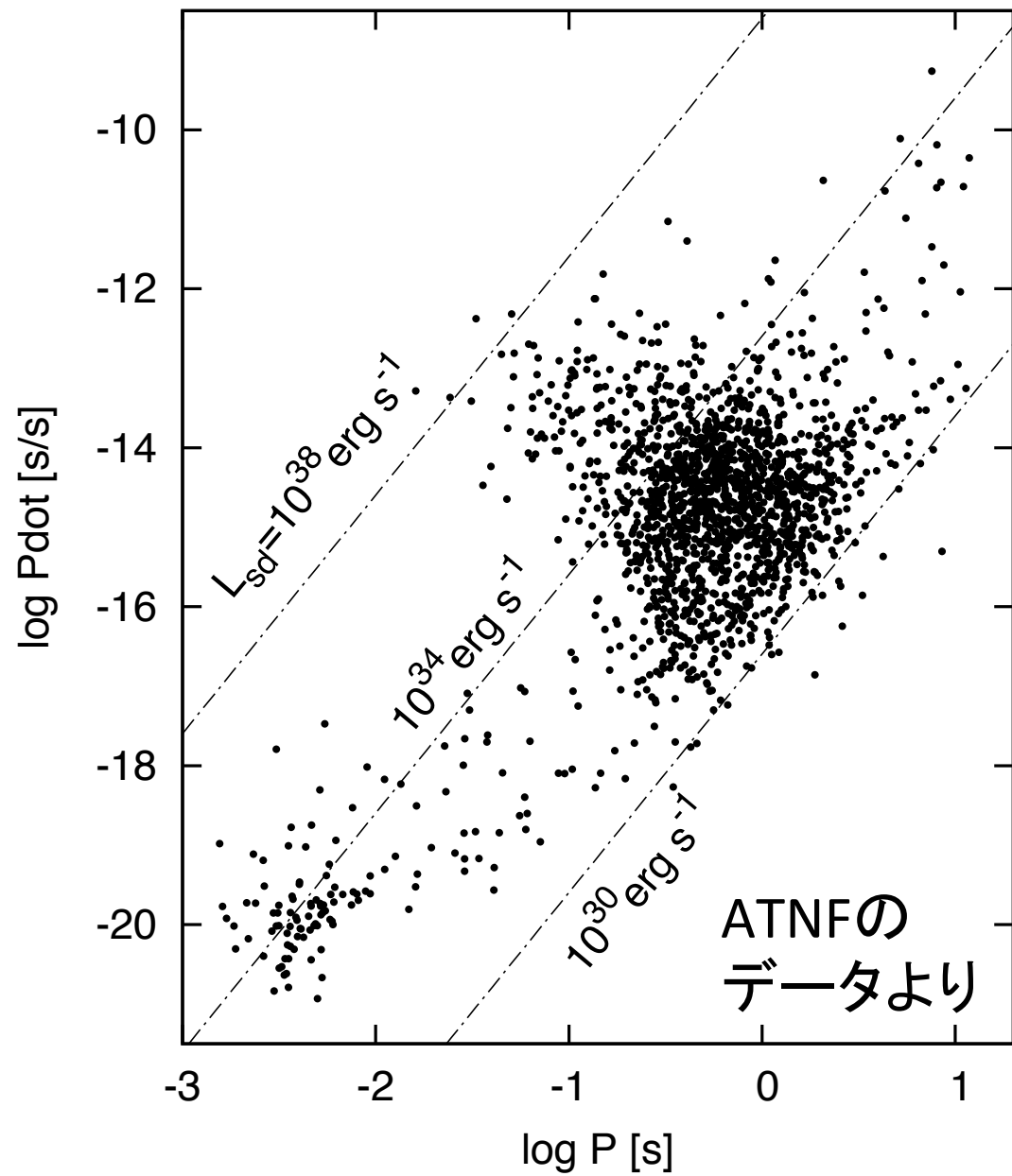


# パルサー磁気圏 構造とパルス放射

木坂 将大 (KEK)

# 回転駆動型パルサー



$$L_{sd} = I\Omega\dot{\Omega}$$

$I$ : 慣性モーメント

$$\Omega = 2\pi/P$$

回転速度の減少は  
星が持つ磁場が原因。

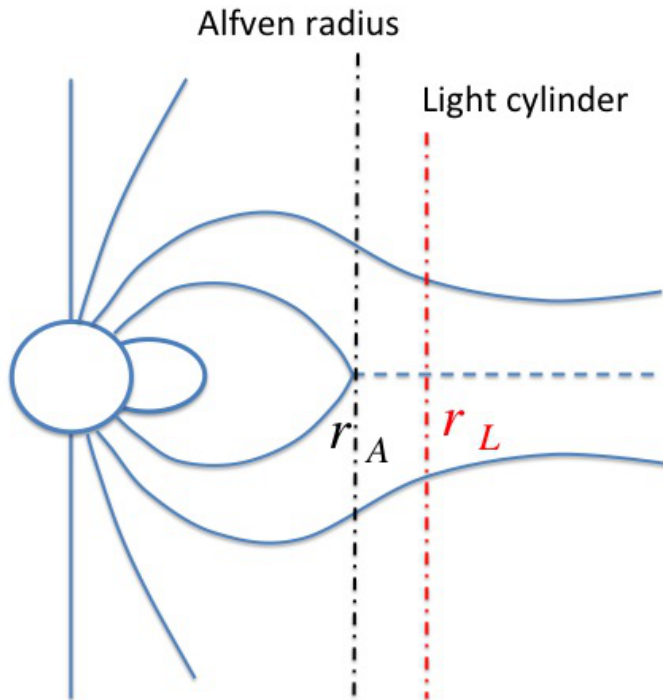
# 遠心力風問題

磁化した中心天体が回転

→ 電磁誘導によりプラズマが共回転。

→ ある距離  $r$  以降は磁場を振り切ってプラズマが流出。

→  $r\Omega$  程度の速度をもった遠心力風の形成。



・回転エネルギーだけでプラズマがどれだけエネルギーを持ち出すか？

・どのような機構で持ち出すか？

# 遠心力風問題

プラズマが十分ある  $\rightarrow$  遠心力風問題

$$n \gg n_{\text{GJ}} \sim \left| \frac{\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B}}{2\pi e c} \right| \quad \text{Goldreich-Julian density}$$

共回転電場  $\mathbf{E} = -(\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{B}/c$  を維持。

# パルサー風問題

プラズマが十分ある  $\rightarrow$  遠心力風問題

$$n \gg n_{\text{GJ}} \sim \left| \frac{\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B}}{2\pi e c} \right| \quad \text{Goldreich-Julian density}$$

共回転電場  $\mathbf{E} = -(\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{B}/c$  を維持。

パルサー磁気圏では、プラズマが十分あるとは限らない。

$$n_{\text{GJ}}(R_{\text{LC}}) \sim 10^4 \left( \frac{P}{0.1\text{s}} \right)^{-4} \left( \frac{B}{10^{12}\text{G}} \right) \text{cm}^{-3}$$

つまり、 $\mu$ 、 $\Omega$ 、 $\alpha$ を与えても解は一つに決まらず、プラズマ粒子の供給も影響する。

# 回転進化の状態遷移

$$\nu = 1/P$$

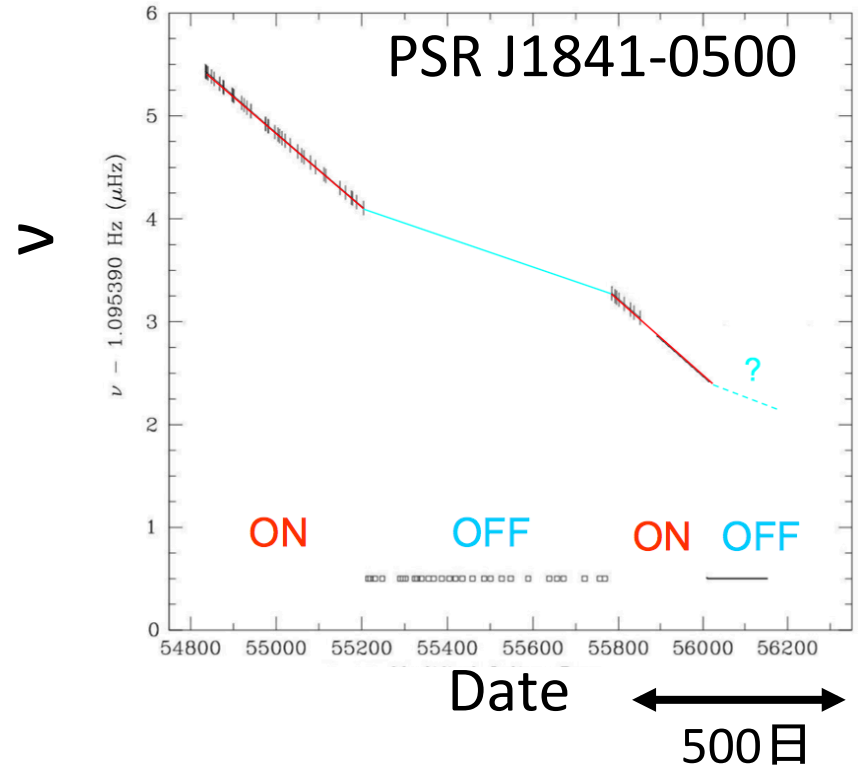
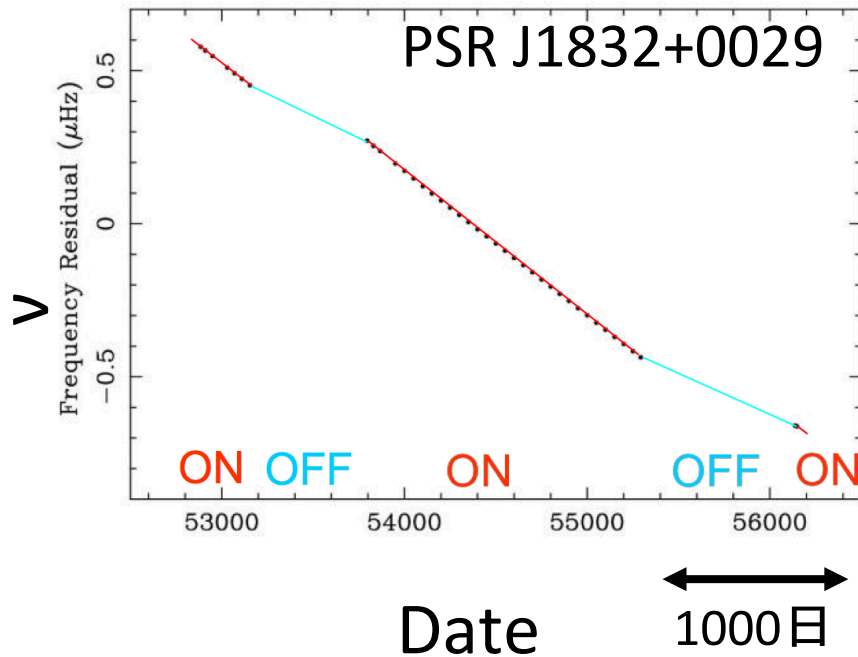
電波放射が観測される期間は回転周期の変化が大きい。

$$\dot{\Omega}_{\text{on}}/\dot{\Omega}_{\text{off}} = 1.7 \pm 0.1$$

(Lyne 09, Lorimer+ 12)

$$\dot{\Omega}_{\text{on}}/\dot{\Omega}_{\text{off}} = 2.5 \pm 0.1$$

(Camilo+ 12)

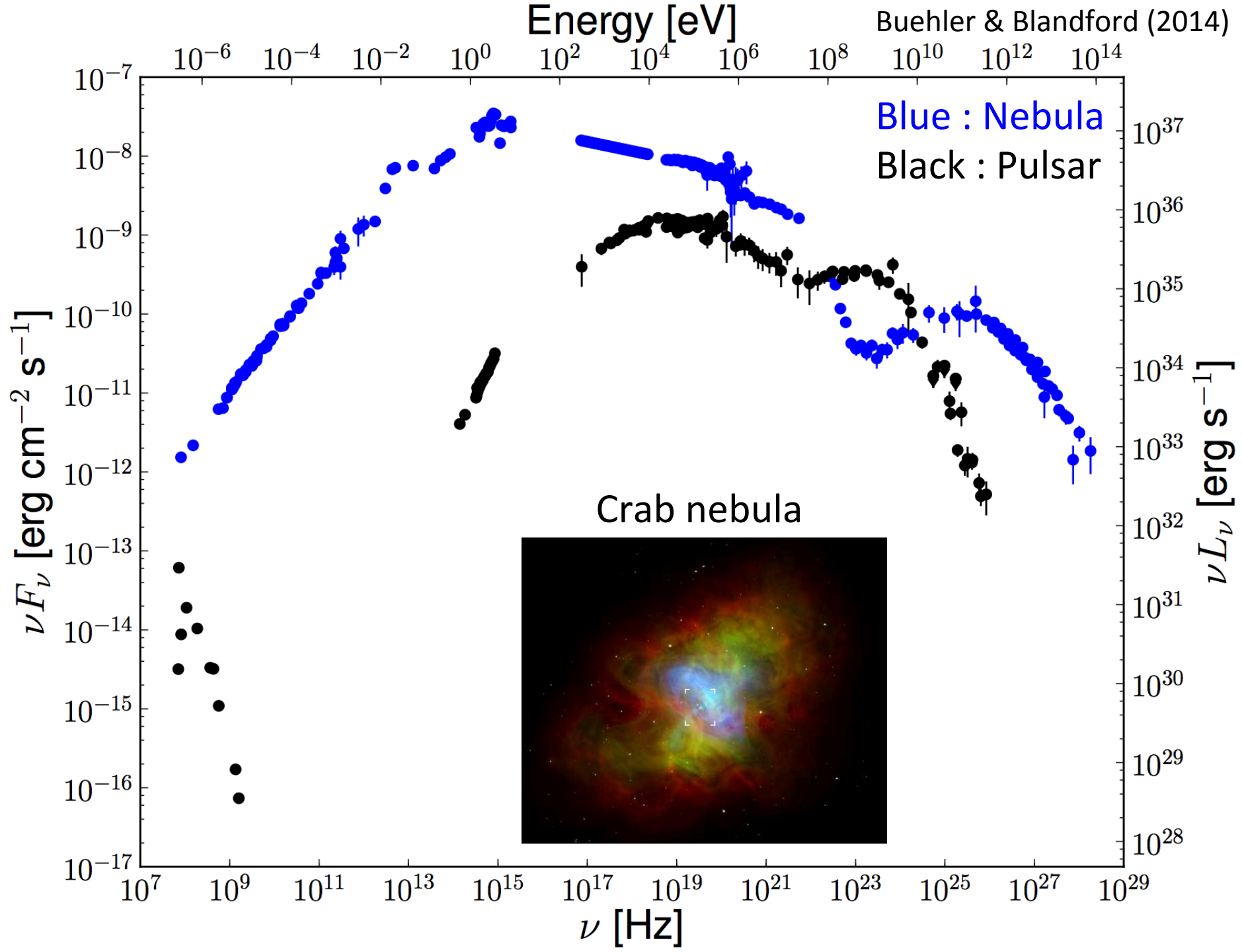


# プラズマ供給とパルス放射

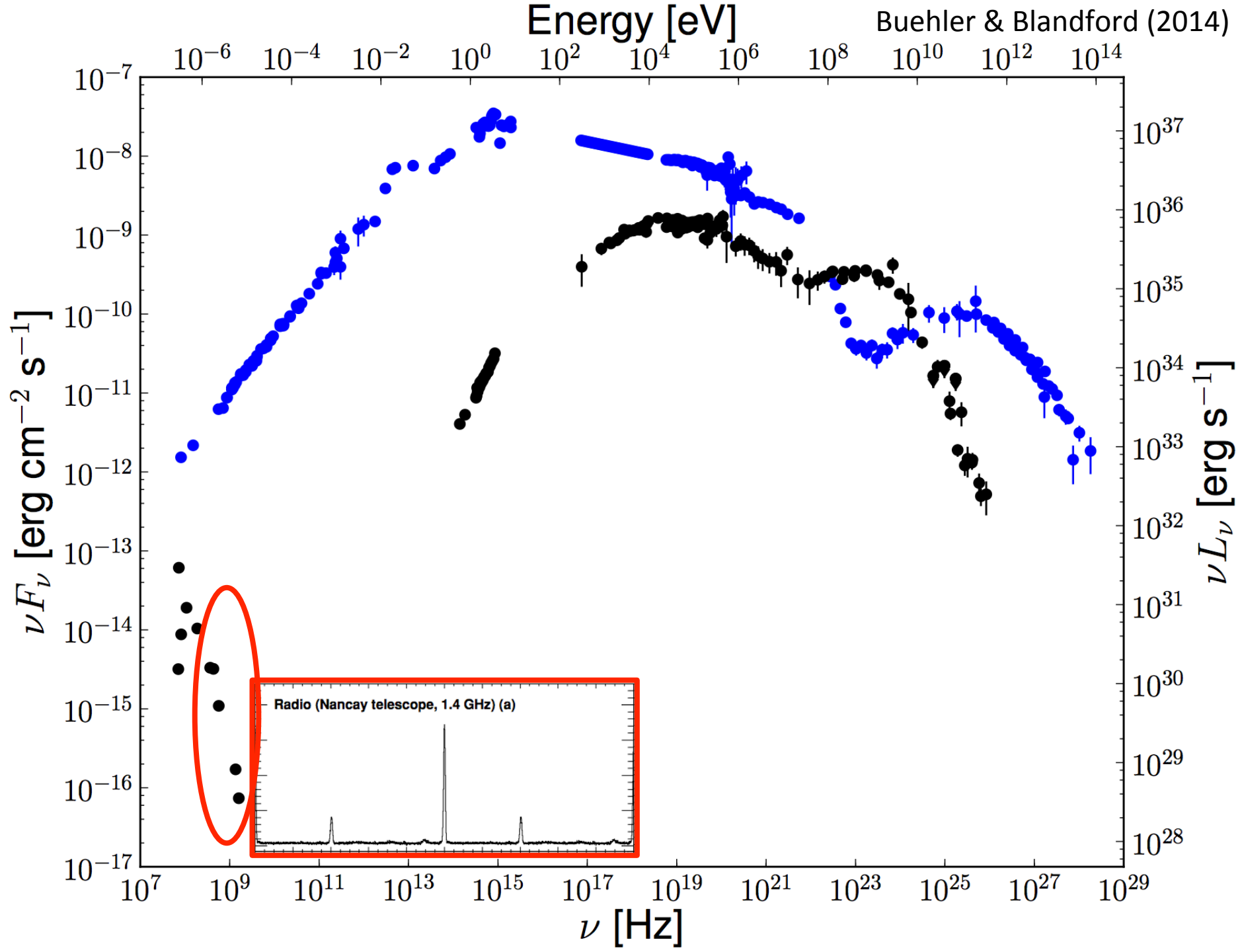
- ・粒子加速  $E \cdot B \neq 0$
- ・粒子の供給 星からの引き抜き、 $B-\gamma$ ,  $\gamma-\gamma$ 対生成
- ・電場遮蔽 電荷、電流の調整

上記の過程の中で、プラズマが電磁波を放出。  
→ パルス放射として観測される。

パルス放射から、磁気圏の構造 (プラズマの供給システム) の情報を引き出せる可能性がある。

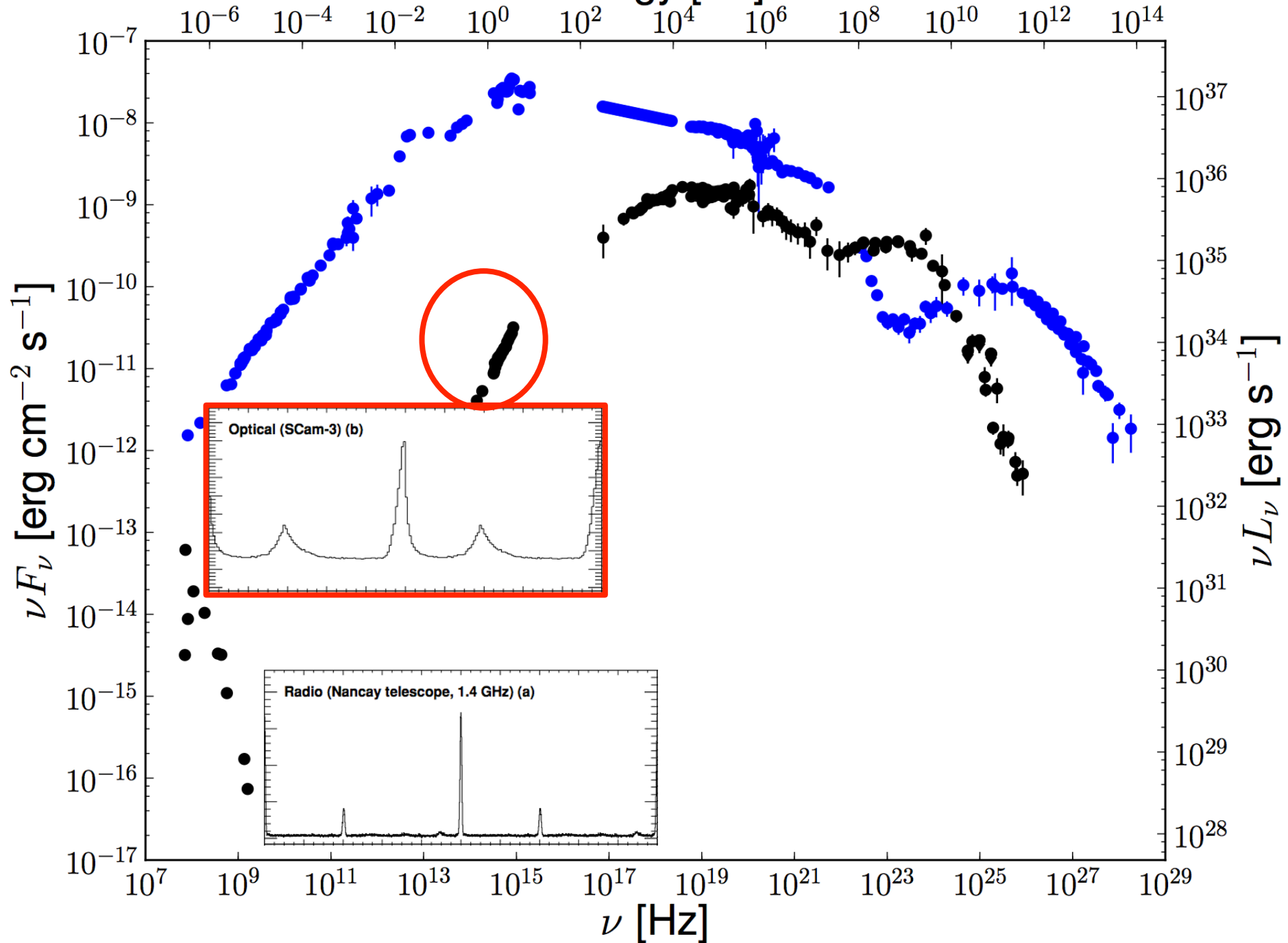






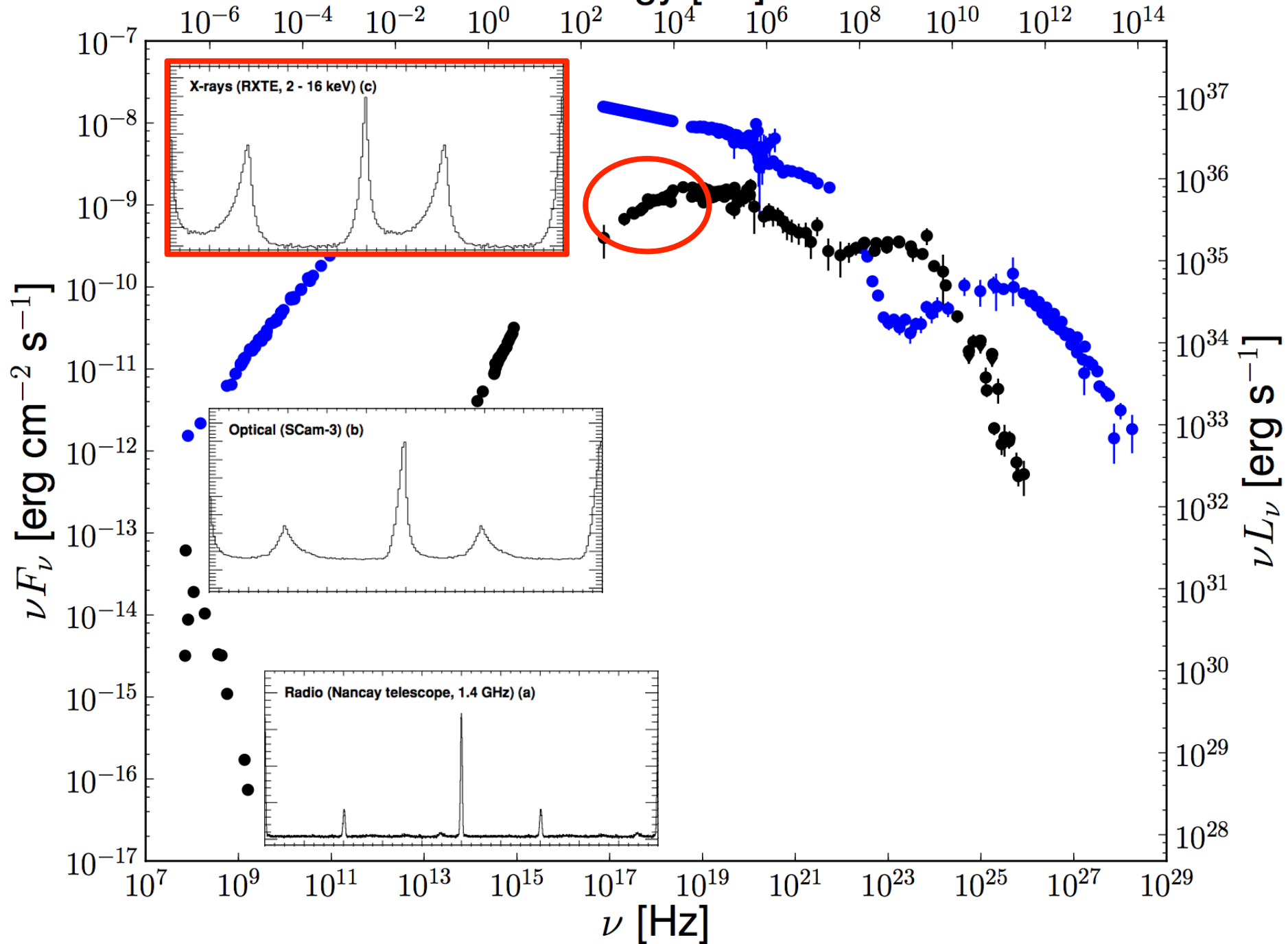
Energy [eV]

Buehler &amp; Blandford (2014)



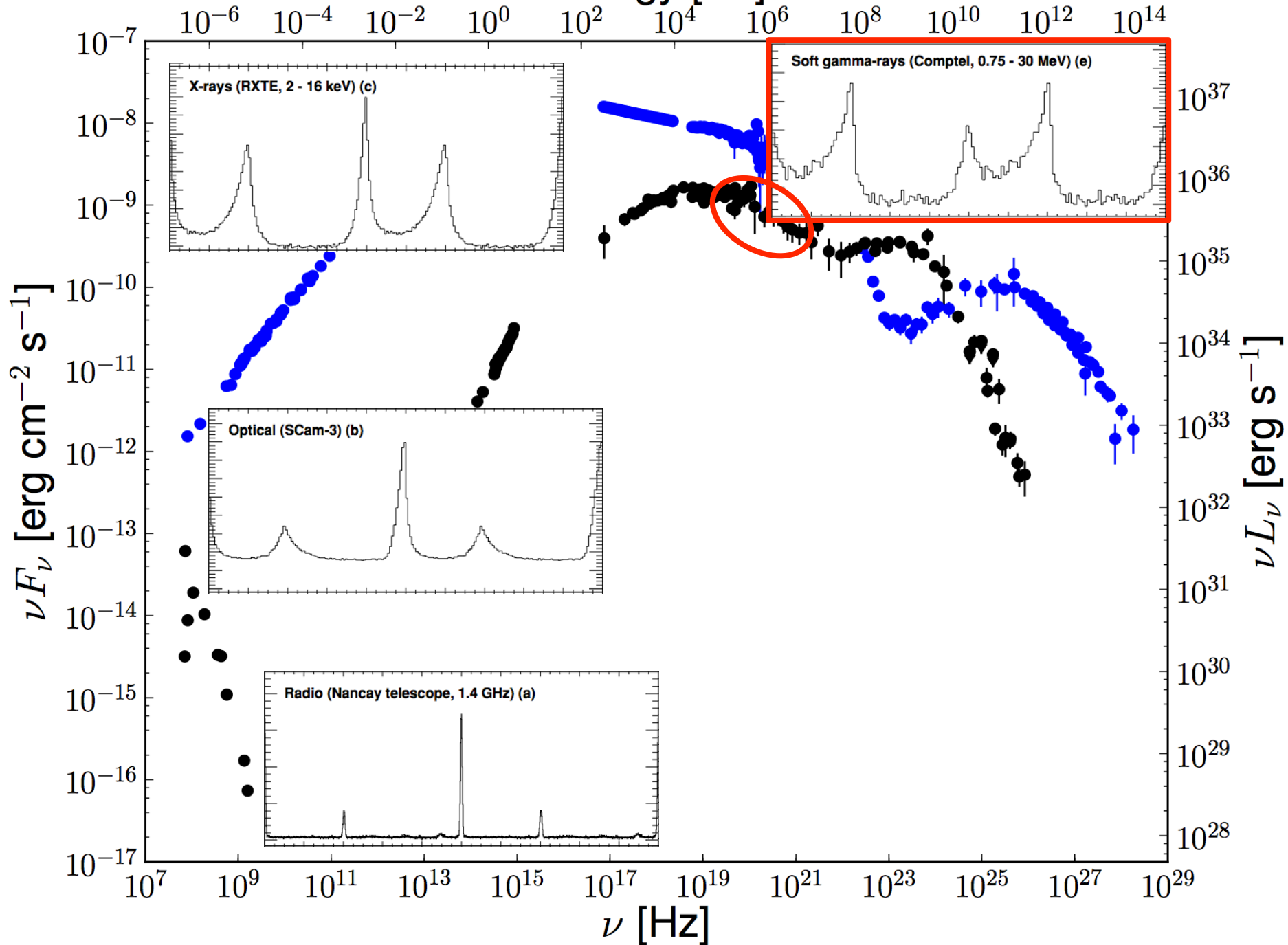
Energy [eV]

Buehler &amp; Blandford (2014)



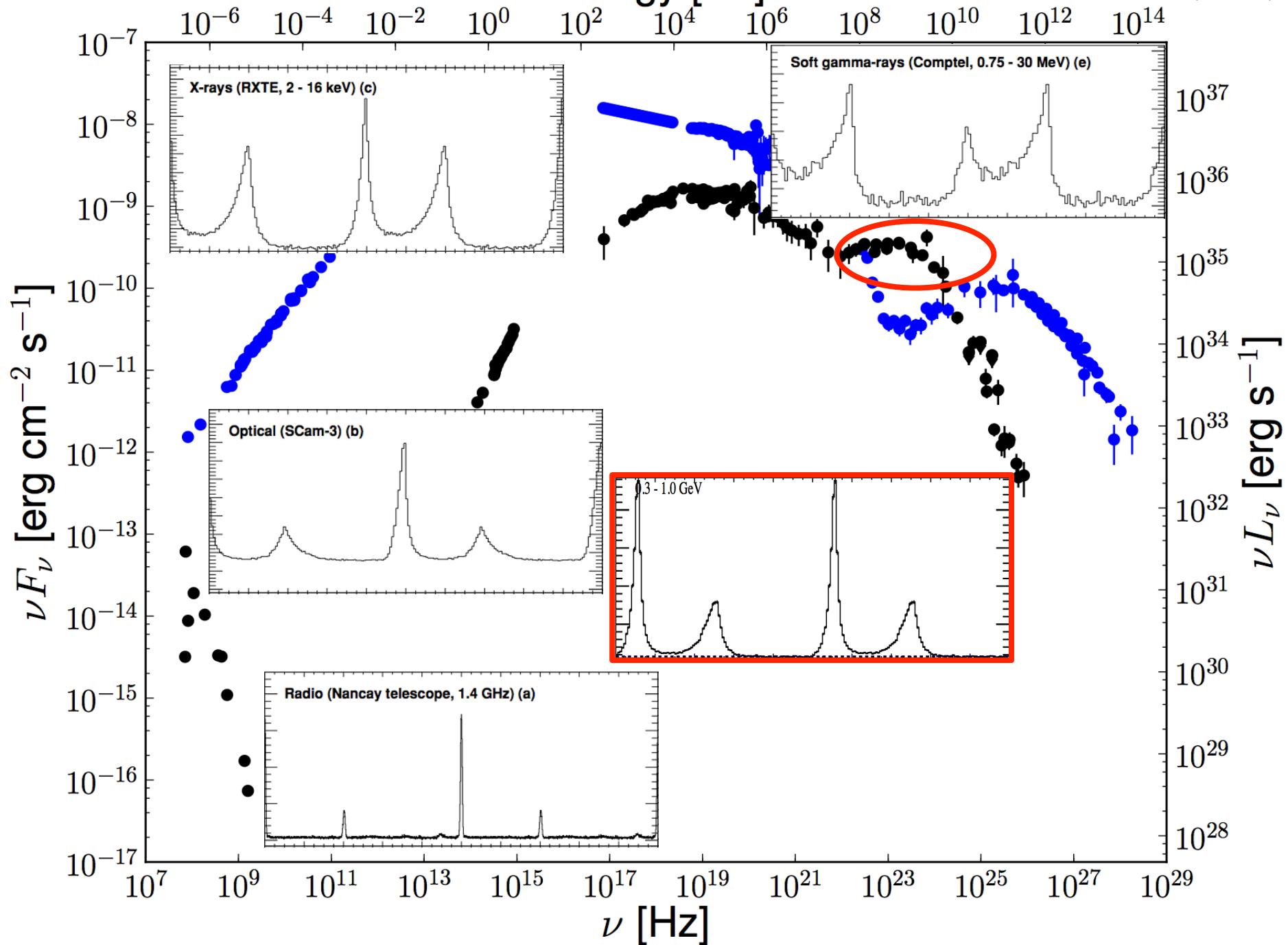
Energy [eV]

Buehler & Blandford (2014)



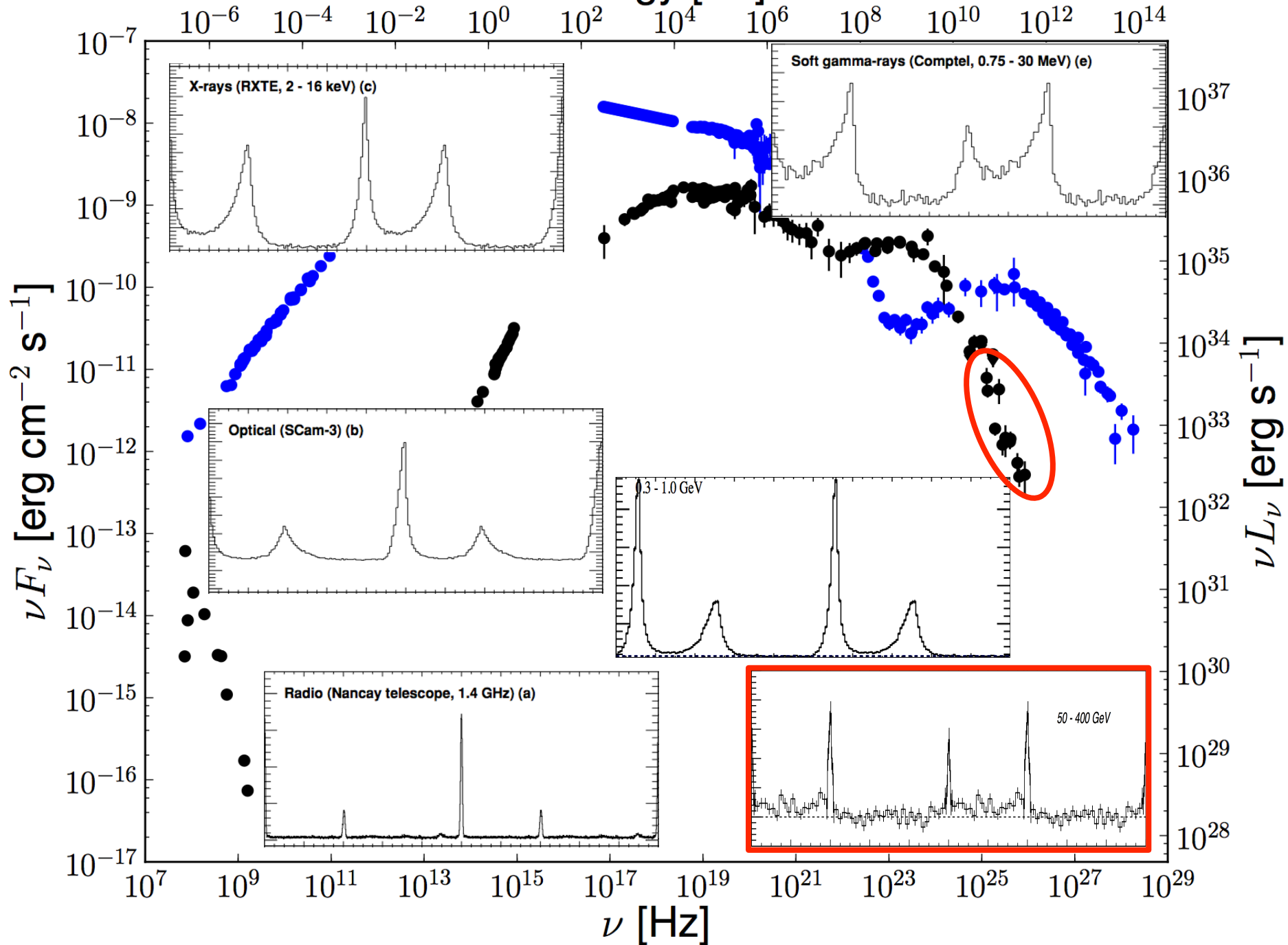
Energy [eV]

Buehler &amp; Blandford (2014)



Energy [eV]

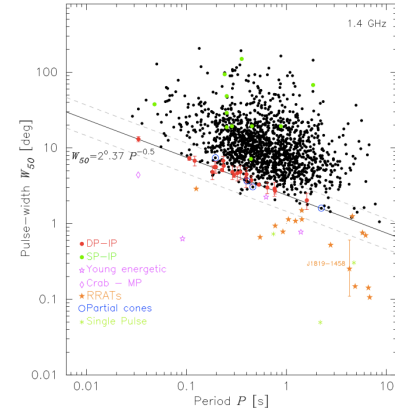
Buehler & Blandford (2014)



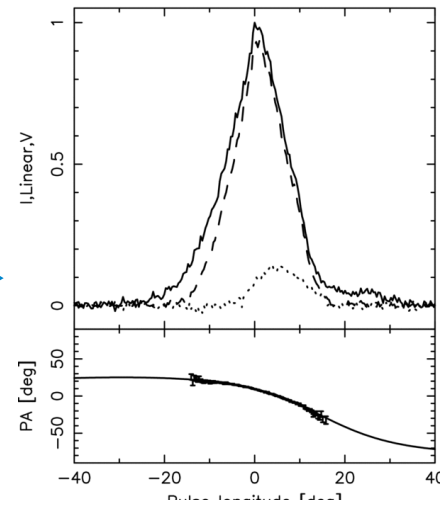
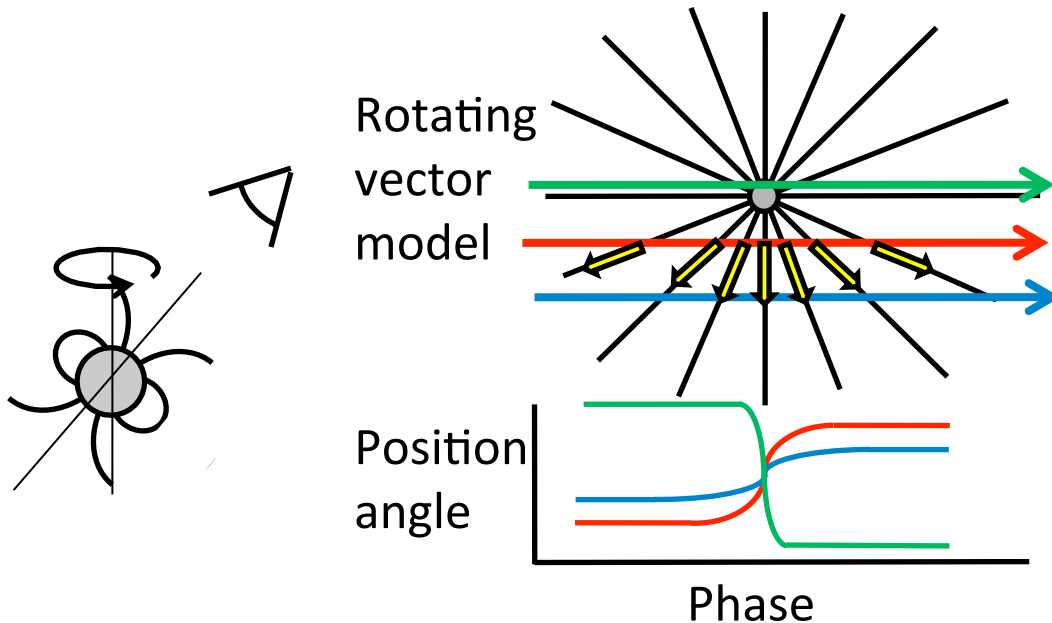
# 観測的示唆(電波)

電波の放射領域は磁極付近。

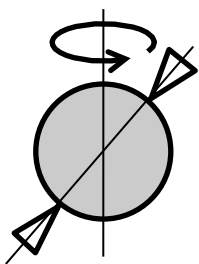
- ・ピークは1周期に1個。  
2個持つものは間隔が  $\sim 0.5P$ 。
- ・パルスの幅は  $\propto P^{-1/2}$ 。
- ・PAの変化がRVMで説明可能。



Maciesiak & Gil (2011)



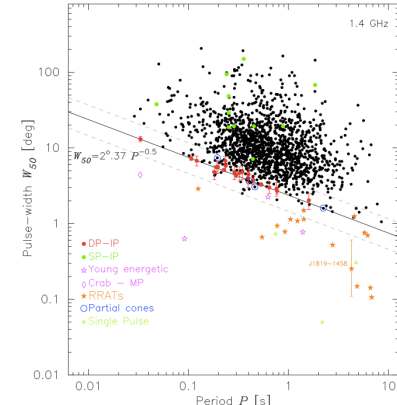
Weltevrede et al. (2010)



# 観測的示唆(電波)

電波の放射領域は磁極付近。

- ・ピークは1周期に1個。  
2個持つものは間隔が  $\sim 0.5P$ 。
- ・パルスの幅は  $\propto P^{-1/2}$ 。
- ・PAの変化がRVMで説明可能。



Maciesiak & Gil (2011)

電波 (コヒーレント放射) の放射機構は未解明。放射領域程度の制限。

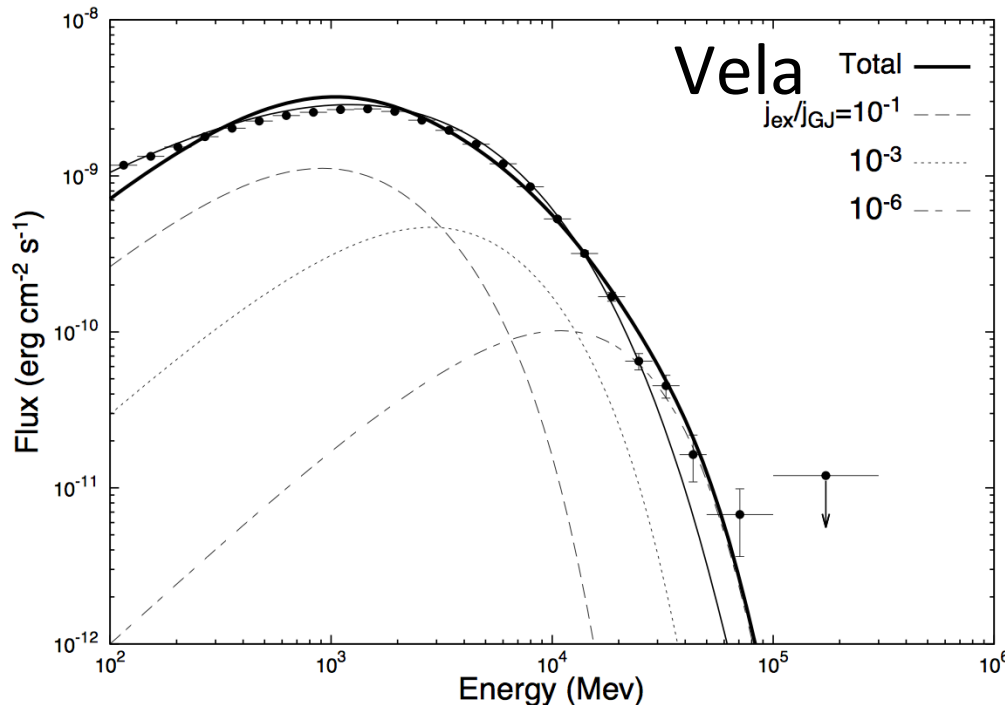


# 観測的示唆( $\gamma$ 線)

GeV  $\gamma$ 線放射領域は比較的外側。

## GeVパルスの特徴

- $\gamma$ 線パルサーの約半分は電波で未検出
- 電波と $\gamma$ 線のピークの位相が一致しない
- スペクトルは指数関数(よりハード)なカットオフ



# 若いパルサーの磁気圏構造 (1)

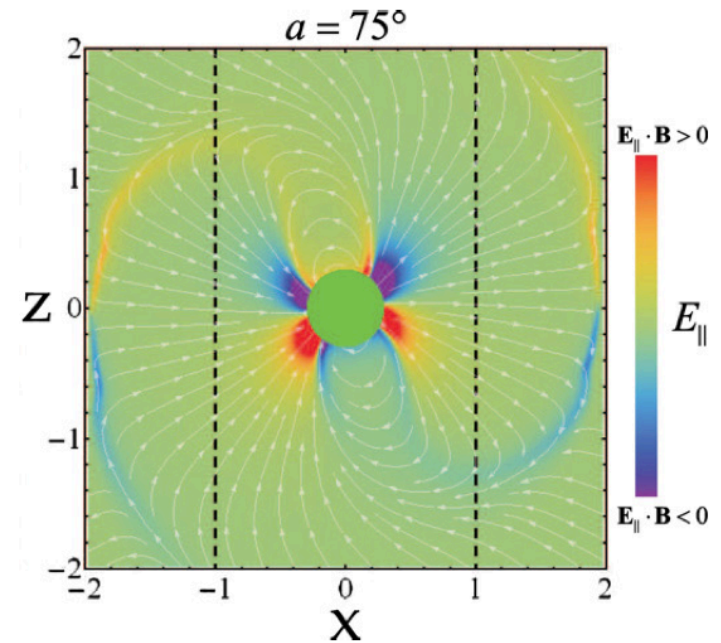
Polar capでプラズマを生成。

全体を十分なプラズマで満たす。

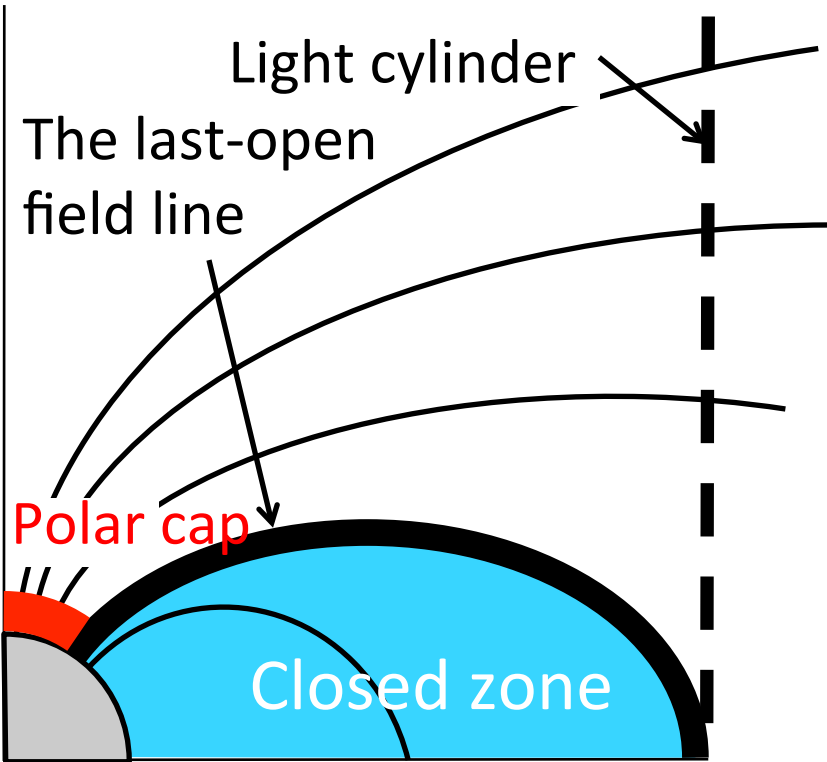
ポーラーキャップからの放射は

10-100MeVで、Fermiでは検出困難。

$E_{\parallel}$  の分布

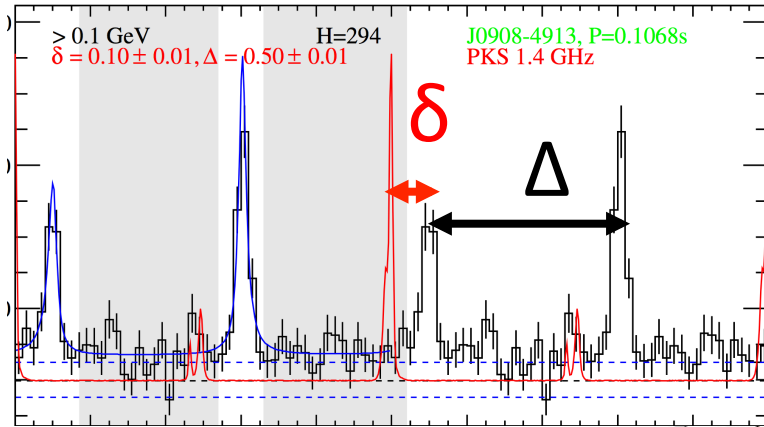


Kalapothisarakos+ 14



GeV  $\gamma$ 線は光円柱より外側の電流シート近傍領域で加速されたプラズマからの曲率放射。

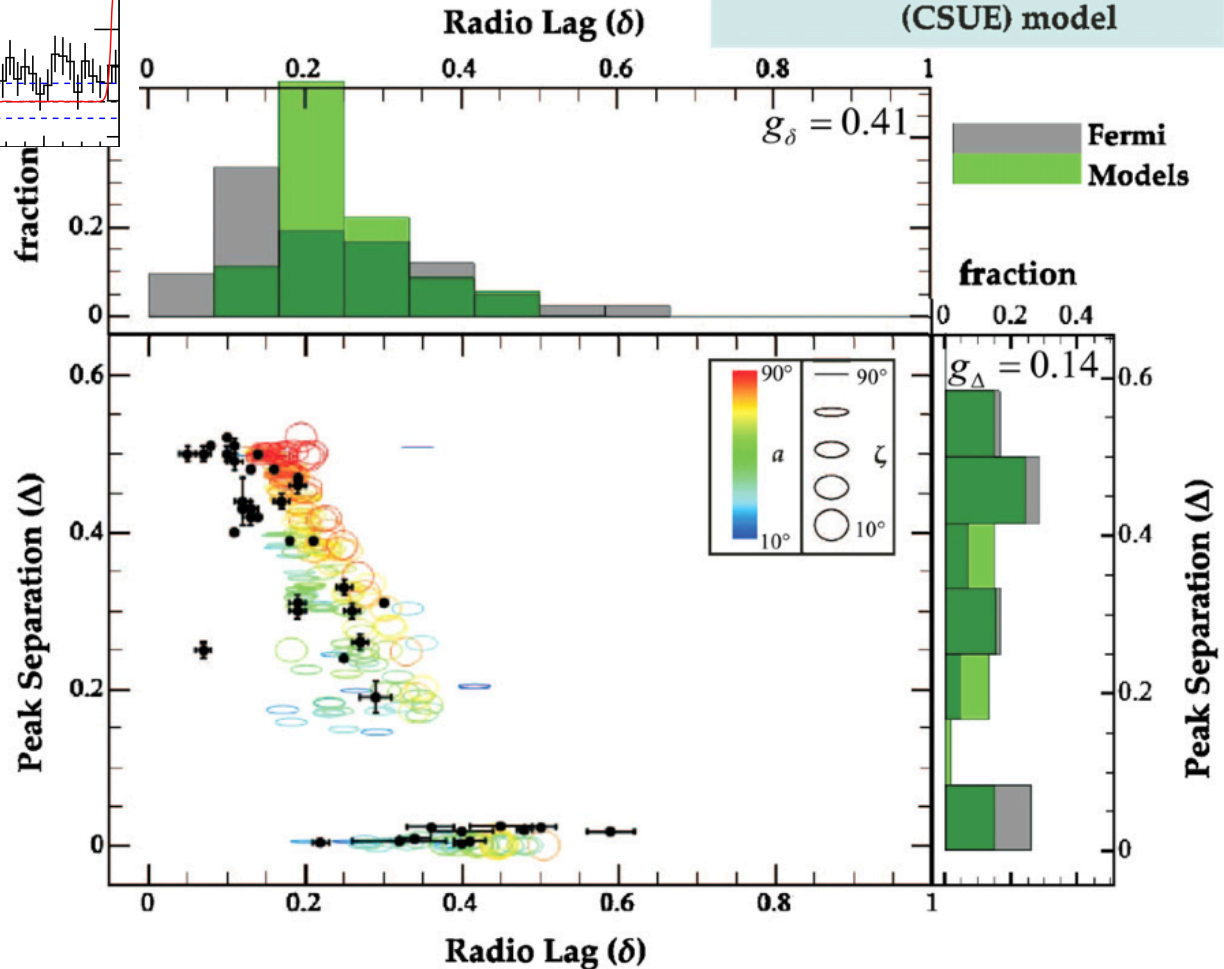
# 若いパルサーの磁気圏構造 (1)



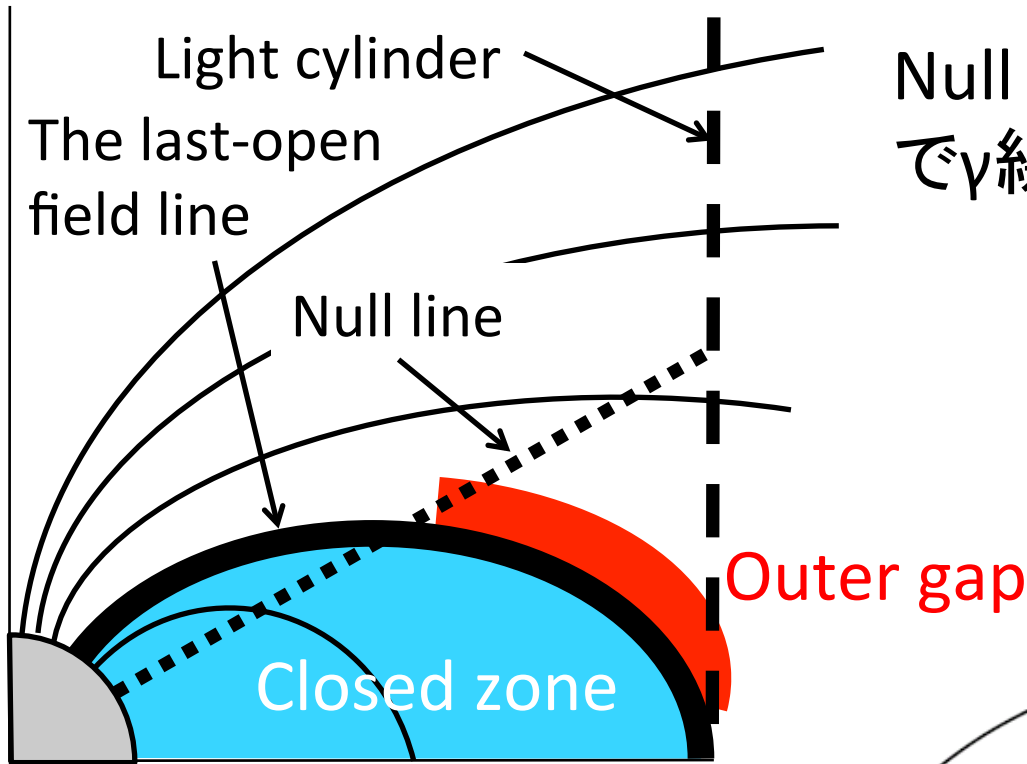
位相

Kalapotharakos+ 14

Current Sheet Uniform Emission (CSUE) model

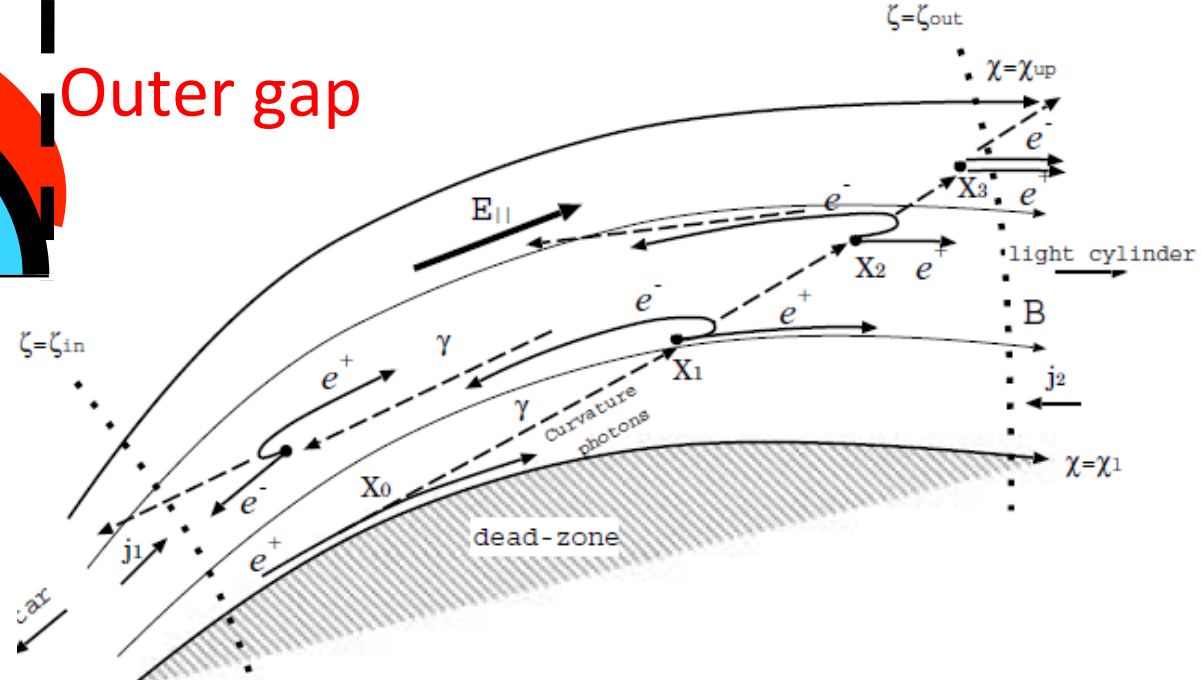


# 若いパルサーの磁気圏構造 (2)

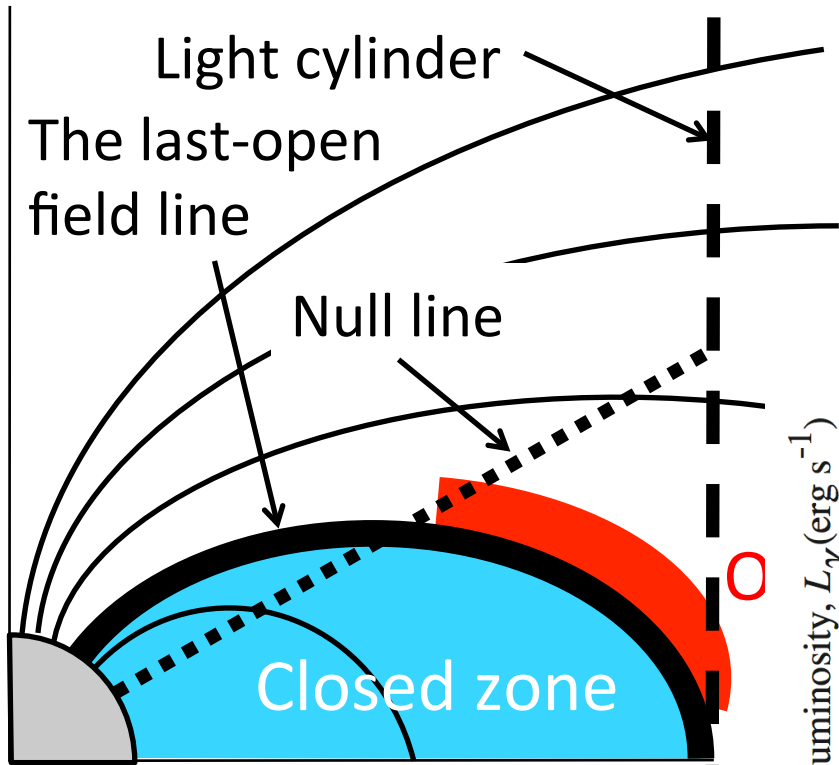


Null line近傍から外側の領域で $\gamma$ 線放射、粒子生成を行う。

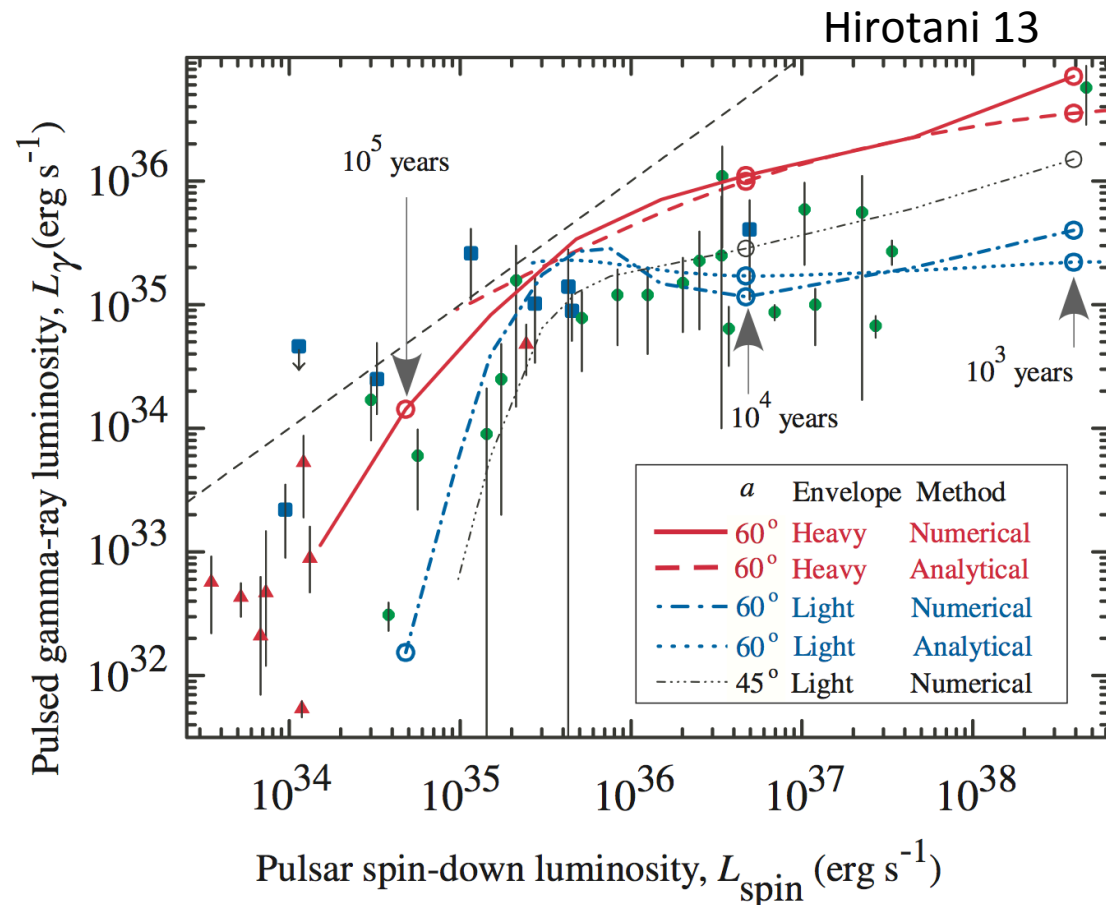
Takata+ 04



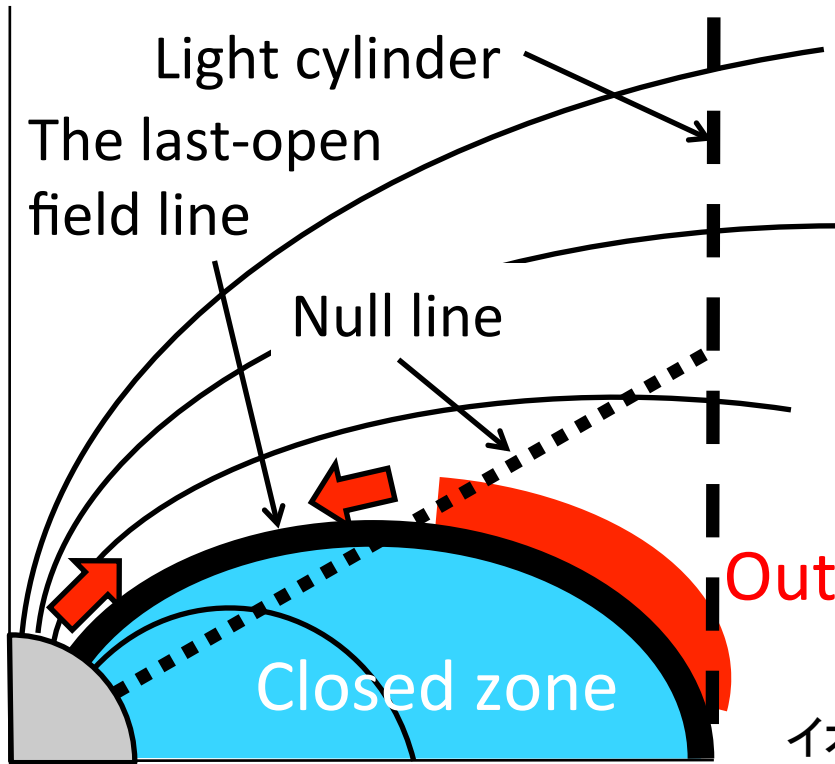
# 若いパルサーの磁気圏構造 (2)



Null line近傍から外側の領域で $\gamma$ 線放射、粒子生成を行う。



# 若いパルサーの磁気圏構造 (2)



Null line近傍から外側の領域で $\gamma$ 線放射、粒子生成を行う。

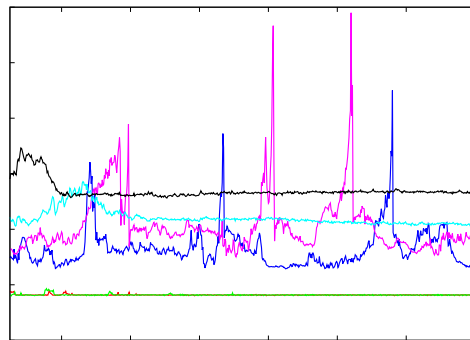
表面近傍でカスケードを起こさなくても、電波放射を出せるかもしれない。

(SK, Asano, Terasawa)

Outer gap

Closed zone

粒子数

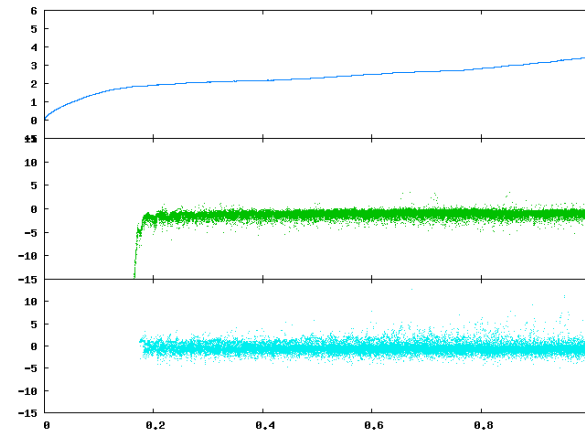


時間

イオンの運動量

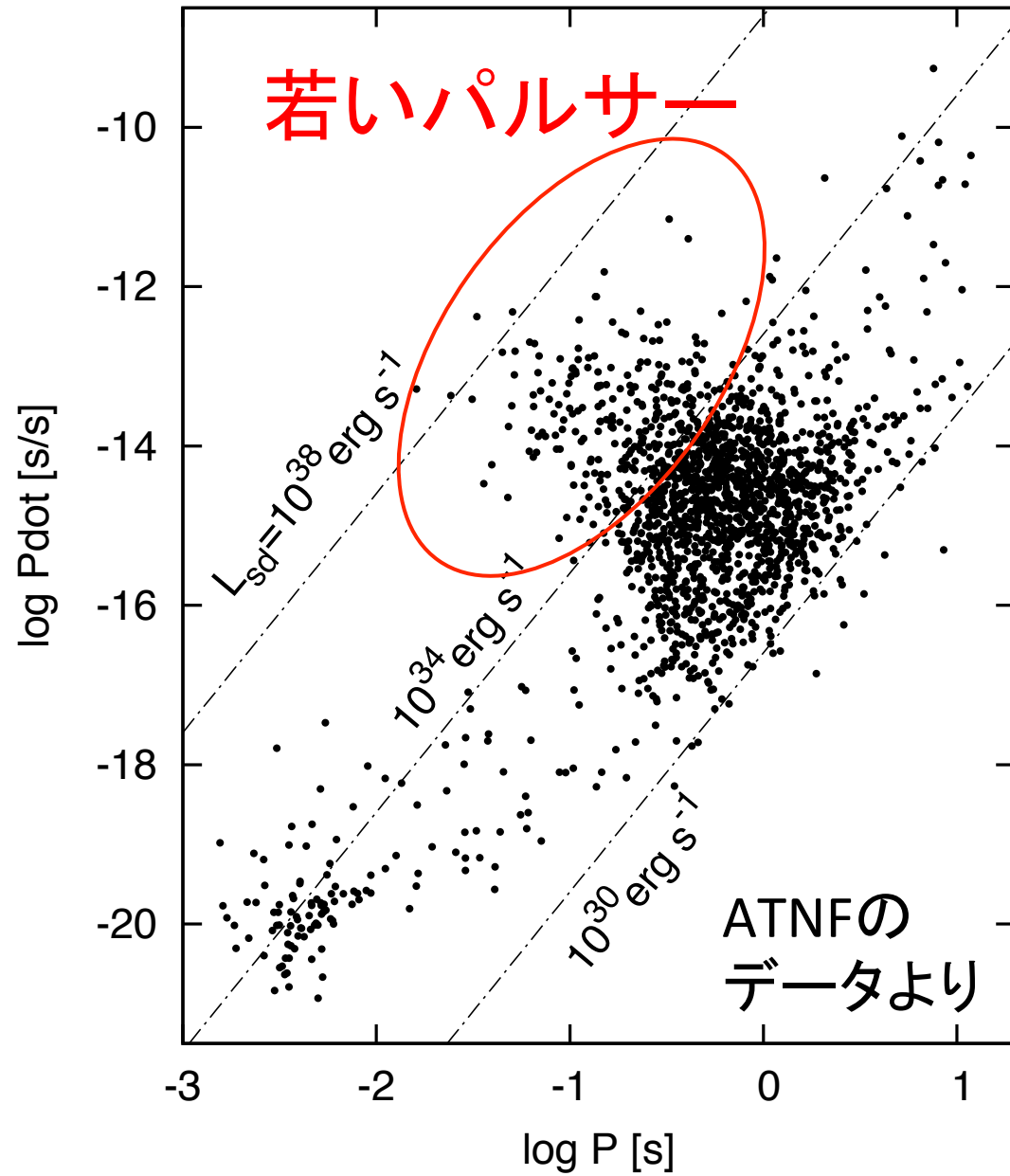
電子の運動量

陽電子の運動量



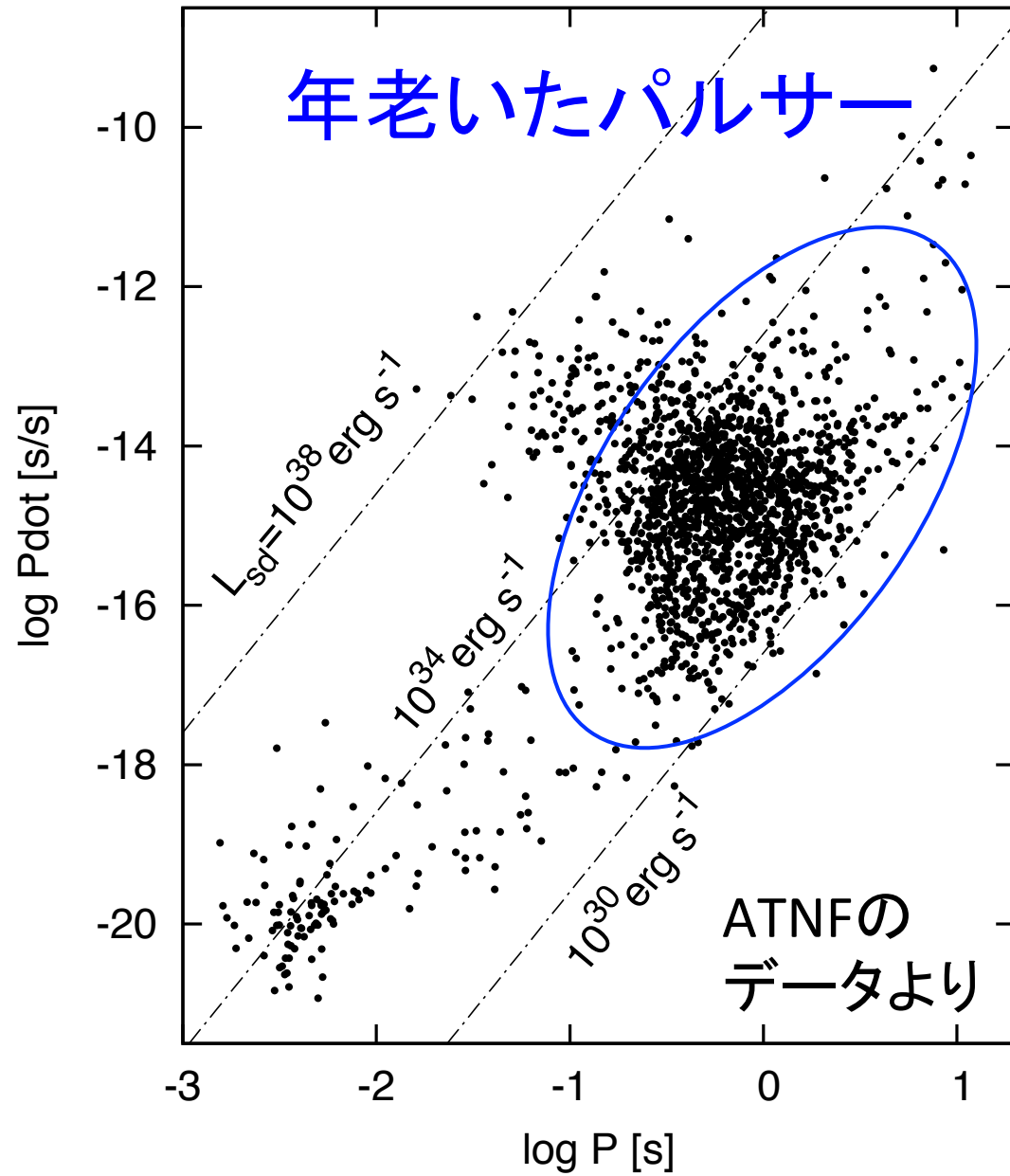
星表面からの距離

# 回転駆動型パルサー



Outer gapでも  
 $L_{sd} > 10^{34} - 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$   
なら十分粒子が生成  
できると考えられている。

# 回転駆動型パルサー

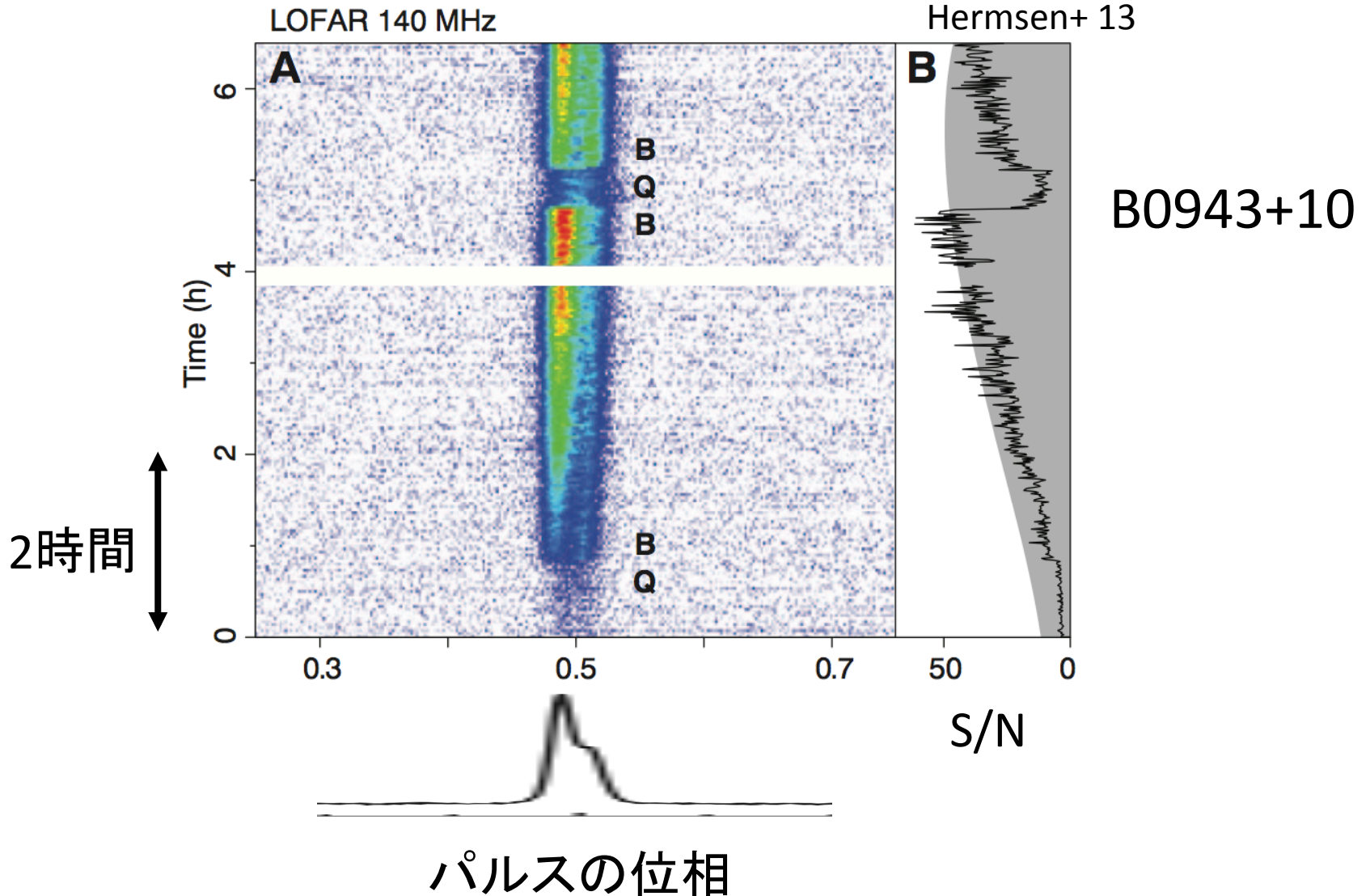


Outer gapでも  
 $L_{sd} > 10^{34} - 10^{35}$  erg s $^{-1}$   
なら十分粒子が生成  
できると考えられている。

1-10Myr のパルサーでは  
outer gap領域で粒子の  
生成が厳しい。  
また、light cylinderでの  
電場が弱いため、外側  
からのGeV放射も厳しい。

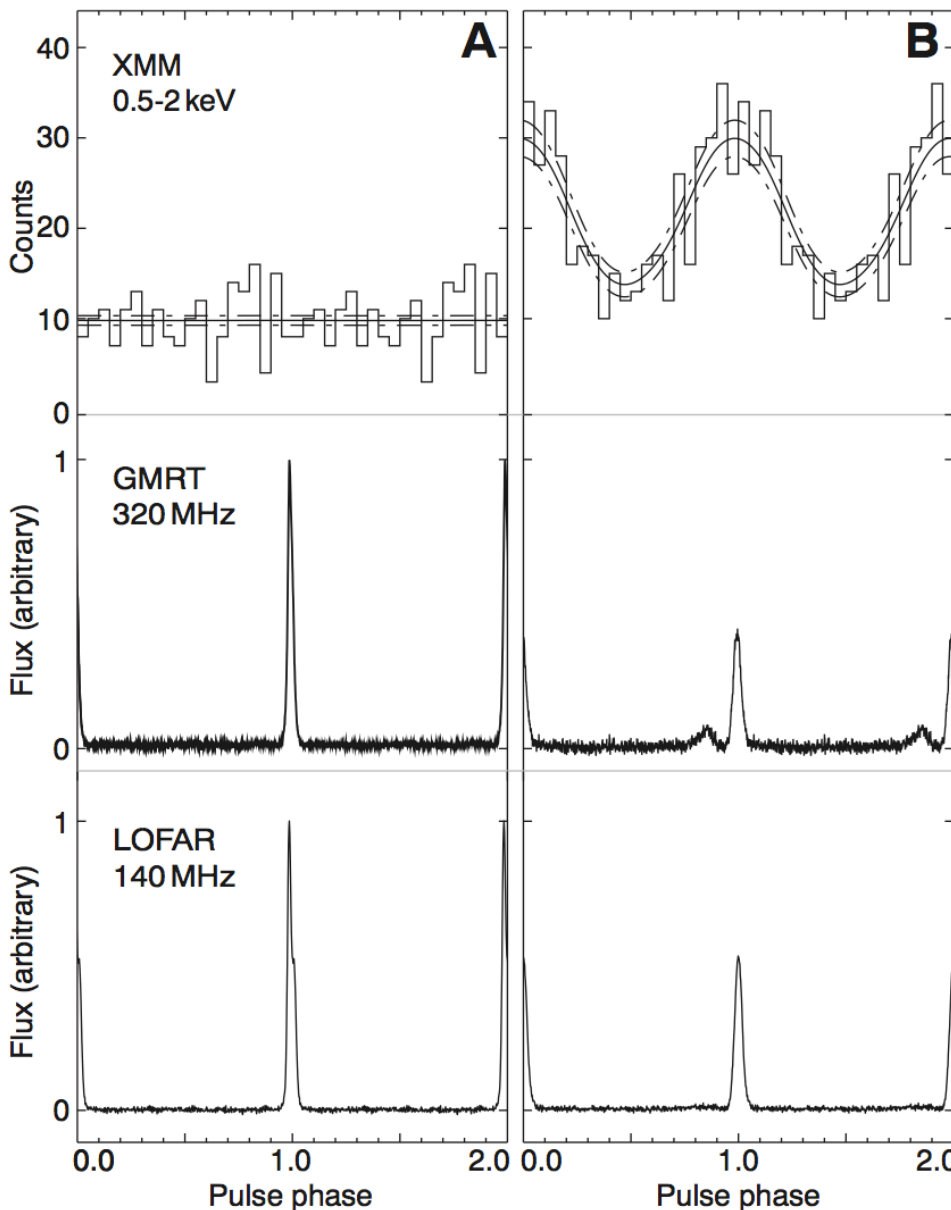


# 電波放射の状態遷移



# 電波とX線の状態遷移の同期

X線  
(0.5-2keV)



電波  
(320MHz)

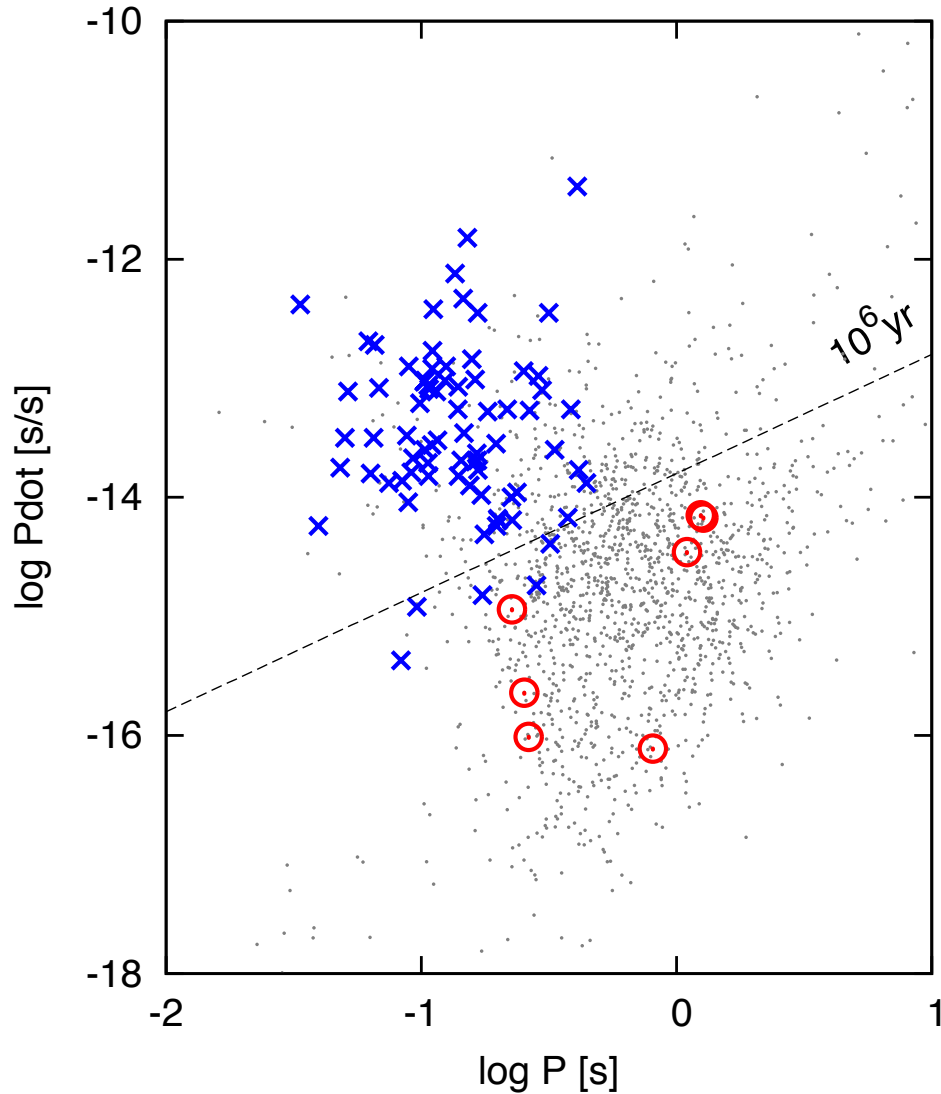
電波  
(140MHz)

電波の状態遷移  
に合わせてX線の  
波形も変化する。

Hermesen+ 13

# X線放射

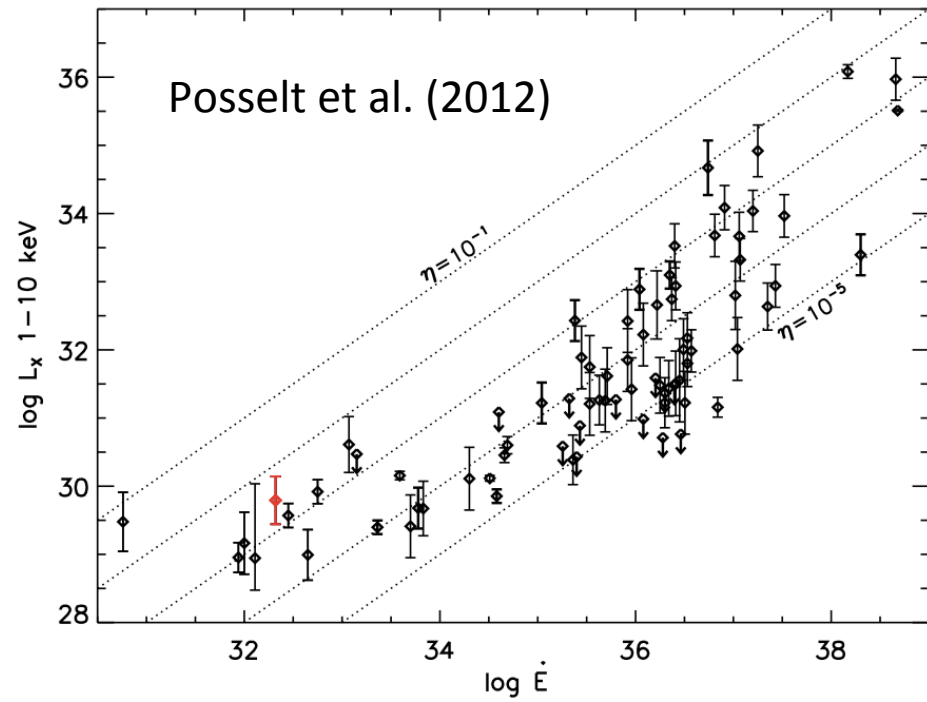
X線は年齢を問わず検出されている。



× :  $\gamma$ 線パルサー

○ : 年老いたX線パルサー

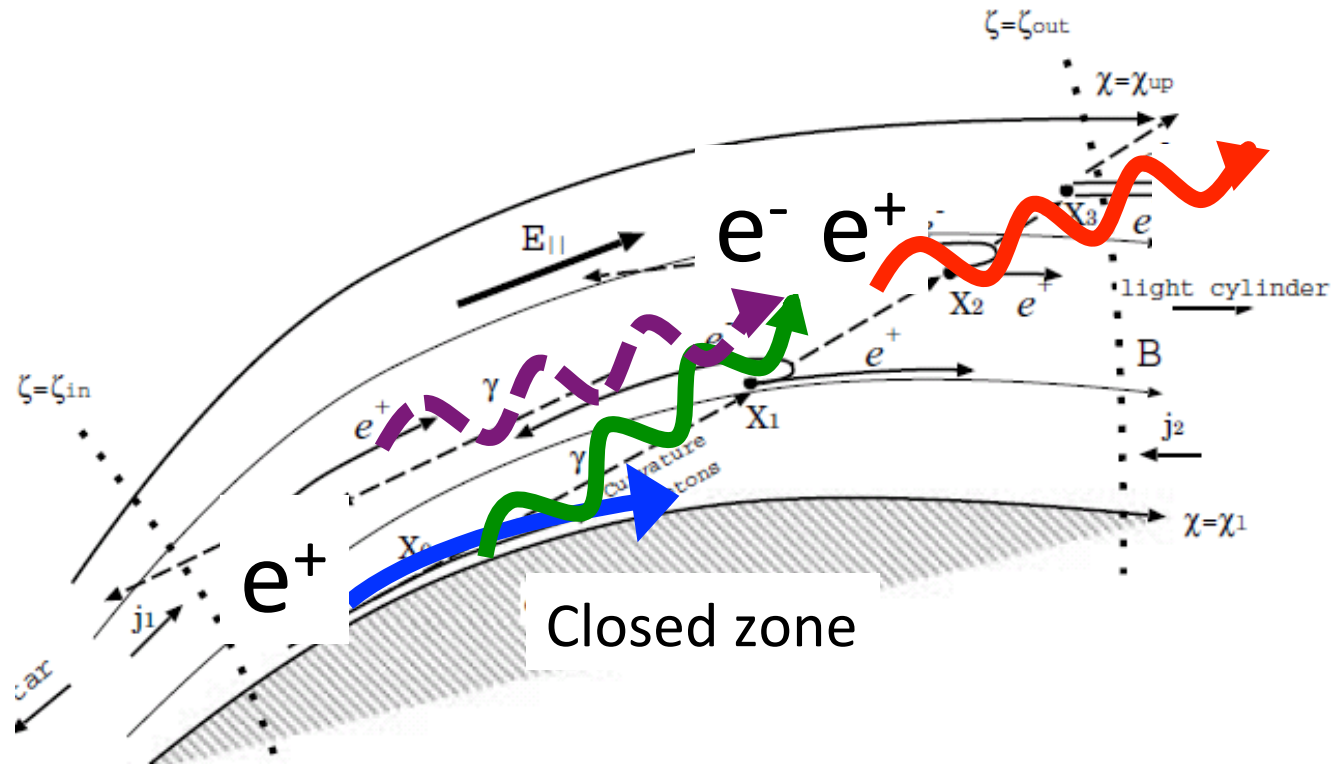
放射効率も大きな進化はなし。



# モデル

## 描像

- ・加速された粒子が(内向き、外向きに) $\gamma$ 線を放射。
- ・(B- $\gamma$ ,  $\gamma$ - $\gamma$ で)生成した粒子がシンクロトロンでX線を放射。



Takata et al. (2004)

# モデル

## 描像

- ・加速された粒子が(内向き、外向きに) $\gamma$ 線を放射。
- ・(B- $\gamma$ ,  $\gamma$ - $\gamma$ で)生成した粒子がシンクロトロンでX線を放射。

## 仮定

- ・X線スペクトルは熱的 + 非熱的成分の2成分。
- ・熱的成分は表面への粒子の衝突で加熱されたもの。
- ・非熱的成分は2次粒子からのシンクロトロン放射。  
→観測から  $v_{\text{syn}}$ ,  $L_{\text{syn}}$ ,  $L_{\text{th}}$ ,  $T_{\text{pc}}$  が得られる。
- ・磁場形状は双極磁場。
- ・磁極以外からの熱放射は無視。

得られる情報をもとに、放射領域に制限を課す。

# 放射領域への制限 (1)

2次粒子のエネルギー (上限)

$$(\nu_p \rightarrow E_{\text{cur}} \rightarrow) \quad \nu_{s,\text{pair}} > \nu_{s,\text{syn}} \quad (\leftarrow \nu_{\text{obs}})$$

・1次, 2次粒子のローレンツ因子

$$\gamma_p = \frac{e\Delta V_{\text{pc}}}{m_e c^2}$$

$$\gamma_{s,\text{pair}} = \frac{E_{\text{cur}}}{2m_e c^2}$$

・曲率放射、シンクロトロン放射の光子のエネルギー

$$E_{\text{cur}} = 0.29 \frac{3h\gamma_p^3 c}{4\pi R_{\text{cur}}}$$

$$h\nu_{\text{obs}} = 0.29 \frac{3}{4\pi} h\gamma_{s,\text{syn}}^2 \frac{eB}{m_e c} \alpha$$

$\Delta V_{\text{pc}}$  : ポテンシャル差

$\alpha$  : ピッチ角

$R_{\text{cur}}$  : 曲率半径

# 放射領域への制限 (2, 3)

カットオフ振動数 (下限)

$$\nu_{\text{obs}} < \nu_b = eB/(2\pi m_e c)$$

粒子生成条件

(B- $\gamma$ : 上限,  $\gamma$ - $\gamma$ : 上限または下限)

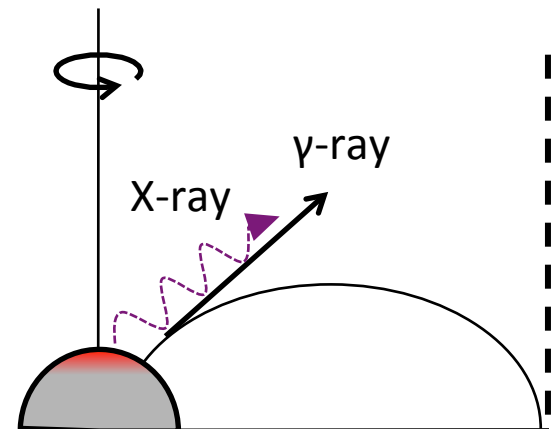
B- $\gamma$ :  $I_{B\gamma} < R_{\text{NS}} (\chi > 1/15)$  ( $\leftarrow E_{\text{cur}}$ )

$\gamma$ - $\gamma$ :  $(1 - \cos\theta_{\text{col}}) E_{\chi} E_{\text{cur}} > (m_e c^2)^2$  ( $\leftarrow E_{\text{cur}}, T_{\text{pc}}$ )

•  $\gamma + B \rightarrow e^+ + e^-$   $l_p \propto (B \sin \theta)^{-1} \exp\left(\frac{4}{3\chi}\right)$  ( $\chi \ll 1$ )

$$\chi \propto E_{\text{cur}} B \sin \theta$$

•  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$  種光子はポーラーキャップからの熱放射起源。



# 放射領域への制限 (4)

## 2次粒子の個数 (上限と下限)

$$(L_{sd}, L_{th}, T_{pc} \rightarrow) \dot{N}_p N_\gamma \tau \times \min\{t_{ad}, t_{cool}\} > N_s \quad (\leftarrow L_{syn}, v_{syn})$$

・1つの粒子が放出する $\gamma$ 線光子数

$$N_\gamma \sim (P_{cur}/E_{cur})t_{ad}$$

・1次粒子の個数フラックス

$$\dot{N}_{p,out} = L_{sd}/(\gamma_p m_e c^2) \quad (\text{外向き})$$

$$\dot{N}_{p,in} = L_{th}/(\gamma_p m_e c^2) \quad (\text{内向き})$$

・移流と冷却のタイムスケール

$$t_{ad} \sim r/c$$

$$t_{cool} \sim \gamma_{s,syn} m_e c^2 / P_{syn}$$

$P_{cur}$   $P_{syn}$  : 曲率放射とシンクロトロン放射のパワー

$E_X \sim 2.8kT_{pc}$  : 熱放射の光子のエネルギー

$\sigma_{\gamma\gamma} \sim 0.2\sigma_T$  : 対消滅の断面積       $\theta_{col}$ : 衝突角

・2次粒子の個数

$$N_s \sim L_{syn}/P_{syn}$$

・光学的厚み

$$\tau_{B\gamma} \sim 1 \quad (\text{B-}\gamma)$$

$$\tau_{\gamma\gamma} \sim \frac{L_{th}}{4\pi r^2 c E_X} \sigma_{\gamma\gamma} (1 - \cos \theta_{col}) \times r$$

( $\gamma$ - $\gamma$ )



# 放射の方向

$$L_{\text{th}} \sim 10^{-3} L_{\text{sd}}$$

- ・外向き (One zone)

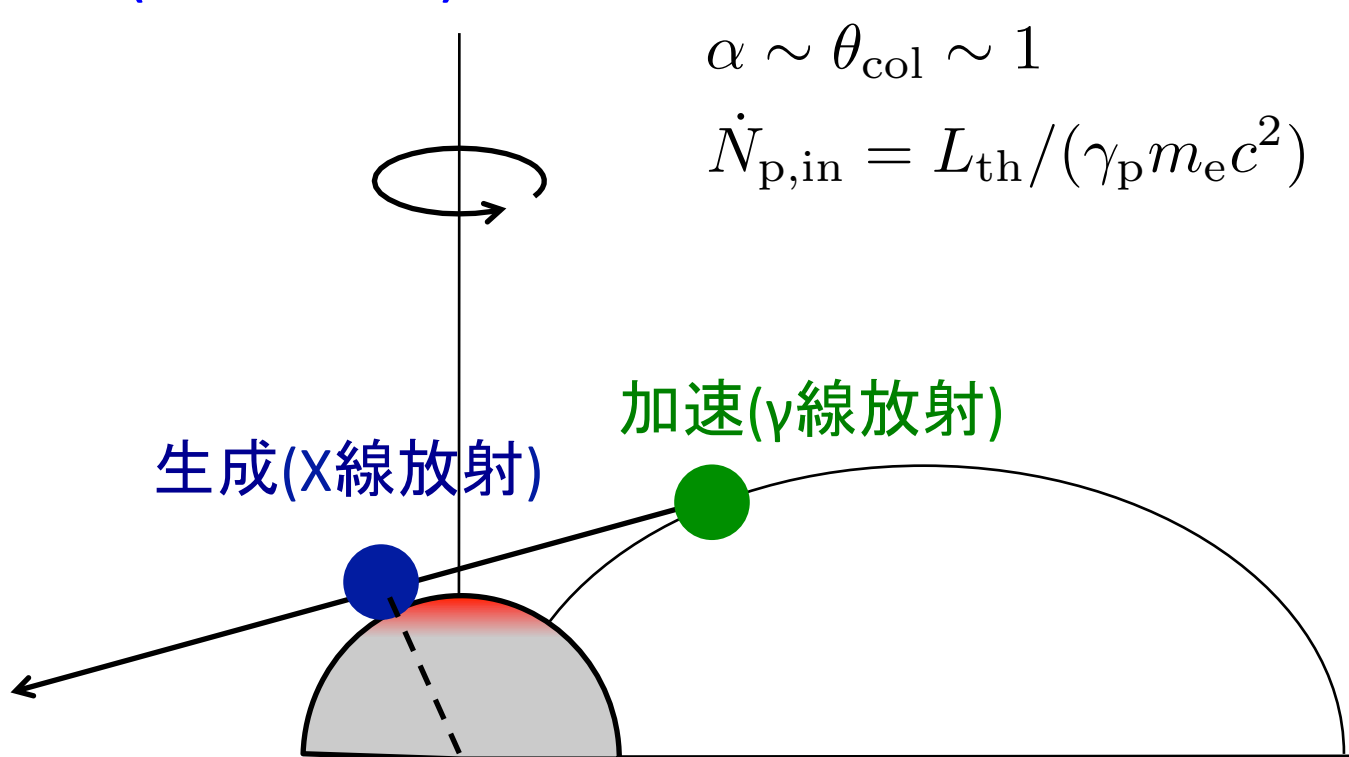
(加速領域) ~ (生成領域)

$$\alpha \sim \theta_{\text{col}} \sim \sqrt{\frac{r}{R_{\text{lc}}}} \sim 10^{-2} \sqrt{\frac{r}{10^6 \text{cm}} \frac{1\text{s}}{P}}$$
$$\dot{N}_{\text{p,out}} = L_{\text{sd}} / (\gamma_{\text{p}} m_e c^2)$$

- ・内向き (Two zone)

$$\alpha \sim \theta_{\text{col}} \sim 1$$

$$\dot{N}_{\text{p,in}} = L_{\text{th}} / (\gamma_{\text{p}} m_e c^2)$$



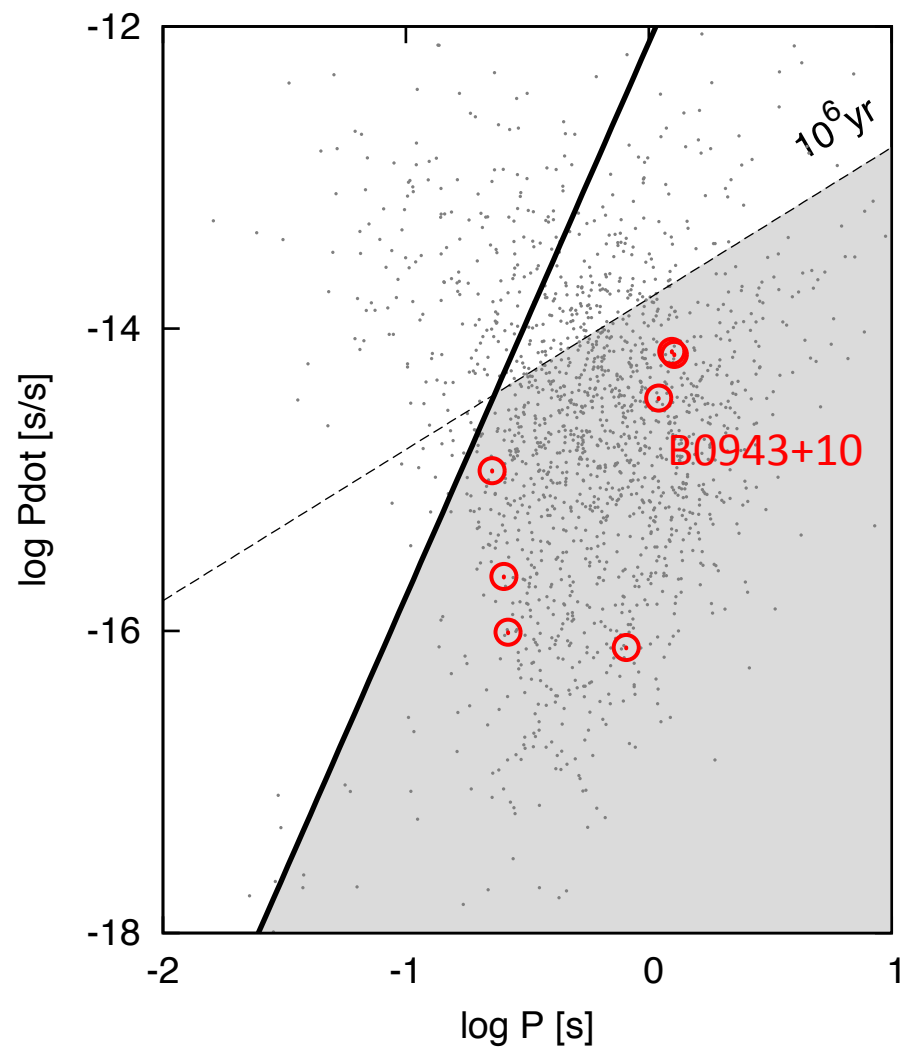
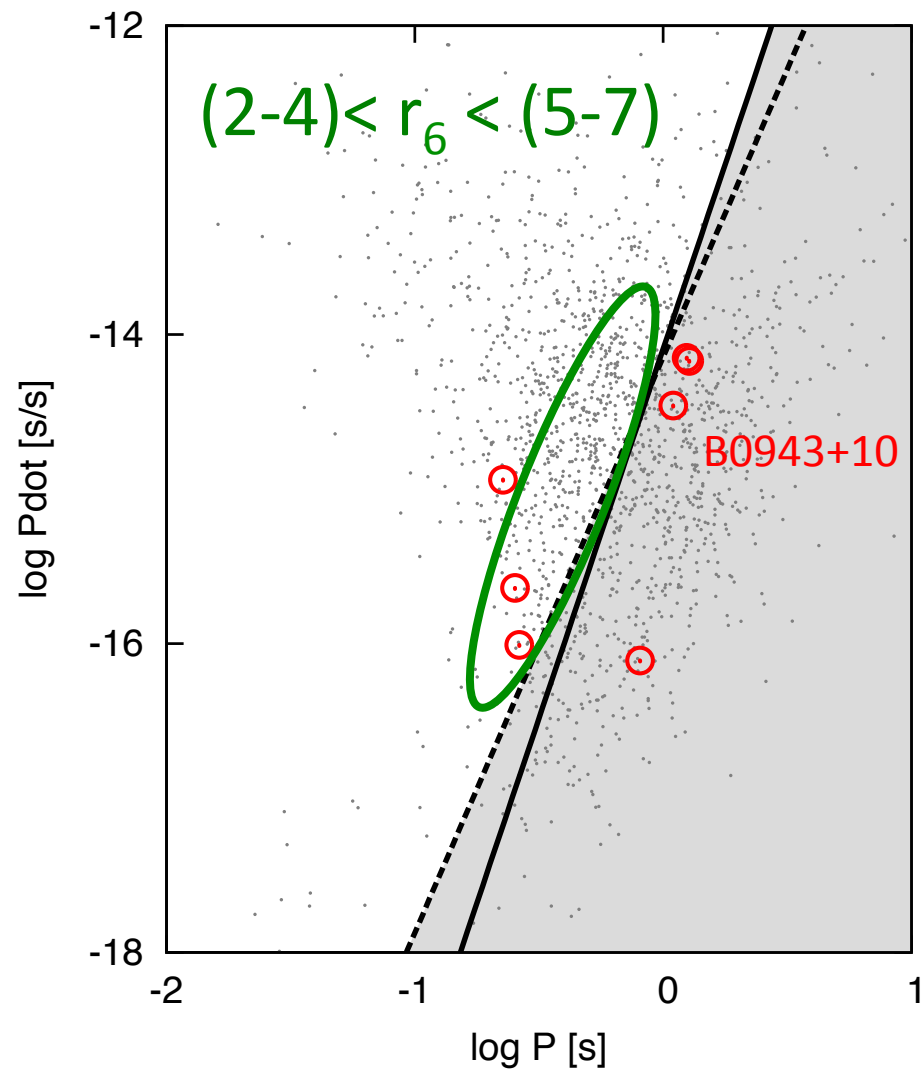
# 結果 (外向き)

$$r_6 \equiv r/10^6 \text{ cm}$$

SK & Tanaka 14

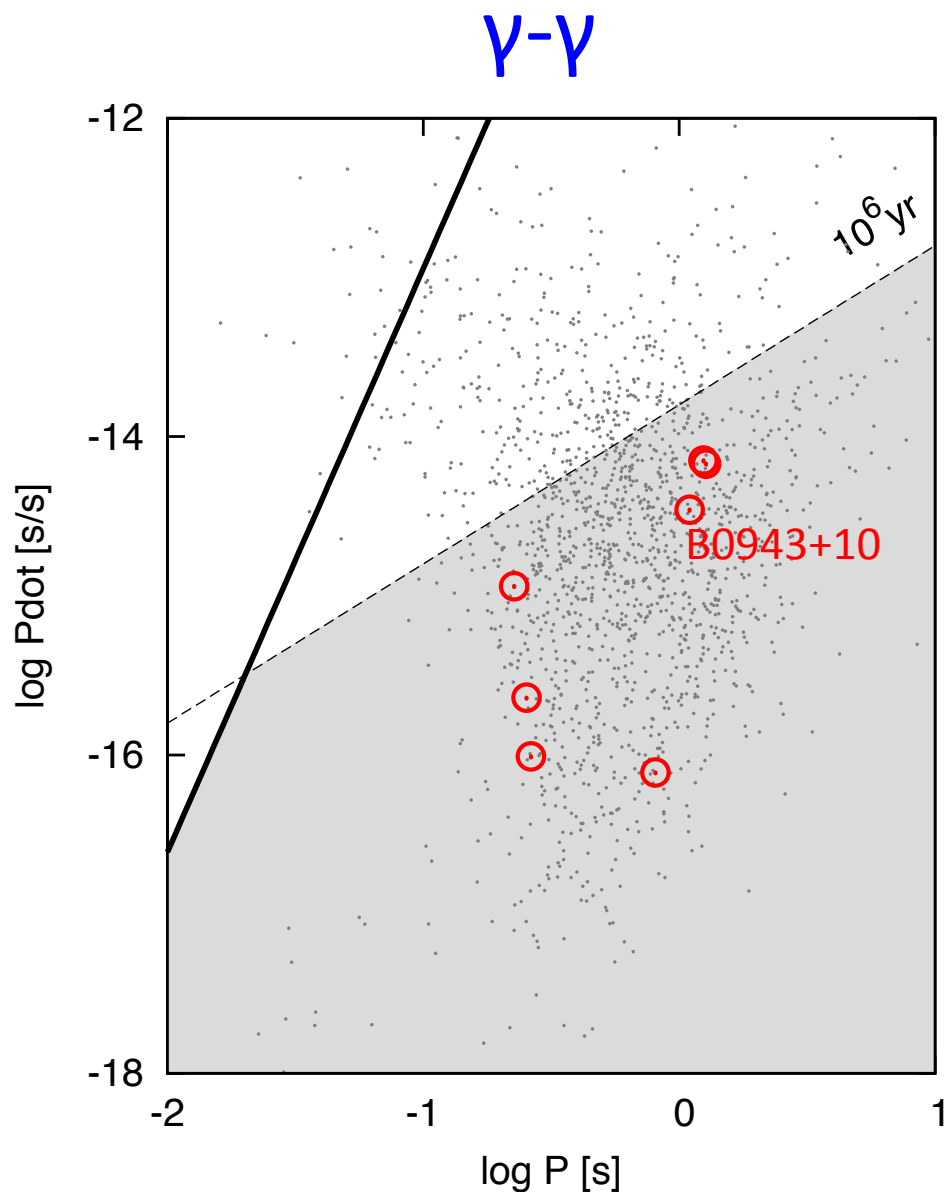
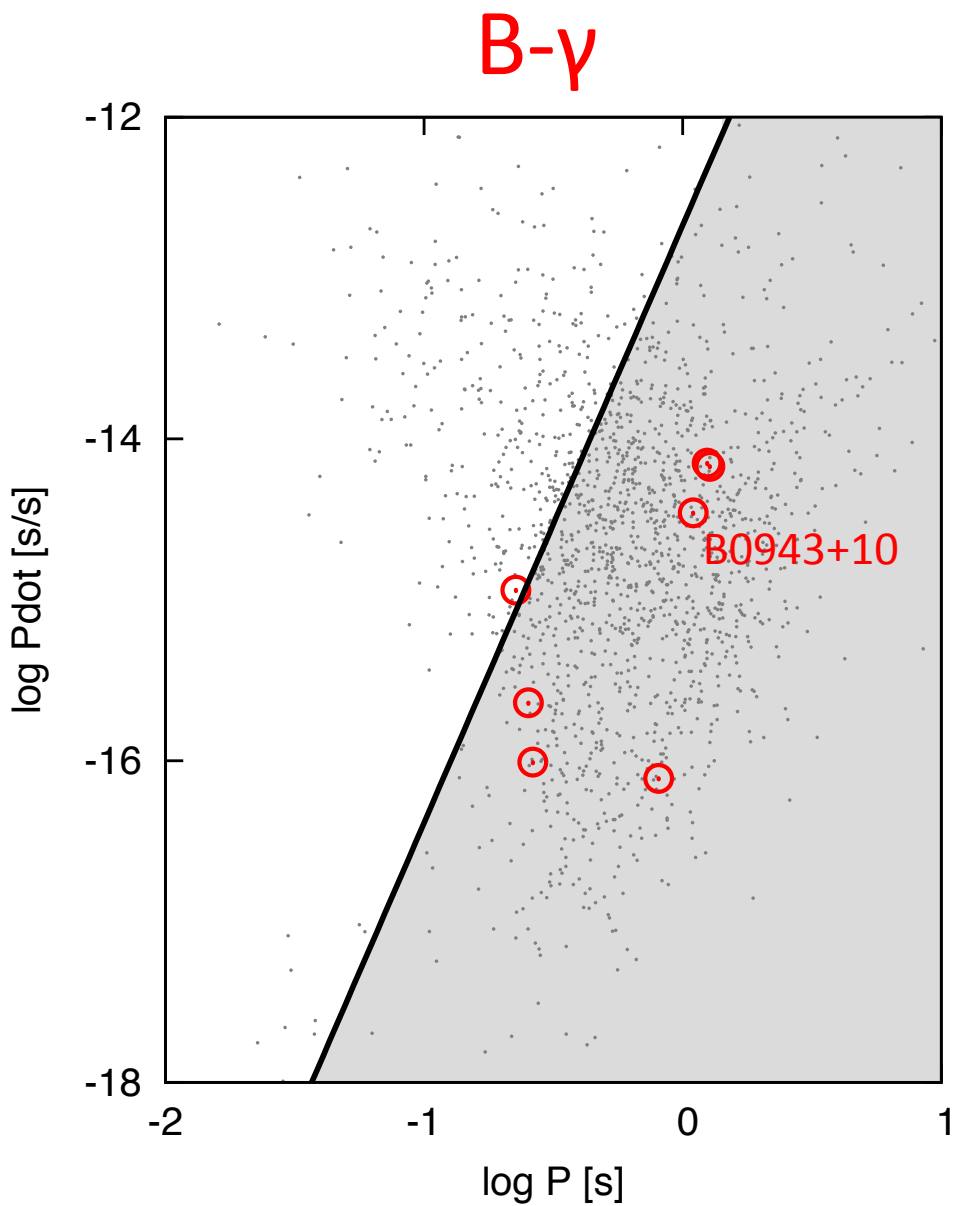
B- $\gamma$

$\gamma$ - $\gamma$



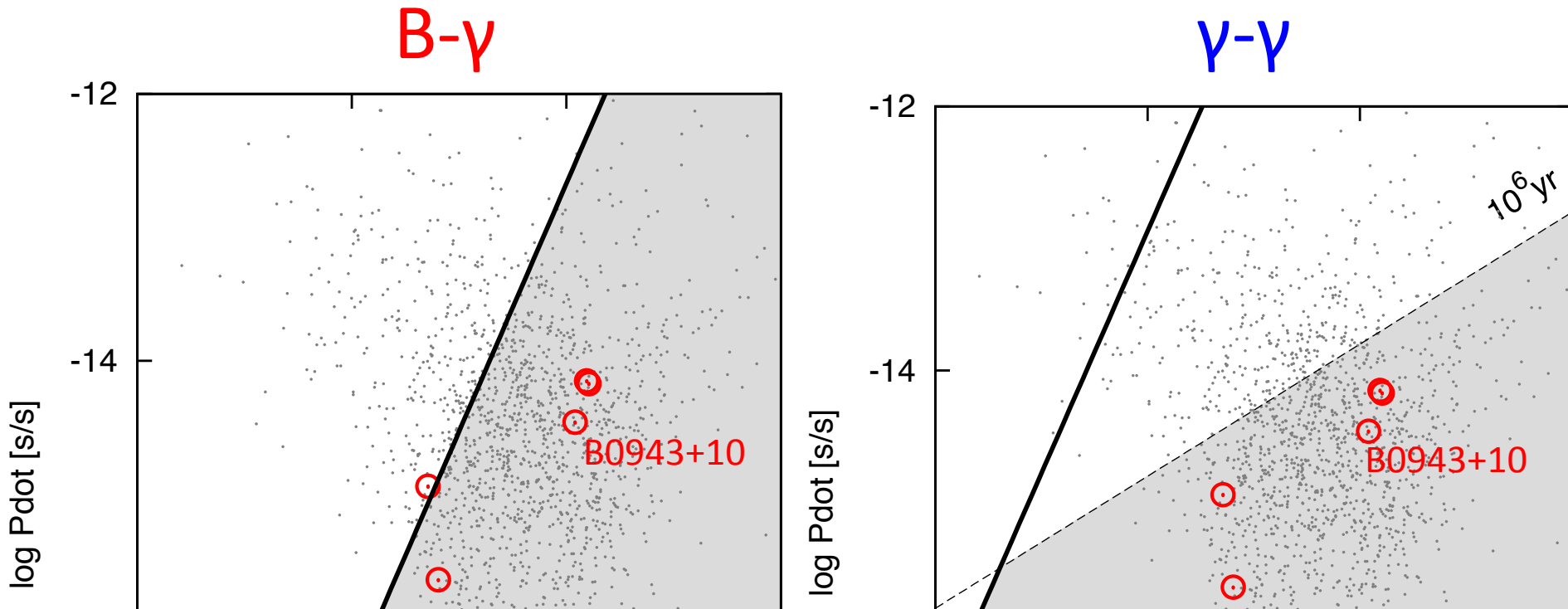
# 結果 (内向き)

SK & Tanaka 14



# 結果 (内向き)

SK & Tanaka 14

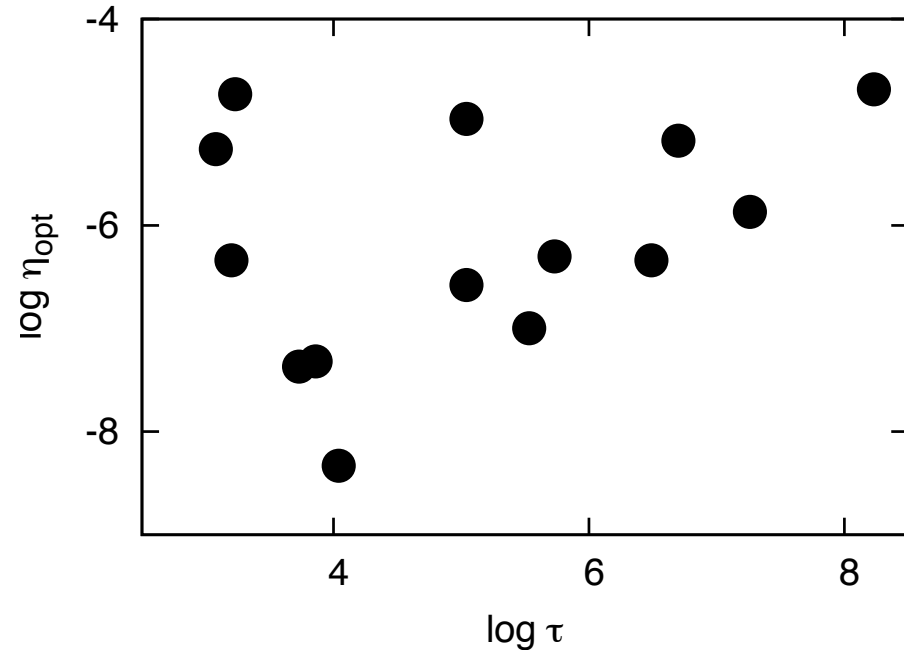
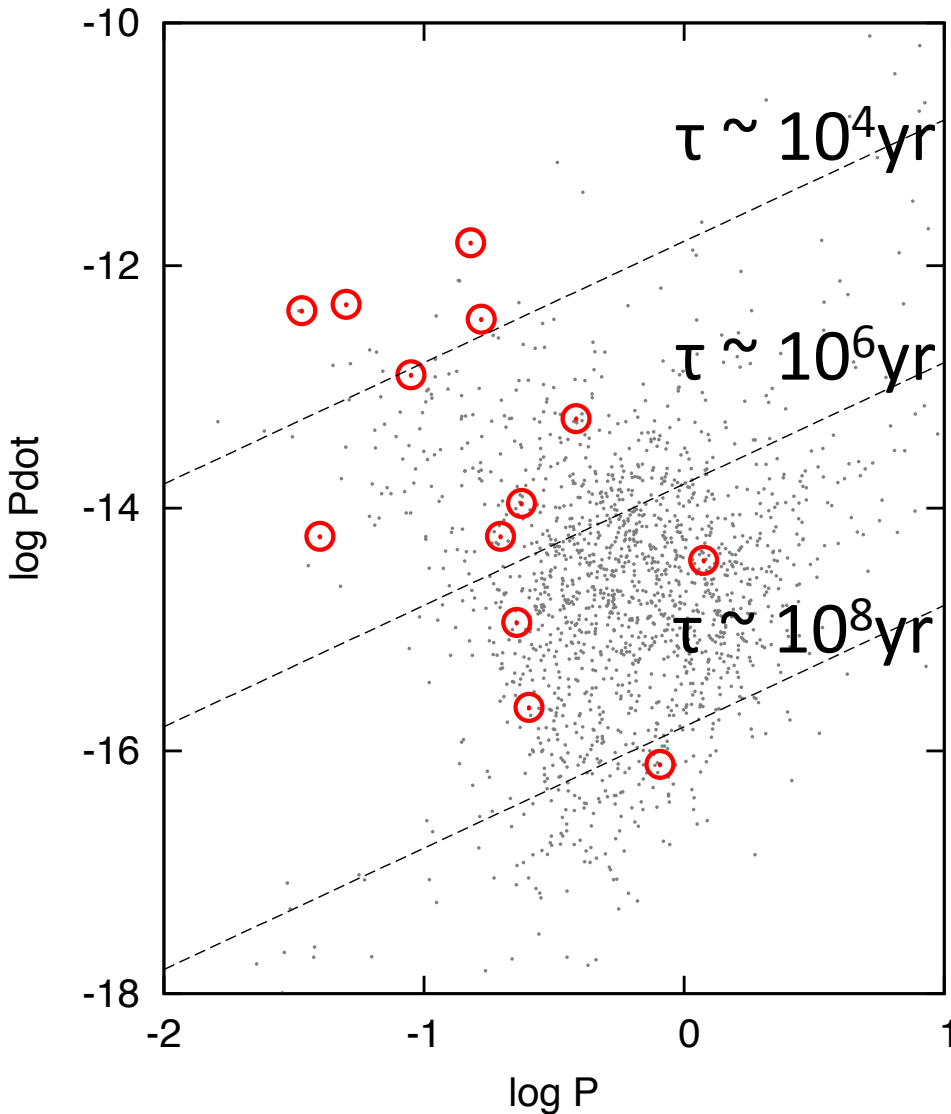


$L_{sd} < 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$  では粒子の加速、生成は星のごく近傍。  
ただし $\sim 2$ 倍程度星から離れている必要がある。

$L_{sd} < 10^{32} - 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$  ではシンクロトロン放射で観測を説明できない。逆コンプトン散乱が考えられるが、この場合も星近傍 ( $\sim 10R_{NS}$ ) が放射領域となる。

# パルサーからの可視光放射

年齢を問わず検出されている。



2次粒子からのシンクロトロン放射とすると、振動数が小さいほど放射領域の下限が厳しい。

$$\nu_{\text{obs}} > \nu_{\text{cut}}$$

$$\nu_{\text{cut}} = \frac{eB}{2\pi m_e c}$$

# 放射領域の下限

$$R_{lc} = Pc/2\pi$$

$$R_{NS} \sim 10^6 \text{ cm}$$

ベキ指数が  $> -1/3$  なので

$$\nu_{\text{obs}} > \nu_{\text{cut}}$$

$$\nu_{\text{cut}} = \frac{eB}{2\pi m_e c}$$

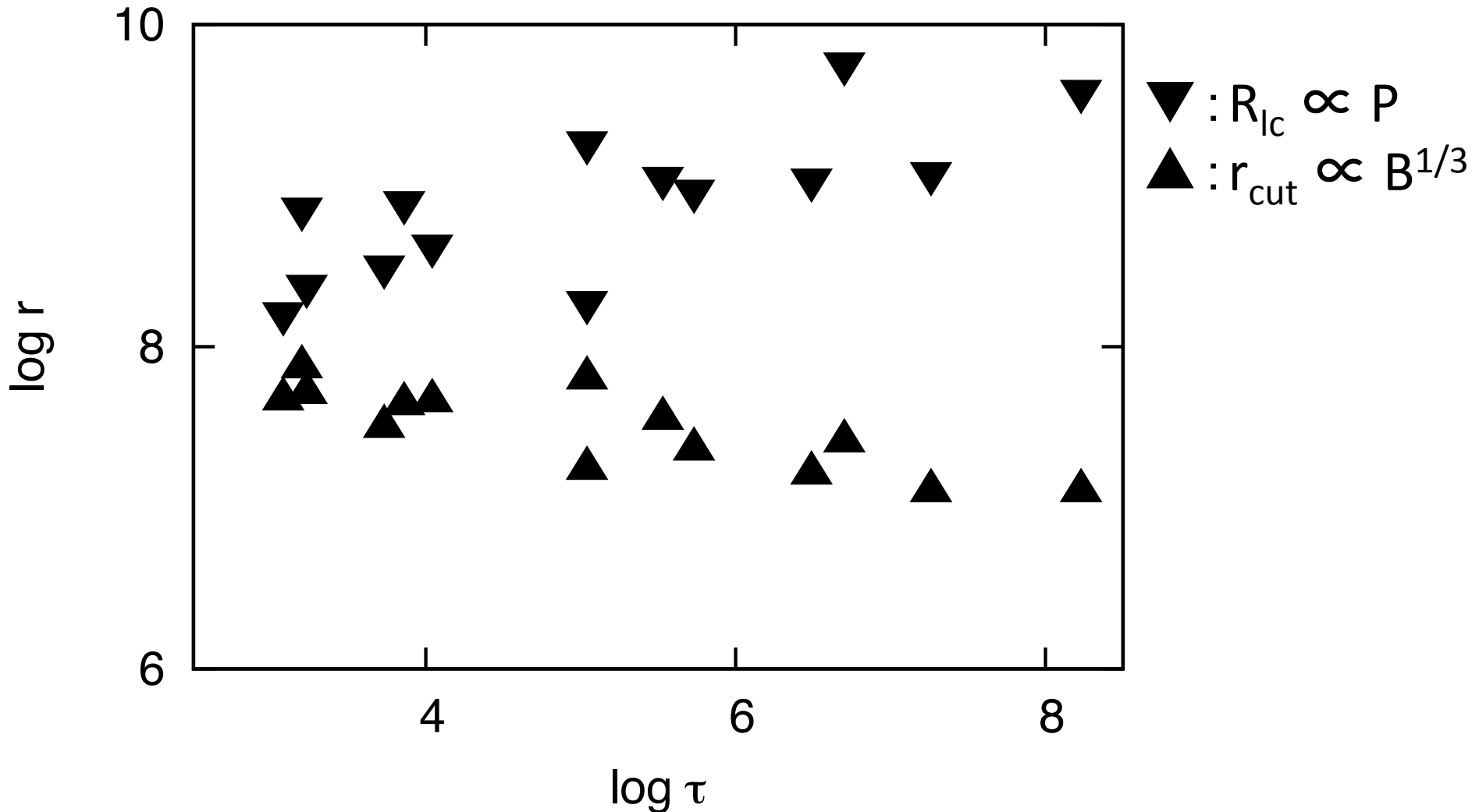
双極磁場を仮定すると、 $B(r) = B_s (r/R_{NS})^{-3}$

放射領域に下限が得られる。

$$\left( \frac{r}{10^6 \text{ cm}} \right) > 14 \left( \frac{\nu_{\text{obs}}}{10^{15} \text{ Hz}} \right)^{-1/3} \left( \frac{B_s}{10^{12} \text{ G}} \right)^{1/3}$$

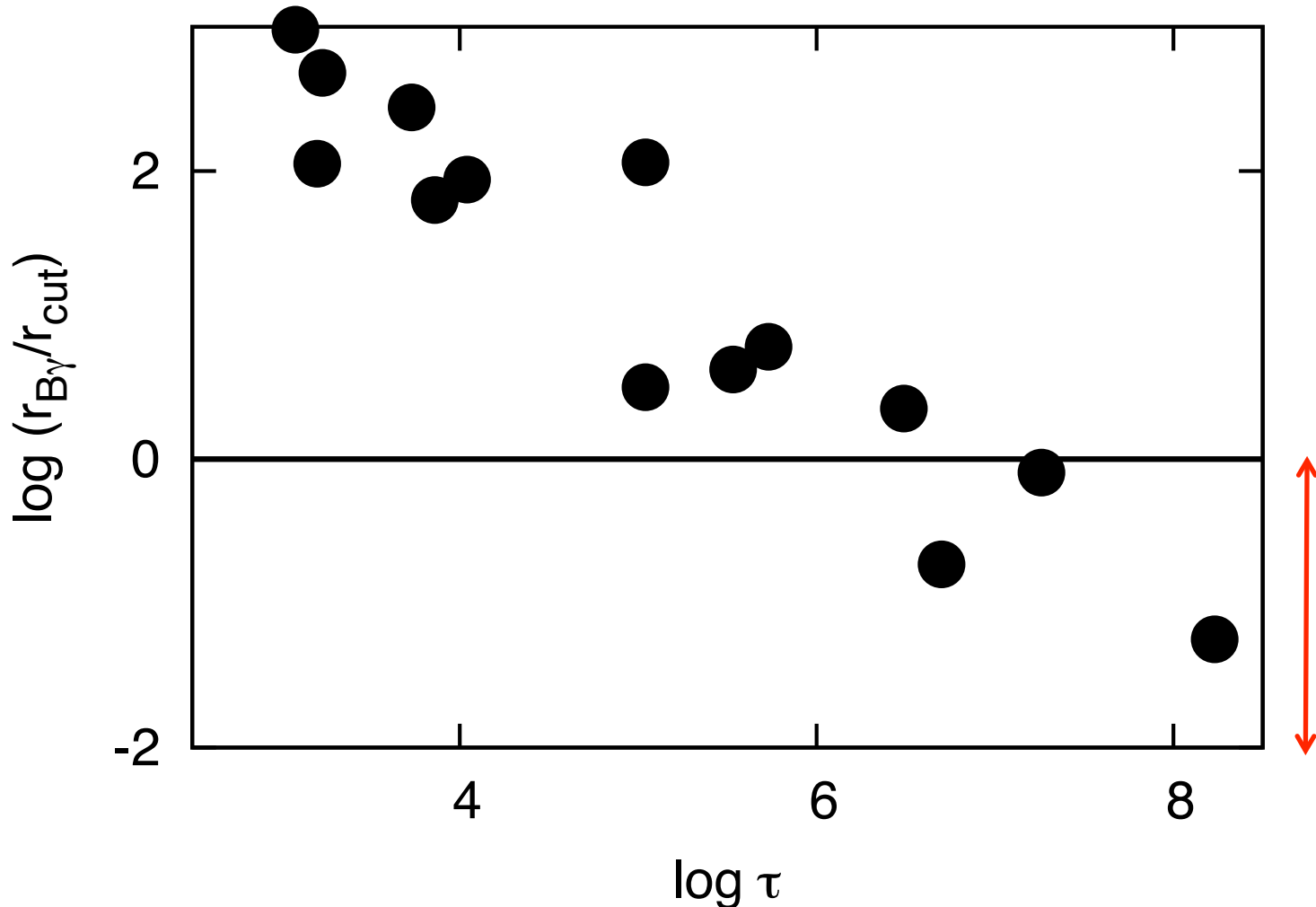
# 放射領域

可視光の放射領域の下限は  $\sim 10 - 100 R_{NS}$  程度。



# B- $\gamma$ 反応が可能か？

B- $\gamma$  反応では説明できない領域 (polar cap以外) で可視光の放射が起きている天体が存在する。





# まとめ

- ・回転駆動型パルサーの回転エネルギー引き抜きには、プラズマの供給が重要なパラメーターの一つと考えられる。
- ・若いパルサーでは、星から離れた領域から $\gamma$ 線が放出されていることは確立した。**polar cap + current sheet** vs **outer gap** という構図で議論が展開されている印象。
- ・年老いたパルサーでは、X線を説明するには星近傍での粒子加速、粒子生成が行われているだろう。ただし、 **$L_{sd} < 10^{32}-10^{33} \text{erg s}^{-1}$  ではシンクロトロン放射は観測を説明できない**。逆コンプトン散乱？
- ・年老いたパルサーからの可視光は、 $\gamma$ - $\gamma$ で生成された粒子からの放射でなければならない。光度曲線の確認が必要。