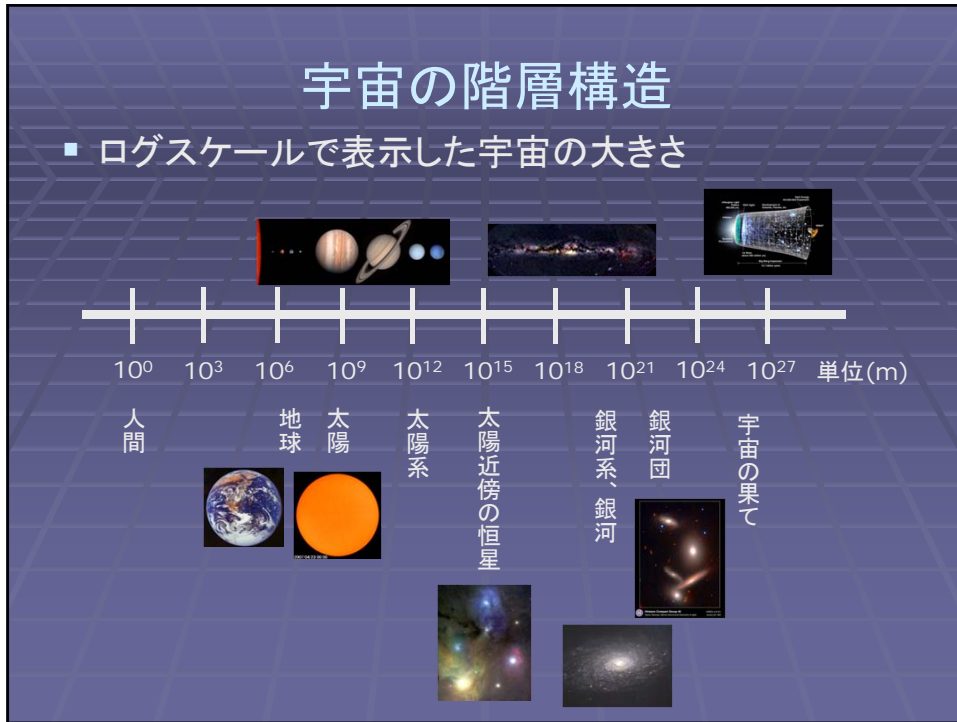


宇宙科学II（電波天文学）
第8回

星の死
&
パルサー

前回の復習



地球の温度


■ 太陽の光度 $L_{\text{sun}} = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4$

■ 地球が単位時間に受け取るエネルギーと放射するエネルギーのつり合いから


$$T_e = \left(\frac{1-A}{1-f} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{R_\odot}{2a}} T_\odot,$$

■ A=f=0の時 $T_e = 279 \text{ K } (6 \text{ }^\circ\text{C})$

■ A=0.3, f=0の時 $T_e = 255 \text{ K } (-18 \text{ }^\circ\text{C}) \quad T \sim 300 \text{ K}$



T=5800 K



恒星のエネルギー源

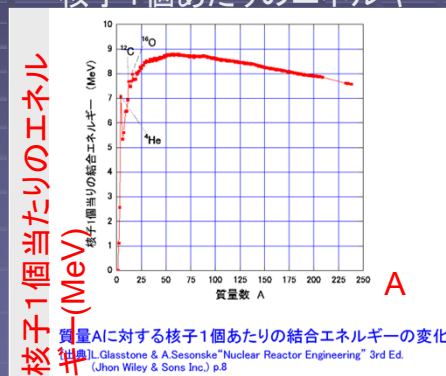
- 太陽のような恒星は核融合を起こして輝く
- 主系列での核融合反応
 $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ 等
- 高いエネルギー生成効率 $\varepsilon \sim 0.7\%$
- 1千万度以上の高温が必要



恒星での元素合成

- 安定核種の中でも最も安定な原子核はFe (A=56)
- 星の中心部では最大鉄まで元素が生成
 $\text{H} \rightarrow \text{He} \rightarrow \text{C} \rightarrow \dots \text{Fe}$
- それ以上の元素は超新星爆発で

核子1個あたりのエネルギー



1eV = 1.3×10^{-19} J, 電子に1Vの電圧をかけて得られるエネルギー

元素と宇宙

- すべての元素は宇宙起源

1 H 1.0079																	18 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 * #	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 #	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (291)	118 Uuo (294)	
* Lanthanide series			57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97
# Actinide series			89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

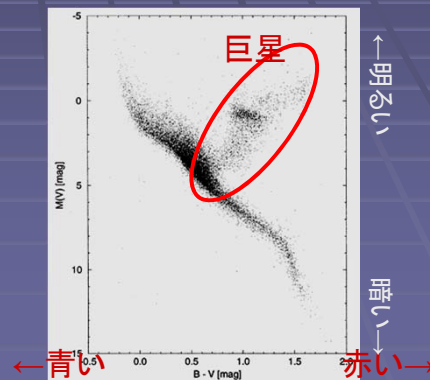
- 天体による元素合成がなければ、生命は誕生しえない

星の死

巨星

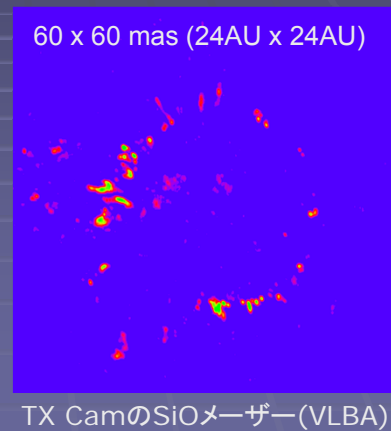
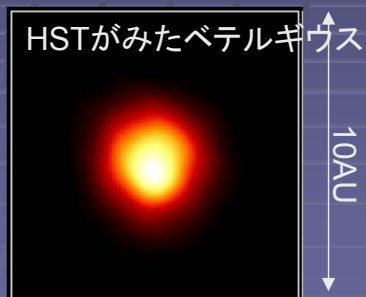
赤色巨星と漸近巨星の模式図

- 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)



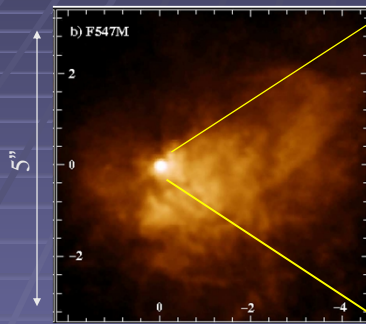
巨星を分解して見る

- 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、明るいレーザーを持つAGBをVLBIで観測すると、光球近傍のガスを分解できる。

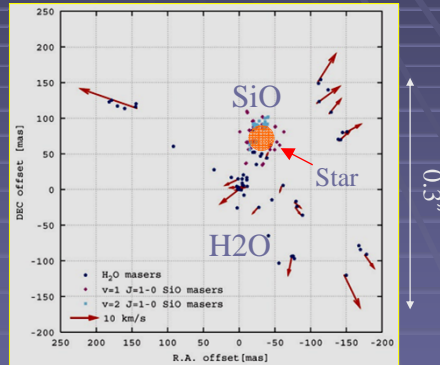


巨星からの質量放出

- 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

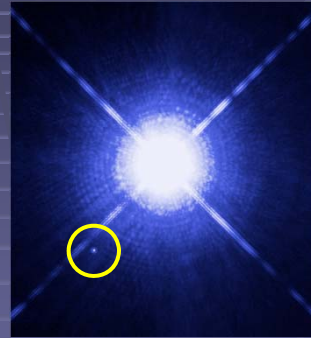
$$m = -2.5 \log (F / F_0)$$

F_0 : ベガの見かけの明るさ(0等の基準)

$\Delta m = +5$ 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を同じとし黒体放射を仮定する。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

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

$$\text{運動量とエネルギーの関係 } \varepsilon \sim cp$$

$$\text{不確定性関係 } \hbar \sim \Delta x \Delta p$$

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

チャンドラセカール質量(II)

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

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

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

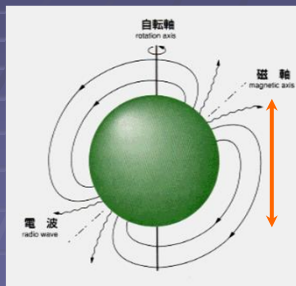
これより、

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

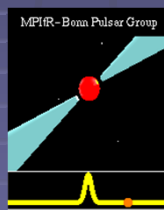
- 電子縮退のとき、 $m=m_e$ として、 $R < 4000 \text{ km}$
- 中性子縮退のとき、 $m=m_n=m_p$ として、 $R < 2 \text{ km}$
この数値は、上記の天体の半径の凡その目安となる。

中性子星とパルサー

- パルサー一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

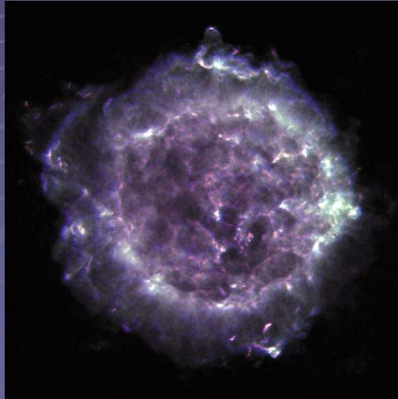


かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つっている

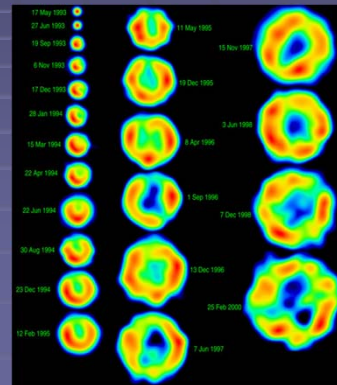
超新星残骸

- 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

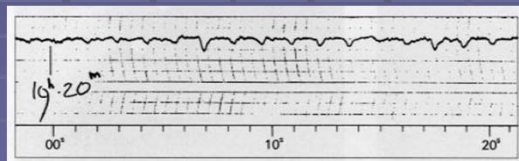
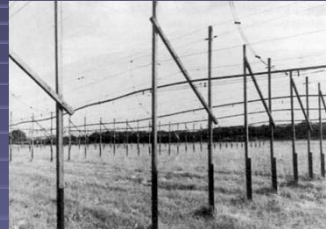


パルサー

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)

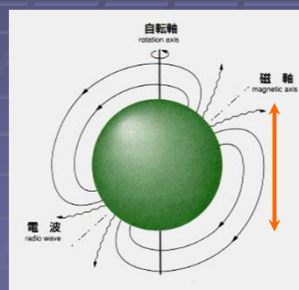
使用した望遠鏡



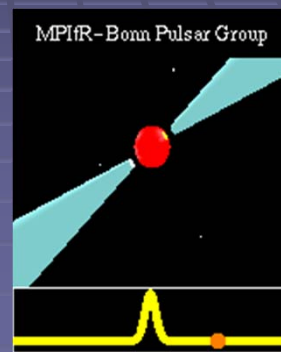
観測された周期パルス

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

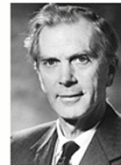
- Ryle (干渉計の開発)
- Hewish (パルサーの発見)

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



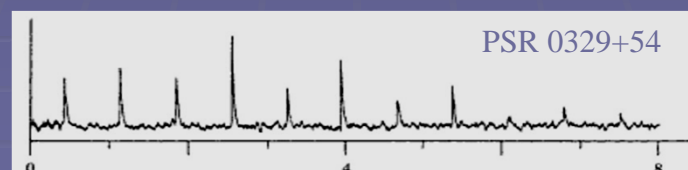
Antony Hewish

🏆 1/2 of the prize
United Kingdom

University of Cambridge
Cambridge, United Kingdom
b. 1924

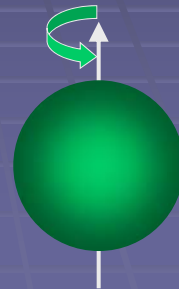
パルサーのパルスの性質

- 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。



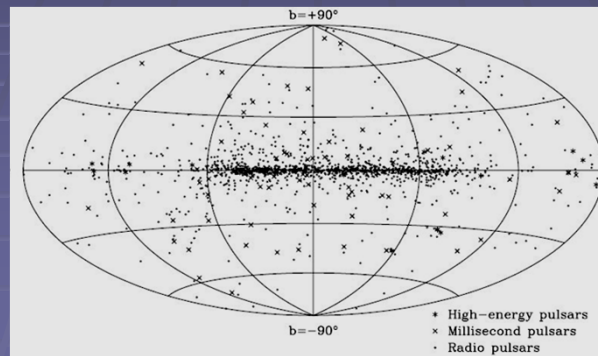
かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった



光とX線で見たかに星雲のパルサー

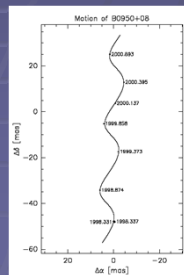
パルサーの分布

- 現在2000個近くのパルサーが知られる
- 銀河面に集中。しかし、高い銀緯にも存在する
(近傍天体または高速度天体)

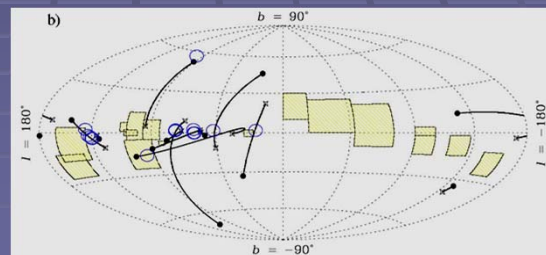


パルサーの運動

- いくつかのパルサーはVLBI観測等により精密に距離と運動が測られている。
- パルサーは極めて大きな固有運動を持っている
($v \sim 300 - 1000 \text{ km/s}$, 銀河回転速度よりも大きい)
- 超新星爆発の非対称により放り出されたと考えられる(Pulsar-kick)



パルサーの位置観測例



運動速度と年齢から得られたパルサーの運動の軌跡

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 ($v \sim 1000 \text{ km/s}$)
 $E_k \sim \frac{1}{2} m v^2 \sim 1 \times 10^{42} \text{ J} \ll E_{\text{sn}_k}$

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

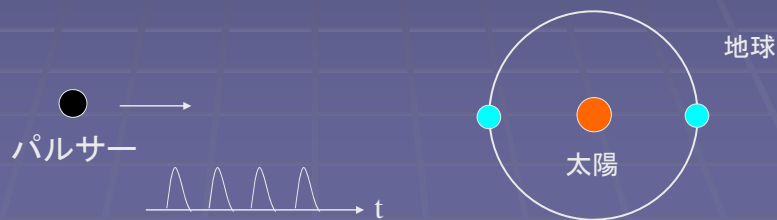
- 基本的観測量:パルスの到達時間
- これを精密に測定することを、タイミング観測という。
- 非常に単純な観測であるが、この観測からさまざまな情報が得られる(ただし、周期の安定したパルサーのみ利用可能)

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)

パルサータイミングと天体位置

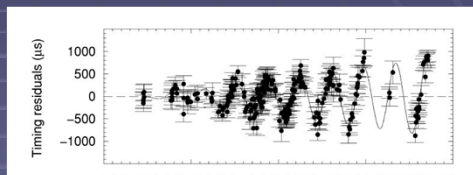
- パルサータイミングの変動計測から、天体位置の情報が得られる。
- タイミングの遅れ幅 : $\tau \sim 1\text{AU}/c \sim 8\text{ min} \sim 500\text{s}$
- タイミングの精度 : $\Delta\tau \sim 1\ \mu\text{s}$
位置精度 $\theta \sim \Delta\tau/\tau \sim 2 \times 10^{-9}\text{ rad} \sim 0.4\text{ mas}$



パルサータイミングによる位置計測

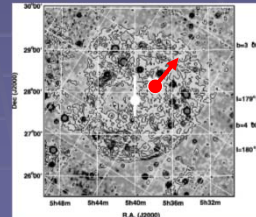
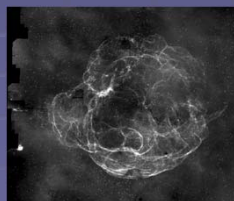
- PSJ J0538+2817のタイミング観測例(Kramer et al. 2003)
- 天体が点球面上に静止しているとするとき、タイミングの残差に年周成分が見られ、残差が増大する。

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



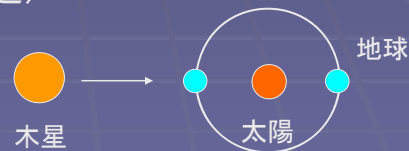
超新星残骸S147とパルサーの位置関係

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



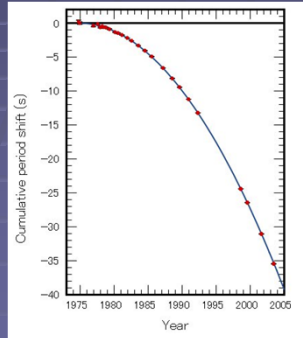
公転周期はたったの7.7時間
2天体間は70万~350万km



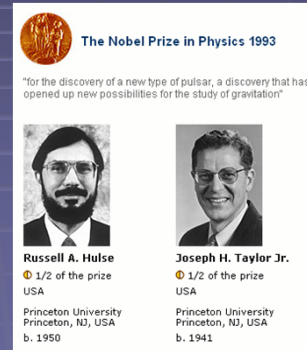
アレシボ望遠鏡

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



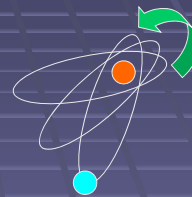
公転周期が現象する様子。一般相対論の重力波放出による予測とぴったり一致



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、

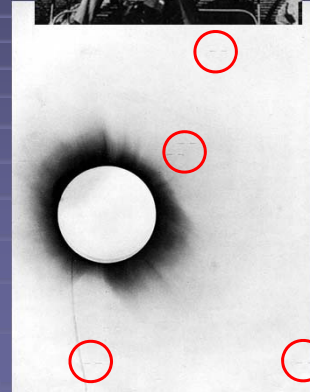
$v/c \sim 10^{-4}$, $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$ である。

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

$$\alpha = 4 GM / c^2 r \sim 1.7 \text{ 秒角}$$

- 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。

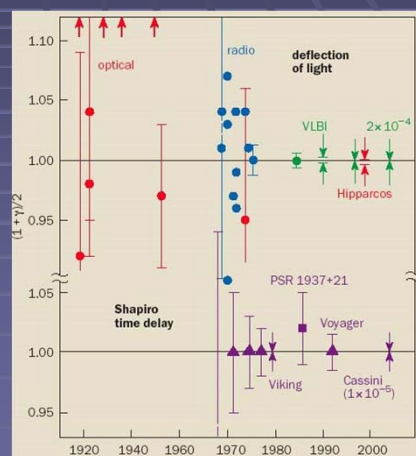


1919年の皆既日食と周囲の星

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

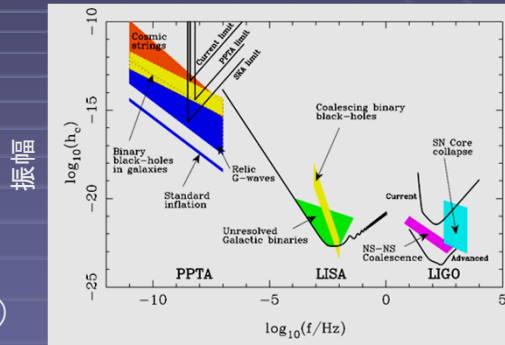
相対論パラメーターの測定の歴史



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)
- レーザー干渉計型の重力波望遠鏡と異なる周波数帯を観測可能



重力波周波数

振幅

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