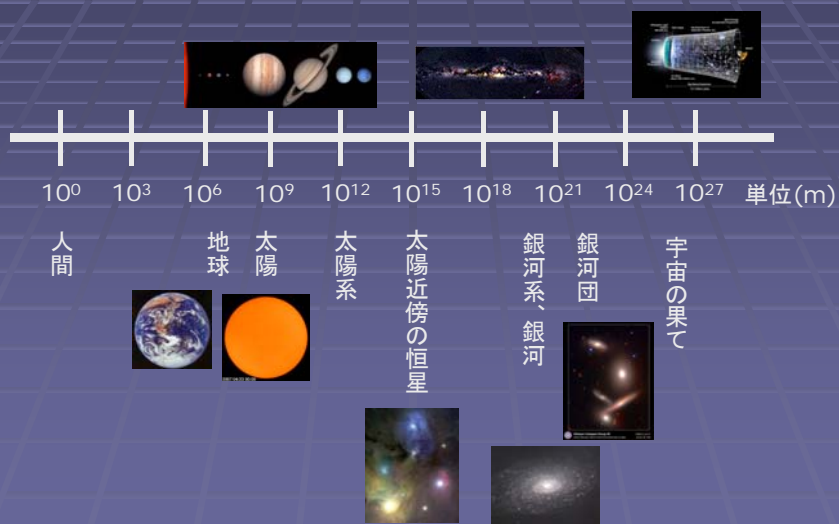


宇宙科学II (電波天文学) 第7回

星の死 (パルサー、超新星)

宇宙の階層構造

- ログスケールで表示した宇宙の大きさ

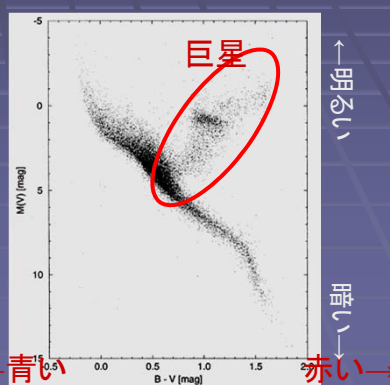


星の死

巨星

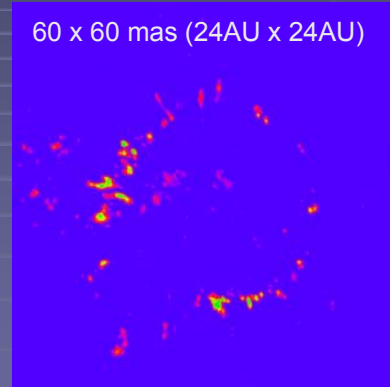
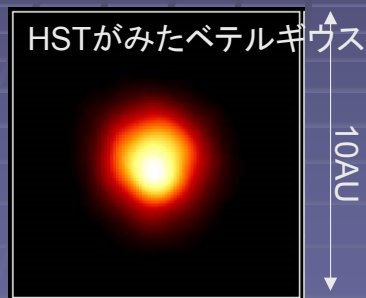
- 中心部で水素が燃え尽きた星は、ヘリウムコアの周囲で水素が燃える → 赤色巨星
- ヘリウムコアの温度があがるとヘリウム燃焼が始まり、やがて炭素のコアができ、周囲でヘリウムと水素が燃焼 → 漸近巨星(AGB星)
- 巨星になると半径が増大し、半径が数AUにもなる(太陽が巨星になると地球も飲み込まれてしまう)

赤色巨星と漸近巨星の模式図



巨星を分解して見る

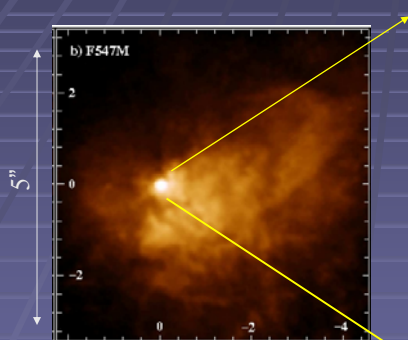
- 巨星は数AUの半径を持つが、光学観測ではその分解は難しい。一方、明るいメーザーを持つAGBをVLBIで観測すると、光球近傍のガスを分解できる。



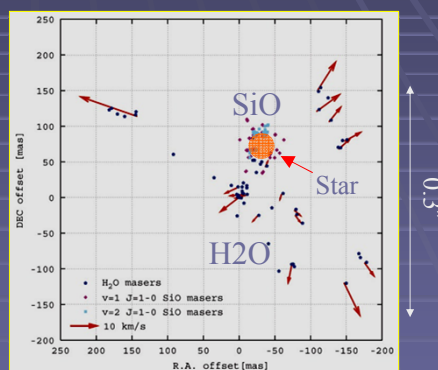
TX CamのSiOメーザー(VLBA)

巨星からの質量放出

- 大犬座VY星: 進化した大質量星(超新星爆発目前?)



HSTの画像



VERAで見たH₂OとSiOメーザーガスの運動が捉えられている。

極めて明るい星の輻射圧によって外層が吹き飛ばされている

星の進化の末期

- 質量に応じて、最大でFeまで燃焼が進む。
 $H \rightarrow He \rightarrow 12C \rightarrow 16O \rightarrow 20Ne \dots \rightarrow 56Fe$
- 軽い星(太陽質量の8倍程度まで)では中心温度が十分あがらないので燃焼が途中で止まる。
 → 縮退圧で支える白色矮星へ
- 重い星(太陽質量の10倍以上)では鉄の生成まで進む。その後鉄より安定な核がないので核反応によるエネルギー生成で星を支えることができなくなる
 → 超新星爆発へ

白色矮星

- 太陽質量の8倍程度までの星は、最後に炭素のコアが残り、惑星状星雲を経て白色矮星となる
- シリウスBの例
 恒星の見かけの明るさと等級

$$m = -2.5 \log (F / F_0)$$

$$\Delta m = +5 \text{ 等級で明るさ100分の1}$$

シリウスA -1.5 等星
 シリウスB 8.4 等星



シリウスとその伴星シリウスB
 後者はシリウスより温度が高いが1万分の1の明るさしかない。シュテファンボルツマン則から半径が極めて小さく、超高密度の天体であることがわかる。

シリウスBの例(続き)

- A,Bとも距離が同じなので、等級比=光度比、よって

$$L_B = L_A / 10000$$
- シリウスBの温度をAを同じとし黒体輻射を仮定する。シュテファン・ボルツマン則より、半径比は

$$(R_B^2 T_B^4) / (R_A^2 T_A^4) = 1/10000 \quad \text{より、}$$

$$R_B = R_A / 100$$

一方、 $R_A = 1.7 R_{\text{sun}}$ より、 $R_B \sim 1/60 R_{\text{sun}} \sim 10000 \text{ km}$
- 一方、連星の運動からシリウスBの質量は $\sim 1 M_{\text{sun}}$
 → シリウスBの密度は太陽の ~ 30 万倍！

チャンドラセカール質量

- 相対論的な縮退圧で支えられる天体の限界質量
- 縮退圧のエネルギーを大ざっぱに見積もる

粒子間距離 $\Delta x \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{1/3}$ $n \sim \left(\frac{M}{\mu m} \frac{1}{R^3}\right)$

運動量とエネルギーの関係 $\varepsilon \sim cp$

不確定性関係 $\hbar \sim \Delta x \Delta p$

より、 $E_{\text{deg}} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) c \Delta p \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) \frac{c \hbar}{\Delta x} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right) c \hbar n^{1/3}$

チャンドラセカール質量(II)

以上より、縮退圧のエネルギー $E_{\text{deg}} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right)^{4/3} \frac{c\hbar}{R}$

これが重力エネルギー $E_{\text{grav}} \sim GM^2/R$ と等しいとして、

$$\frac{GM^2}{R} \sim \left(\frac{M}{\mu m}\right)^{4/3} \frac{c\hbar}{R}$$

これより、 $M \sim \left(\frac{1}{\mu m}\right)^2 \left(\frac{c\hbar}{G}\right)^{3/2}$ となる。これは、チャンドラセカール質量といい、縮退圧で支える天体の限界質量である(上式では $\mu=1$ で、 $M \sim 1.8 M_{\text{sun}}$)
 詳しい計算では炭素($\mu=2$)からなる星で $M \sim 1.4 M_{\text{sun}}$

高密度天体の大きさ

- 白色矮星: 電子の縮退圧
 - 中性子星: 中性子の縮退圧
- 共にチャンドラセカール質量が限界値
- 天体の大きさは、粒子が相対論的になる条件から

$$cp \sim c\hbar n^{1/3} \sim \left(\frac{M}{\mu m_p}\right)^{1/3} \frac{c\hbar}{R} \geq mc^2$$

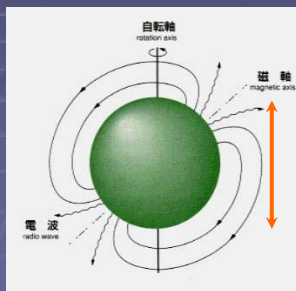
これより、

$$R \leq \left(\frac{M}{\mu m_p}\right)^{1/3} \frac{\hbar}{mc}$$

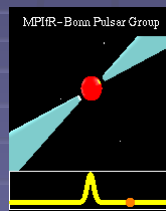
- 電子縮退のとき、 $m=m_e$ として、 $R \sim 4000 \text{ km}$
 - 中性子縮退のとき、 $m=m_n=m_p$ として、 $R \sim 2 \text{ km}$
- この数値は、上記の天体の半径の凡その目安となる。

中性子星とパルサー

- パルサー 定期的なパルスを発する星
- 高速回転する中性子星で、超新星爆発で形成される



パルサー(中性子星)の模式図



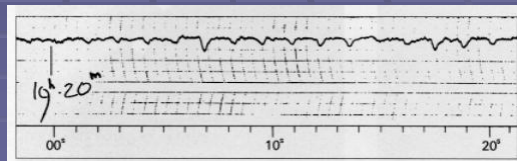
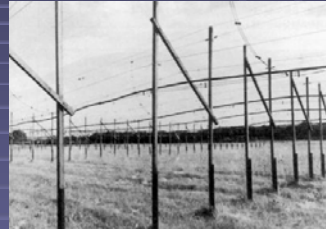
かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった

パルサー

パルサーの発見

- 周期的なパルスを出す天体
- 発見者
ヒューイッシュ、ベル(1967年)

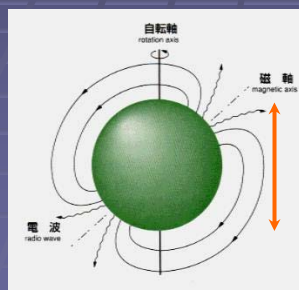
使用した望遠鏡



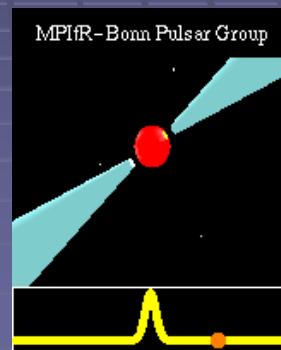
観測された周期パルス

パルサー = 中性子星

- 最初は宇宙人の信号説も！？
パルサー第一号は当時 LGM-1 と命名された。
LGM1は宇宙人を意味する”Little Green Men”。
- 結局は 中性子星 と判明



パルサー(中性子星)の模式図



パルサーからの放射の模式図

1974年度ノーベル物理学賞

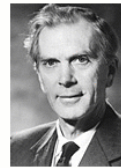
- Ryle (干渉計の開発)
- Hewish (パルサーの発見)

第一発見者のベルが
選からもれたことに対
して多くの意義が唱え
られた、...



The Nobel Prize in Physics 1974

"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



Sir Martin Ryle

🏆 1/2 of the prize
United Kingdom

University of Cambridge
Cambridge, United Kingdom
b. 1918
d. 1984



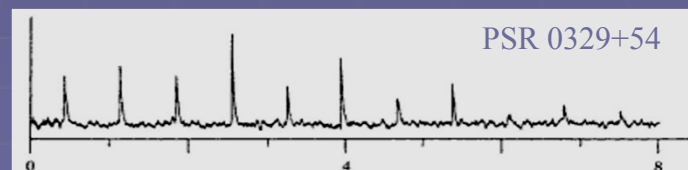
Antony Hewish

🏆 1/2 of the prize
United Kingdom

University of Cambridge
Cambridge, United Kingdom
b. 1924

パルサーのパルスの性質

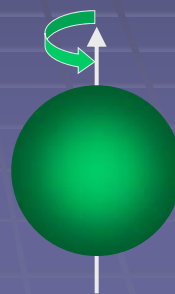
- 周期ミリ秒から数秒の規則的なパルスを持つ
- 周期に比べてパルス幅は小さい(ビーム立体角が小さいことを示す)
- 周期が伸びていくのが観測される $dP/dt > 0$
(回転の減速を示す)



天体回転と大きさ

- 高速回転する天体は、遠心力が重力よりも大きくなならない条件から、半径の上限が決まる
- 遠心力 $f_{\text{cen}} \sim m r \omega^2$
- 重力 $f_{\text{grav}} \sim GMm/r^2$
- 半径の上限値は

$$r \sim (GM/\omega^2)^{1/3}$$



パルサーの大きさ

- パルサーの周期はミリ秒～数秒
- $P \sim 1 \text{ s}$ とすると最大半径 r_{max} は
 $r_{\text{max}} \sim 1500 \text{ km}$
 > これでも白色矮星よりも小さい
- $P \sim 1 \text{ ms}$ とすると最大半径 r_{max} は
 $r_{\text{max}} \sim 15 \text{ km} !!$

パルサーの密度

- パルサーは極めてコンパクトな天体であり、中性子の縮退圧で支えられる中性子星である
- $M \sim 1 M_{\text{sun}}$, $R \sim 10 \text{ km}$ の場合、平均密度は
 $\rho \sim 5 \times 10^{11} \text{ kg / cc}$
 (1立方センチ当たり 5億トン !!)
- 1太陽質量をもった天体の平均密度の比較

	半径	平均密度
太陽	70万 km	1 g/cc
白色矮星	6000 km	2 トン/cc
中性子星	10 km	5億トン/cc

超新星残骸とパルサー

- パルサー/中性子星は超新星爆発で形成される。
- パルサーは超新星残骸に付随して見られることもある。



かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった



光とX線で見たかに星雲のパルサー

パルサーのエネルギー

パルサーの回転と減速 I

- パルサーの周期を長期に観測すると、周期が伸びていく(回転が減速している)のが観測される
- この減速は、回転運動のエネルギーを放射によって失ったために起きていると考えられる
- パルサーの回転エネルギー
$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = 2\pi^2 I P^{-2}$$
- 回転エネルギーの変化率
$$dE/dt = I \omega d\omega/dt = -4\pi^2 I P^{-3} dP/dt$$

(I: 慣性モーメント。ここでは簡単のため
一様球の値 $I = 2/5 M r^2$ で近似する)

パルサーの回転と減速 II

- カニ星雲のパルサー(Crab pulsar)の場合
 $M=1 M_{\text{sun}}, R=10 \text{ km}$
 $P = 0.03 \text{ s}, dP/dt = 4 \times 10^{-13} \text{ s/s}$ から

回転エネルギー $E_{\text{rot}} = 1.7 \times 10^{42} \text{ J}$
 変化率 $|dE/dt| = 4.7 \times 10^{31} \text{ W}$



となる。一方、Crab パルサーのおよその放射光度は、
 $L \sim 5 \times 10^{31} \text{ W}$

なので、上記のエネルギーから説明できる。

> パルサーは回転エネルギーを放射に変換して、太陽光度の10万倍ものエネルギーを放出する。

パルサーのエネルギーの源 I

- パルサー/中性子星は超新星爆発で作られる

大マゼラン雲の超新星1987A

- 超新星爆発のエネルギー源は、星の中心がつぶれるときに解放される重力エネルギー。
 $E_{\text{sn}} \sim GM^2/R$

- $M \sim 1 M_{\text{sun}}, R \sim 10 \text{ km}$ なら
 $E_{\text{sn}} \sim 3 \times 10^{46} \text{ J}$

このうち99%はニュートリノが持ち去り
 残りの1%が爆発の運動エネルギーに

$$E_{\text{sn}_k} \sim 3 \times 10^{44} \text{ J}$$



カミオカンデ: 1987Aからのニュートリノを検出



パルサーのエネルギーの源 II

- パルサーの回転エネルギー
 $E_{\text{rot}} \sim 1.7 \times 10^{42} \text{ J} \ll E_{\text{sn_k}}$
- パルサーの運動エネルギー ($v \sim 1000 \text{ km/s}$)
 $E_{\text{k}} \sim \frac{1}{2} m v^2 \sim 1 \times 10^{42} \text{ J} \ll E_{\text{sn_k}}$

パルサーの回転、運動とも、超新星爆発時の重力エネルギーの一部を運動エネルギーに渡すことで説明可能。

パルサーのタイミング観測

パルサーの基本的な観測量

- 基本的観測量:パルスの到達時間
- これを精密に測定することを、タイミング観測という。
- 非常に単純な観測であるが、この観測からさまざまな情報が得られる(ただし、周期の安定したパルサーのみ利用可能)

周期の変動

- パルサーの周期を長期に観測すると、回転速度が遅くなっているのがわかる
($dP/dt > 0$)
- パルスの放射によって回転エネルギーを失っているため
- パルサーの大まかな年齢の見積もり
 $\tau \sim P / (dP/dt)$
- 典型的なパルサーの年齢
1000 yr ~ 10^7 yr 程度
比較的若い種族(ただし、古くてリサイクルされたパルサーも存在する)

かにパルサーの年齢

- カニ星雲のパルサー(Crab pulsar)の場合
 $P = 0.03 \text{ s}$, $dP/dt = 4 \times 10^{-13} \text{ s/s}$ から

$\tau \sim$ 約2000年

- 実際は1054年の爆発

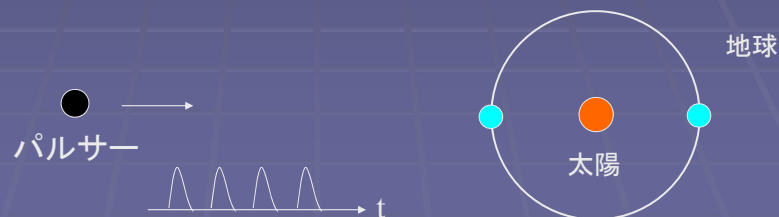
中国の「宋史」
藤原定家の「明月記」などに記録あり。

おおざっぱにはあっている。



パルサータイミングと天体位置

- パルサータイミングの変動計測から、天体位置の情報が得られる。
- タイミングの遅れ幅： $\tau \sim 1 \text{ AU}/c \sim 8 \text{ min} \sim 500 \text{ s}$
- タイミングの精度： $\Delta\tau \sim 1 \mu\text{s}$
 位置精度 $\theta \sim \Delta\tau/\tau \sim 2 \times 10^{-9} \text{ rad} \sim 0.4 \text{ mas}$

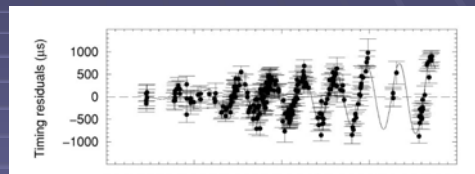


パルサータイミングによる位置計測

- PSJ J0538+2817のタイミング観測例(Kramer et al. 2003)

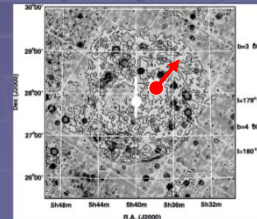
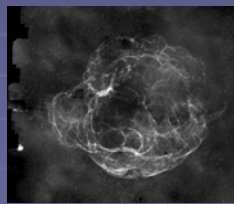
- 天体が点球面上に静止しているとするとき、タイミングの残差に年周成分が見られ、残差が増大する。

タイミングの残差



> パルサーの運動を見ている

> 超新星残骸との関連、パルサーの年齢などが得られる



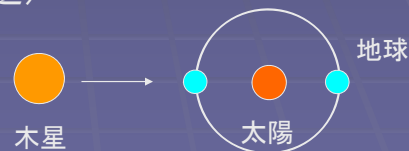
超新星残骸S147とパルサーの位置関係

光速度測定とタイミング観測

- 歴史上有名な「タイミング観測」は、レーマーによる光速度の計測(1676年)
- 木星のガリレオ衛星の食の時刻が季節変動することから、光速度を求めた
(食の時間差～光の伝搬時間)
- この場合、天体位置が既知、光速度が未知
(パルサータイミングとは逆)



木星とガリレオ衛星



パルサータイミングと連星

- パルサーが連星系になっている場合、その軌道運動によってもタイミングに変動がみられる。ここから連星の軌道情報を得ることが可能。
- この手法により
 - 1) パルサー周囲の惑星検出
 - 2) 連星パルサー観測による相対論検証なども行われている



パルサーと相対論検証

連星パルサーと重力波

- 連星パルサー=PSR1913+16の発見(ハルス、テイラー)
- 公転周期がわずか7.7時間
- 公転運動で加速をうけ、重力波放出が起こるはず。

PSR 1913+16の模式図



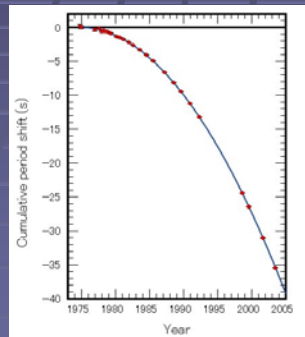
公転周期はたったの7.7時間
2天体間は70万~350万km




アレシボ望遠鏡

連星パルサーと重力波 (2)


- 公転周期の変化が、重力波によるエネルギー放出による予測と一致
- 重力波存在の間接的な証明





公転周期が現象する様子。一般相対論の重力波放出による予測とびったり一致


 **The Nobel Prize in Physics 1993**

"For the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"



Russell A. Hulse
 1/2 of the prize
 USA
 Princeton University
 Princeton, NJ, USA
 b. 1950

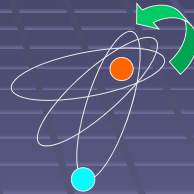


Joseph H. Taylor Jr.
 1/2 of the prize
 USA
 Princeton University
 Princeton, NJ, USA
 b. 1941

1993年度
ノーベル賞受賞

一般相対性理論の検証

- 水星の近日点移動
- 太陽重力による光の屈折
- 太陽重力による光の伝搬遅延 (シャピロ効果)
- 重力による時計の遅れ
- 重力波の存在 (間接的) etc.



水星の近日点移動の模式図

ちなみに、

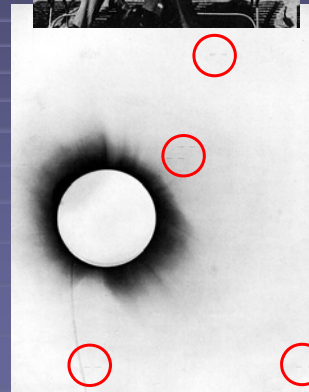
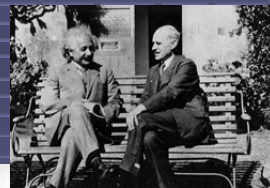
特殊相対論効果 v/c

一般相対論効果 $(v/c)^2$

で表され、太陽系の場合 (地球近傍) は、
 $v/c \sim 10^{-4}$, $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$ である。

太陽による光の屈折

- 太陽表面近傍を通過する光の屈折角
 $\alpha = 4 GM / c^2 r \sim 1.7$ 秒角
- 歴史的にはエディントンらによる日食観測で初めて検出 (1919年)
- 現在はVLBI観測等により、上記の屈折角が 10^{-3} の精度で計測されており、相対論が正しいことが確められている。

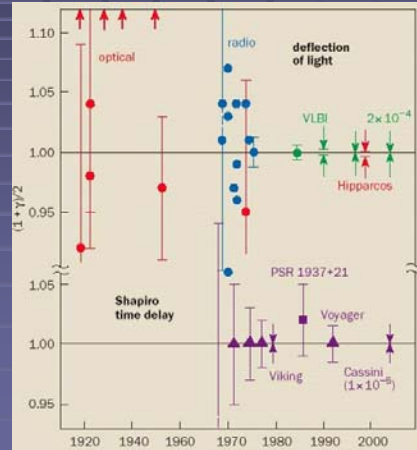


1919年の皆既日食と周囲の星

相対論検証の状況

- 相対論パラメーター γ の測定
(相対論なら $\gamma=1$ 、他の理論なら1以外)
- 0.1%以下の精度で相対論は正しいと確認されている。
- ただし、そのほとんどは太陽系内の弱い重力場
- BH近傍などの強重力場での観測はこれから

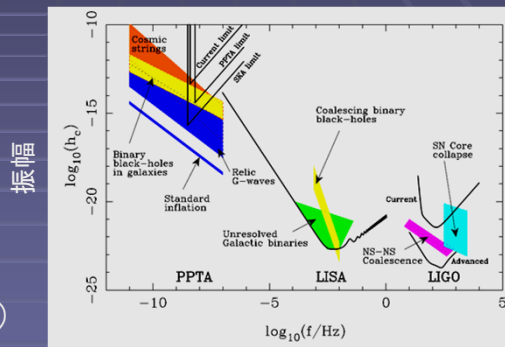
相対論パラメーターの測定の歴史



VLBI観測やパルサー観測などの電波天文観測も重要な貢献をしている

パルサータイミングと重力波

- パルサータイミングを利用して、重力波の直接検出を目指す計画が進行中
- さまざまな方向のパルサーを精密に観測し、その変動から重力波の存在を調べる
- 周波数: 10^{-8} Hz (周期数年、波長数光年)
- レーザ干渉計型の重力波望遠鏡と異なる周波数帯を観測可能



振幅

重力波周波数

SKA (Square Kilometer Array)

- 国際協力で1km平方の集光面積を持つ望遠鏡を計画中
パルサー観測やSETIにも利用可能 (豪州 or 南アフリカ?)



ASKAP: 豪州のSKAプロトタイプ



SKAの完成想像図

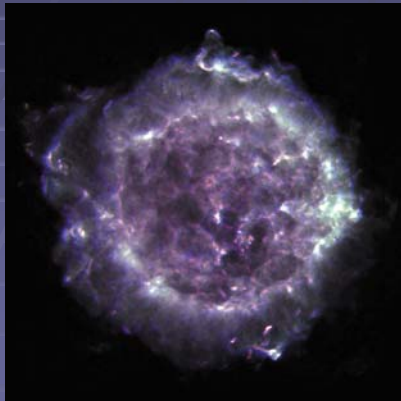
2020年ごろ稼働? パルサー研究にも大きく貢献すると期待される

超新星爆発

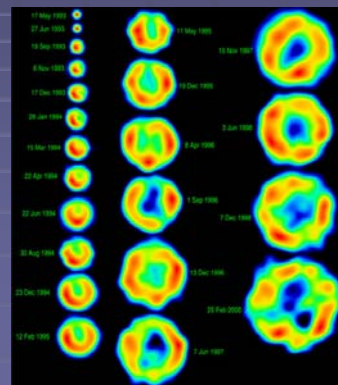
超新星残骸

- 星の末期の大爆発
- 電子加速+磁場によりシンクロトン放射で電波でも明るく輝く

超新星残骸 Cas A (VLA)



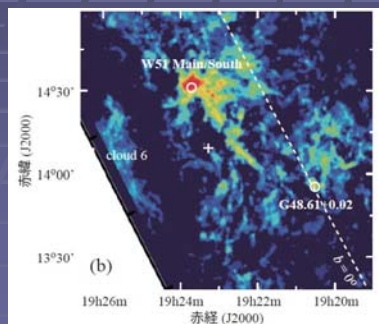
超新星残骸 SN1993J (M81)
VLBAによるモニターから系外銀河
の超新星残骸の膨張が見える



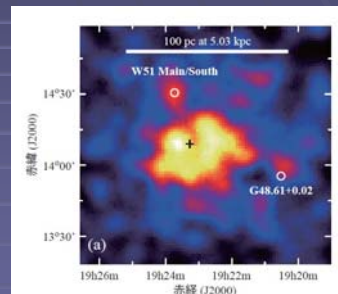
超新星は次世代の星を形成

- 超新星が周囲のガスを圧縮しながら吹き飛ばし、その中で次の星形成が進むと考えられる(誘発的星形成)

W51領域の分子ガス



W51領域のガンマ線



中央は超新星残骸による
ガンマ線放射

W51領域における超新星残骸と分子ガスの相互作用はその一例

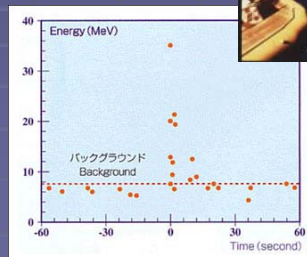
1987Aとカミオカンデ

- 1987A: 1987年に大マゼラン星雲で発生した超新星
- カミオカンデ: 岐阜県の神岡鉱山に設置されたニュートリノ検出装置(チェレンコフ光を利用)
- ニュートリノ検出により小柴さんがノーベル賞



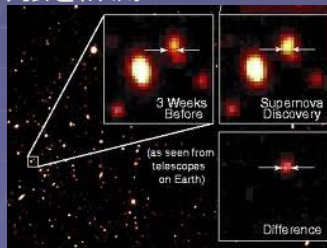
マゼラン雲で発生した超新星
1987A

カミオカンデ
が検出した
ニュートリノ



Supernova cosmology

- Ia型超新星(チャンドラセカール質量に達した星の爆発)が光度一定であることを距離指標として利用
- 遠方の超新星を多数観測して、宇宙の加速膨張を計測



The Nobel Prize in Physics 2011
Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011

Nobel Prize Award Ceremony

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess

Photo: U. Montan Photo: U. Montan Photo: U. Montan

Saul Perlmutter Brian P. Schmidt Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

2011年のノーベル賞

次の銀河系内の超新星は？

- 超新星は1銀河あたり、100年に一度程度
- 銀河系で人類が最後に見た超新星は約400年前
- 次はいつ起こる？
もし起きれば世紀の天文イベントに
(世界中の望遠鏡が観測する、
ニュートリノや重力波が受かる...)

が、太陽に近すぎると危険 !?