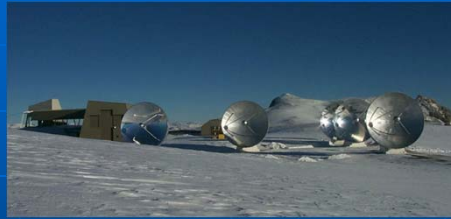


移動台車

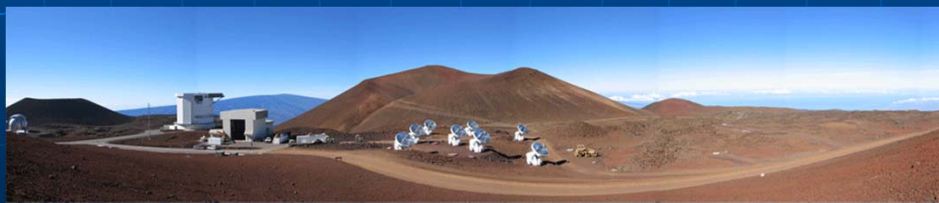
ミリ波干渉計の例



野辺山ミリ波干渉計 10m x 6台



IRAM (仏) 15m x 6台



SMA 6m x 8台 (ミリ波・サブミリ波)

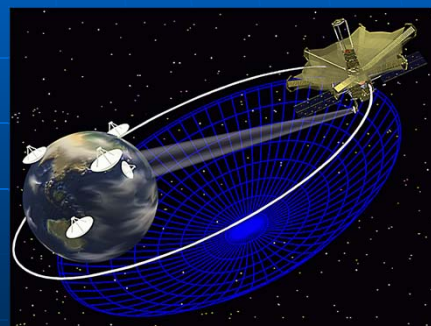
VLBIの例

VERA
20m x 4台



分解能 1 mas
波長1 cm, $D = 2300$ km

VSOP-2 (VLBI用アンテナを
積んだ衛星)



分解能 40 μ as
波長7 mm, $D = 30000$ km

ホーリーとーり、やいまは ぱいぬ ちゅらしまさ~ ようこそ、八重山は南の美しい島ですよ~



石垣島 川平湾



由布島の水牛車



竹富島の集落



VERA石垣島局



西表島の滝

最新のspace VLBI

- ロシアの"Radio Astron" project
- 2011年7月18日打ち上げ
- 最長基線30万km(月の距離の~80%)
- 現在軌道上で試験中



VLBI

- VLBIは基線長を伸ばして分解能を追及した究極の干渉計(最大の長所)
- ただし、アレイ配置がまばらな分、感度が低い(最大の欠点)

高輝度の放射を高分解能で観測することが得意(観測可能天体は限られる)

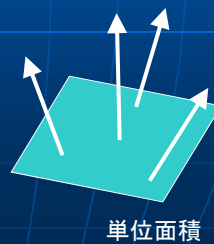
電波の観測量

電波の観測量(1) フラックス

- フラックス(flux): 電波の強さを表す量

単位時間、単位周波数あたりに単位面積を通過する電磁波のエネルギー

単位例: $\text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$



電波天文でよく使う単位

- ジャンスキー Jy (フラックス:fluxの単位)

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$



K. Jansky

実際の電波天体の強度は~数1000 Jyから1 μJy レベル

日常使用している電波に比べたらはるかにエネルギーが小さい

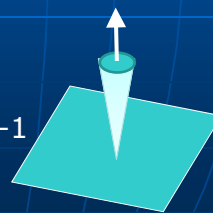
観測量(2):輝度

- 輝度(brightness):

単位時間、単位周波数、単位立体角あたりに
単位面積を通過する電磁波のエネルギー

フラックスのうち、ある特定の方向(立体角)
からきているものを表す

単位例: $W m^{-2} Hz^{-1} str^{-1}$



単位面積

輝度と輝度温度

- 輝度は通常、温度(K:ケルビン)の単位を用いる(これを輝度温度という)。
- 輝度温度は、電波を出している領域が、黒体放射で何度の放射に相当しているかを表している。
- 天体が実際に黒体放射をしている場合、輝度温度は天体の温度に相当する。

電波望遠鏡は温度計である、といってもよい!?

レーザー

レーザーの発明

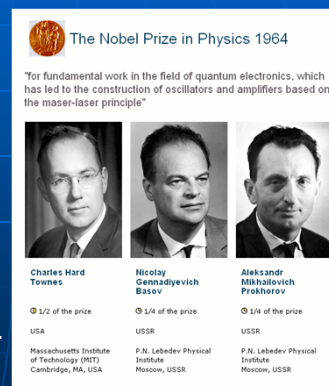
- 最初のレーザーはタウンズらによる人工的なもの(マイクロ波増幅技術として, 1954年)
- その後、宇宙空間でのレーザー現象が発見された

レーザーは現在の日常生活に
欠かせない技術

レーザーポインター、

CD, DVD

加工用レーザー、医療用レーザー
等



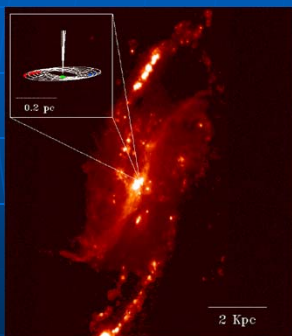
1964年ノーベル賞
(レーザーとレーザー)

メーザー観測の利点

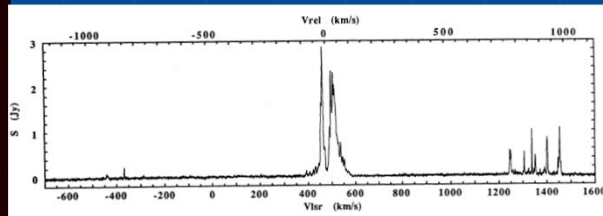
- 高い空間分解能
BH近傍、原始星近傍、恒星近傍を
観測するユニークな道具
- 天球面上での運動を容易に検出可能
天体観測に新しい軸を導入(時間軸)
運動学、位置天文学

NGC4258のAGNメガメーザー

- NGC4258 (M106)
+ / - 1000km/sにもおよぶ幅の広い
スペクトルの発見 (1993、野辺山45m鏡)



光学写真



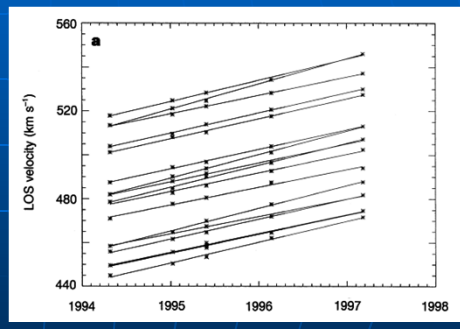
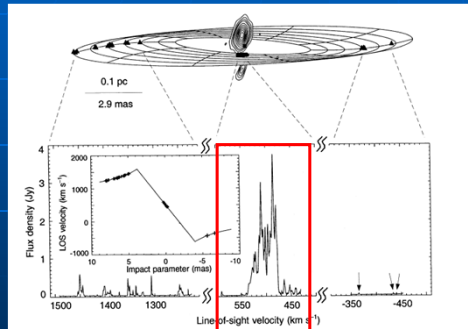
中心部の水メーザーのスペクトル

中心成分は視線速度が系統的に変化する(加速)

NGC4258のメーザー加速

円盤モデル

視線速度の加速



加速を示す成分

Herrnstain et al.(1999)

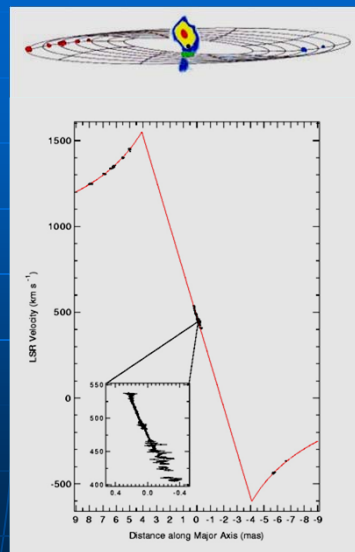
NGC4258のVLBI観測

- VLBAによるイメージング
ブラックホール周りの回転ガス円盤を検出

その大きさと回転速度が
ブラックホールの質量が
3600万太陽質量と分かった

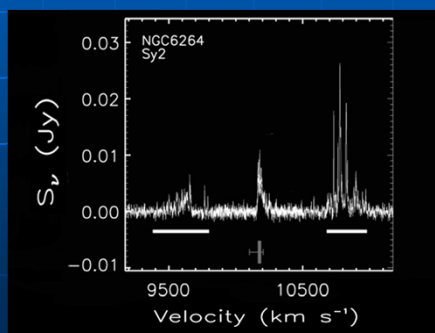
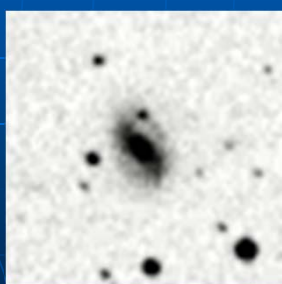
もっとも確からしいブラック
ホールの証拠
(日米共同研究、1995年)

※天体の距離も精密に求まった



AGN Maser Cosmology

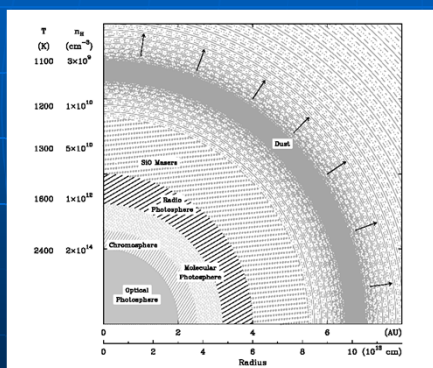
- AGNメガメーザ円盤は遠方銀河の距離を超高精度に測れる唯一の手段 ($v=r\omega$, $a=r\omega^2$, $\theta = r/D$)
- GBT100m + VLBAによる多数のAGN観測により、ハッブル定数の超高精度決定を目指すプロジェクトが米国で進行中



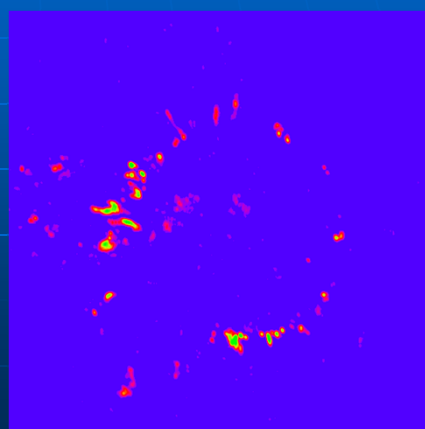
NGC6264の写真とスペクトルの例

AGB星の星周領域

- AGB星: 年老いた星。質量放出をしながら脈動している。



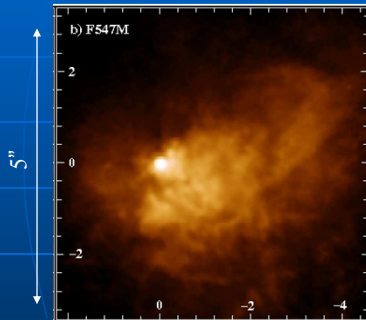
AGB星の星周領域の模式図



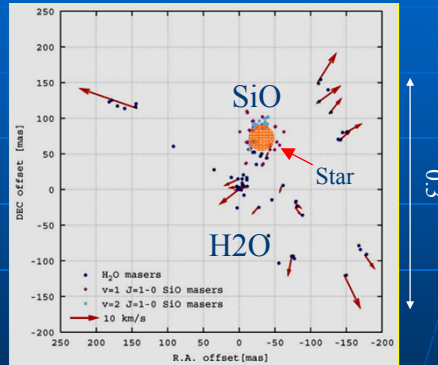
TX CamのSiOメーザー(VLBA)

晩期型星メーザーの例: VY CMa

- VY CMa: 進化した大質量星(超新星爆発目前?)



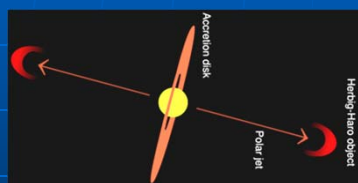
HSTで見た質量放出
(Smith et al. 2001)



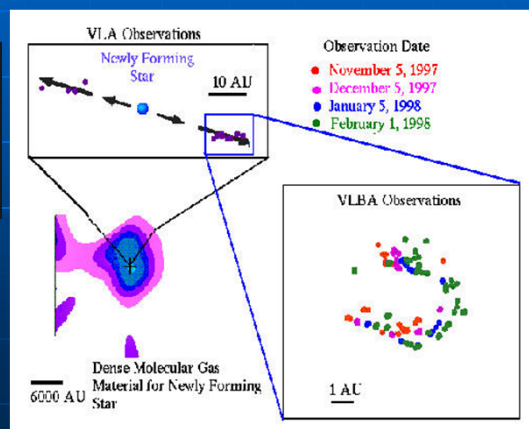
H₂O と SiO メーザー
(Choi et al., VERA)

星形成領域のメーザー

- 水メーザーは主に原始星ジェットのリック領域をトレース。運動が容易に検出できる。

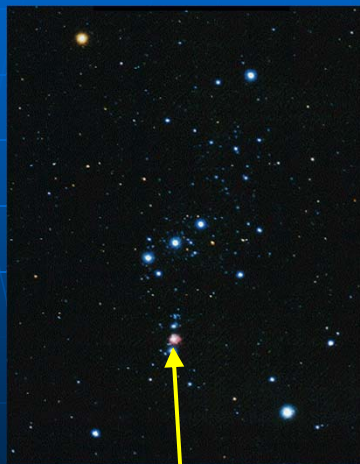


S106 FIR

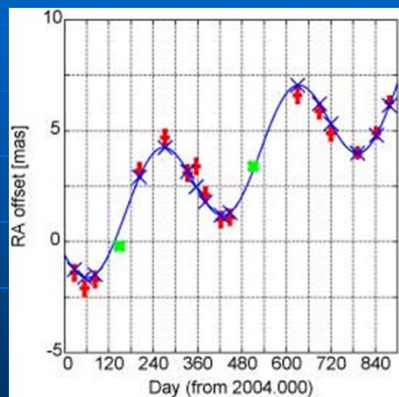


メーザー位置天文学

■ オリオン星雲 (VERA) 2年あまりの東西方向の動き



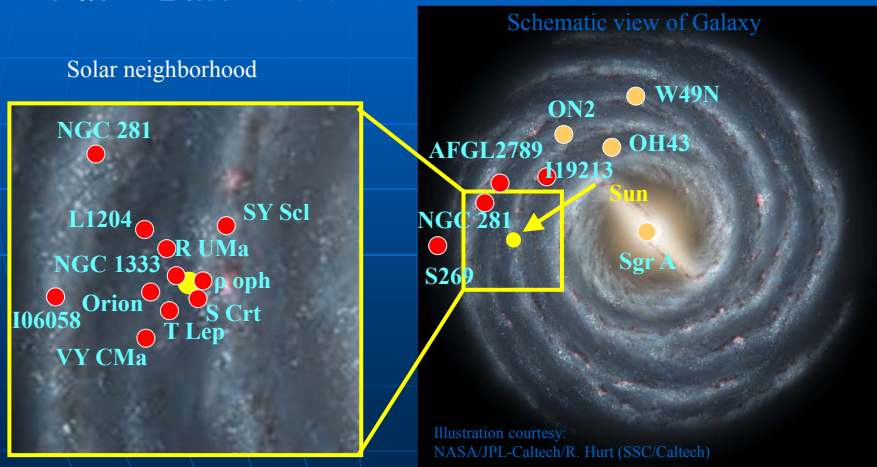
電波を出す若い星



視差: 約140万分の1度
 距離: 1420光年
 オリオン星雲の最も正確な距離

VERAでのメーザー測量

VERAはメーザー源の距離と運動を精密に計り、銀河系構造を精密に決定する(現在進行中)



● Parallax + proper motion ● Proper motion

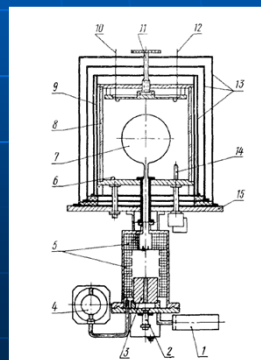
関連技術：水素メーザー

- HI 21cmを用いた人工的なメーザー。超高安定度の時計として用いられる
(時刻管理、電波干渉計の周波数標準 etc)



左：クバルツ社
水素メーザー

右：水素メーザー
の模式図
(Gaigerov+)



シンクロトロン放射

シンクロトン放射

- 高エネルギー電子＋磁場による非熱的放射
- ドップラーブーストにより高い輝度温度が達成可能。(レーザー放射と並ぶ高輝度放射、高分解能観測可能)
- 高エネルギー現象(AGN, 超新星残骸etc)に付随して観測されることが多い

電波天文学の誕生と銀河面背景放射

- カール ジャンスキー
(1905-1950)
米国ベル研究所の電波技師
雷による電波雑音を研究中に宇宙電波を(偶然)発見 (1931年)

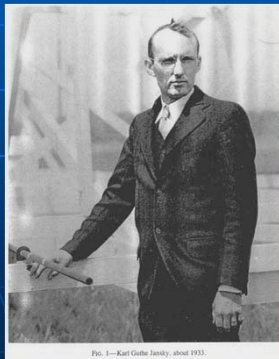
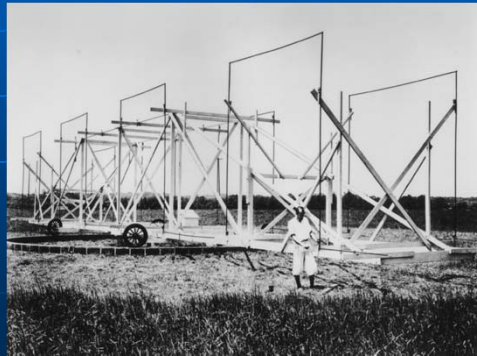


FIG. 1—Karl G. Jansky, about 1933.

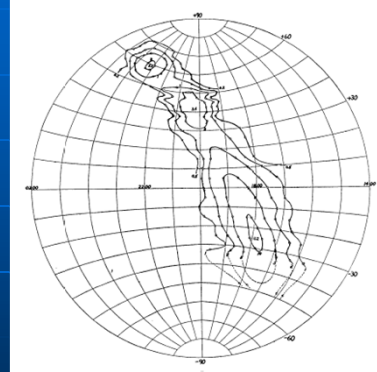


リーバーの電波地図

- 自作の望遠鏡をいろいろな方向に向け、電波強度を測定



リーバーの観測で得られた初めての電波宇宙地図

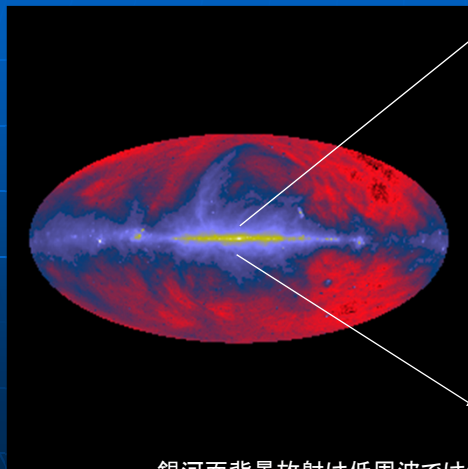


天の川と、Sgr Aなどの明るい天体も見えている (1944年)

この帯域の銀河面放射は主にシンクロトロン放射

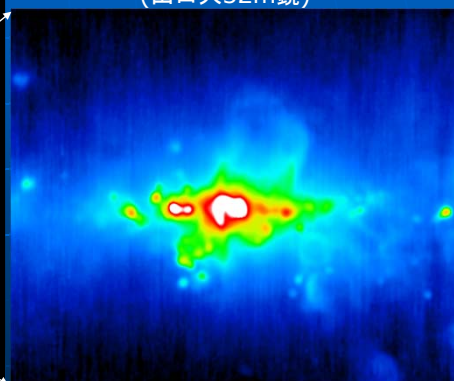
銀河面放射

- 408MHzの全天マップ(左)



銀河系中心部(8GHz)

(山口大32m鏡)

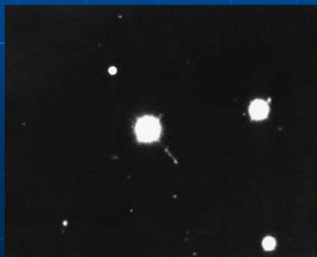


銀河面背景放射は低周波ではシンクロトロン放射が卓越
GHz帯になると、星形成領域からの制動放射なども混じる

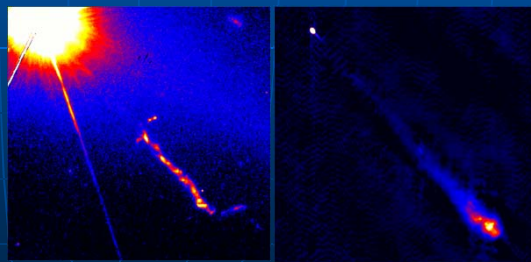
クェーサーの発見

- 3C273
ケンブリッジ大の3Cカタログで発見 (1959)
月の掩蔽を用いて位置計測と光学同定が行われ、約13等級のクェーサー($z=0.158$)が発見された (1963)。

3C273 光学写真

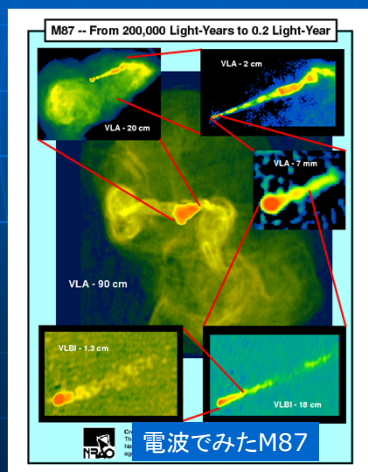


光および電波でみえるジェット

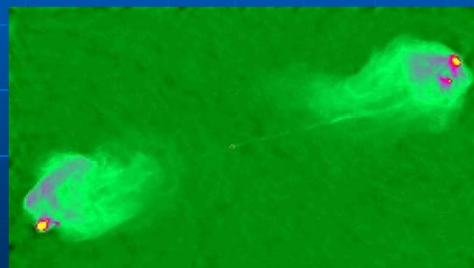


電波銀河、AGN

- AGNから光速に近い速度でジェットが放出され、シンクロトロン放射で明るく輝く。VLBIで中心部を高分解観測可能。



電波銀河 はくちょう座A (VLA)

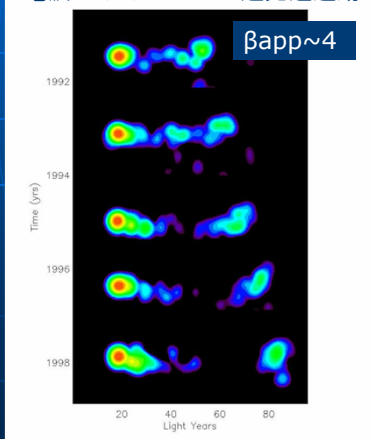


相対論的ジェット+電波ローブ

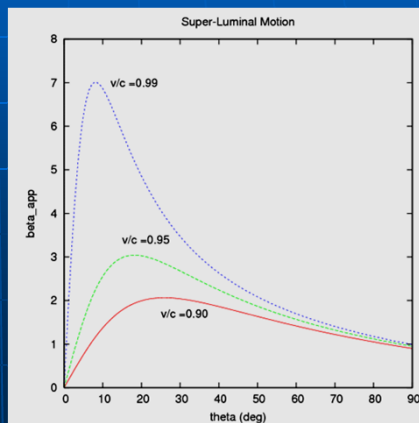
ジェットの超光速運動

- 光速に近いジェットの天球面上での見かけの速度は光速度よりも大きく見えることがある（光速近くまで加速された証拠）

電波でみた3C279の超光速運動



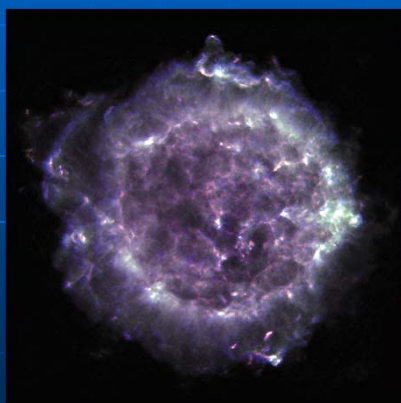
ジェットの見かけの運動速度とジェットを見込む角の関係



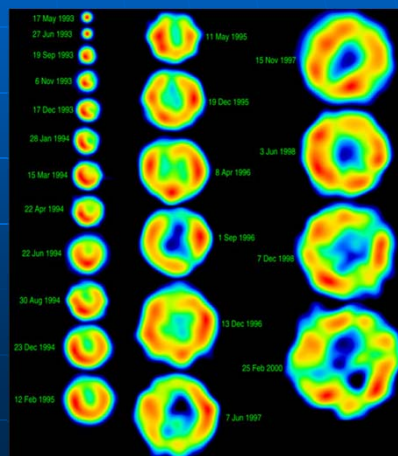
超新星残骸

- 超新星残骸での電子加速 + 磁場

超新星残骸 Cas A (VLA)

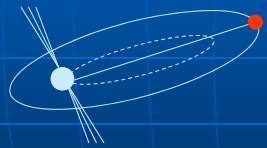


超新星残骸 SN1993J (M81) VLBAによるモニター観測結果

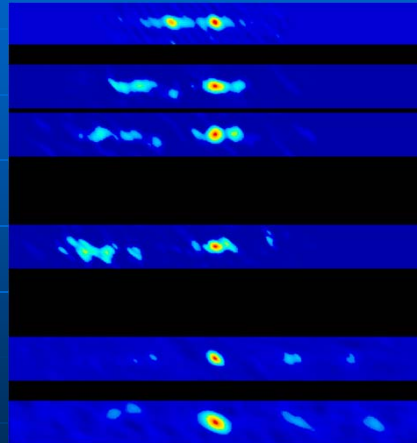


マイクロウェーサー

AGNのミニチュア版
銀河系内の連星系
star + compact objects
(WD, NS, BH ?)



距離と軌道決定
→ 質量, エネルギー
天体の正体



GRO 1655-40 with VLBA

将来のAGN観測

VSOP-2 : VLBI Space Observatory Program-2

10mクラス、打ち上げ2016年?
(2006年3月に計画承認)

最長基線: 30000 km

最高分解能:

38 μ as @ 43 GHz



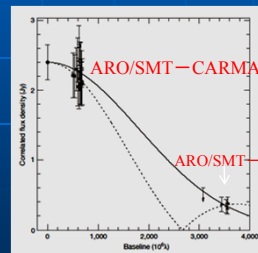
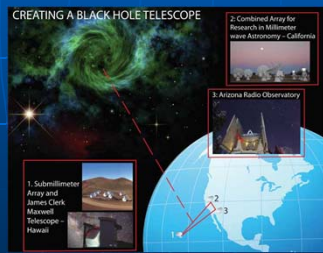
= M87 BHの10 R_g
降着円盤が見える! ?

VERAや大学連携、
東アジアネットはその
地上局として貢献

銀河系中心ブラックホール Sgr A*

Sgr A*: 見かけが最も大きいBH
その分解にはサブミリ波VLBIが有効

- 1) shorter λ , higher resolution
- 2) less interstellar scattering



Doeleman et al.
2008 in Nature

Doeleman et al.(2008)は1.3mmでSgr A*の構造を
~40 μ 秒まで分解。シャドウ分解まであと一歩？

事象の地平線検出へ向けて

- Submm VLBI with ASTE will be the first step
(Sgr A* may not be detected ...) ALMA/ACA
- needs more station
(LMT, S-pole, relocation of ATF)
- ACA/ALMA phase-up array will significantly boost the sensitivity
(ACA correlator has a phase-up capability)
- VSOP-3 as a submm VLBI satellite ?
(one of possible future plans)
targets : Sgr A* and M87

