

量子論的

synchro-curvature radiationによる
メーザーとFRB

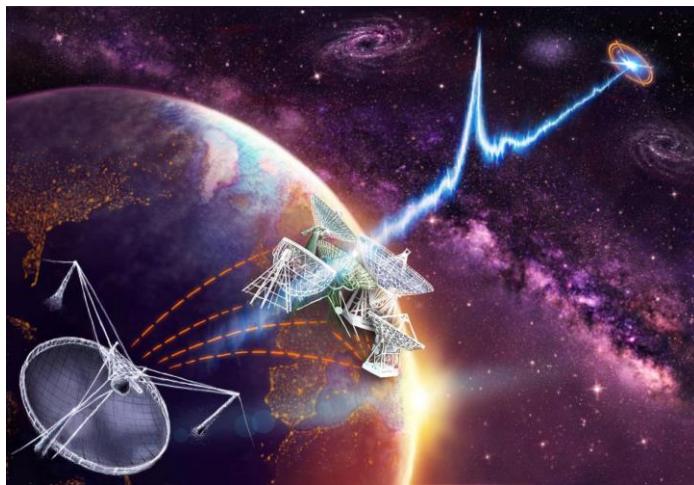
早稲田大学 修士課程1年
山田研究室 直江知哉

Introduction

なぜ**メーザー**なのか？ **FRB**の放射を説明するため

Fast Radio Burst(FRB)と呼ばれる天体現象とは？

1ms程度の間に1GHz程度の電波を放出
観測されるエネルギーは1Jy($10^{-23} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)程度
高い輝度温度($\sim 10^{35} \text{ K}$)
パルスを繰り返すものとそうでないものがある
発生機構は不明



Danielle Futselaar, www.artsource.nl.



<https://www.parkes.atnf.csiro.au/>

Introduction

なぜメーザーなのか？

FRBの放射を説明するため

arXiv.org > astro-ph > arXiv:1901.04525

Search or Article ID

(Help | Advanced search)

Astrophysics > High Energy Astrophysical Phenomena

A Second Source of Repeating Fast Radio Bursts

The CHIME/FRB Collaboration: M. Amiri, K. Bandura, M. Bhardwaj, P. Boubel, M. M. Boyce, P. J. Boyle, C. Brar, M. Burhanpurkar, T. Cassanelli, P. Chawla, J. F. Cliche, D. Cubranic, M. Deng, N. Denman, M. Dobbs, M. Fandino, E. Fonseca, B. M. Gaensler, A. J. Gilbert, A. Gill, U. Giri, D. C. Good, M. Halpern, D. S. Hanna, A. S. Hill, G. Hinshaw, C. Höfer, A. Josephy, V. M. Kaspi, T. L. Landecker, D. A. Lang, H.-H. Lin, K. W. Masui, R. Mckinven, J. Mena-Parra, M. Merryfield, D. Michilli, N. Milutinovic, C. Moatti, A. Naidu, L. B. Newburgh, C. Ng, C. Patel, U.-L. Pen, T. Pinsonneault-Marotte, Z. Pleunis, M. Rafiei-Ravandi, M. Rahman, S. M. Ransom, A. Renard, P. Scholz, J. R. Shaw, S. R. Siegel, K. M. Smith, I. H. Stairs, S. P. Tendulkar, I. Tretyakov, K. Vanderlinde, P. Yadav

(Submitted on 14 Jan 2019)

The discovery of a repeating Fast Radio Burst (FRB) source, FRB 121102, eliminated models involving cataclysmic events for this source. No other repeating FRB has yet been detected in spite of many recent FRB discoveries and follow-ups, suggesting repeaters may be rare in the FRB population. Here we report the detection of six repeat bursts from FRB 180814.J0422+73, one of the 13 FRBs detected by the Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) FRB project during its pre-commissioning phase in July and August 2018. These repeat bursts are consistent with originating from a single position on the sky, with the same dispersion measure (DM), $\sim 189 \text{ pc cm}^{-3}$. This DM is approximately twice the expected Milky Way column density, and implies an upper limit on the source redshift of 0.1, at least a factor of ~ 2 closer than FRB 121102. In some of the repeat bursts, we observe sub-pulse frequency structure, drifting, and spectral variation reminiscent of that seen in FRB 121102, suggesting similar emission mechanisms and/or propagation effects. This second repeater, found among the first few CHIME/FRB discoveries, suggests that there exists -- and that CHIME/FRB and other wide-field, sensitive radio telescopes will find -- a substantial population of repeating FRBs.



Danielle Futselaar, www.artsource.nl.



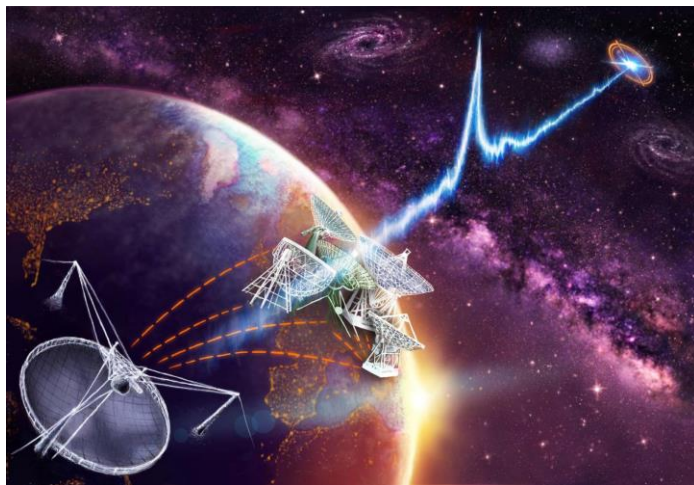
<https://www.parkes.atnf.csiro.au/>

Introduction

なぜ**メーザー**なのか？ **FRB**の放射を説明するため

Fast Radio Burst(FRB)と呼ばれる天体現象とは？

1ms程度の間に1GHz程度の電波を放出
観測されるエネルギーは1Jy($10^{-23} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)程度
高い輝度温度($\sim 10^{35} \text{ K}$)
パルスを繰り返すものとそうでないものがある
発生機構は不明



Danielle Futselaar, www.artsource.nl.



<https://www.parkes.atnf.csiro.au/>

Introduction

なぜメーザーなのか？ **FRB**の放射を説明するため

Fast Radio Burst(FRB)と呼ばれる天体現象とは？

1ms程度の間に1GHz程度の電波を放出
観測されるエネルギーは1Jy($10^{-23} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)程度

高い輝度温度($\sim 10^{35} \text{ K}$)

パルスを繰り返すものとそうでないものがある
発生機構 不明



FRBは**コヒーレント光**によって生じる

コヒーレント光の発生機構

Particle bunching
メーザー

Introduction

なぜメーザーなのか？ **FRB**の放射を説明するため

Fast Radio Burst(FRB)と呼ばれる天体現象とは？

1ms程度の間に1GHz程度の電波を放出
観測されるエネルギーは1Jy($10^{-23} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)程度

高い輝度温度($\sim 10^{35} \text{ K}$)

パルスを繰り返すものとそうでないものがある
発生機構 不明



FRBは**コヒーレント光**によって生じる

コヒーレント光の発生機構

メーザー

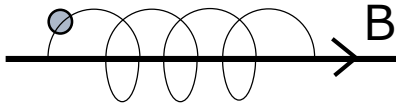
こっちを考える

どのような運動による放射を考えるか？

中性子星の磁気圏からの放射を考える

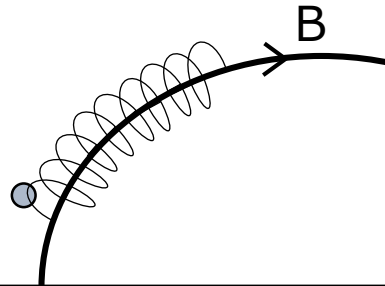
中性子星の磁気圏の粒子の運動…大きく3つに分類

磁力線のまわりを螺旋運動



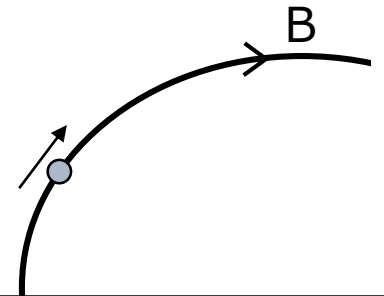
Synchrotron
radiation

2つの中間の運動



Synchro-Curvature
radiation

曲がった磁力線に沿って運動



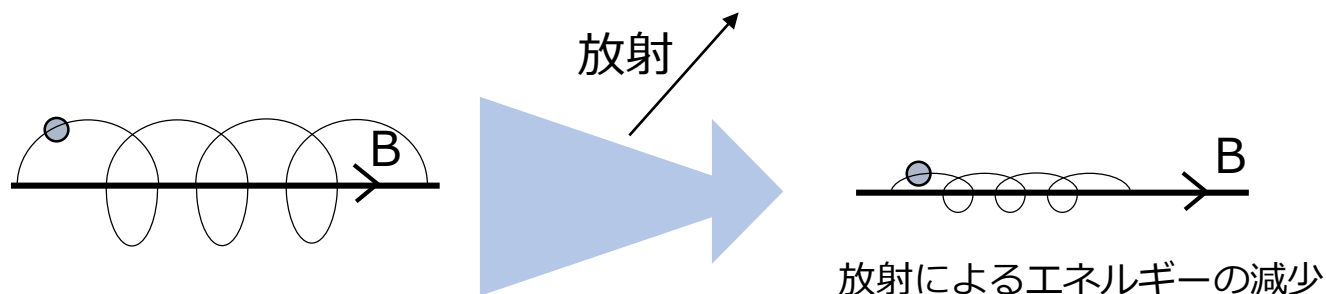
Curvature
radiation

なぜ量子論なのか？

中性子星の極付近の磁場の強いところでは粒子が数メートルも進むと放射によって粒子のエネルギーがランダウ準位の基底状態ぐらいまで下がる

⇒ 量子論の影響が出てくる

S.R. Kelner et al, 2013



先行研究

- ✓ 古典論のSynchro-Curvature radiationでメーザーが生じるか
S.R. Kelner et al, 2015
- ✓ 量子論的にSynchro-Curvature radiationを計算
G.Voison et al, 2017a,b
- ✗ 量子論のSynchro-Curvature radiationでメーザーが生じるかどうか

目標

量子論のSynchro-Curvature radiationでメーザーが起きるか調べる

研究方法 (量子論でメーザーが生じる条件)

吸収と誘導放射の反応断面積を比べればよい

⇒どのように反応断面積を求めるか？

計算
の
流れ

Dirac方程式を解いて波動関数を求める

$$\left[i\hbar\gamma^\mu \left(\partial_\mu + i\frac{e}{\hbar}A_\mu \right) - mc \right] \psi = 0$$

電子と光子の相互作用ハミルトニアンを計算

$$\hat{H}_{int} = \int ec\bar{\psi}\gamma^\mu\psi\hat{A}_\mu d^3\vec{x}$$

フェルミの黄金律で遷移確率を計算→反応断面積

$$\left| \int_0^t dt' e^{i\frac{E_f - E_i + \hbar\omega}{\hbar}t'} \left\langle f \left| \hat{H}_{int}/\hbar \right| i \right\rangle \right|^2$$

↑ ↑
終状態 始状態

研究方法 (量子論でメーザーが生じる条件)

吸収と誘導放射の反応断面積を比べればよい

⇒どのように反応断面積を求めるか？

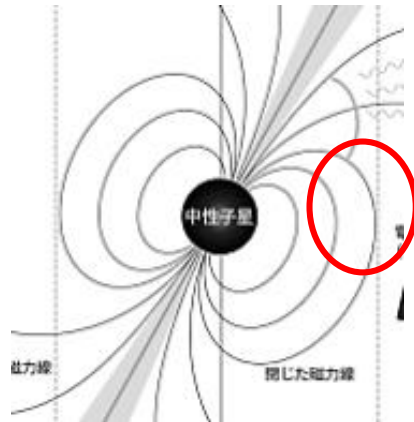
計算
の
流
れ

Dirac方程式を解いて波動関数を求める

$$\left[i\hbar\gamma^\mu \left(\partial_\mu + i\frac{e}{\hbar}A_\mu \right) - mc \right] \psi = 0$$

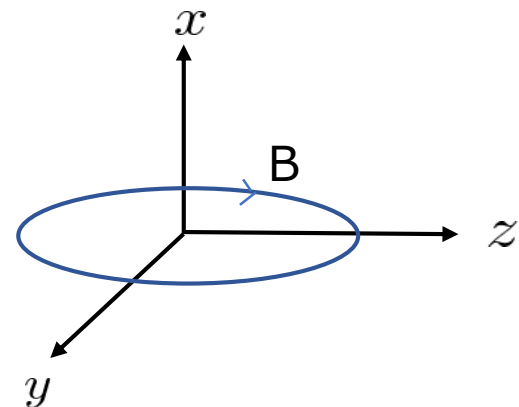
電磁場

ポテンシャルを計算



<http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2012/0223.shtml>

Dipole磁場で解くのは大変



軸対称の円形磁場で近似

研究方法 (量子論でメーザーが生じる条件)

吸収と誘導放射の反応断面積を比べればよい

⇒どのように反応断面積を求めるか？

計算
の
流れ

Dirac方程式を解いて波動関数を求める

$$\left[i\hbar\gamma^\mu \left(\partial_\mu + i\frac{e}{\hbar}A_\mu \right) - mc \right] \psi = 0$$

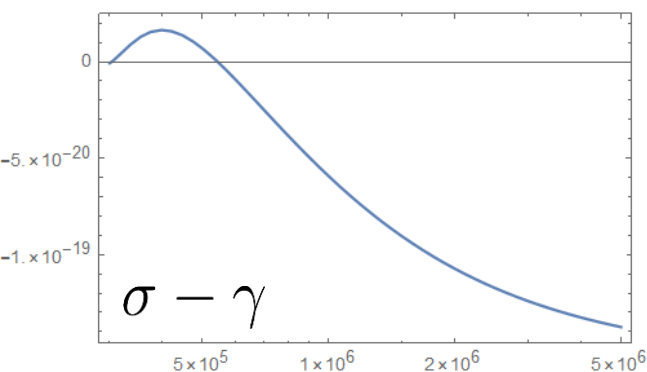
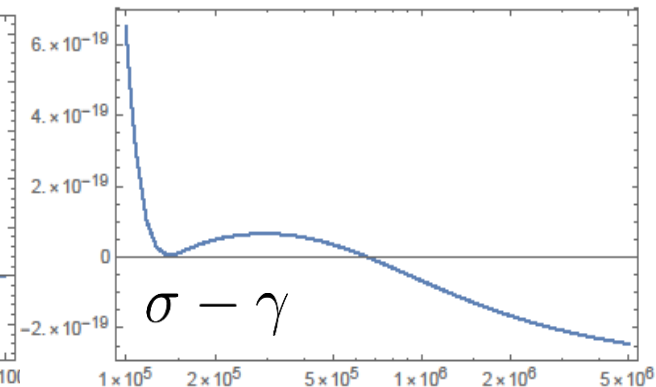
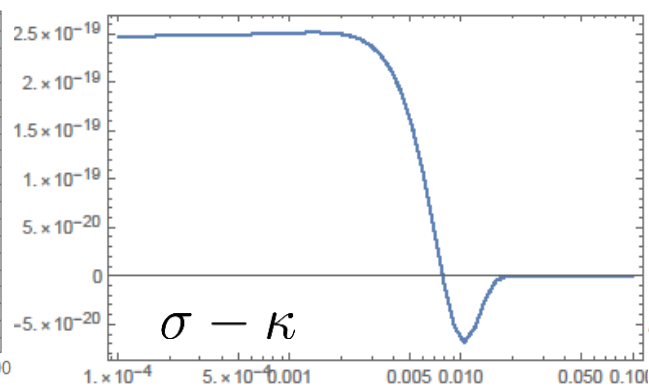
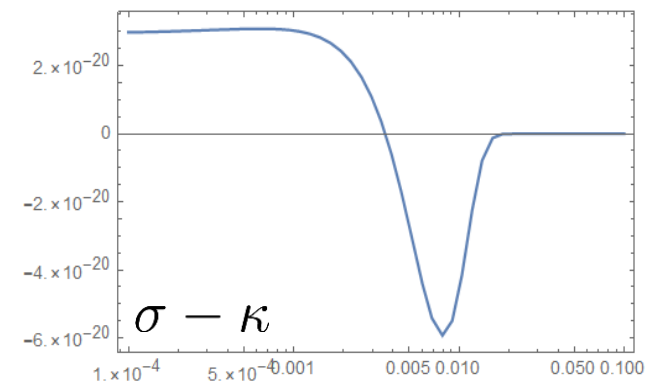
電子と光子の相互作用ハミルトニアンを計算

$$\hat{H}_{int} = \int ec\bar{\psi}\gamma^\mu\psi\hat{A}_\mu d^3\vec{x}$$

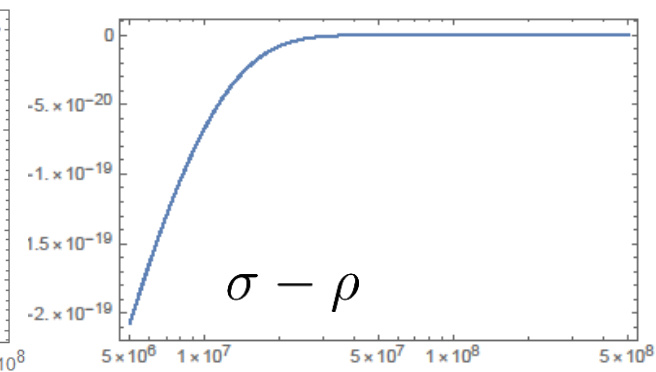
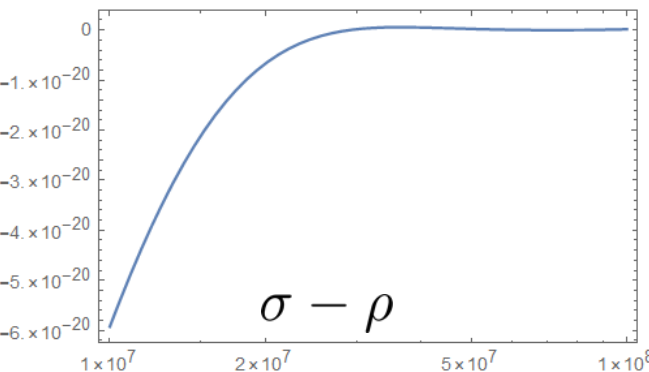
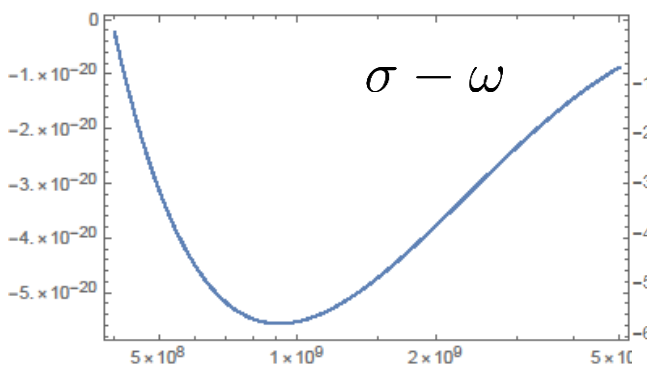
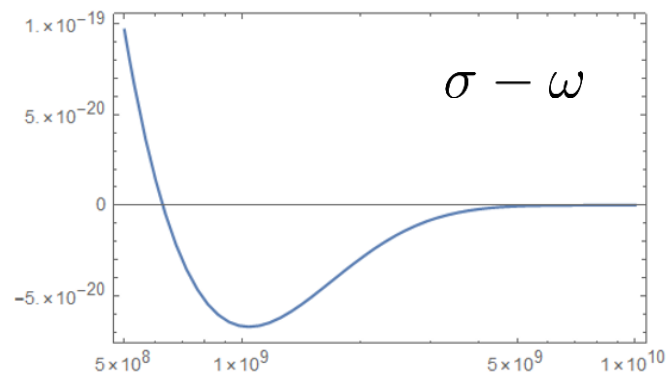
フェルミの黄金律で遷移確率を計算→反応断面積

$$\left| \int_0^t dt' e^{i\frac{E_f - E_i + \hbar\omega}{\hbar}t'} \left\langle f \left| \hat{H}_{int}/\hbar \right| i \right\rangle \right|^2$$

↑ ↑
終状態 始状態



結果



結果

✓ 1GHzのメーザーに適しているのは

基底状態(Curvature)

$$B = 10^4 \text{ G}$$

$$\gamma \gtrsim 5 \times 10^5$$

$$\rho \lesssim 3 \times 10^7 \text{ cm}$$

(磁力線の曲率半径)

励起状態(Synchro-curvature)

$$B = 5 \times 10^3 \text{ G}$$

$$\gamma \gtrsim 7 \times 10^5$$

$$\rho \lesssim 5 \times 10^7 \text{ cm}$$

✓ 他の周波数でのメーザーに適しているのは

5GHz

$$B = 3 \times 10^4 \text{ G}$$

$$B = 2.5 \times 10^4 \text{ G}$$

0.5GHz

$$B = 5 \times 10^3 \text{ G}$$

$$B = 2 \times 10^3 \text{ G}$$

結果

- ✓ 1GHzのメーザーに適しているのは

基底状態(Curvature)

$$B = 10^4 \text{ G}$$

$$\gamma \gtrsim 5 \times 10^5$$

$$\rho \lesssim 3 \times 10^7 \text{ cm}$$

(磁力線の曲率半径)

- ✓ 他の周波数でのメ

5GHz $B = 3 \times 10^4 \text{ G}$

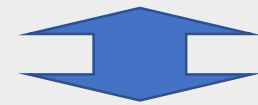
0.5GHz $B = 5 \times 10^3 \text{ G}$

古典論

Curvature radiation では

- ✓ **Drift 速度**
- ✓ **Torsion**

を考慮するとメーザーが生じる



量子論

Drift や torsion がなくても良い

 量子論が重要

結果

- ✓ 1GHzのメーザーに適しているのは

基底状態(Curvature)

励起状態(Synchro-curvature)

B

磁場が強いと高周波数

$$5 \times 10^3 \text{ G}$$

γ

磁場が弱いと低周波数に

$$7 \times 10^5$$

$$\rho \lesssim 3 \times 10^6 \text{ cm}$$

(磁力線の曲率半径)

$$\rho \lesssim 5 \times 10^7 \text{ cm}$$

- ✓ 他の周波数でのメーザーに適しているのは

5GHz

$$B = 3 \times 10^4 \text{ G}$$

$$B = 2.5 \times 10^4 \text{ G}$$

0.5GHz

$$B = 5 \times 10^3 \text{ G}$$

$$B = 2 \times 10^3 \text{ G}$$

結果

- ✓ 1 GHz のメーザーに適しているのは
メーザーに適している γ が非常に大きい

基底状態 (Curvature)

$$B = 10^4 \text{ G}$$

$$\underline{\gamma \gtrsim 5 \times 10^5}$$

$$\rho \lesssim 3 \times 10^7 \text{ cm}$$

(磁力線の曲率半径)

励起状態 (Synchro-curvature)

$$B = 5 \times 10^3 \text{ G}$$

$$\underline{\gamma \gtrsim 7 \times 10^5}$$

$$\rho \lesssim 5 \times 10^7 \text{ cm}$$

- ✓ 他の周波数でのメーザーに適しているのは

5 GHz $B = 3 \times 10^4 \text{ G}$

$$B = 2.5 \times 10^4 \text{ G}$$

0.5 GHz $B = 5 \times 10^3 \text{ G}$

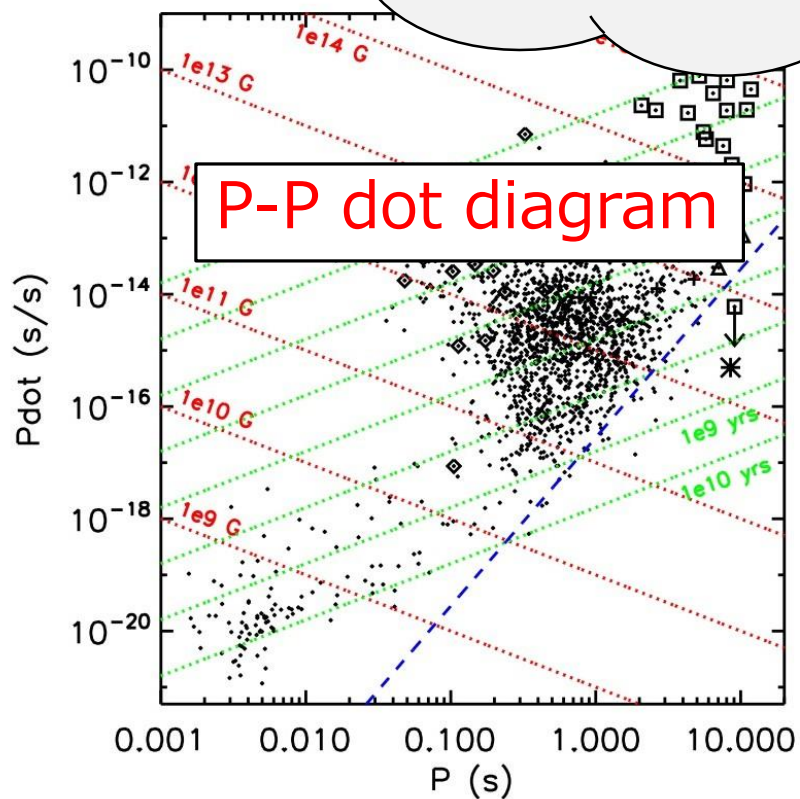
$$B = 2 \times 10^3 \text{ G}$$

考察

メーザーに適してるのは
加速領域？

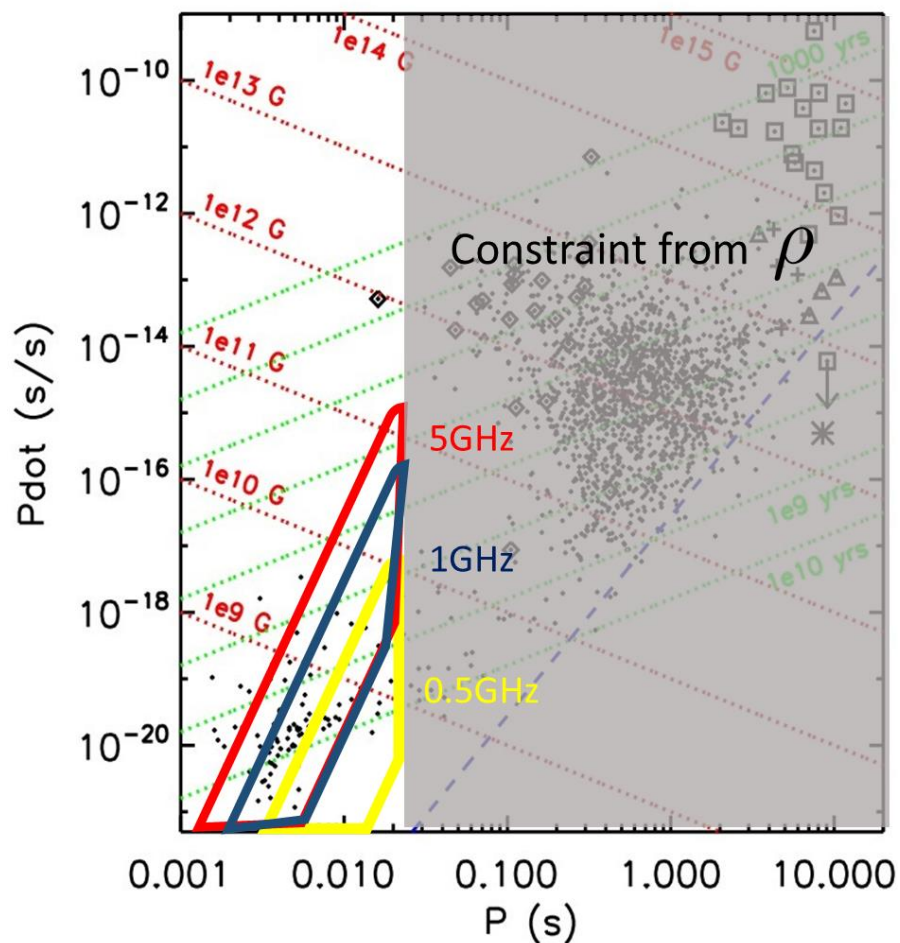
適している中性子星は？

Outer gap ?

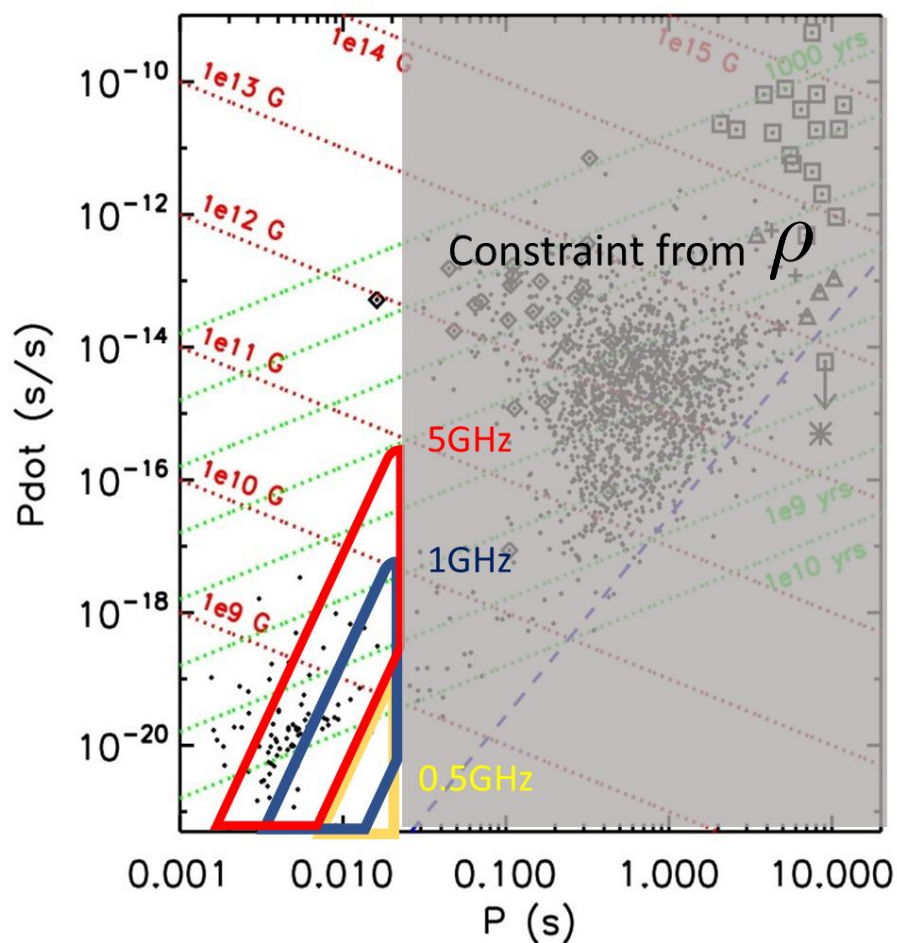


メーザーに適している中性子星

基底状態(Curvature)



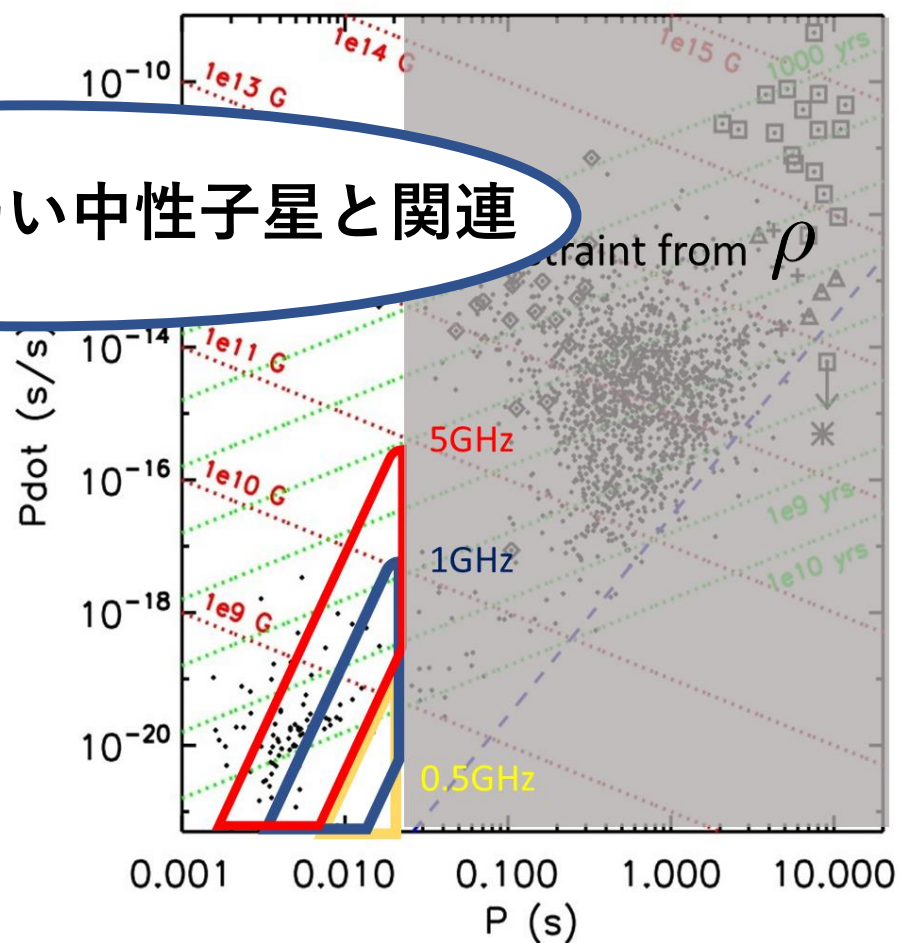
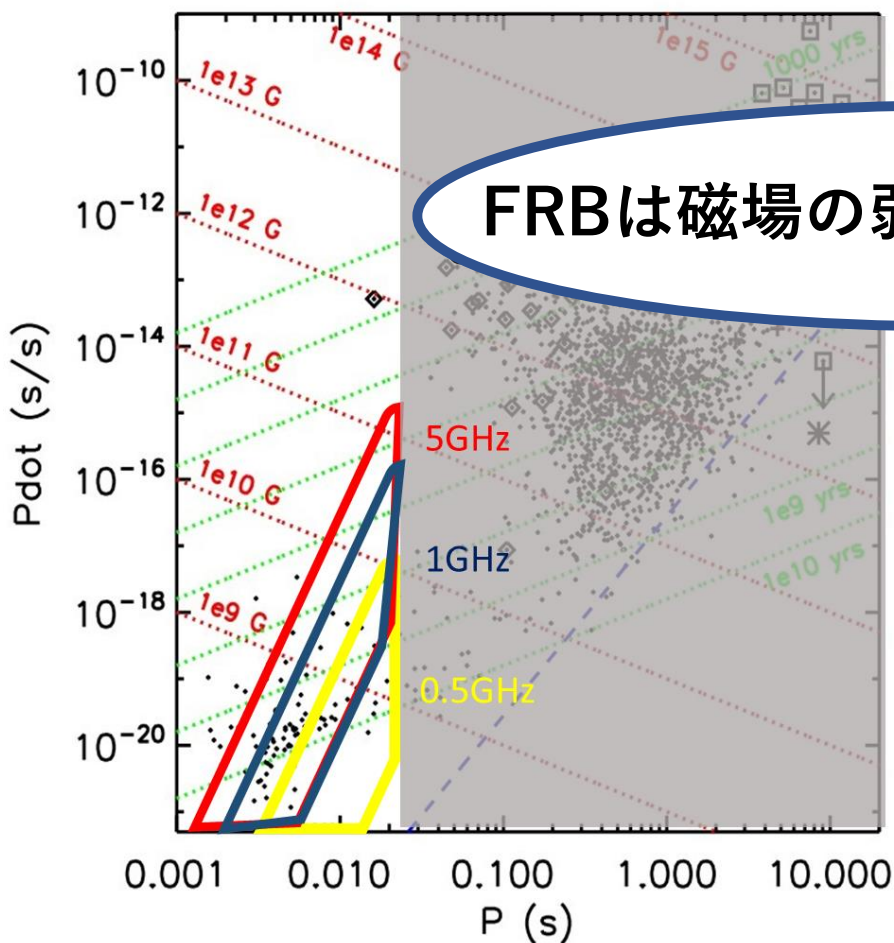
励起状態(Synchro-curvature)



メーザーに適している中性子星

基底状態(Curvature)

励起状態(Synchro-curvature)



FRBのEvent rate

FRBが磁場の弱い中性子星と関連しているとする

$$\mathcal{R}_{FRB} \sim 0.98_{-0.89}^{+1.15} \times 10^4 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{SN} \sim (1.42 \pm 0.3) \times 10^5 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$

$$\mathcal{R}_{NS} \sim \mathcal{R}_{SN}$$

$$\frac{\mathcal{R}_{NS(B_* \leq 10^{10} G)}}{\mathcal{R}_{NS}} \sim 0.1$$

$$\mathcal{R}_{FRB} \sim \mathcal{R}_{NS(B_* \leq 10^{10} G)}$$

Event rate を説明できる

エネルギー計算

- 1msの間に放出されるメーザーのエネルギーは

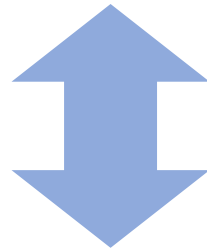
$$E_{\text{maser}} = 3 \times 10^7 \times \hbar\omega \times S \times \exp(-2n_e\sigma d)$$

基底状態(Curvature)

$$n_e \times d = 9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$$

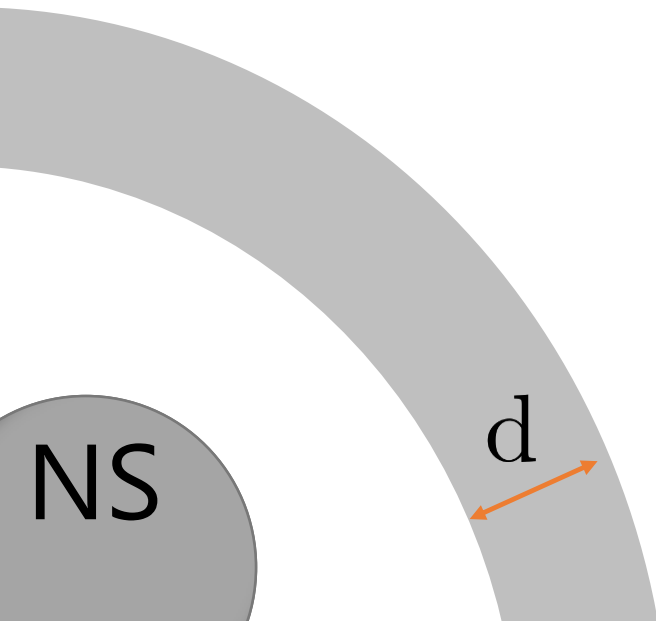
励起状態(Synchro-curvature)

$$n_e \times d = 7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$$



$$\begin{aligned} E_{\text{shell}} &= V \times n_e \times \gamma mc^2 \\ &= 10^{38} \text{ erg} \end{aligned}$$

$$n_e \times d = 10^{23} \text{ cm}^{-2}$$



エネルギー計算

- 1msの間に放出されるメーザーのエネルギーは

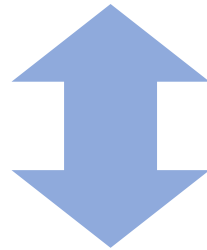
$$E_{\text{maser}} \sim 3 \times 10^{41} \text{erg}$$

基底状態(Curvature)

$$n_e \times d = 9 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$$

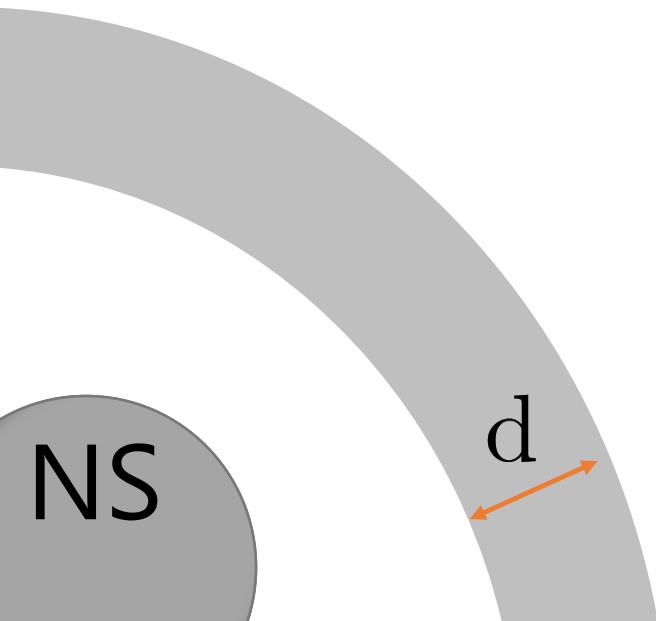
励起状態(Synchro-curvature)

$$n_e \times d = 7 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$$



$$\begin{aligned} E_{\text{shell}} &= V \times n_e \times \gamma m c^2 \\ &= 10^{38} \text{erg} \end{aligned}$$

$$n_e \times d = 10^{23} \text{cm}^{-2}$$



NS

まとめと今後の課題

- Synchro-curvature radiation, Curvature radiationの両方でメーザーが可能
 - 量子論的Curvature radiation では古典論と違いdrift速度, torsionなしでもメーザーが可能
 - FRBは**磁場の弱い中性子星**と関係していそう
 - 今回のモデルでは**周波数, エネルギー, event rate**を説明できる
-
- Rotation Measure(RM)を説明する
 - 今回考えたパラメータが現実的なのか調査
 - FRBを解明する