

宇宙科学II（電波天文学）
第8回

星の死（パルサー、超新星）

星の死

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。

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

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

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

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

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

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

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

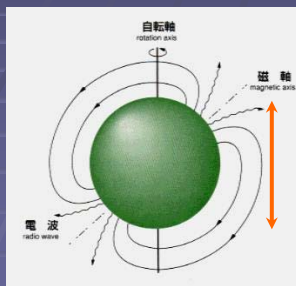
これより、

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

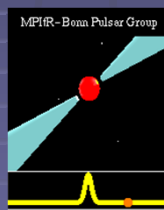
- 電子縮退のとき、 $m=m_e$ として、 $R \sim 4000 \text{ km}$
- 中性子縮退のとき、 $m=m_n=m_p$ として、 $R \sim 2 \text{ km}$
この数値は、上記の天体の半径の凡その目安となる。

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



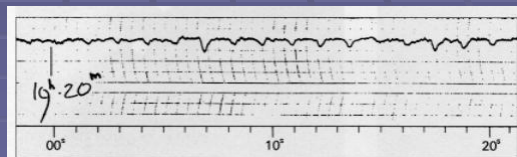
かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった。

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)

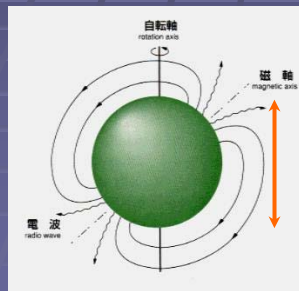
使用した望遠鏡



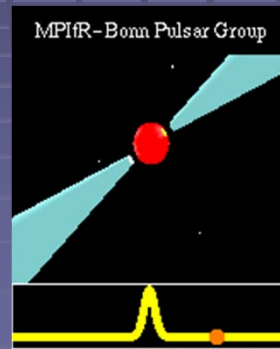
観測された周期パルス

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。
LGM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

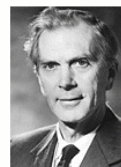
- Ryle (干渉計の開発)
- Hewish (パルサーの発見)

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

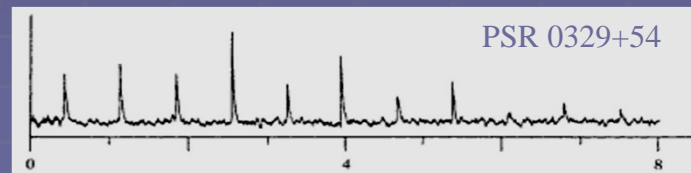


Antony Hewish
1/2 of the prize
United Kingdom

University of Cambridge
Cambridge, United Kingdom
b. 1924

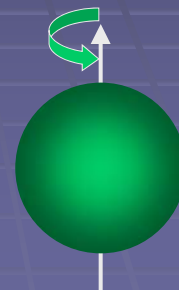
パルサーのパルスの性質

- 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。



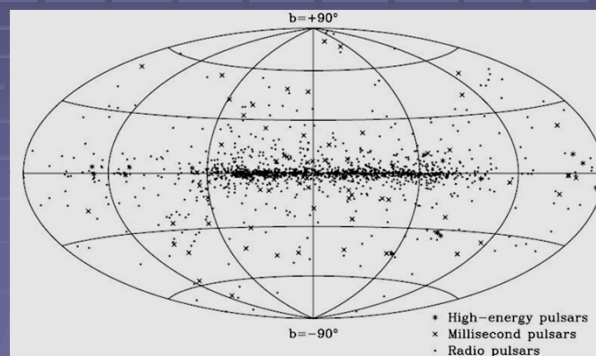
かに星雲：1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった



光とX線で見たかに星雲のパルサー

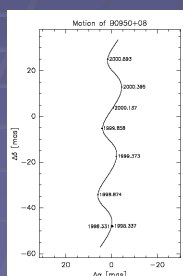
パルサーの分布

- 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）

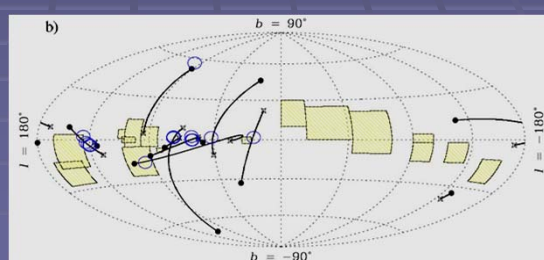


パルサーの運動

- 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)

かにパルサーの年齢

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

$\tau \sim$ 約2000年

- 実際は1054年の爆発

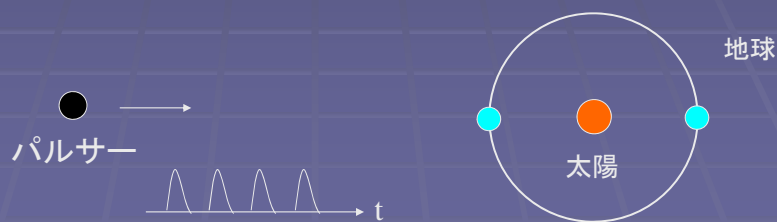
中国の「宋史」
藤原定家の「明月記」などに記録あり。

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

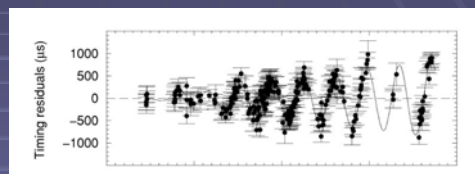
- パルサータイミングの変動計測から、天体位置の情報得られる。
- タイミングの遅れ幅 : $\tau \sim 1\text{AU}/c \sim 8\text{ min} \sim 500\text{s}$
- タイミングの精度 : $\Delta\tau \sim 1\ \mu\text{s}$
位置精度 $\theta \sim \Delta\tau/\tau \sim 2 \times 10^{-9}\text{ rad} \sim 0.4\text{ mas}$



パルサータイミングによる位置計測

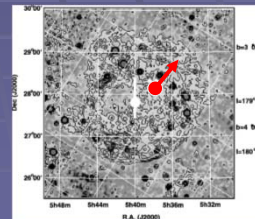
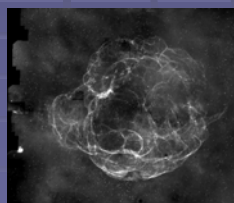
- PSJ J0538+2817のタイミング観測例(Kramer et al. 2003)
- 天体が点球面上に静止しているとするとき、タイミングの残差に年周成分が見られ、残差が増大する。

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



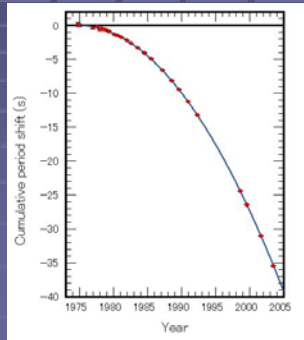
公転周期はたったの7.7時間
2天体間は70万~350万km



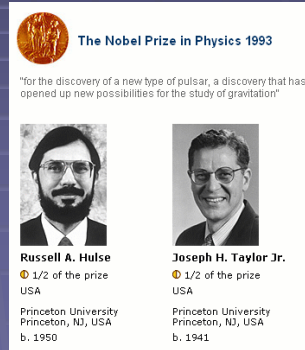
アレシボ望遠鏡

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



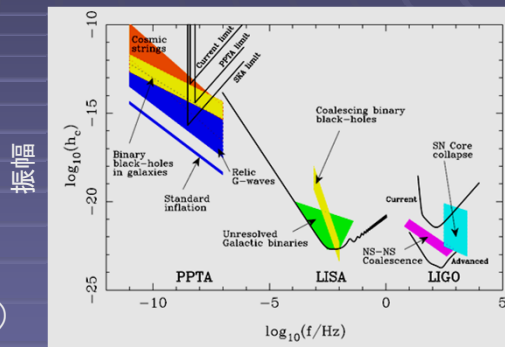
公転周期が現象する様子。一般相対論の重力波放出による予測とぴったり一致



1993年度
ノーベル賞受賞

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