

6.1 中性子星

中性子星: 1933にツビッキーとバーデによってモデル提唱

「超新星は普通の星から新しい形の星, 中性子星への遷移を表しており, それは恒星進化の終着点であろう。そのような星は半径が非常に小さく、密度が非常に高い。中性子は通常の原子核や電子よりもはるかに密に詰めることができるため、冷たい中性子星における「重力充填」エネルギーは非常に大きくなり、ある状況下では通常の原子核充填率をはるかに超えるかもしれない。」

中性子が非常に密に詰め込まれている天体

強力な重力によるポテンシャルは核力を上回っている



フリッツ・ツビッキー (Wikipedia)

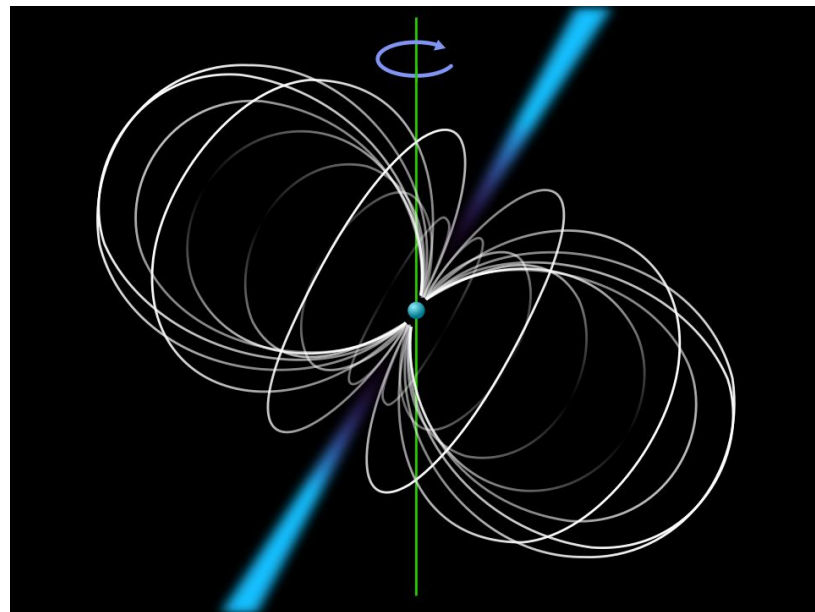
6.1 パルサー

パルサー: 磁化された中性子星、1.4ミリ秒から8.5秒の短い電波パルスを周期的に放射しているように見える

自転しながら放射線のビームを放出し、ビームが観測者の視線を横切ることで点滅するように見えている

点滅周期は中性子星の自転周期に一致し、安定している

ビームの発生機構はよく分かっていない



パルサー (Wikipedia)

6.1 パルサーの性質

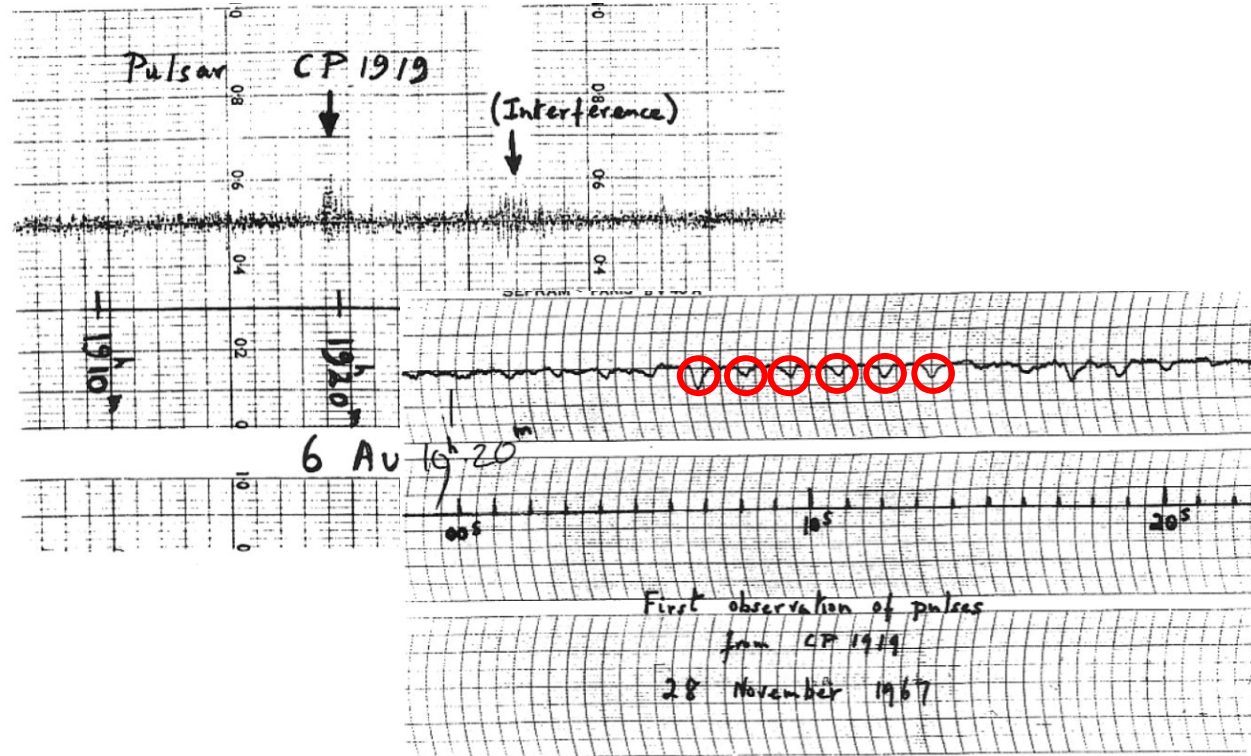
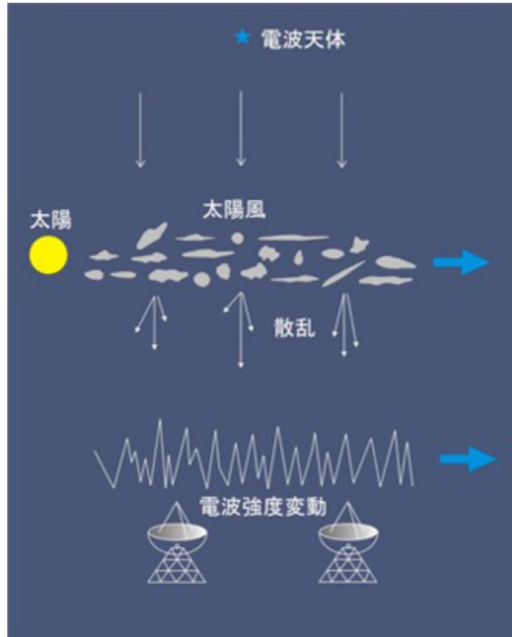
パルサーは以下の性質を持つため、天体物理学における有用なツールである:

1. 深い重力ポテンシャル、原子核を超える高い密度、高い磁場強度など、地球上で再現不可能な環境を持つ
2. パルス周期は 10^{-16} の誤差で計測できるので、様々な物理量を正確に測る基準として使える

(連星系内のパルサーが放出する重力放射のパワー、中性子星の質量、強い重力場における一般相対論的効果、惑星と同じくらい軽い連星系の伴星からの軌道摂動、正確なパルサーの位置と固有運動、宇宙全体の超大質量ブラックホールの合体による長波長重力放射...etc)

6.1.1 パルサーの発見

1967年、系外光源による低周波の惑星間空間シンチレーションの計測中、偶然発見された



惑星間空間シンチレーション
(名古屋大学 宇宙地球環境研究所 太陽圏研究部)

6.1.2 中性子星の密度

中性子星の自転周期 P に対し角速度を $\Omega = 2\pi/P$ とすると、
自転する天体が重力的に拘束される条件は

$$\Omega^2 R < \frac{GM}{R^2} \Rightarrow P > \left(\frac{3\pi}{G\rho} \right)^{1/2} \quad (\rightarrow \text{ホワイトボード})$$

(6.2)より、

$$\rho > \frac{3\pi}{GP^2}$$

自転周期は中性子星の平均密度の下限を与える

6.1.2 パルサーの密度

ex1. PSR B1919+21

$$P = 1.3 \text{ s}, \rho > 10^8 \text{ g cm}^{-3}$$

ex2. PSR B0531+21 (かに星雲)

$$P = 0.033 \text{ s}, \rho > 1.3 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$$

中性子星は超新星の残骸であるという指摘の裏付け

ex3. PSR J1748-2446ad

$$P = 1.4 \times 10^{-3} \text{ s}, \rho > 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

6.1.2 中性子星の半径

チャンドラセカール質量: 電子の縮退圧によって支えられる質量の限界

$$M_{\text{Ch}} \sim \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{m_{\text{p}}^2} \sim 1.4 M_{\odot}$$

(6.2)より

$$R < \left(\frac{GM P^2}{4\pi^2} \right)^{1/3}$$

自転周期はチャンドラセカール質量における中性子星の半径の上限を与える

6.1.2 カノニカル中性子星

カノニカル中性子星:

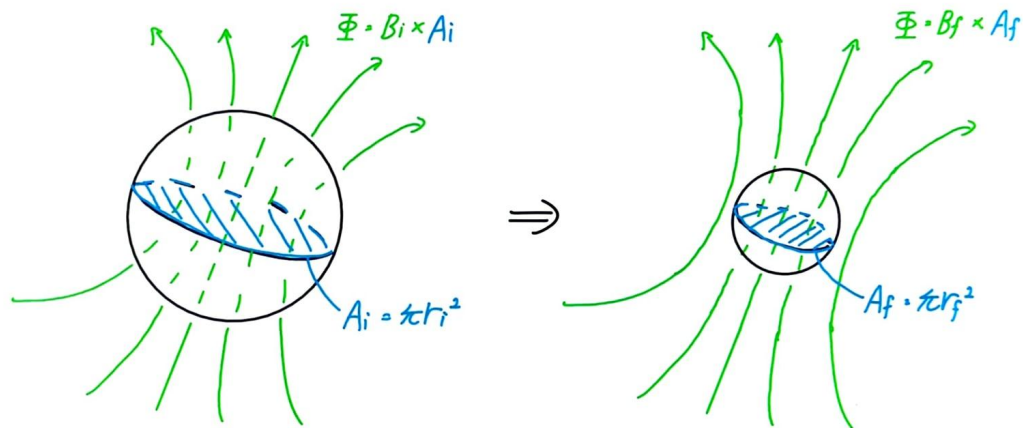
$$M \sim 1.4 M_{\odot}, R \sim 10 \text{ km}, I = \frac{2MR^2}{5} \sim 10^{45} \text{ g cm}^2$$

観測されている中性子星の多くで $M \sim 1.4 M_{\odot}$

$M \sim 3 M_{\odot}$ の場合、崩壊してブラックホールとなる

6.1.3 パルサーの磁場

恒星が縮小して中性子星になることで、磁場が増大する (→ホワイトボード)



ダイナモ効果によって、非常に強い磁場を持つパルサー(マグネター)が生じる可能性がある

角運動量保存より、恒星が縮小して中性子星になると自転速度が上昇した結果、パルサーは非常に速い自転速度を持つ

6.1.4 磁気双極子でのラーモアの公式

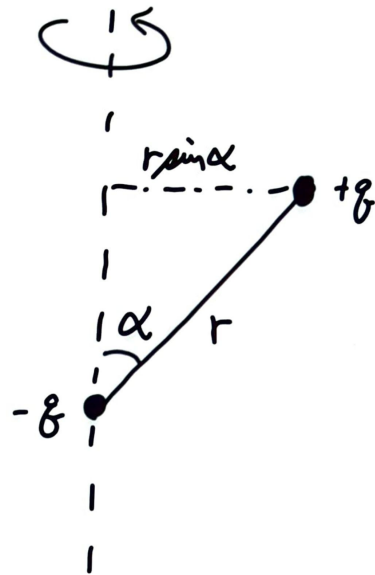
電気双極子におけるラーモアの公式より、

$$P_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{(q\ddot{r} \sin \alpha)^2}{c^3} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{p}_{\perp})^2}{c^3}$$

ラーモアの公式は磁場に対しても有効

磁気双極子におけるラーモアの公式から磁気双極子放射は

$$P_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{(\ddot{m}_{\perp})^2}{c^3}$$



6.1.4 パルサーの磁気双極子放射

半径 R 、表面の磁束密度 B の一様導体球に対し磁気双極子モーメントの大きさは $m = BR^3$ 、また角速度 $\Omega = 2\pi/P$ で回転する磁気双極子モーメントの時間2回微分は $\ddot{m}_\perp = m_\perp \Omega^2$ で与えられるので

$$P_{\text{rad}} = \frac{2}{3} \frac{m_\perp^2 \Omega^4}{c^3} = \frac{2}{3c^3} (BR^3 \sin \alpha)^2 \left(\frac{2\pi}{P} \right)^4$$

パルサーは周波数が非常に低くイオン化したISMを透過できないが、放射によって回転エネルギーが失われることで周期は遅くなる($\dot{P} > 0$)

放射はエネルギーを周囲の星雲に分け与える役割も持つ

6.1.5 中性子星の回転運動エネルギー

球の慣性モーメントから、カノニカル中性子星の慣性モーメントは

$$I = \frac{2MR^2}{5} \sim 10^{45} \text{ g cm}^2$$

かにパルサーと同様の周期 $P = 0.033$ s で回転するカノニカル中性子星の回転運動エネルギーは、

$$E = \frac{I\Omega^2}{2} = \frac{2\pi^2 I}{P^2} \sim 1.8 \times 10^{49} \text{ ergs}$$

6.1.5 スピンダウン光度

回転エネルギーの損失率はスピンダウン光度と呼ばれ、磁気双極子放射の光度と等しいものと推測される:

$$-\dot{E} = -I\Omega\dot{\Omega} = \frac{4\pi^2 I \dot{P}}{P^3}$$

かにパルサー($P = 0.033$ s, $\dot{P} = 10^{-12.4}$, $I = 10^{45}$ g cm²)については
 $-\dot{E} \sim 4 \times 10^{38}$ erg s⁻¹ $\sim 10^5 L_{\odot}$

かにパルサーによる長波長の磁気双極子放射は周囲のかに星雲に吸収され、電波やX線として再放射される

実際、かに星雲のボロメトリック光度 \sim かにパルサーのスピンダウン光度

6.1.6 最小磁場強度

$P_{\text{rad}} \sim -\dot{E}$ とすると、(6.12)、(6.20)と $1/\sin^2 \alpha$ から磁場強度の最小値が求められる:

$$B > \left(\frac{3c^3 I}{8\pi^2 R^6} \right)^{1/2} (P\dot{P})^{1/2}$$

カノニカルなパルサーについては以下が成り立つ(パルサーの特性磁場):

$$\left(\frac{B}{\text{gauss}} \right) > 3.2 \times 10^{19} \left(\frac{P\dot{P}}{\text{s}} \right)^{1/2}$$

かにパルサーでは $B > 4 \times 10^{12}$ gauss, $U_B = B^2/8\pi > 6 \times 10^{23}$ erg cm⁻³

1 cm³ あたり 2 GW これは大型原子力発電所の年間出力に相当

6.1.7 特性年齢

$P_{\text{rad}} \sim -\dot{E}$ かつ $B \sin \alpha$ が時間変動しない場合、(6.23)から求められる $P\dot{P}$ は時間変動しないので、

$$\int_{P_0}^P P dP = \int_0^\tau P \dot{P} dt = P \dot{P} \int_0^\tau dt \Rightarrow \frac{P^2 - P_0^2}{2} = P \dot{P} \tau$$

$P_0^2 \ll P^2$ とすると、パルサーの特性年齢を以下のように定義できる:

$$\tau \equiv \frac{P}{2\dot{P}}$$

観測量から求められるが、回転速度が早い若いパルサーは、扁平なため四重極重力放射により減速が早まり、特性年齢が大きく見積もられることがある

かにパルサーの特性年齢は1300 yr、これは実際の年齢 (1000 yr) より大きい

6.1.7 パルサー特性図

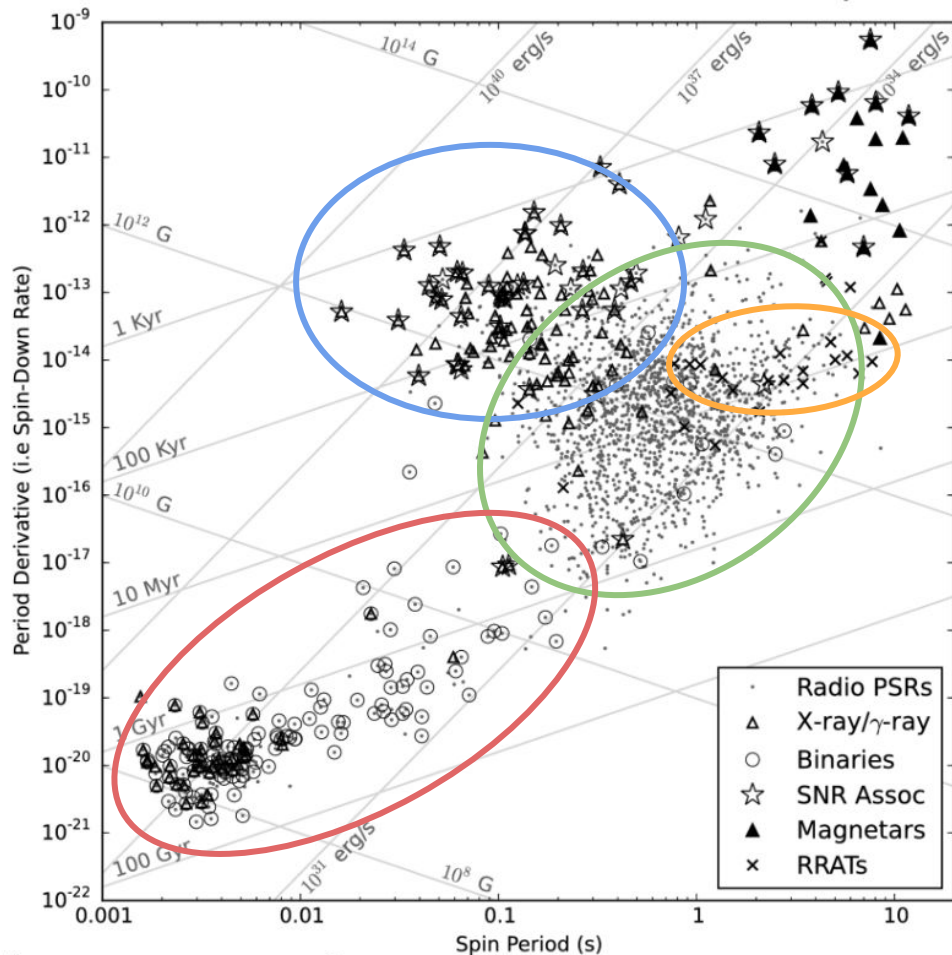
パルサー特性図は、パルサーの性質を観測値と P で表す

スピンドウン光度、最小磁場強度、特性年齢はダイアグラム上の線で表される

若いパルサー(青)はSNRの近くに存在し、高エネルギーの放射線を放出している
これらは後に周期が約1秒まで減速したパルサーへ進化していく

RRAT(橙): 散発的な放射を行うパルサー

ミリ秒パルサー(赤): ほとんどが連星系に属し、伴星からのガスが降着することで角運動量が増加して、周期が非常に速くなっている



6.1.8 制動指数

$P_{\text{rad}} \sim -\dot{E}$ に(6.12)と(6.18)を代入すると $\dot{\Omega} \propto \Omega^3$ (→ホワイトボード)
となるので、これより角速度とその時間微分がべき乗の関係にあるとしてその指数を制動指数と呼ぶ:

$$\dot{\Omega} = C\Omega^n \Rightarrow n = \frac{\Omega\ddot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2} = 2 - \frac{P\ddot{P}}{\dot{P}^2} \quad (\rightarrow\text{ホワイトボード})$$

結局、観測値である P 、 \dot{P} 、 \ddot{P} から制動指数は求められる

観測値と期待値 $n = 3$ を比較し、磁気双極子放射以外のスピンドアウン機構を検討したり、パルサーの年齢や初期スピン周期をより正確に調べることができる

6.1.9 パルサーの一生

特性年齢が 10^5 yr未満の若いパルサーは、通常SNRの内部か周辺に存在する

磁場が一定の場合、ダイアグラム上の線に沿って右下へ移動する

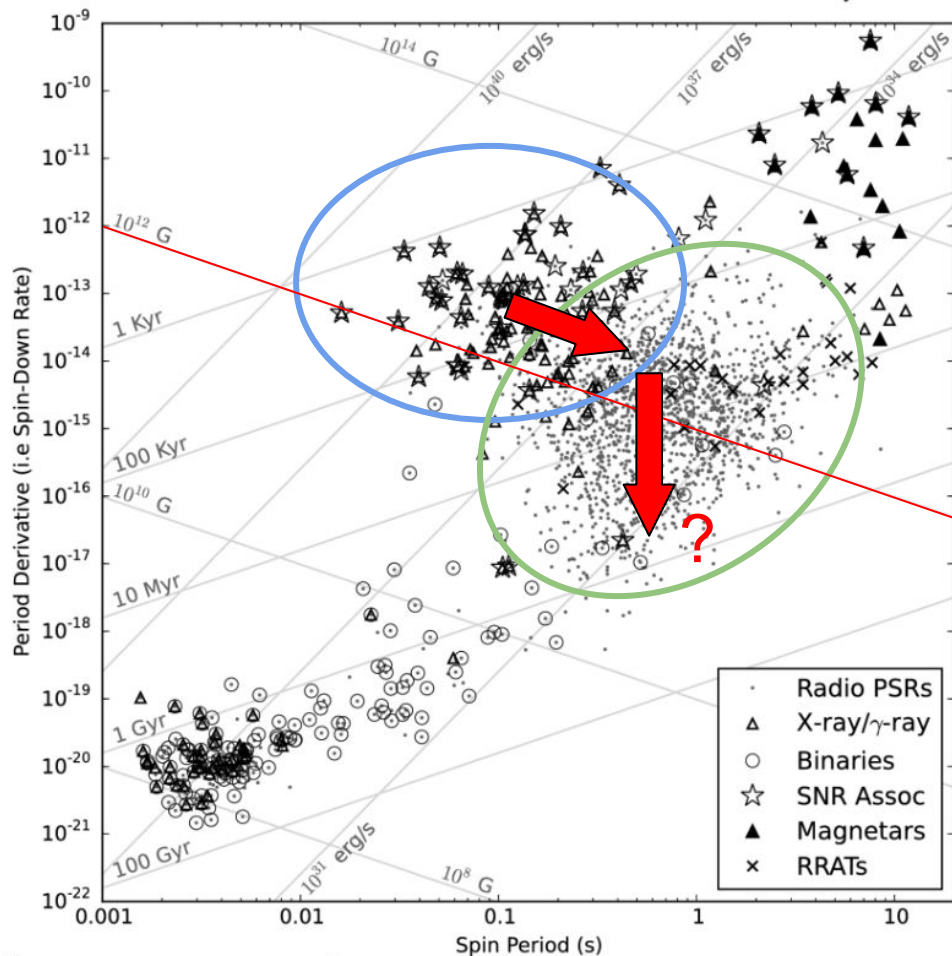
特性年齢が 10^5 yr以上のパルサーは周囲のSNRが消えるか、親SNRから脱出する

年老いたパルサーは磁場が減衰していき、特性図上では真下に移動していくと考えられる

その後なんらかのメカニズムで

- ・磁場が非常に弱くなる
- ・自転が非常に遅くなる

のどちらかが起こり、パルサーはほとんど電波を放出しなくなる



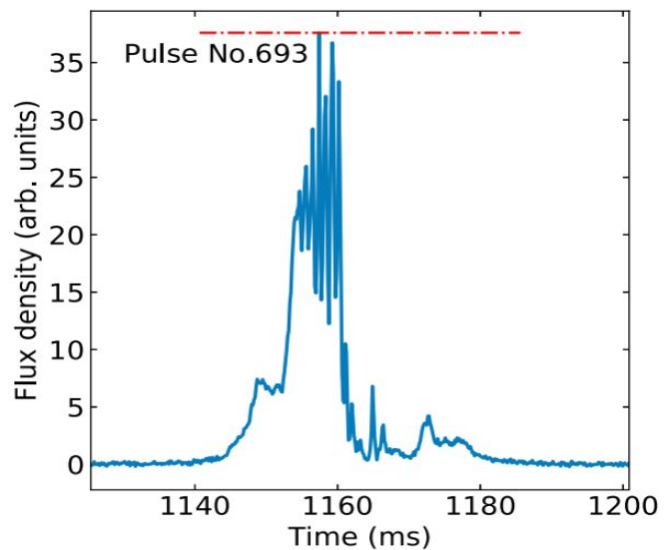
6.1.9 RRAT

RRAT: 散発的な放射を行うパルサー

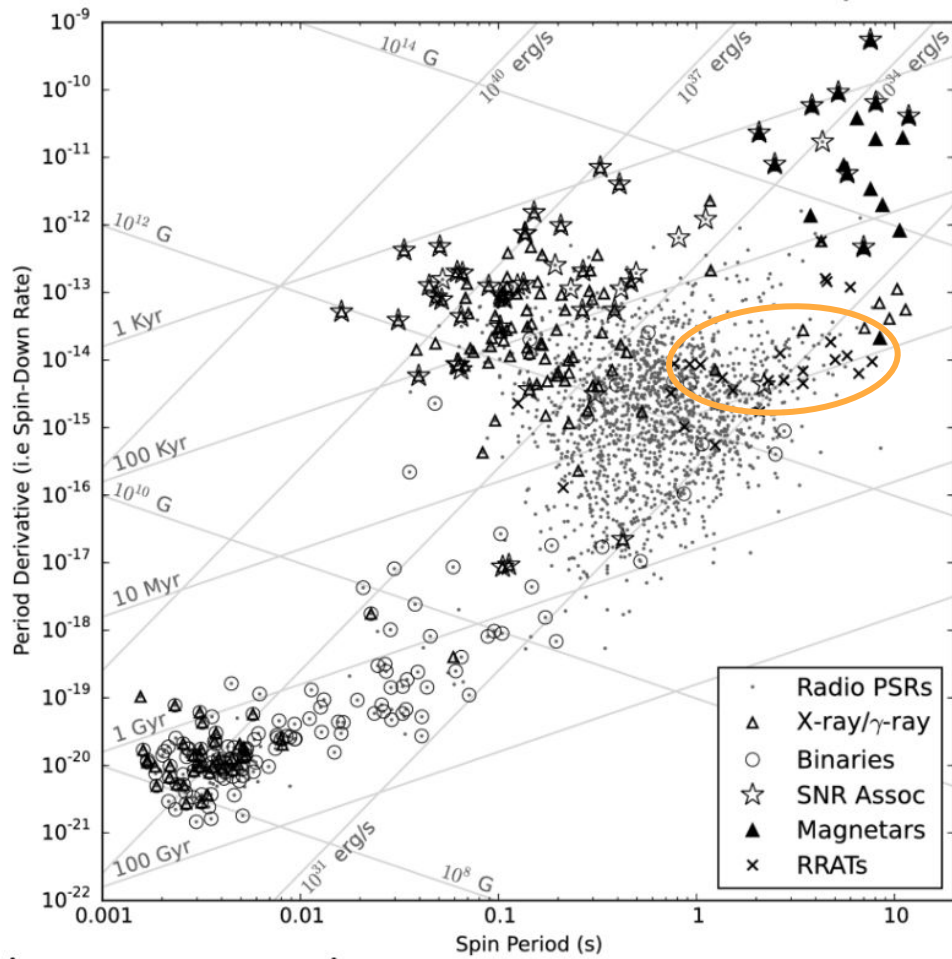
観測可能周期を持つ場合、通常1秒以上

電波放出をほとんどしなくなっている

古いパルサーも含む



Dang+2024



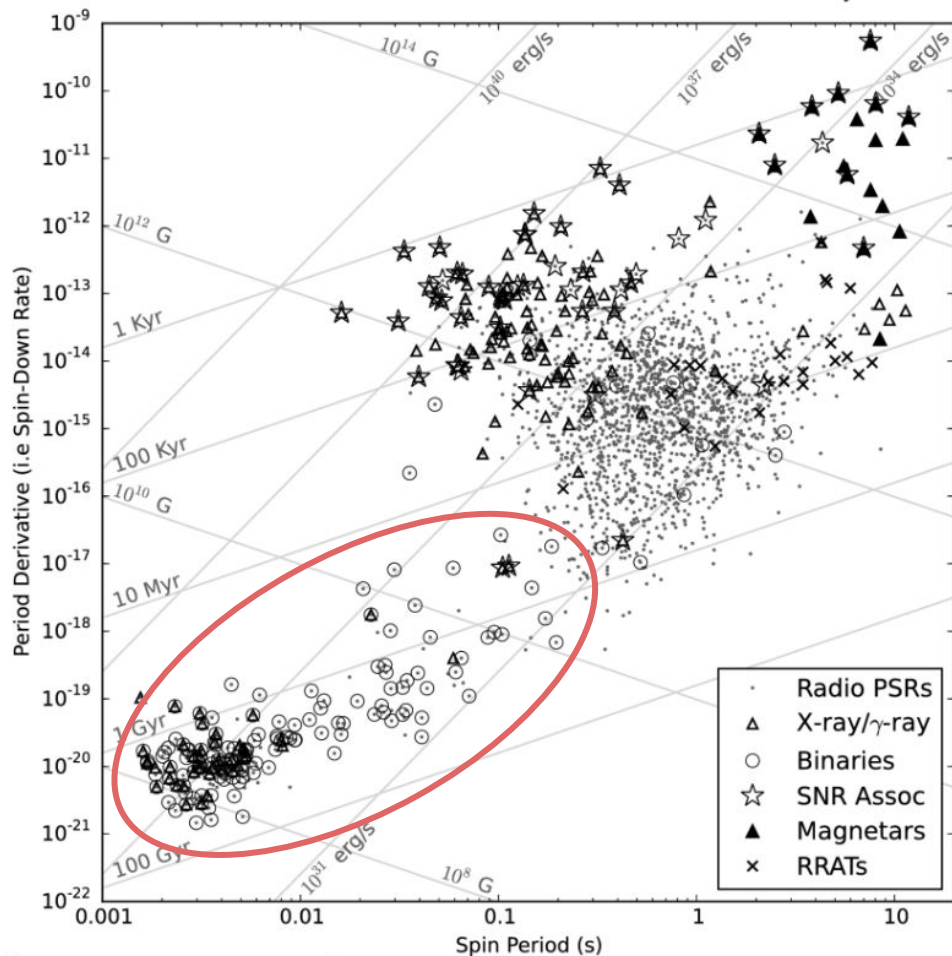
6.1.9 連星系パルサー

連星系におけるパルサーは周期が短く、磁場が比較的小さいが、伴星から質量や角運動量を引き寄せるため電波の放射が可能

伴星から引き寄せたプラズマによる局所的な磁場が元の中性子星の磁場を弱めていると考えられている

物質降着時、磁極と降着円盤は非常に高温であり、X線を放射する(LMXB)

電波放射と同様、X線もパルサーの自転によって変動する



6.1.9 連星系パルサーの離心率

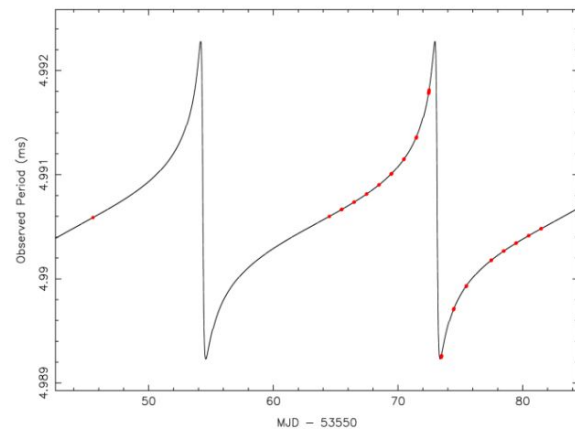
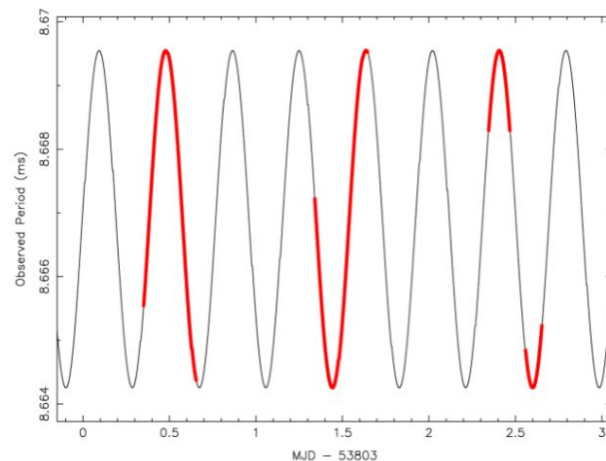
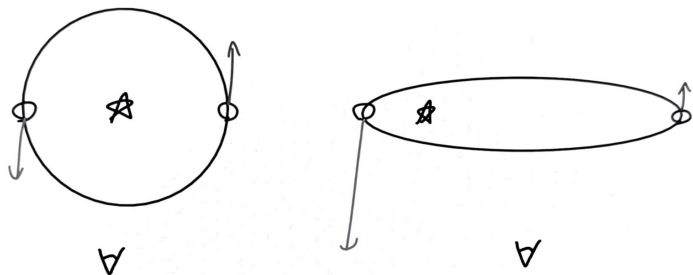
連星系パルサーは通常、伴星からの降着過程で潮汐力が働き、公転軌道の離心率が著しく低くなる軌道が円形に極めて近いので、パルス周期は滑らかに変化する

(例:MSP J1748-2446N、離心率 4.6×10^{-5} 、上図)

軌道の離心率が高い場合、伴星は超新星爆発を終えた中性子星であることが多く、爆発によって軌道が不安定になったと考えられる

軌道が潰れた楕円になるので、近点と遠点の間の速度変化が大きく、パルス周期は極端に変化する

(例:MSP J0514-4002A、離心率0.888、下図)



6.1.9 球状星団内でのパルサーの「リサイクル」

球状星団では銀河系円盤よりも恒星間相互作用が高頻度で起こるため、低質量伴星が他の恒星に弾き飛ばされ、パルサーに再び質量降着が起こることがある

このため球状星団内では銀河系円盤より高密度でMSPが存在する

このような相互作用は、パルサー-主系列星連星や、非常に偏心したMSPなどの奇妙な系を生み出すこともある

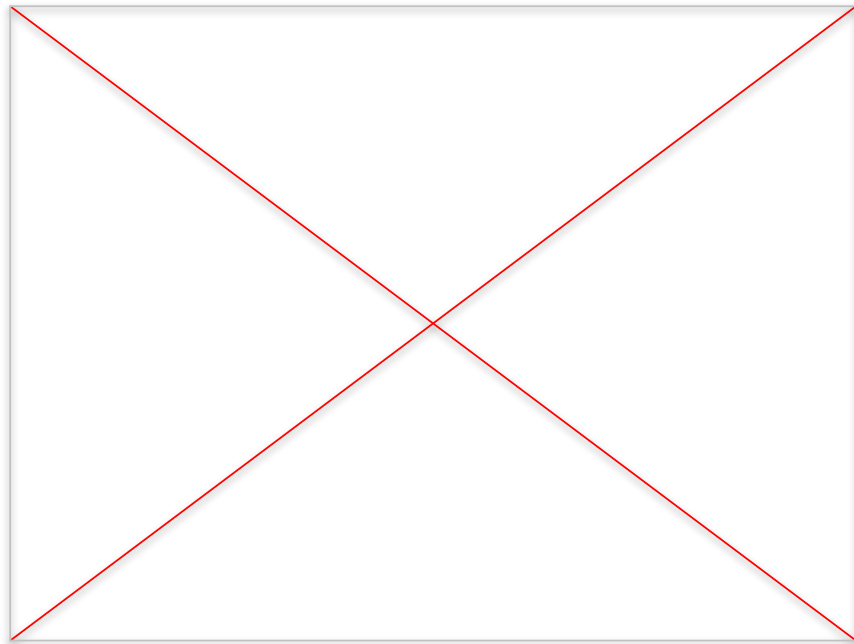
6.1.9 ブラックウィドウ、レッドバック

伴星を消滅させ孤立したMSPが、全体の15%存在

ブラックウィドウパルサー: パルサーと伴星の距離が極めて近く、パルサーからの強い放射によって伴星が蒸発している系

レッドバックパルサー: ブラックウィドウより伴星が大きく、降着ディスクが生じることもある

このような系はいずれ伴星を消滅させると考えられる
また伴星から蒸発したガスなどがパルサーからの放射を吸収する「食」が発生することもある



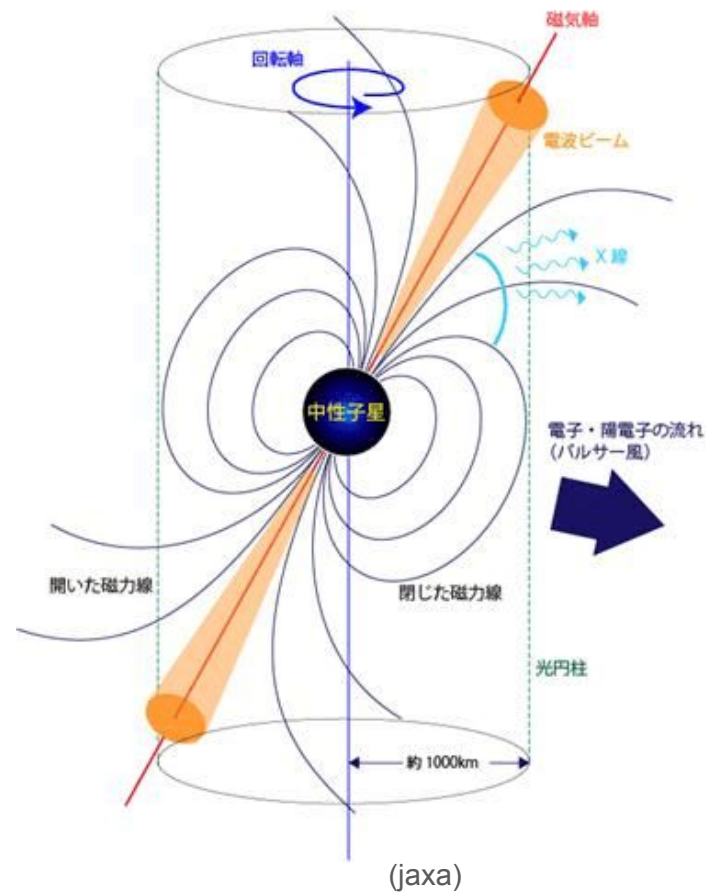
ブラックウィドウパルサー PSR J1311-3430が伴星を蒸発させる様子 (nasa.gov)

6.1.10 パルサーの磁場線

パルサーの表面などから生じた荷電粒子(電子やイオンなど)はパルサーの磁場線に沿って動き、ローレンツ力が0となる位置に分布する

パルサーの外側に分布した荷電粒子はパルサーと共回転するが、パルサーから離れすぎると振りほどかれてしまい、開いた磁場線となる

この境界に分布し回転する荷電粒子は光速で回転しており、境界を光円柱と呼ぶ



6.1.10 曲率放射

磁場に沿って動く荷電粒子は曲がった軌道をとるため曲率放射を放出するが、この放射は磁場線の面に沿って強く偏光しており、偏光の平面はパルサーの回転によって最大 180° まで回転する

MSPでは磁気圏内の相対論的効果が偏光に影響するものの、同様に強い偏光を示す

曲率放射によって生じた高エネルギーの光子は、磁場や低エネルギーの光子と相互作用して電子・陽電子対を生成する

これらの対はさらに高エネルギーの光子を放射し、この光子もまた電子・陽電子対を生成する
このようにして電子・陽電子対のカスケードが発生する

大量に生じた荷電粒子もまた磁場線に沿って動き、曲率放射などの放射を行う

パルサーがエネルギーを失い、自転速度が遅くなったり、磁場が弱くなるとカスケードが起こらなくなり、放射が起こらなくなる

6.1.10 コヒーレント放射

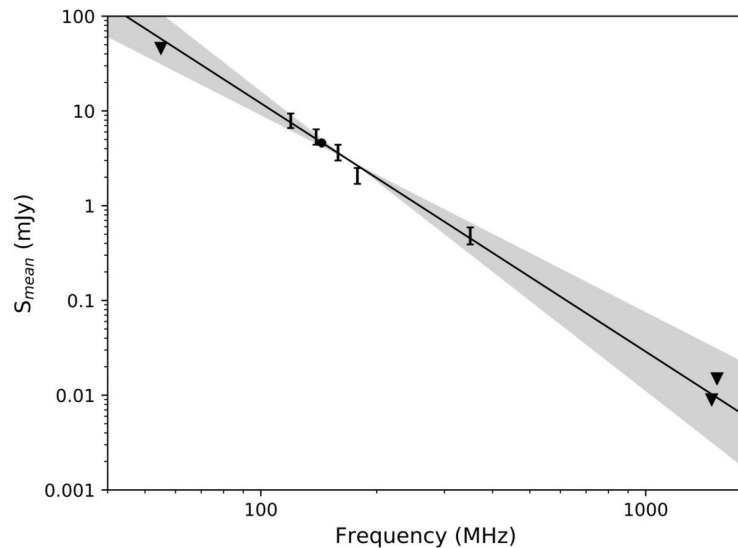
パルサーから放射される電子は波長より短い体積でまとまり、同位相で放射される(コヒーレント放射)

ラーモア公式より放射強度は電荷の二乗に比例するので、個の電子がコヒーレント放射する時の強度は

$(Ne)^2$ となり、個々の電子が独立に放射する時の強度の N^2 倍、結果パルサーは非常に高い輝度温度を持つ

コヒーレント放射の体積は短波長で小さくなるので、パルサーの放射強度は短波長側で小さくなる

パルサーのラジオスペクトル指数は(4.55)より典型的に
だが、 $\alpha < -3$ や $\alpha > -0.5$ の場合もある
 $\alpha \sim -1.7$



パルサー PSR J0250+5854 の
ラジオスペクトル、 $\alpha \sim -2.6 \pm 0.5$
(Tan+2018)