РАДИОПУЛЬСАРЫ

РАДИОПУЛЬСАРЫ

Предсказание ...

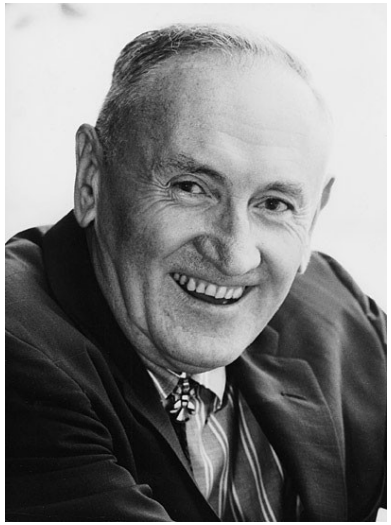
(Ландау)

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.

Л.Д. Ландау: Звезда-ядро

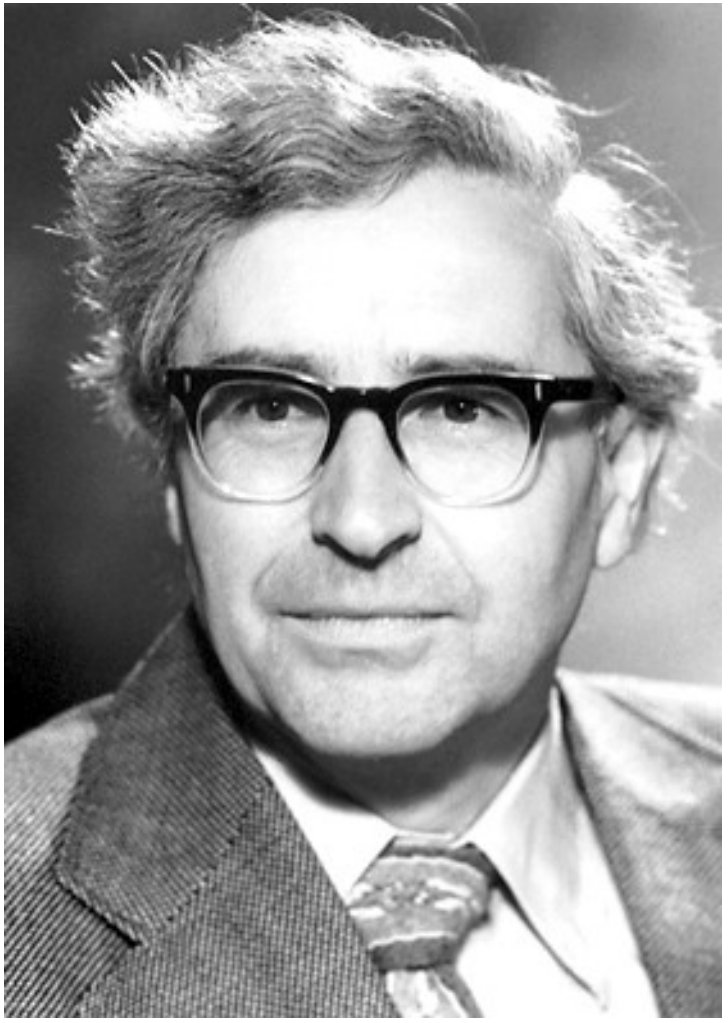
Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые

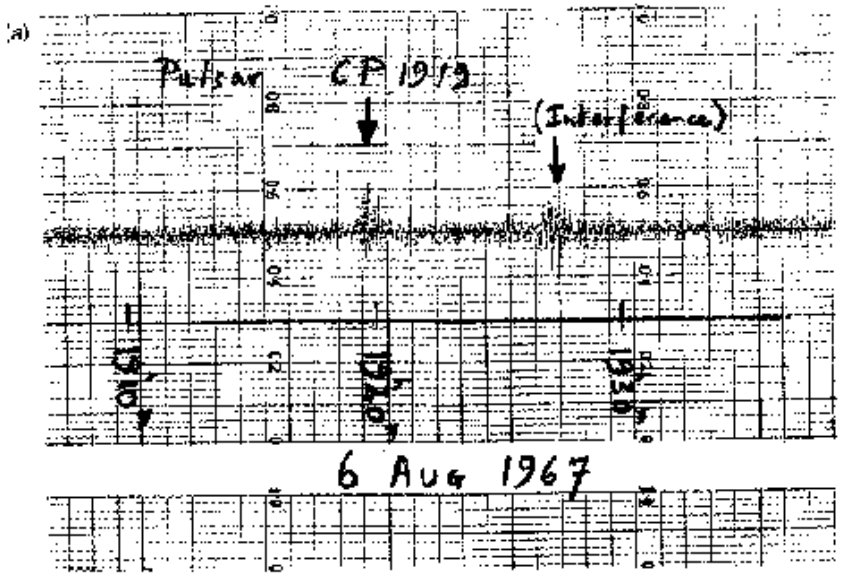
(Бааде)

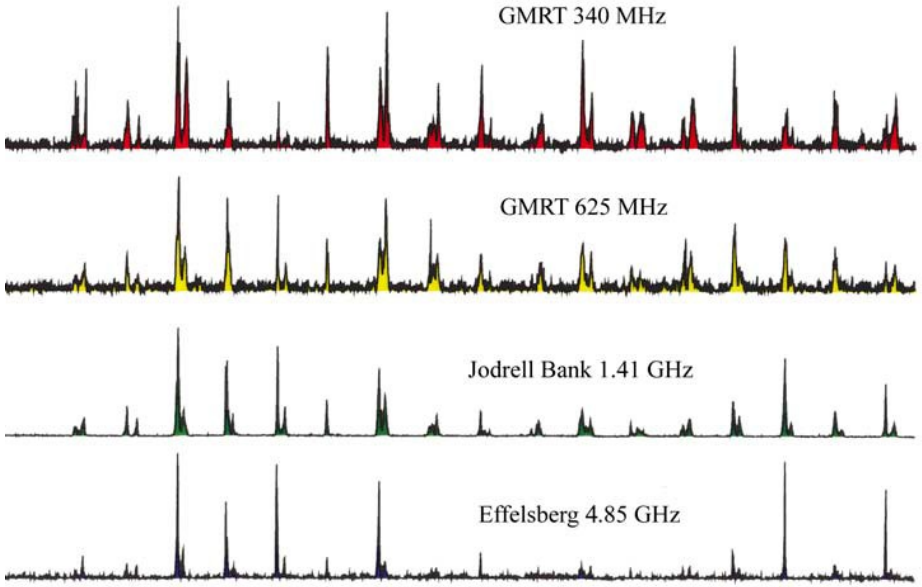


(Цвикки)

Jocelyn Bell, Antony Hewish, 1967




(a)
Pulsar CP 1919
(Interference)
6 Aug 1967


GMRT 340 MHz
GMRT 625 MHz
Jodrell Bank 1.41 GHz
Effelsberg 4.85 GHz

http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/

Catalogue version: 1.44

Predefined Variables

Name | JName | RaJ | DecJ | PMRA | PMDec

http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/

Catalogue version: 1.44

Australia Telescope National Facility

TABLE

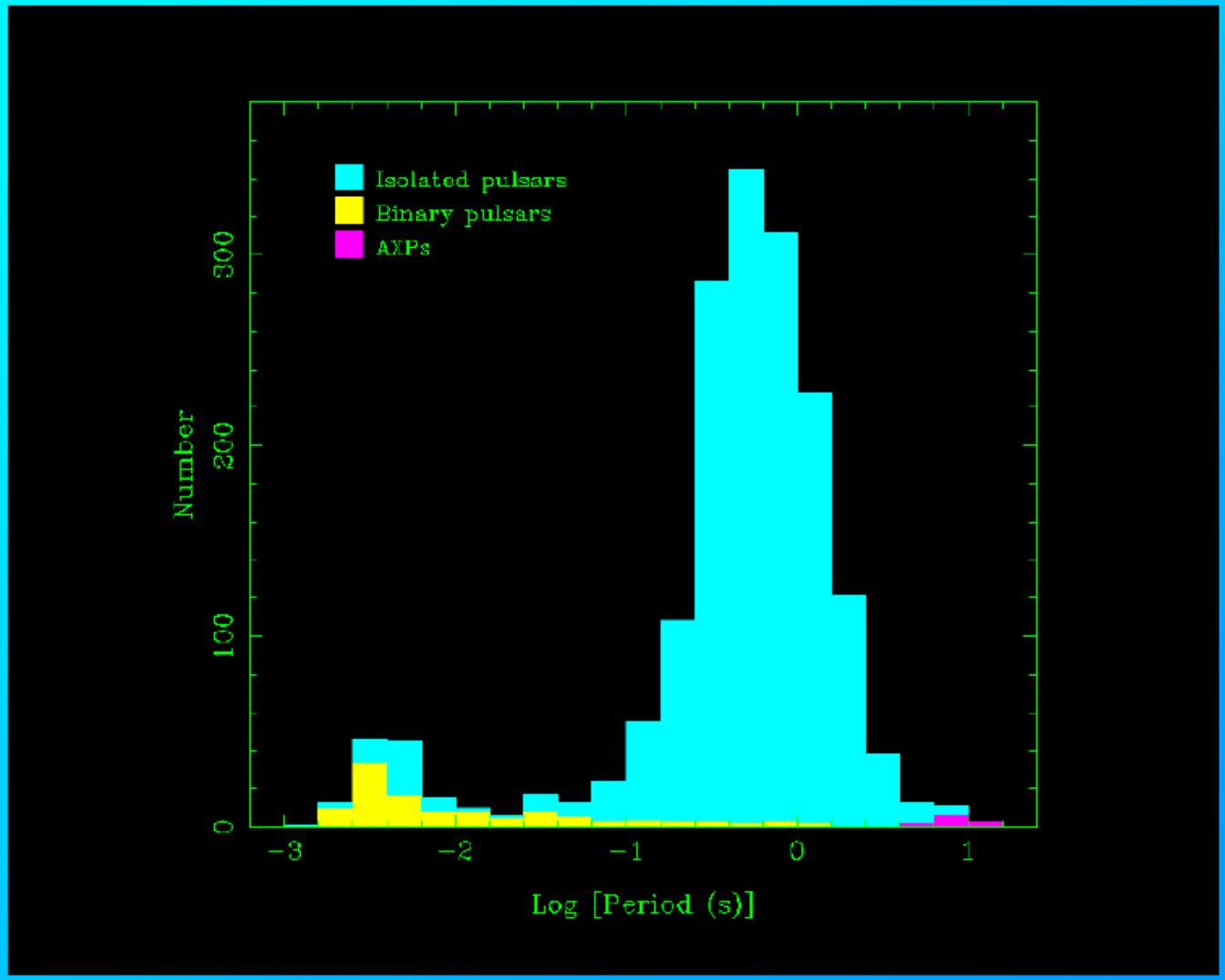
PLOT

Predefined Variables

Name | JName | RaJ | DecJ | PMRA | PMDec

Spin-Powered Pulsars: A Census

- Number of known pulsars: 1765
- Number of millisecond pulsars: 170
- Number of binary pulsars: 131
- Number of AXPs: 12
- Number of pulsars in globular clusters: 99*
- Number of extragalactic pulsars: 20

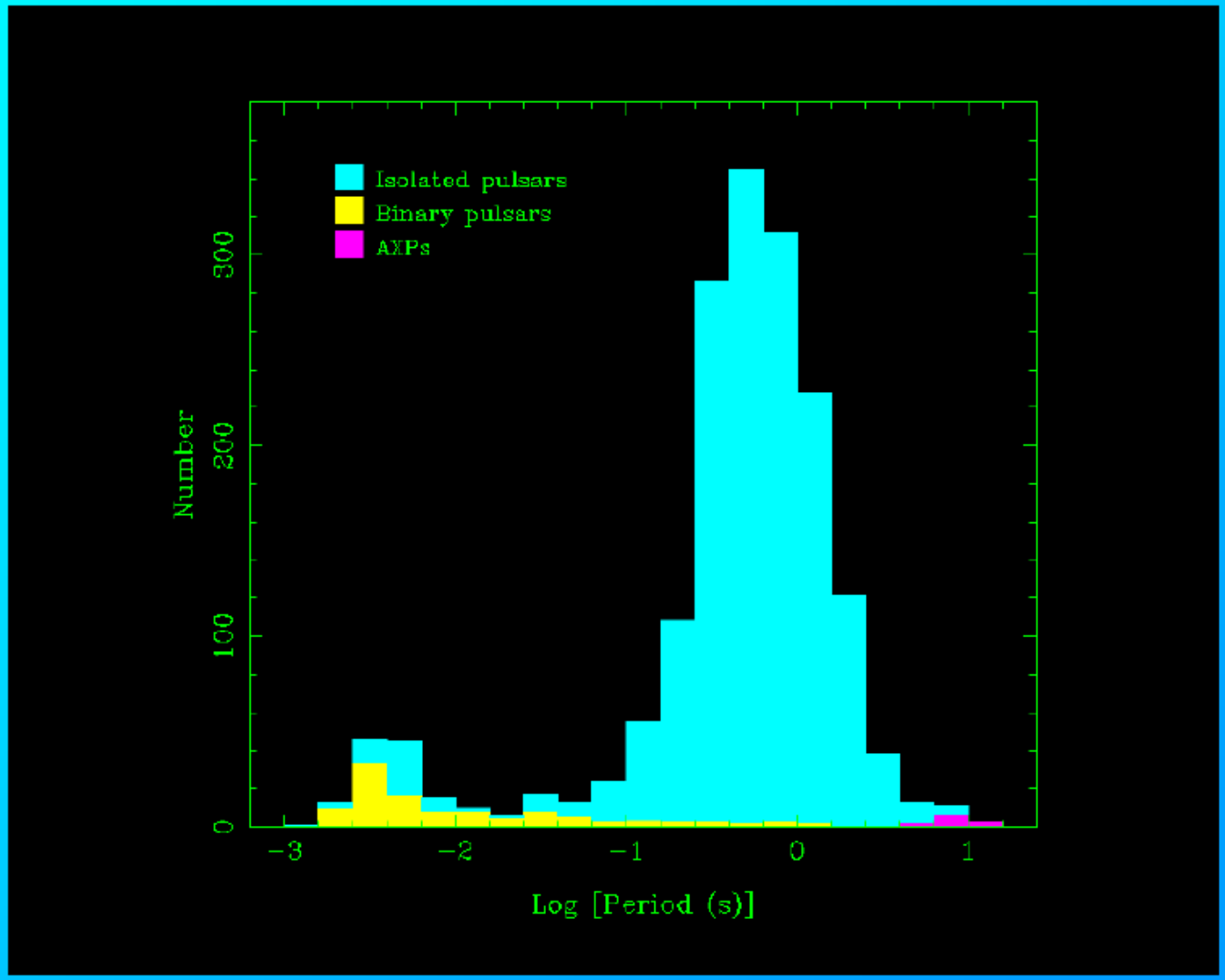


* Total known: 129 in 24 clusters (Paulo Freire's web page)

Data from ATNF Pulsar Catalogue, V1.25 (www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat; Manchester et al. 2005)

Spin-Powered Pulsars: A Census

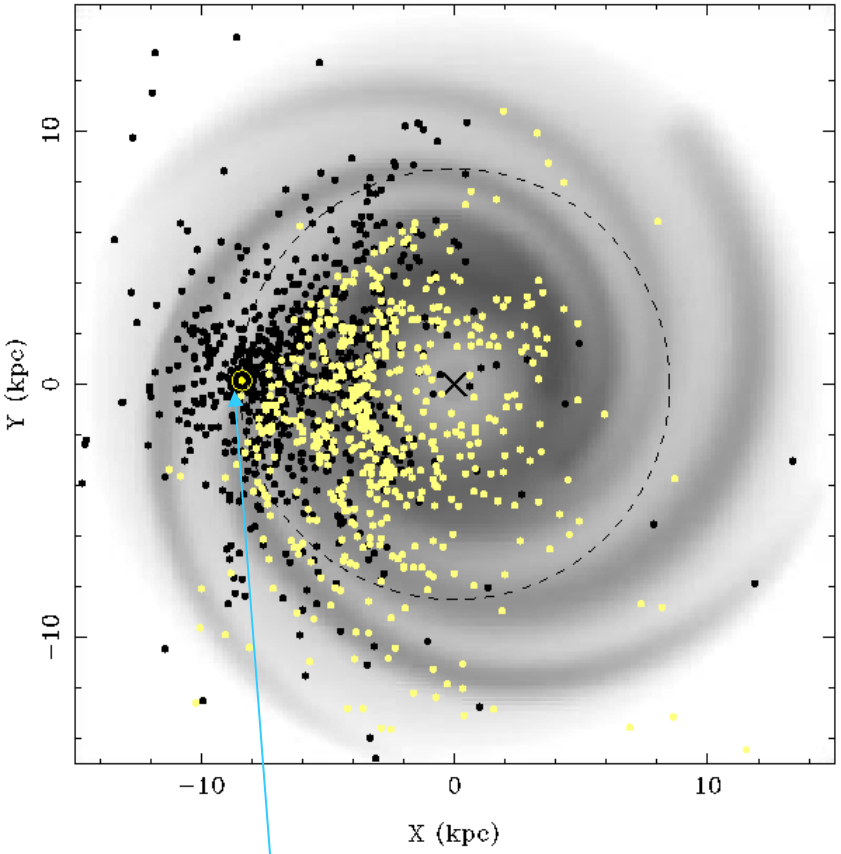
- Number of known pulsars: 2008
- Number of millisecond pulsars: 205
- Number of binary pulsars: 131
- Number of AXPs: 12
- Number of pulsars in globular clusters: 99*
- Number of extragalactic pulsars: 20



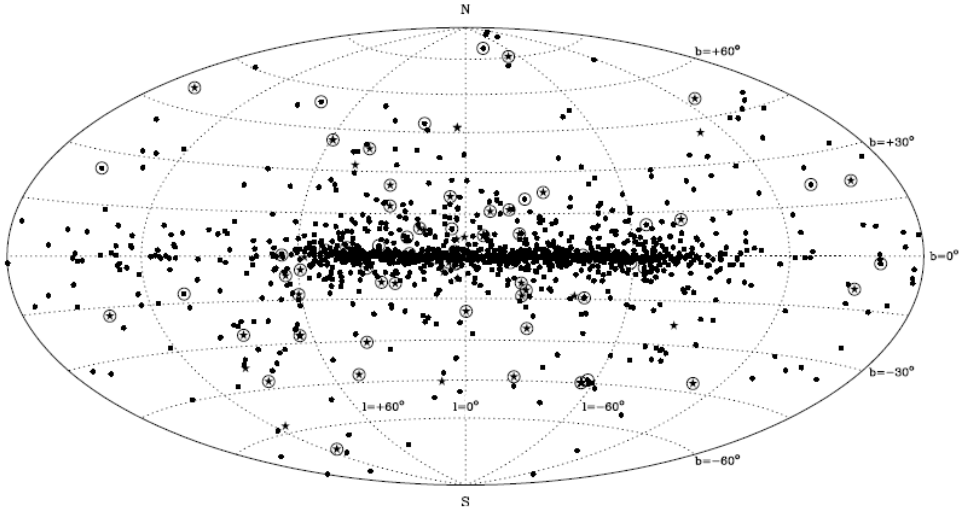
* Total known: 129 in 24 clusters (Paulo Freire's web page)

Data from ATNF Pulsar Catalogue, V1.25 (www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat; Manchester et al. 2005)

Пространственное распределение радиопульсаров



Солнце

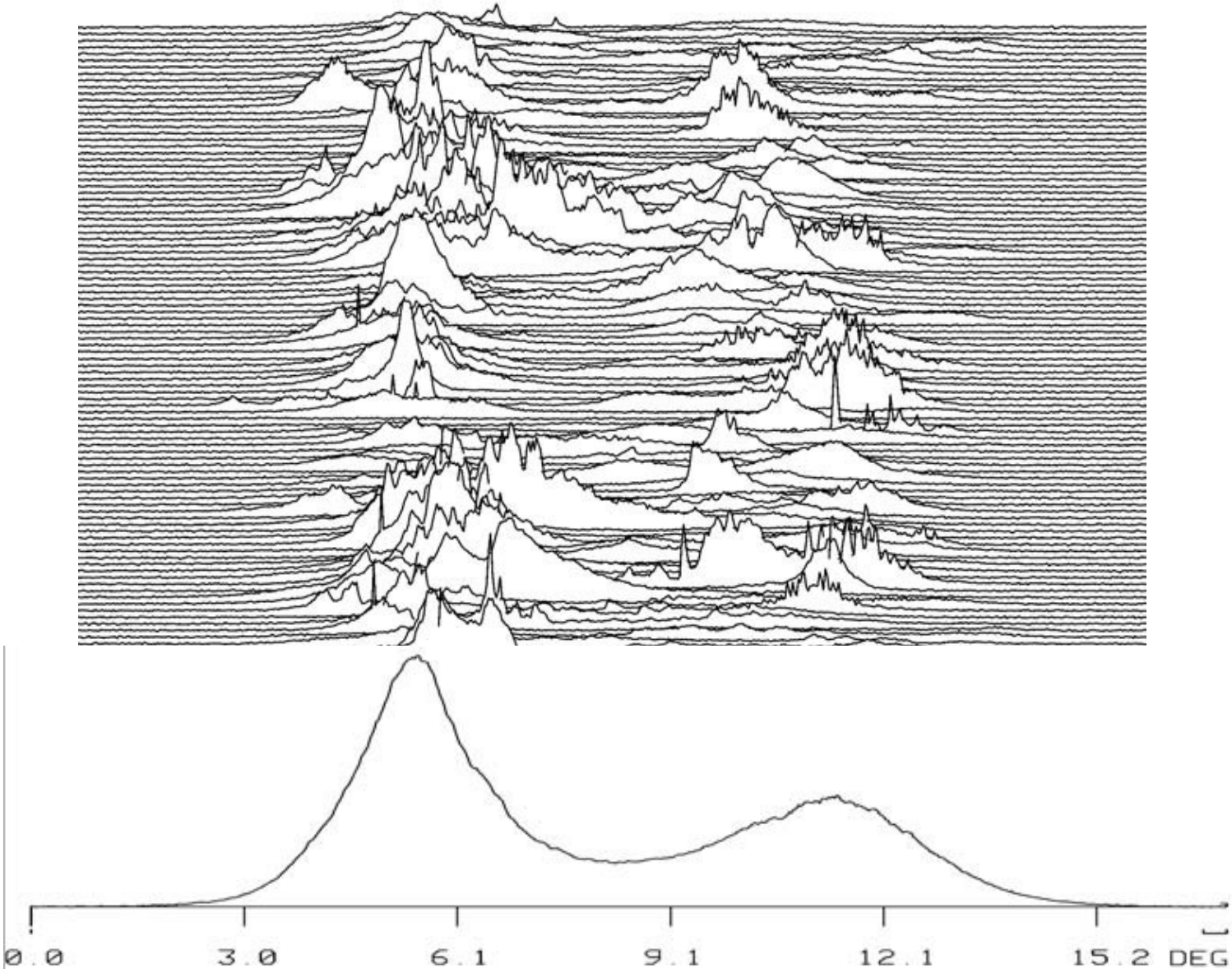


Паспортные данные

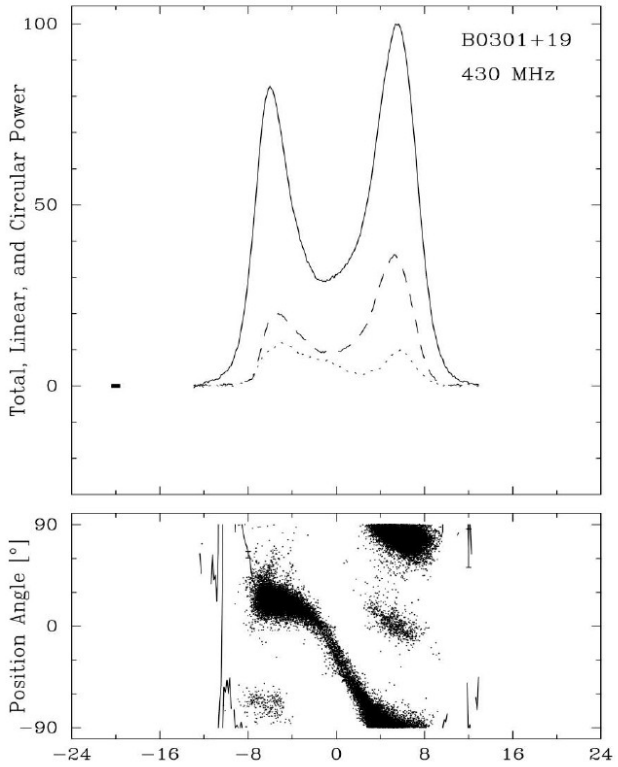
- Период P
- Производная периода $\mathrm{d}P/\mathrm{d}t$
- Средний профиль
- Мера дисперсии

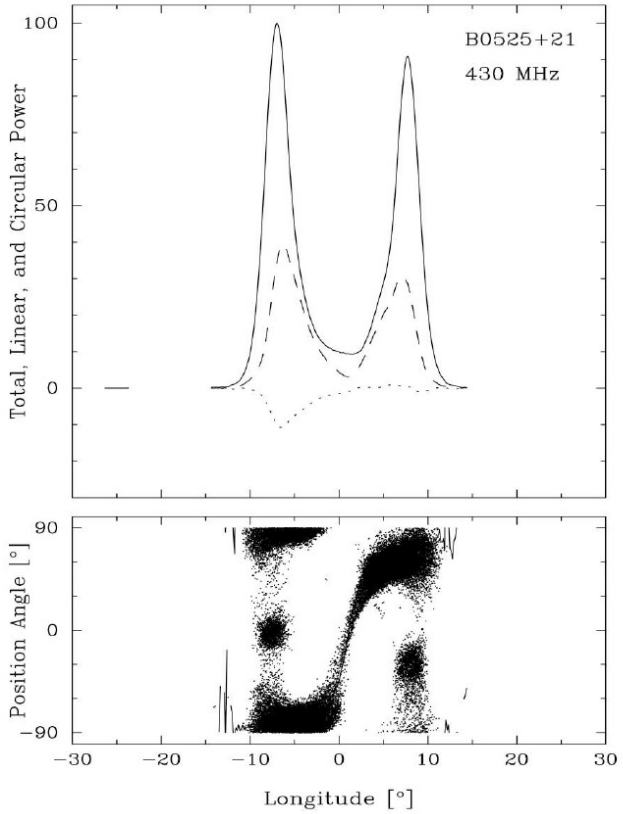
$$DM = \int_0^L n_e dl = \overline{n}_e L$$

Средний профиль

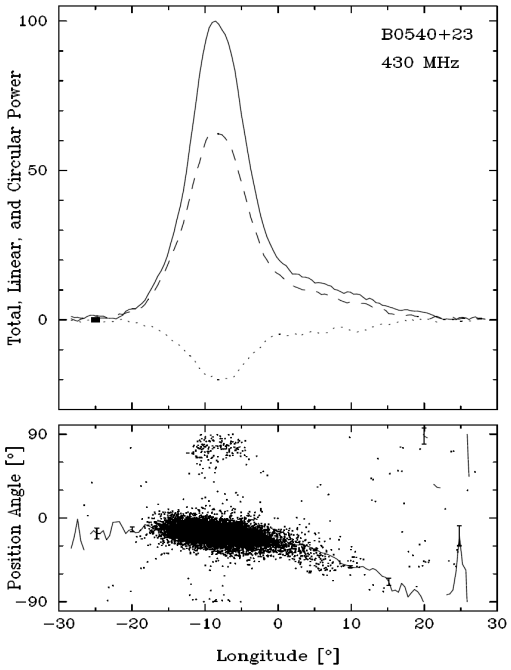


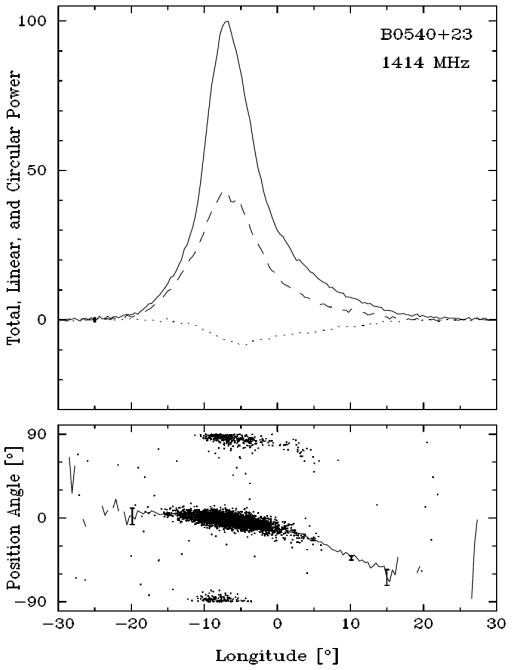
Двугорбые

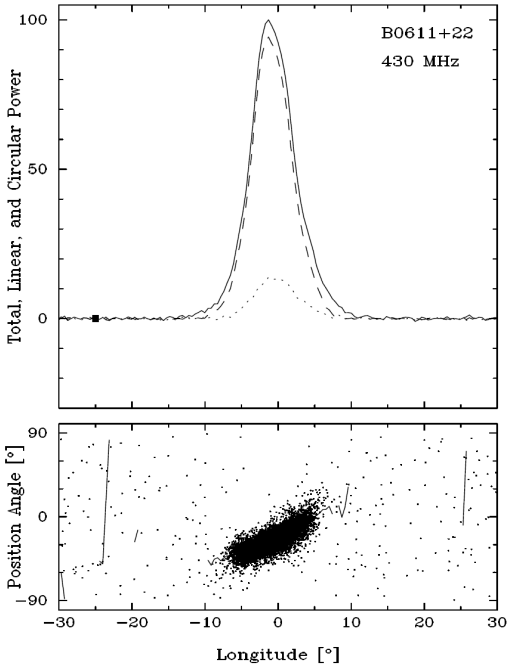

B0301+19
430 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
100
50
0
90
0
−90
−24
−16
−8
0
8
16
24

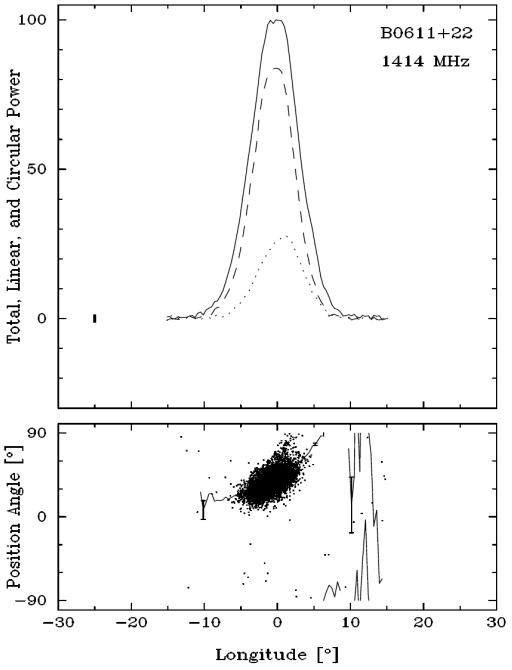

B0525+21
430 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]
100
50
0
90
0
−90
−30
−20
−10
0
10
20
30

Одногорбые

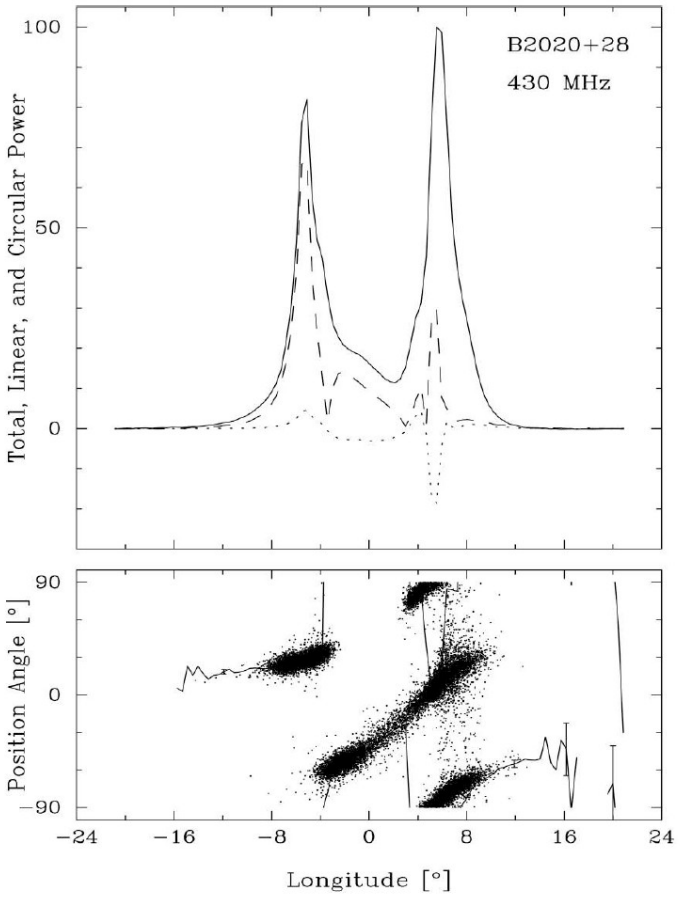

B0540+23
430 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]

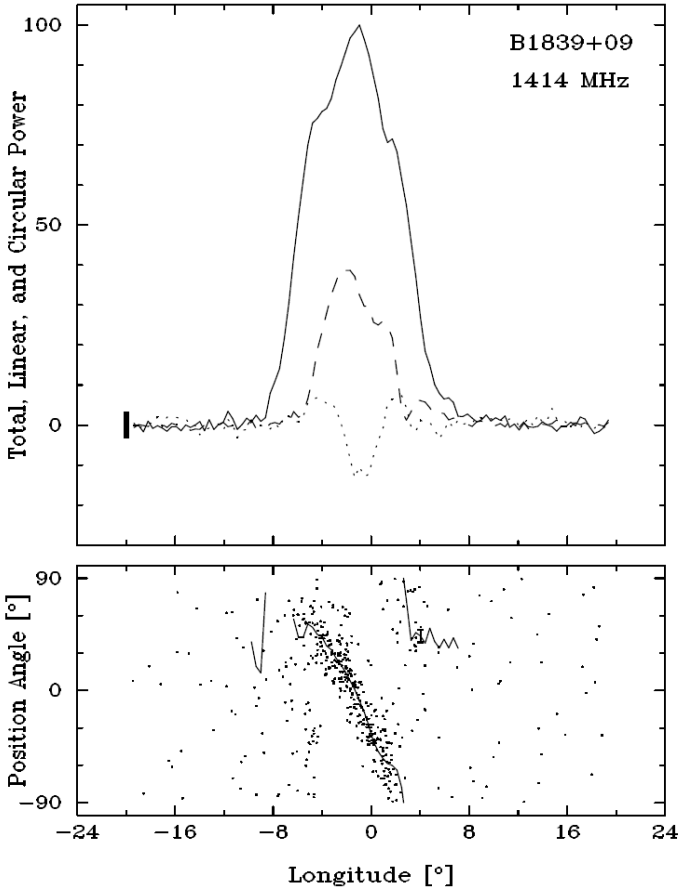

B0540+23
1414 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]


B0611+22
430 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]

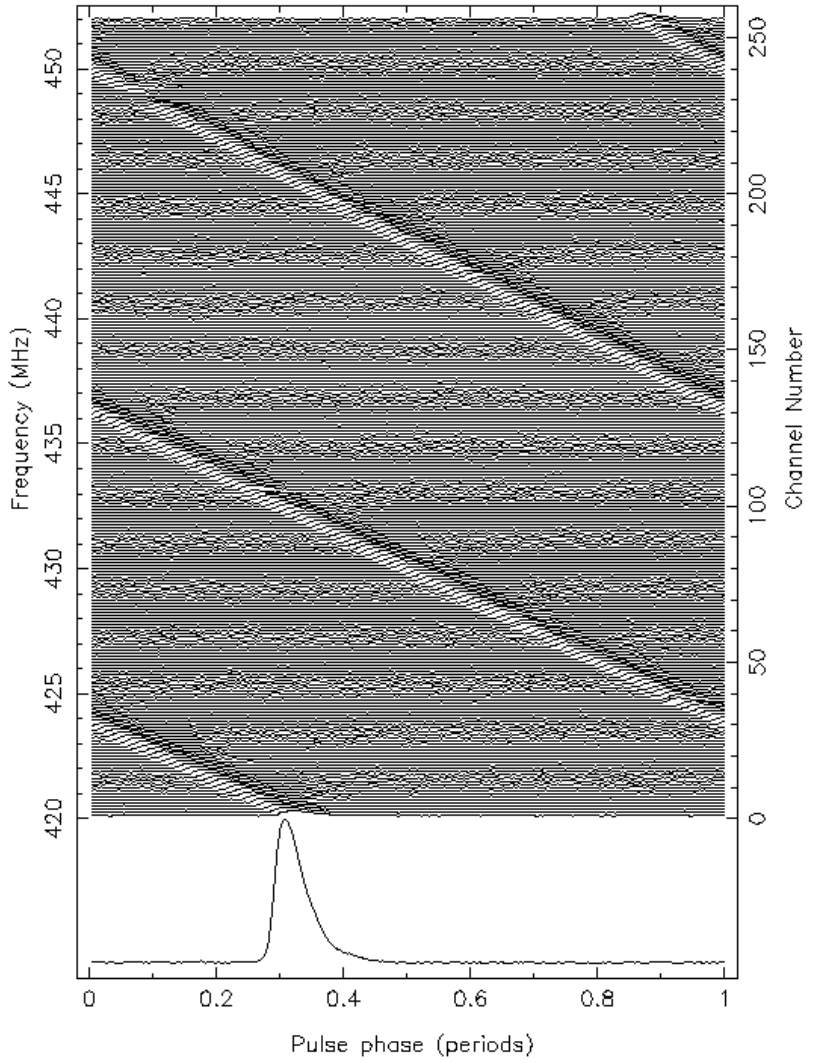

B0611+22
1414 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]

Сложные


B2020+28
430 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]


B1839+09
1414 MHz
Total, Linear, and Circular Power
Position Angle [°]
Longitude [°]

Мера дисперсии DM



Плазменная частота

$$\omega_{\mathrm{pe}} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{e}}}}$$

Дисперсионное уравнение

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_{\mathrm{pe}}^2$$

Плазменная частота

$$\omega_{\mathrm{pe}} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_{\mathrm{e}}}{m_{\mathrm{e}}}} \qquad \omega^2 = c^2 k^2 + \omega_{\mathrm{pe}}^2$$

- Невозможно распространение волн в плазме с частотами, ниже плазменной
- Групповая скорость меньше c

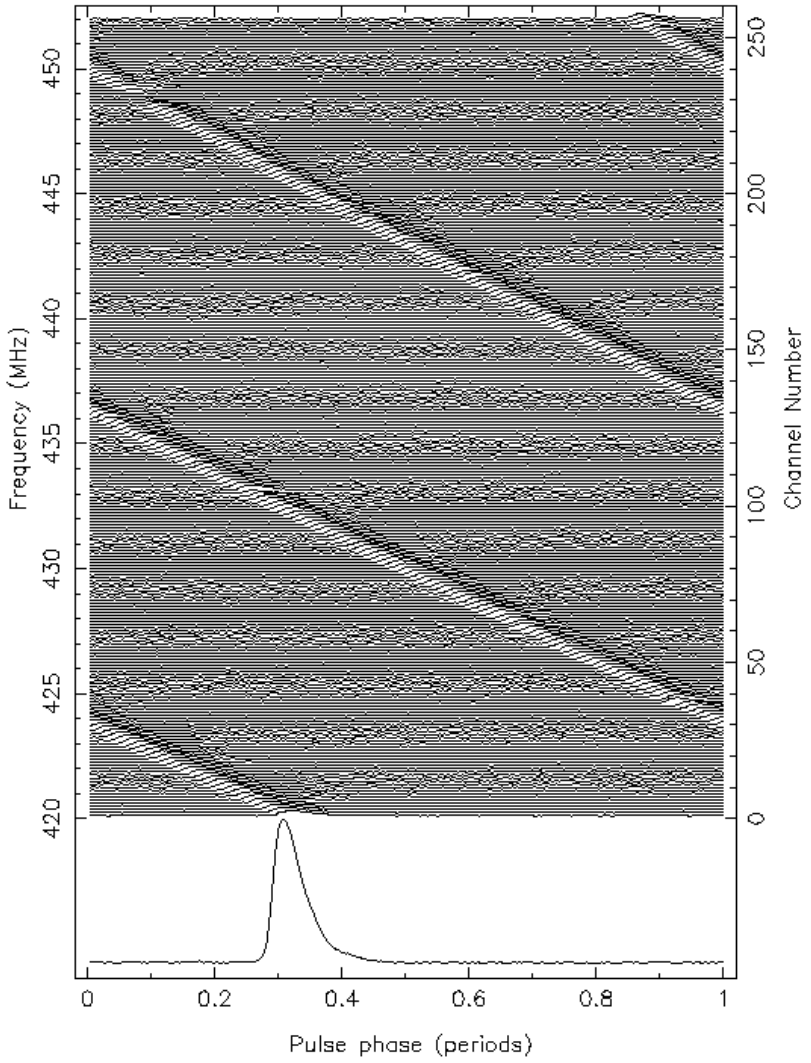
$$v_{\mathrm{gr}} = c\left(1 - \frac{1}{2}\frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\omega^2}\right)$$

Мера дисперсии DM

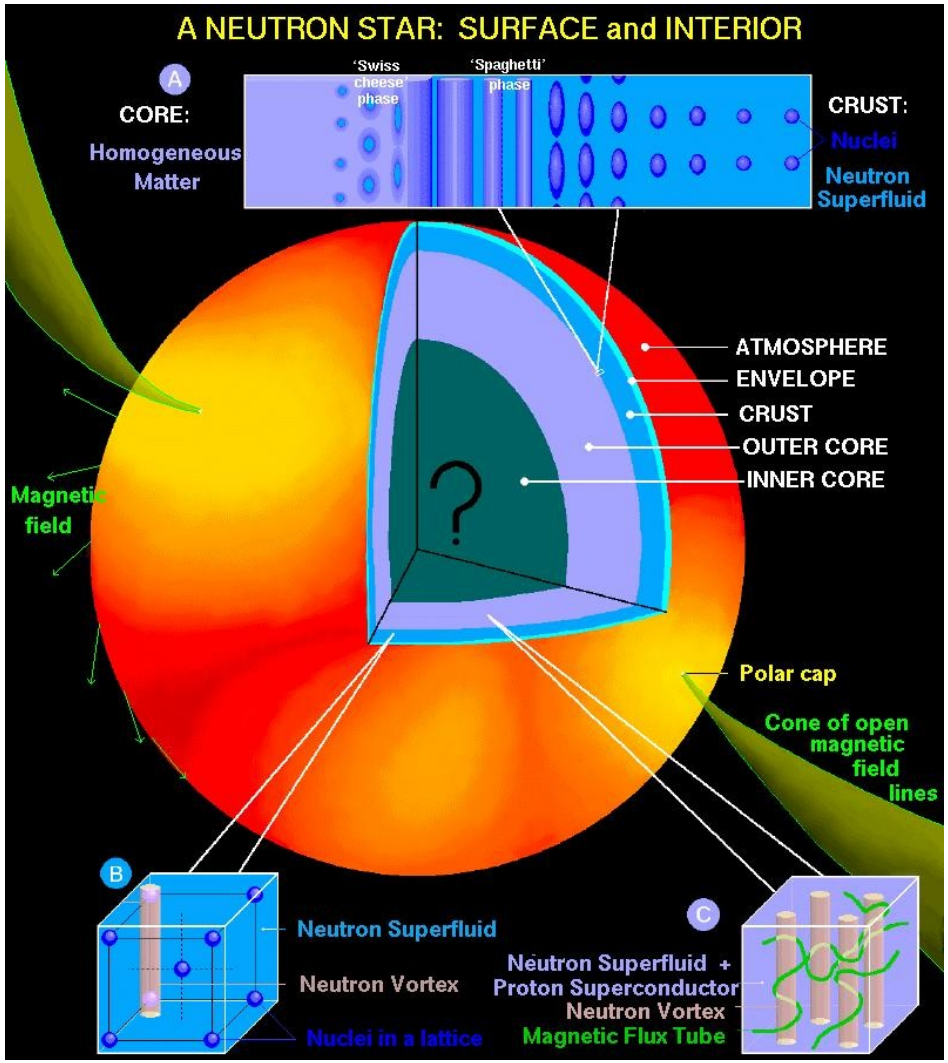
$$v_{\mathrm{gr}} = c\left(1 - \frac{1}{2}\frac{\omega_{\mathrm{pe}}^2}{\omega^2}\right)$$

$$\Delta t = \frac{e^2}{2\pi m_{\mathrm{e}} c} DM \left(\frac{1}{\nu_2^2} - \frac{1}{\nu_1^2}\right)$$

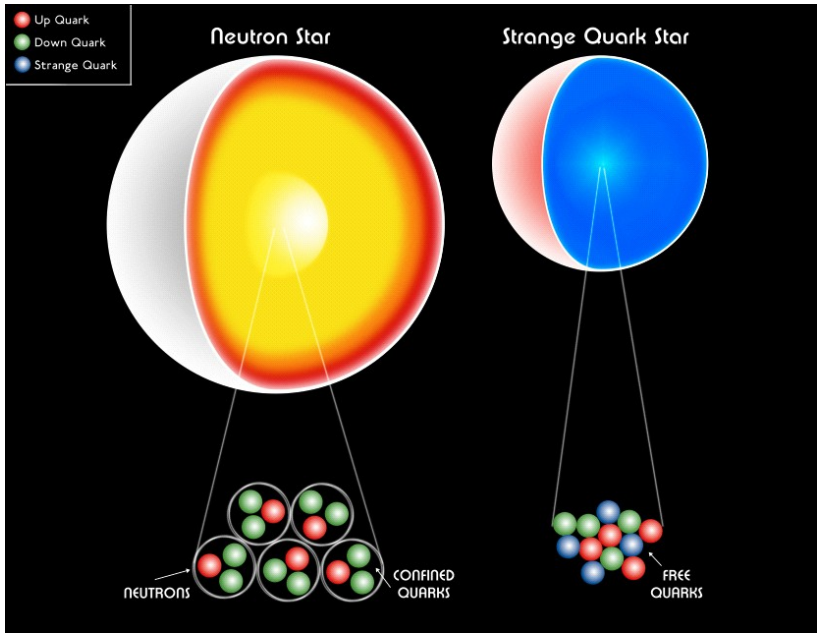
$$\boxed{DM = \int n_{\mathrm{e}} \mathrm{d}l}$$



Нейтронные звезды

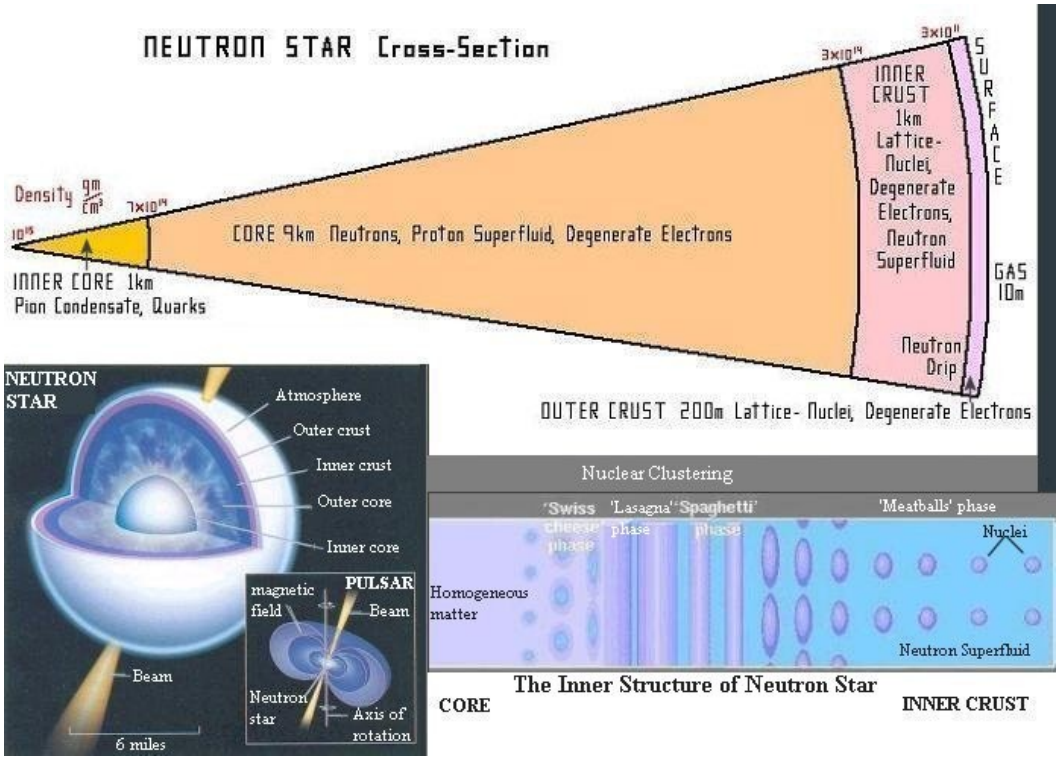


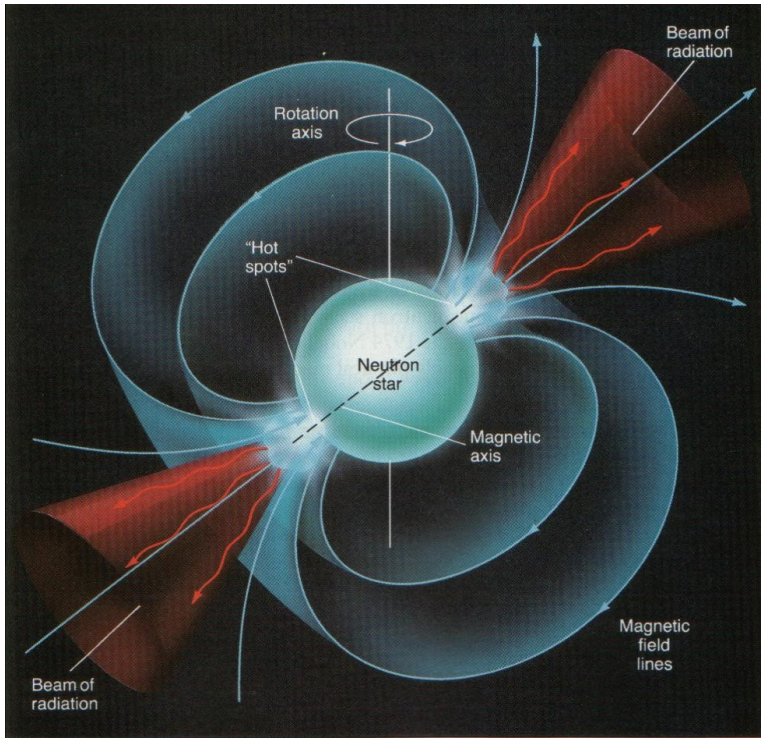
Радиус 10 км
Масса 1-2 солнечной
Плотность порядка ядерной
Сильные магнитные поля



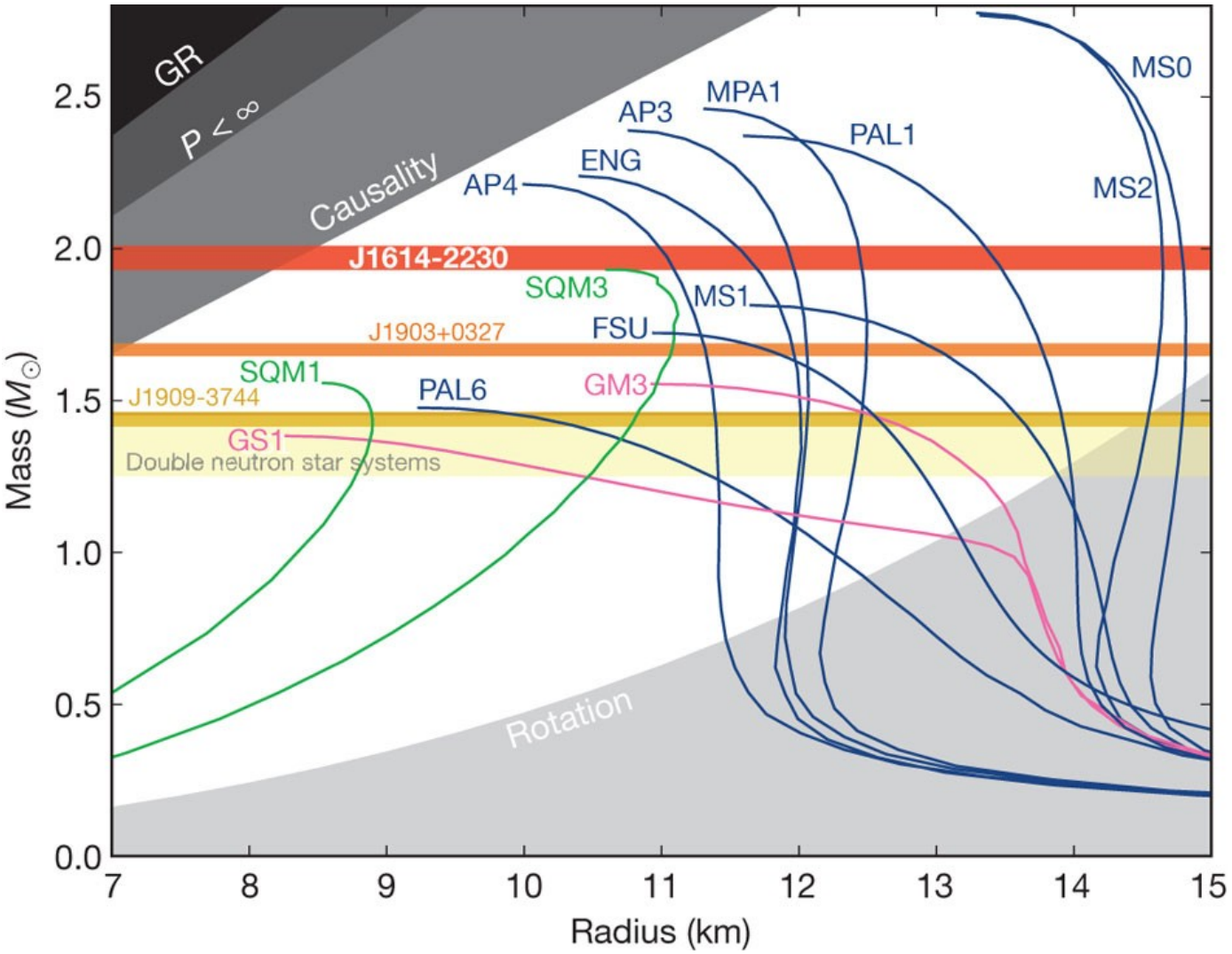
Нейтронные звезды - 2

Сверхплотное вещество и сверхсильные магнитные поля





Масса-радиус



Радиопульсары – вращающиеся одиночные* нейтронные звезды

- Масса $\sim 1.4\, M_{\odot}$
- Радиус $\sim (10–15)$ *км*
- Период вращения $P \sim 1$ *с*
- Магнитное поле $B_0 \sim 10^{12}$ *Гс*
- Радиосветимость $L_r \sim 10^{28}$ *эрг/с*
- Когерентность: $T \sim 10^{28}$ *K* (10^{40} *K*?)

---

* нет активного взаимодействия с компаньоном

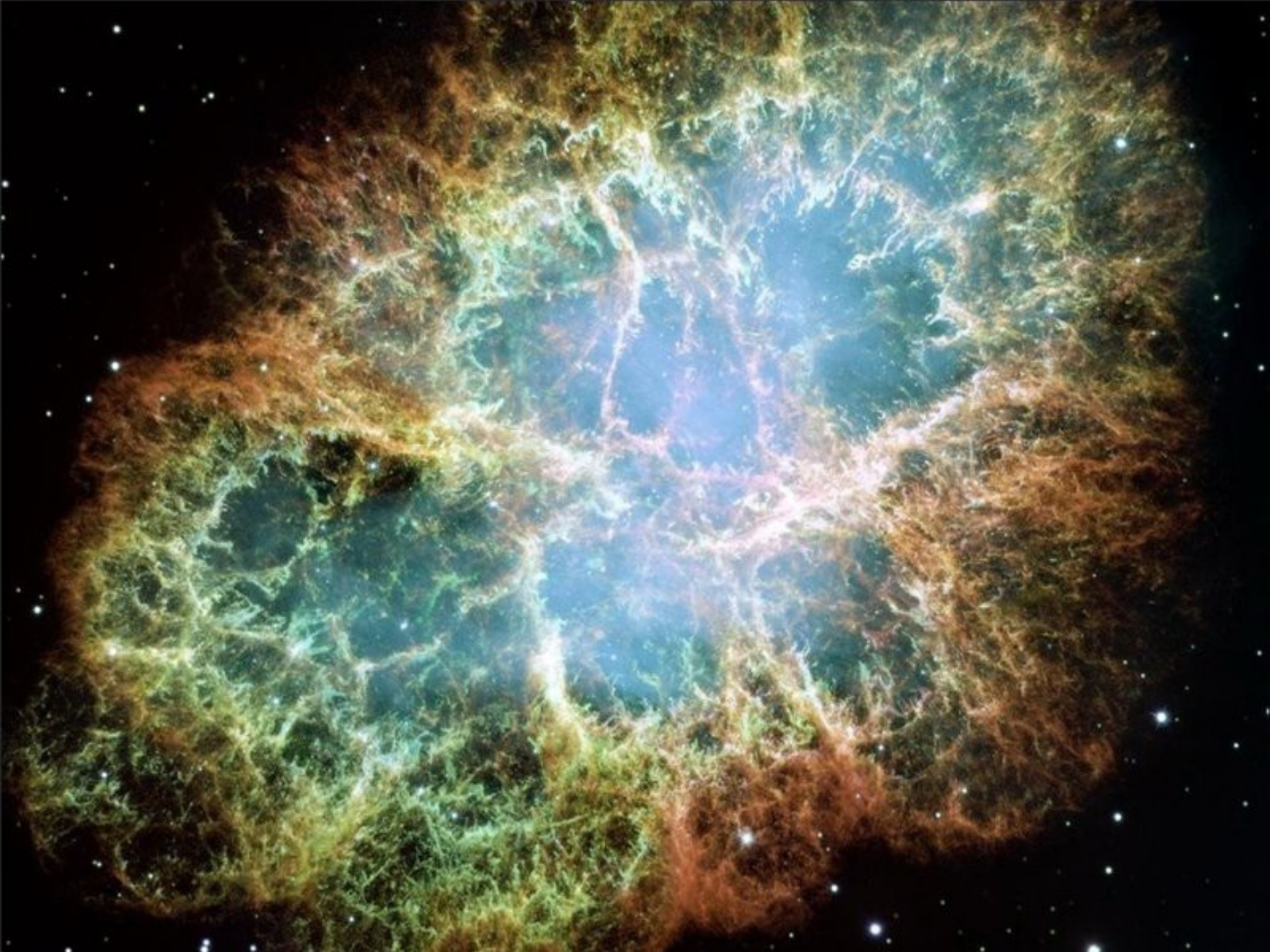
Ключевая электромагнитная идея

(Н.С.Кардашёв,1964; Pacini, 1967)

Магнитодипольное излучение

$$W_{\text{tot}} = \frac{1}{6}\frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3}\sin^2\chi$$

$W_{\text{tot}} \sim 10^{32}$ *эрг/с*



Ключевая электромагнитная идея

Момент истины – пульсар в Крабовидной туманности

$$P = 0.033\ c,$$

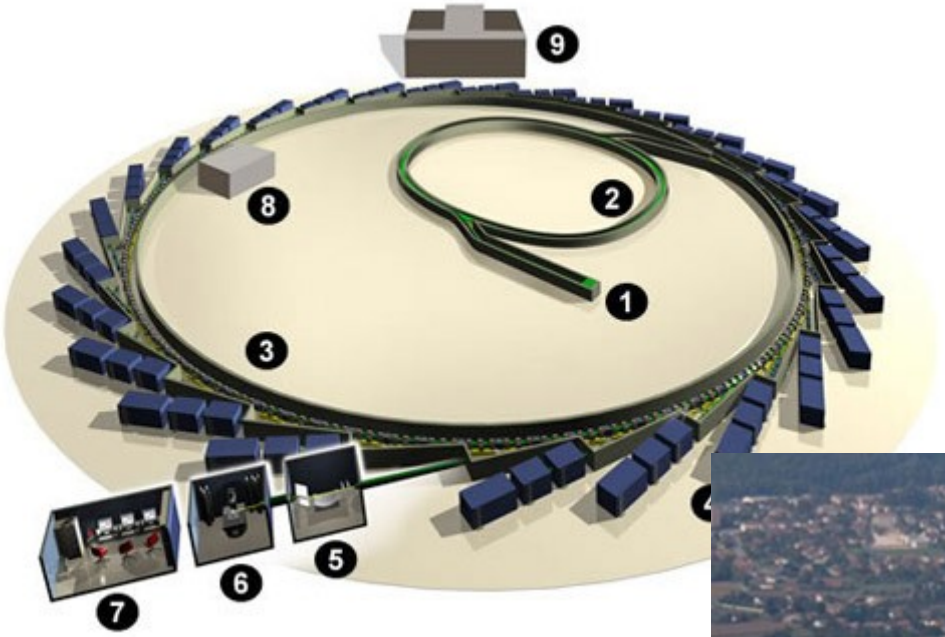
$$\mathrm{d}P/\mathrm{d}t = 4\ 10^{-13}$$

Полные потери $W = -I\,\Omega\,\mathrm{d}\Omega/\mathrm{d}t \sim 5\ 10^{38}$ *эрг/с*

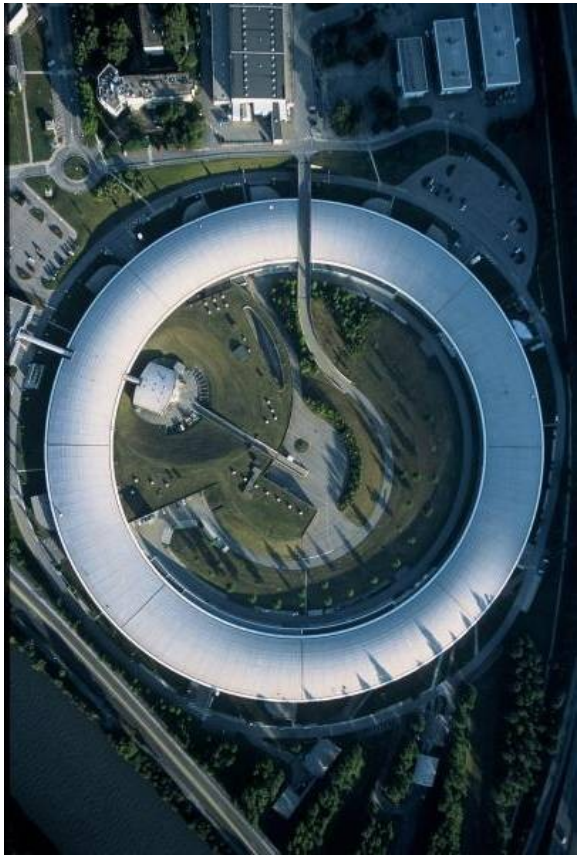
Время жизни $\tau_D = P/(2\ \mathrm{d}P/\mathrm{d}t) \sim 1000$ *лет*

Оптические пульсации

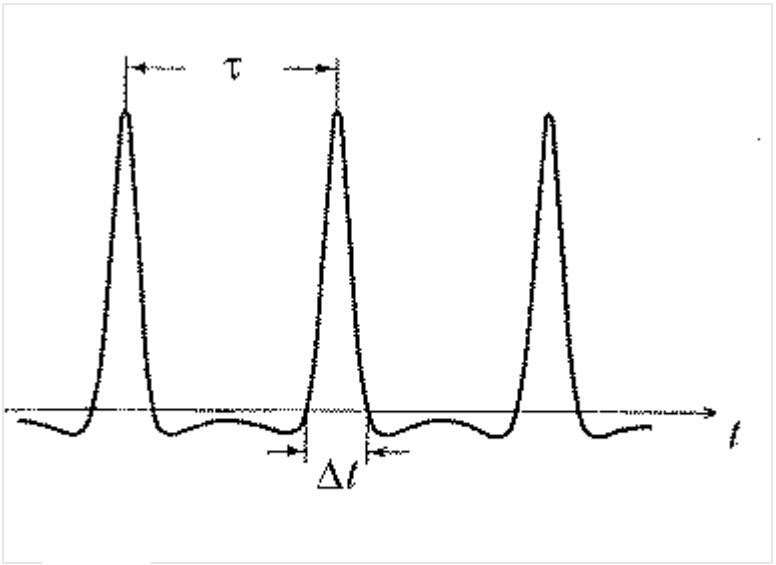
Синхротронное излучение



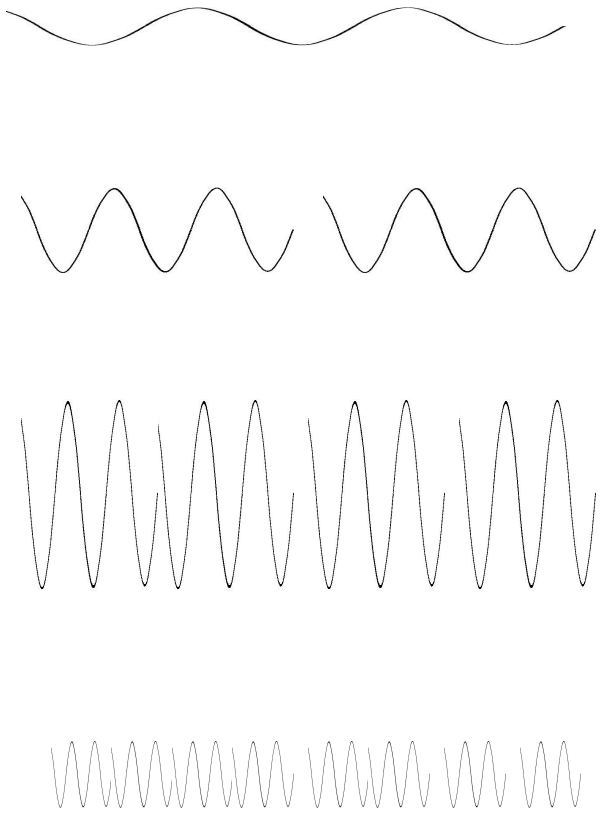
Синхротронное излучение



Синхротронное излучение

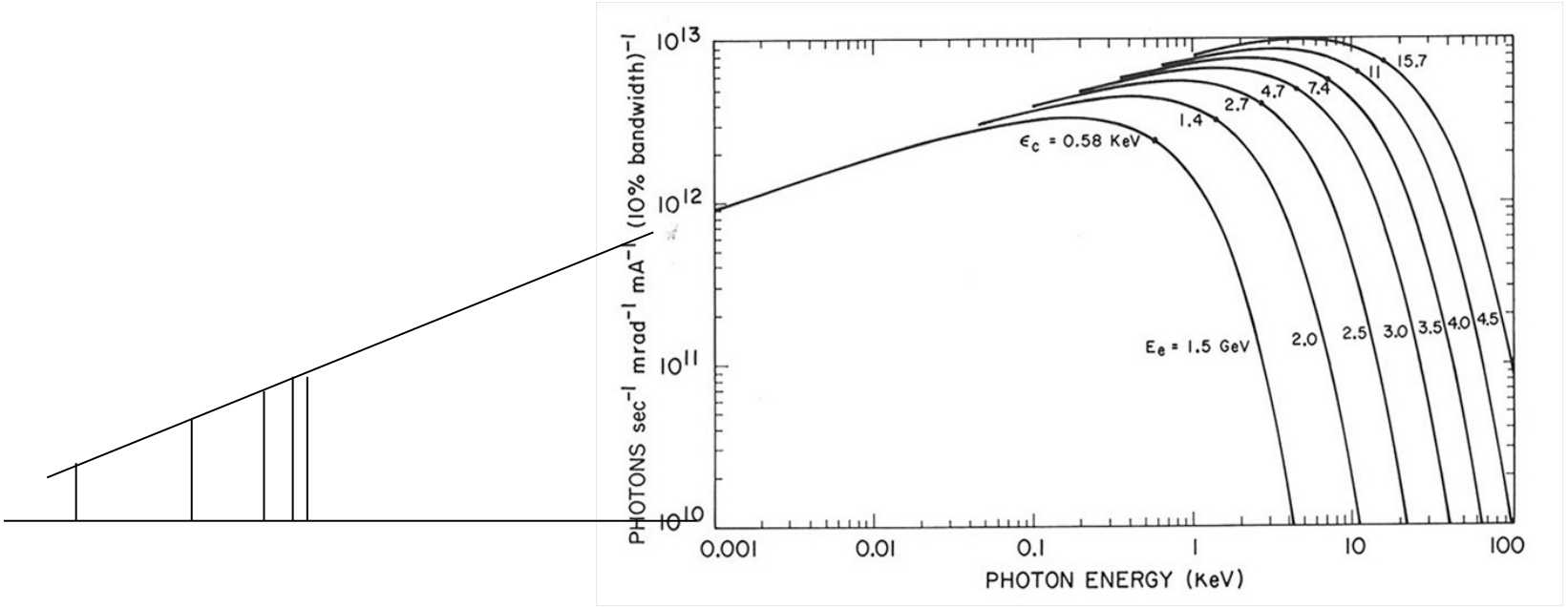


Импульсы излучения релятивистского электрона.



$$\Delta t \sim \frac{1}{\omega} \times \frac{1}{\gamma} \times \left(1 - \frac{V}{c}\right) \quad \sim \frac{1}{\omega} \frac{1}{\gamma^3}$$

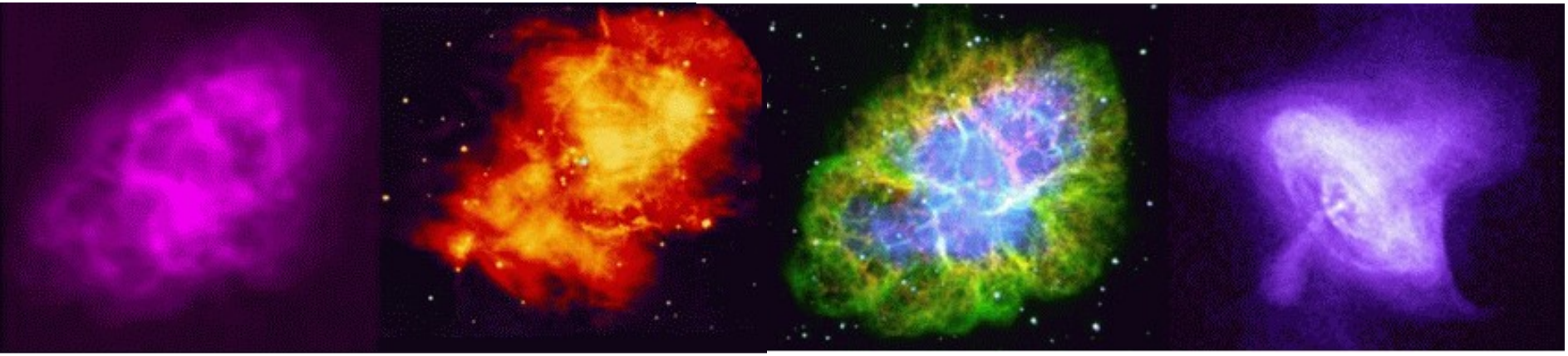
Синхротронное излучение



‘Время жизни’ электрона

$$\tau_{\rm s} = \frac{1}{\omega_{\rm B}} \frac{c}{\omega_{\rm B} r_{\rm e}} \frac{1}{\gamma} = \frac{c}{\omega_{\rm B}^{3/2} r_{\rm e}} \frac{1}{\omega^{1/2}}$$

радио IR оптика X



Синхротронное излучение

- Мощность

$$-\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{2e^4}{3m^4c^7} H^2 E^2 = 0{,}98 \cdot 10^{-3} H^2 \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$$

- Частота максимума

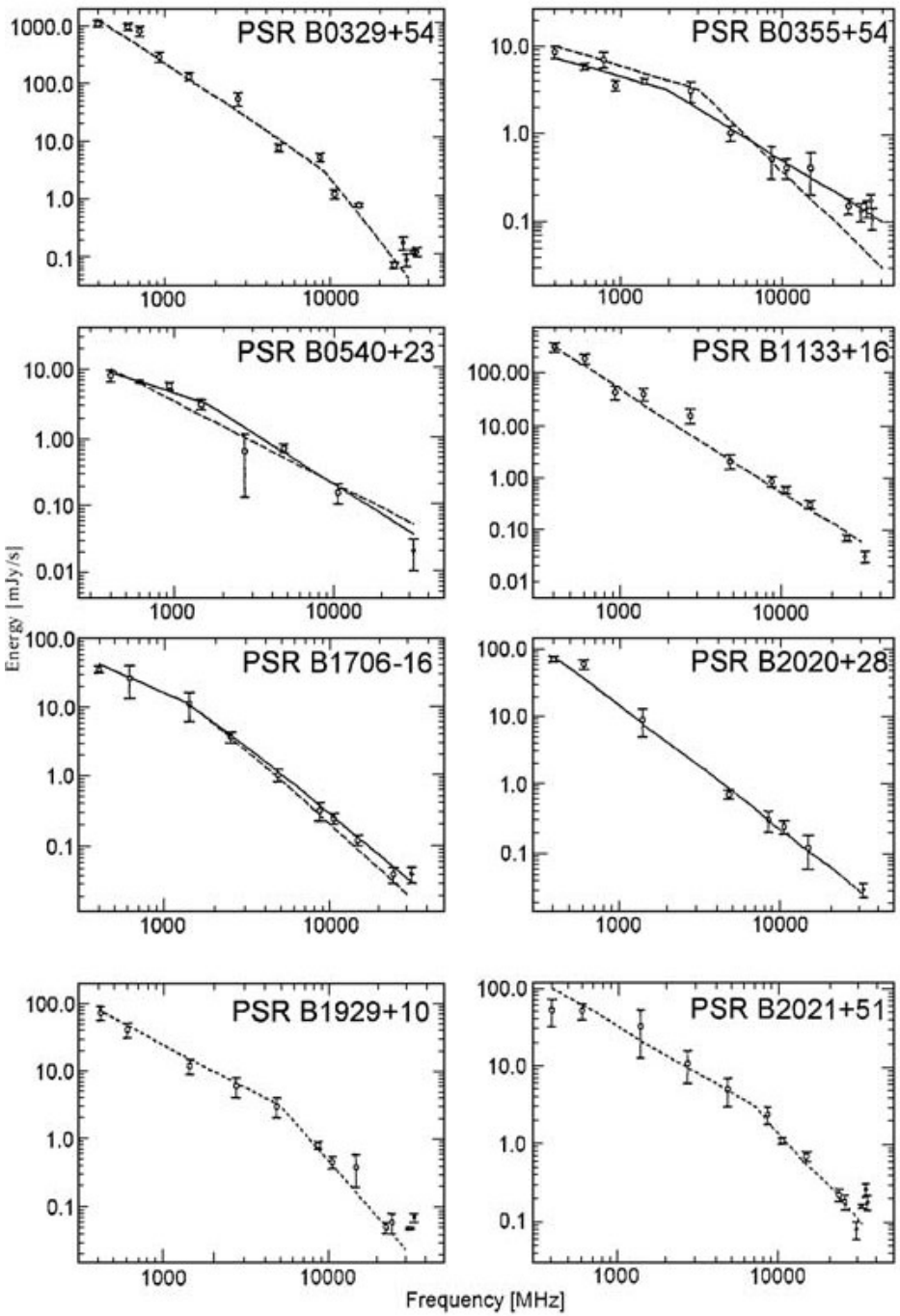
$$\nu_m = \frac{eH}{4\pi mc} \cdot \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2 = 1{,}4 \cdot 10^6 H \left(\frac{E}{mc^2}\right)^2$$

- Изгибное (curvature) излучение

$$\omega_0 = \frac{3c}{2R_m}\left(\frac{\mathcal{E}}{mc^2}\right)^3, \quad P = \frac{2q^2c}{3R_m^2}\left(\frac{\mathcal{E}}{mc^2}\right)^4.$$

Все ясно

- Стабильность излучения – вращение
- Источник энергии – энергия вращения
- Механизм потерь – электродинамика
- Нейтронная звезда – радиопульсар,
  если вблизи магнитных полюсов рождается вторичная электронно-позитронная плазма


PSR B0329+54
PSR B0355+54
PSR B0540+23
PSR B1133+16
PSR B1706-16
PSR B2020+28
PSR B1929+10
PSR B2021+51
Energy [mJy/s]
Frequency [MHz]

Радиопульсары – вращающиеся одиночные* нейтронные звезды

Дано:

- Масса $\sim 1.4\, M_{\odot}$
- Радиус $\sim$ (10-15) *км*
- Период вращения $P \sim 1\ c$
- Магнитное поле $B_0 \sim 10^{12}\, Гс$

Найти:

- Радиосветимость $L_r \sim 10^{28}$ *эрг/с*
- Когерентность: $T \sim 10^{28}\ K$

2. Вакуум

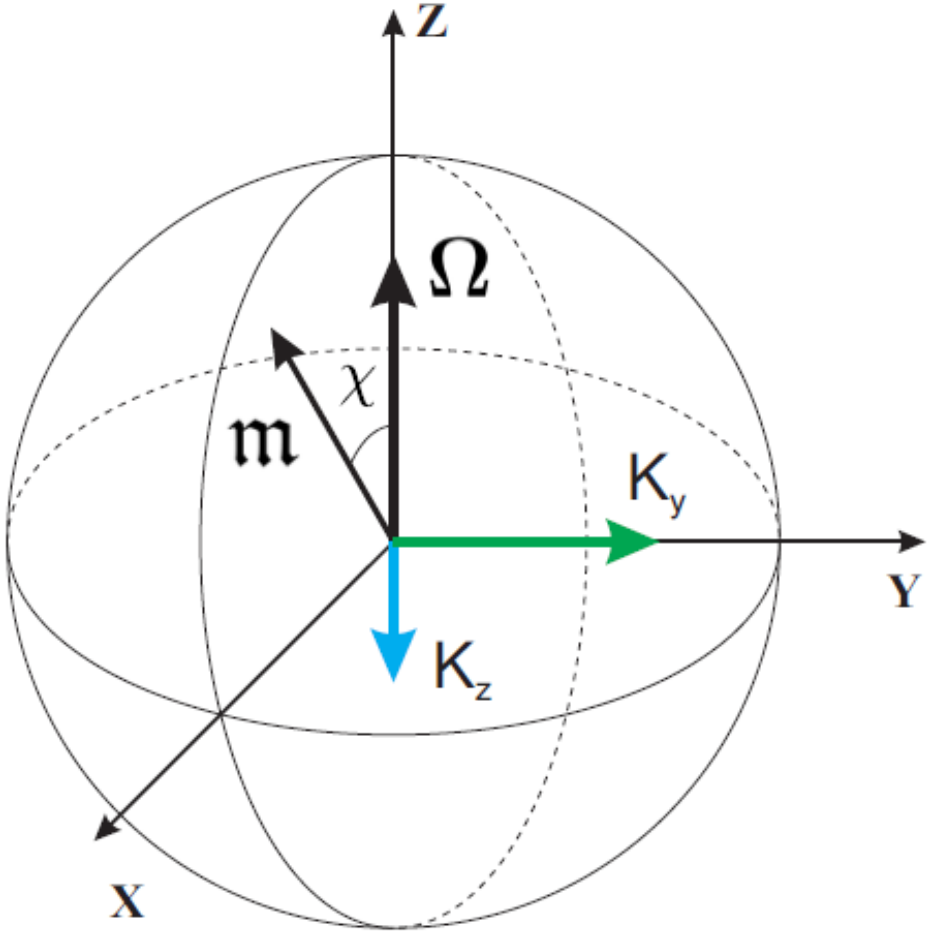
I. Магнитодипольное излучение

Магнитный диполь

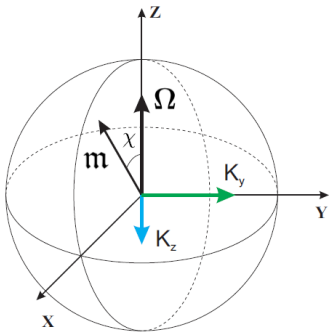
$$\mathbf{B} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{m}\cdot\mathbf{n}) - \mathbf{m}}{r^3}$$

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{d}\cdot\mathbf{n}) - \mathbf{d}}{r^3}$$

Anomalous torque



Anomalous torque

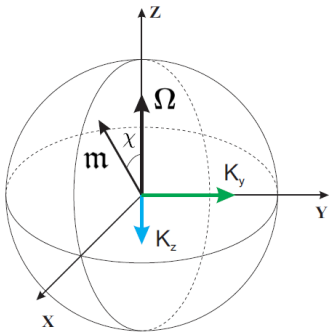


$$K_{z'} = \frac{2}{3}\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^3 \sin^2\chi$$

$$K_{x'} = \frac{2}{3}\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^3 \sin\chi\cos\chi$$

$$\boxed{K_{y'} = \xi\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^2 \sin\chi\cos\chi}$$

$\xi = 1$ (Davis & Goldstein 1970, Goldreich 1970)
$\xi = 1/5$ (Good&Ng 1985)
$\xi = 0$ (Michel 1991, Istomin 2005)
$\xi = 3/5$ (Melatos 2000)



Anomalous torque

Main assumptions

- Rotation in vacuum
- Freezing-in condition inside the body

$$\mathbf{E} + \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{B} = 0$$

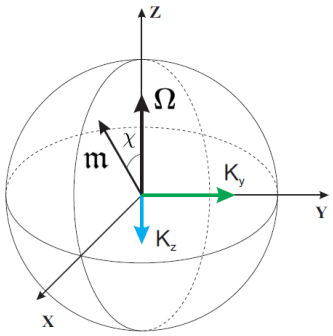
$$\beta_{\mathrm{R}} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}/c$$

- Corotation currents $\mathbf{j} = c\rho_{\mathrm{e}}\beta_{\mathrm{R}}$ (hence, zero volume force)

$$\mathrm{d}\mathbf{F} = \rho_{\mathrm{e}}\mathbf{E}\ \mathrm{d}V + [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]/c\ \mathrm{d}V$$

- Spherical body

Anomalous torque



Basic equation

$$\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{L}_{\text{field}}}{\mathrm{d}t} + \mathbf{K}^{M} + \int [\mathbf{r} \times \mathbf{F}]\mathrm{d}V = 0$$

Electromagnetic angular momentum

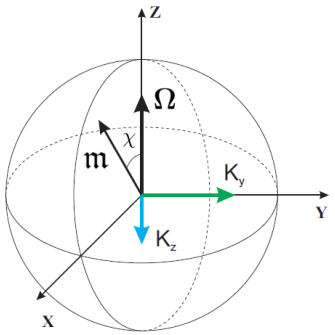
$$\mathbf{L}_{\text{field}} = \int \frac{[\mathbf{r} \times [\mathbf{E} \times \mathbf{B}]]}{4\pi c}\mathrm{d}V$$

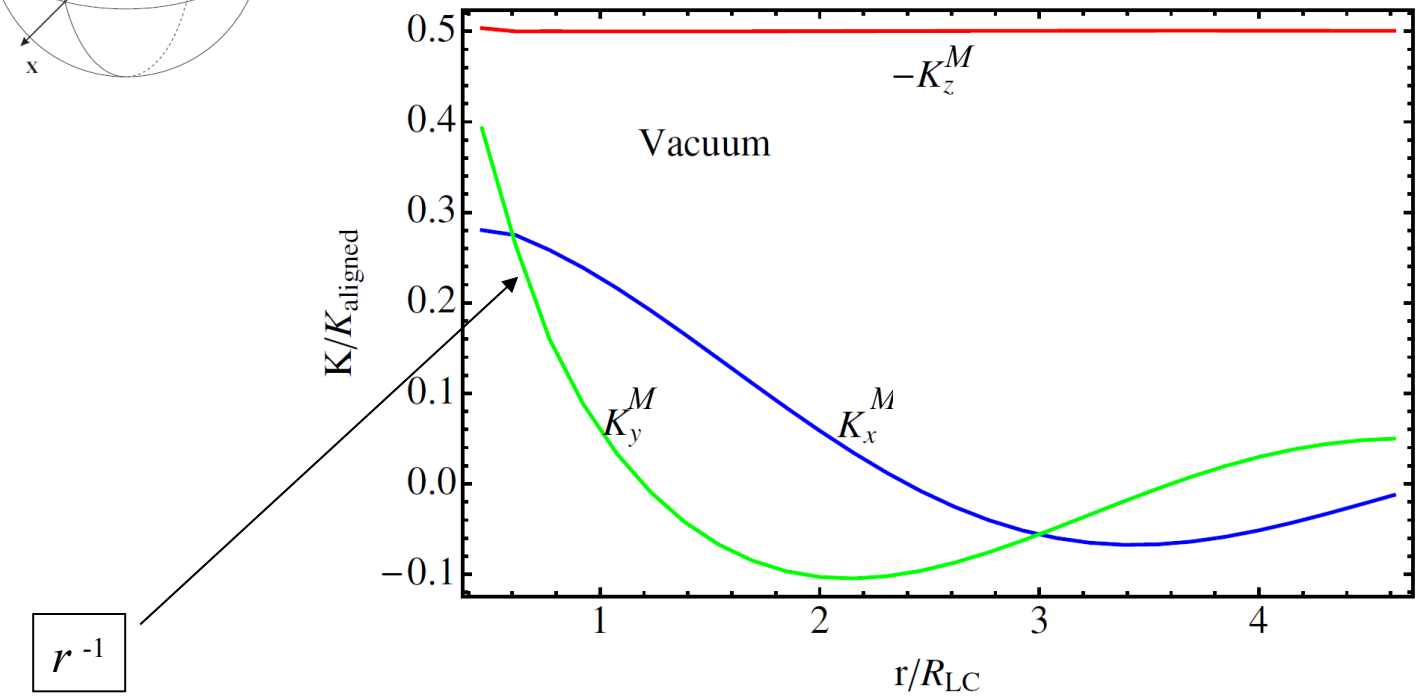
Flux $K_i^M = -\int \varepsilon_{ijk} r_j T_{kl} \mathrm{d}S_l$ (spherical surface)

$$\mathbf{K}_{y'}^{M} = \frac{R^3}{4\pi}\int \Big([\mathbf{n} \times \mathbf{B}]_{y'} (\mathbf{Bn}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}]_{y'} (\mathbf{En}) \Big) \mathrm{d}o$$

Anomalous torque

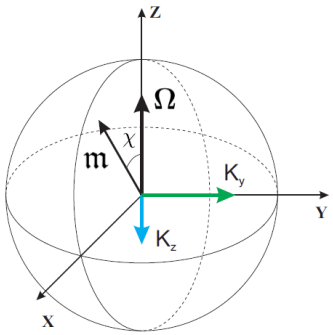
A.Philippov, A.Tchekhovskoy, J.Li,
http://arxiv.org/abs/1311.1513





$$\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{L}_{\mathrm{field}}}{\mathrm{d}t} + \mathbf{K}^M + \int [\mathbf{r}\times\mathbf{F}]\mathrm{d}V = 0$$

Anomalous torque



Torque, acting on the body

$$\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{L}_{\mathrm{mat}}}{\mathrm{d}t} = \int [\mathbf{r} \times \mathbf{F}] \mathrm{d}V$$

$$\mathrm{d}\mathbf{F} = \sigma_{\mathrm{e}} \mathbf{E}\, \mathrm{d}S + [\mathbf{I}_{\mathrm{S}} \times \mathbf{B}]/c\, \mathrm{d}S$$

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{r} \times \mathrm{d}\mathbf{F} = \frac{R^3}{4\pi} \int \Big([\mathbf{n} \times \{\mathbf{B}\}]\,(\mathbf{B}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}]\,(\{\mathbf{E}\}\,\mathbf{n}) \Big) \mathrm{d}o$$

- for spherical body
- for highly conducting interior
- for corotation currents only

Anomalous torque

Calculations

- small parameter
- quasi-stationary

$$\varepsilon = \frac{\Omega R}{c}$$

$$\varphi - \Omega t$$

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{B}) = 0,$$

$$\nabla \times (\mathbf{B} - \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{E}) = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} - 4\pi\rho_e\beta_{\mathrm{R}}$$

$$\beta_{\mathrm{R}} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}/c$$

$$\mathbf{j} = c\rho_{\mathrm{e}}\beta_{\mathrm{R}}$$

$$\mathbf{E} + \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{B} = -\nabla\psi, \longrightarrow \psi^{(1)} \longrightarrow E^{(1)}$$

$$\mathbf{B} - \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{E} = \nabla h \longrightarrow h^{(2)} \longrightarrow B^{(2)}$$

Anomalous torque

$$
\begin{aligned}
B_r^{\perp} &= \frac{|\mathfrak{m}|}{r^3}\sin\theta\,\mathrm{Re}\left(2-2i\frac{\Omega r}{c}\right)\exp\left(i\frac{\Omega r}{c}+i\varphi-i\Omega t\right),\\
B_\theta^{\perp} &= \frac{|\mathfrak{m}|}{r^3}\cos\theta\,\mathrm{Re}\left(-1+i\frac{\Omega r}{c}+\frac{\Omega^2 r^2}{c^2}\right)\exp\left(i\frac{\Omega r}{c}+i\varphi-i\Omega t\right),\\
B_\varphi^{\perp} &= \frac{|\mathfrak{m}|}{r^3}\,\mathrm{Re}\left(-i-\frac{\Omega r}{c}+i\frac{\Omega^2 r^2}{c^2}\right)\exp\left(i\frac{\Omega r}{c}+i\varphi-i\Omega t\right),\\
E_r^{\perp} &= 0,\\
E_\theta^{\perp} &= \frac{|\mathfrak{m}|\Omega}{r^2 c}\,\mathrm{Re}\left(-1+i\frac{\Omega r}{c}\right)\exp\left(i\frac{\Omega r}{c}+i\varphi-i\Omega t\right),\\
E_\varphi^{\perp} &= \frac{|\mathfrak{m}|\Omega}{r^2 c}\cos\theta\,\mathrm{Re}\left(-i-\frac{\Omega r}{c}\right)\exp\left(i\frac{\Omega r}{c}+i\varphi-i\Omega t\right).
\end{aligned}
$$

Anomalous to

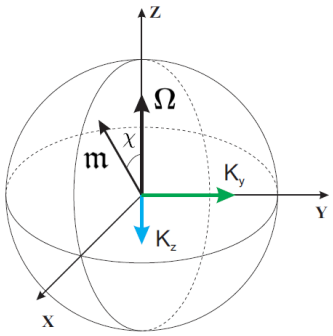
$$\mathbf{E} + \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{B} = -\nabla\psi,$$

$$\mathbf{B} - \beta_{\mathrm{R}} \times \mathbf{E} = \nabla h$$

Calculations

- Freezing-in condition $\psi^{(\mathrm{In})} = 0$
- Hence, no freedom in $E^{(1)}$
- Exactly corresponds to vacuum solution
- Freedom in $B^{(2)}$ree functions $h^{(2)}$
- Result DOES NOT depend on this freedom

Anomalous torque



Torque, acting on the body

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{r} \times \mathrm{d}\mathbf{F} = \frac{R^3}{4\pi} \int \Big([\mathbf{n} \times \{\mathbf{B}\}] \, (\mathbf{B}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{E}] \, (\{\mathbf{E}\} \, \mathbf{n}) \Big) \mathrm{d}o$$

$$K = K^M(R+0) - K^M(R-0)$$

$$\xi = \frac{3}{5}$$

$$\mathbf{K}^M = - \frac{\mathrm{d}\, \mathbf{L}_{\mathrm{field}}}{\mathrm{d}t}$$

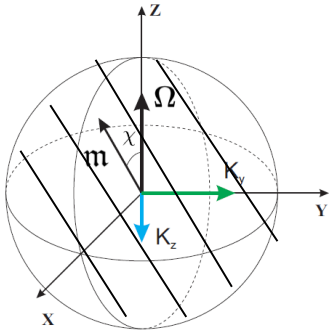
$$\mathbf{L}_{\mathrm{field}} = \int \frac{[\mathbf{r} \times [\mathbf{E} \times \mathbf{B}]]}{4\pi c} \mathrm{d}V$$

- Does not depend on the internal structure and freedom in $h^{(2)}$
- Obtained by A.Melatos (2000) for Deutsch solution

Depends on the internal structure

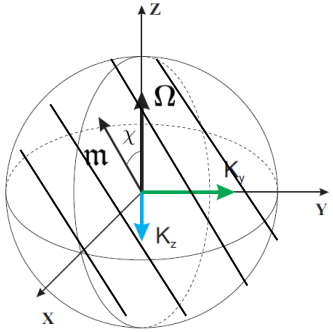
Anomalous torque

Three cases



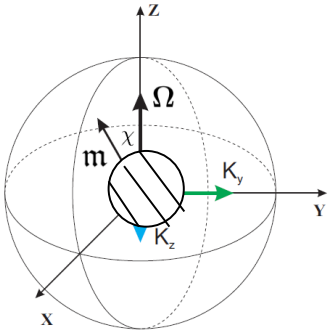
- Homogeneously magnetized sphere

$$K_{y'} = \frac{1}{3}\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^2 \sin\chi\cos\chi$$



- Homogeneously magnetized hollow envelope

$$K_{y'} = \frac{31}{45}\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^2 \sin\chi\cos\chi$$



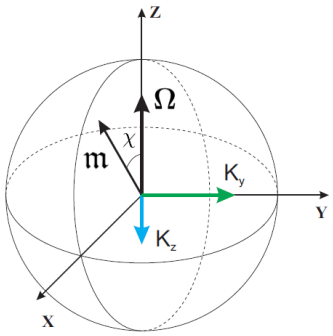
- Homogeneously magnetized core $R_{\text{in}} < R$

$$K_{y'} = \left(\frac{8}{15} - \frac{1}{5}\frac{R}{R_{\text{in}}}\right)\frac{\mathfrak{m}^2}{R^3}\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^2 \sin\chi\cos\chi$$

Comparison with previous results

$\xi = 1$ (Davis & Goldstein 1970, Goldreich 1970)
$\xi = 1/5$ (Good&Ng 1985)
$\xi = 0$ (Michel 1991, Istomin 2005)
$\xi = 3/5$ (Melatos 2000)

$\xi = 1$ – electric current only
$\xi = 0$ – outer sphere only
$\xi = 3/5$ – stress for $r = R+0$



Anomalous torque

Main conclusion

Anomalous torque acting on the body depends on the internal structure of the electromagnetic field inside the body:

Магнитный диполь

$$\mathbf{B} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{m}\cdot\mathbf{n}) - \mathbf{m}}{r^3} - \frac{4\pi}{3}\mathbf{m}\delta(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{n}(\mathbf{d}\cdot\mathbf{n}) - \mathbf{d}}{r^3}$$

Магнитодипольное излучение

(Ландау, Лифшиц)

$$W_{\rm tot} = -J_{\rm r}\Omega\dot{\Omega} \approx \frac{1}{6}\frac{B_0^2\Omega^4 R^6}{c^3}\sin^2\chi$$

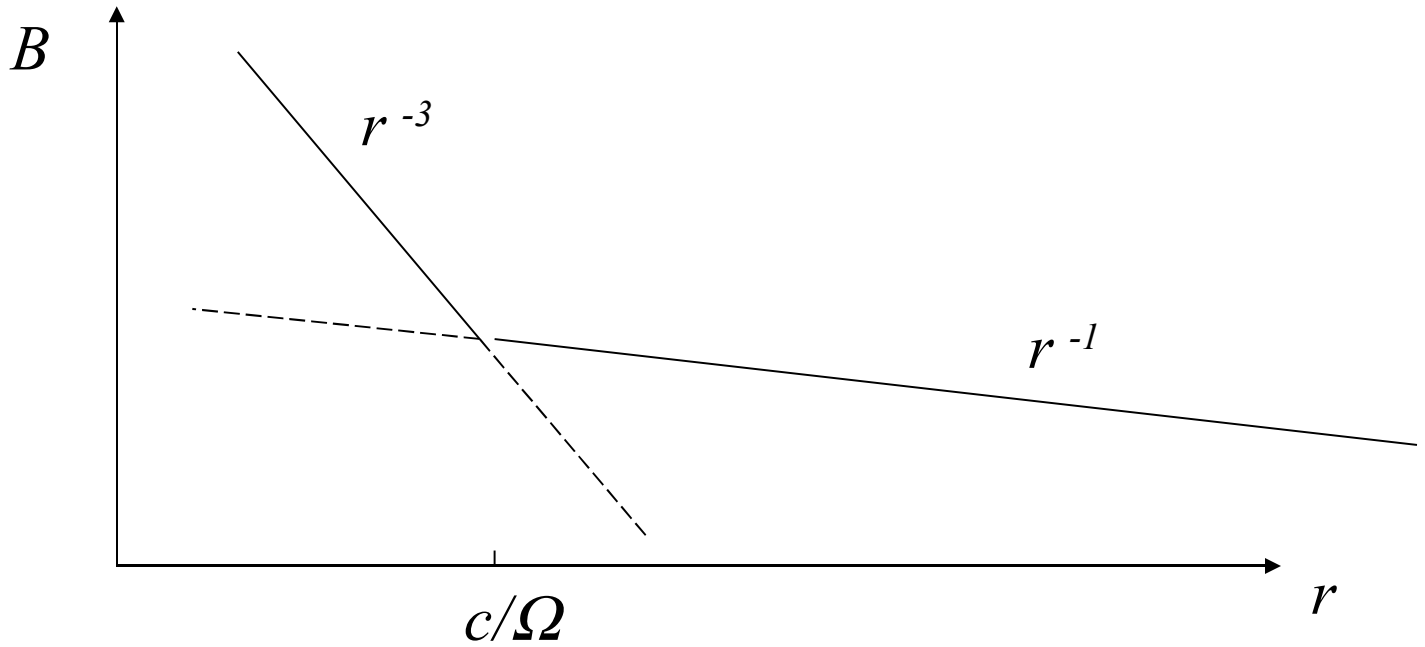
- Торможение током
- Эволюция угла
- Стабилизация угла?
- Аномальный момент?

Малый параметр $\varepsilon_A = \left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2} \sim 10^{-2}$

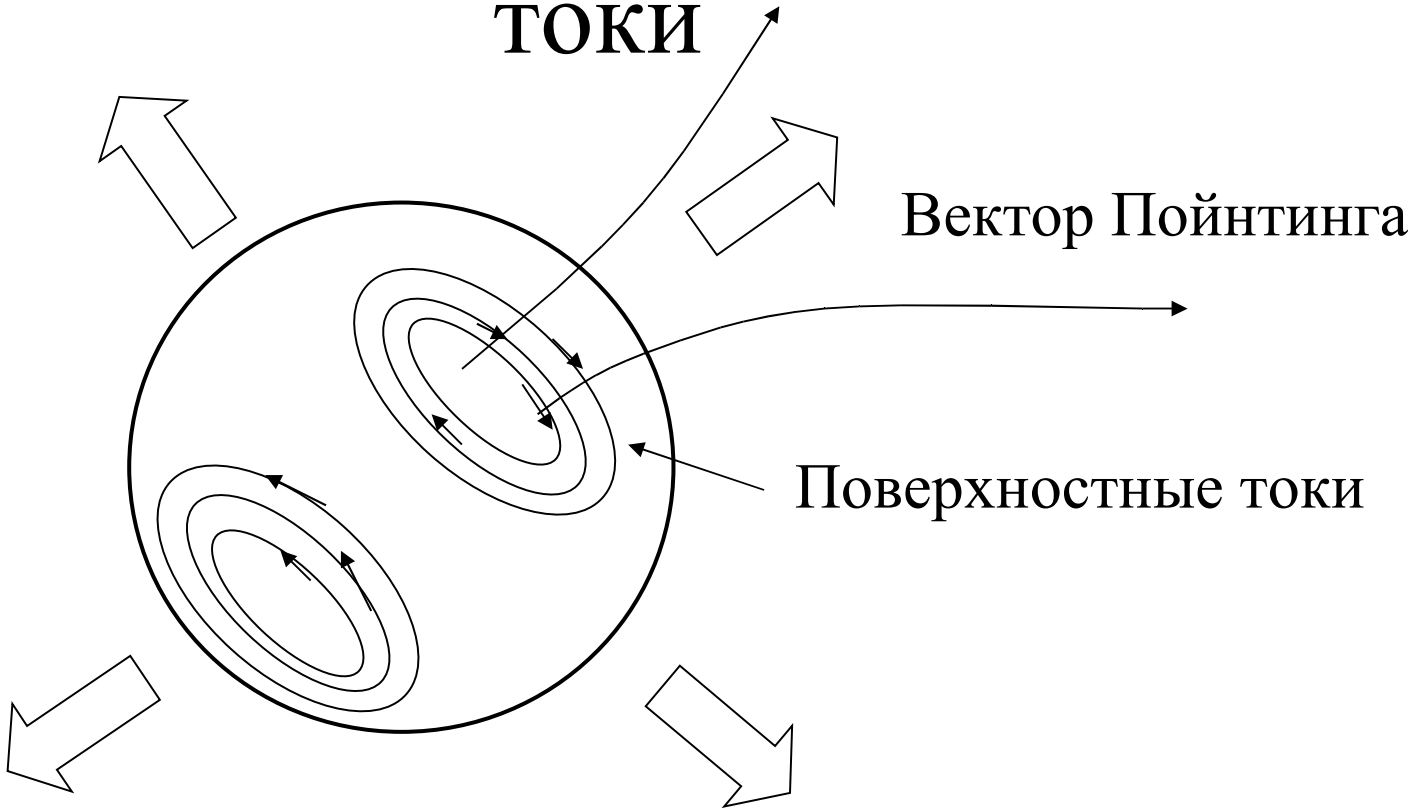
$$B_r = \frac{|\mathbf{m}|}{r^3}\sin\theta\,\mathrm{Re}\left(2 - 2\mathrm{i}\frac{\Omega r}{c}\right)\exp\left(\mathrm{i}\frac{\Omega r}{c} + \mathrm{i}\varphi - \mathrm{i}\Omega t\right),$$

$$B_\theta = \frac{|\mathbf{m}|}{r^3}\cos\theta\,\mathrm{Re}\left(-1 + \mathrm{i}\frac{\Omega r}{c} + \frac{\Omega^2 r^2}{c^2}\right)\exp\left(\mathrm{i}\frac{\Omega r}{c} + \mathrm{i}\varphi - \mathrm{i}\Omega t\right)$$

$$B_\varphi = \frac{|\mathbf{m}|}{r^3}\,\mathrm{Re}\left(-\mathrm{i} - \frac{\Omega r}{c} + \mathrm{i}\frac{\Omega^2 r^2}{c^2}\right)\exp\left(\mathrm{i}\frac{\Omega r}{c} + \mathrm{i}\varphi - \mathrm{i}\Omega t\right),$$



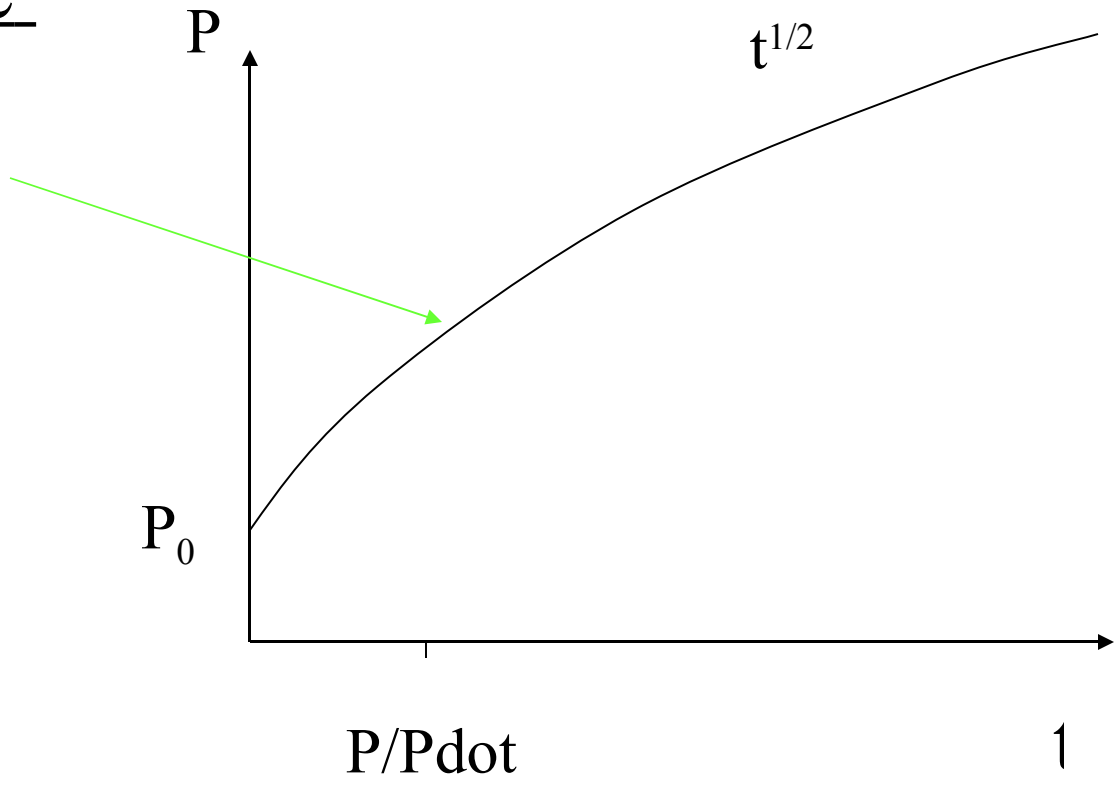
Энергия и угловой момент звезды передаются через поверхностные токи



Энергетические потери при $\chi < \pi/2$

Магнитодипольные

$$W_{\text{tot}} = \frac{1}{6}\frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3}$$

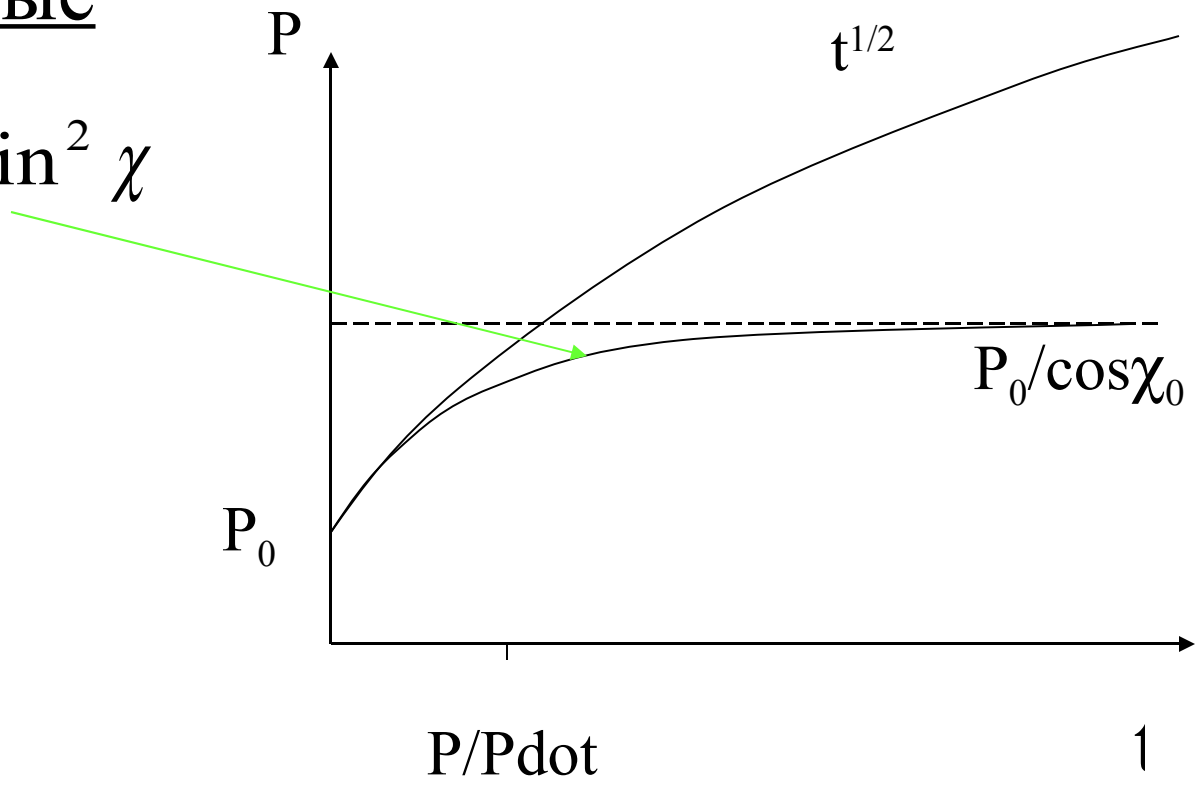


Энергетические потери при $\chi < \pi/2$

Магнитодипольные

$$W_{\text{tot}} = \frac{1}{6}\frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2\chi$$

$$\Omega \cos\chi = \text{const}$$

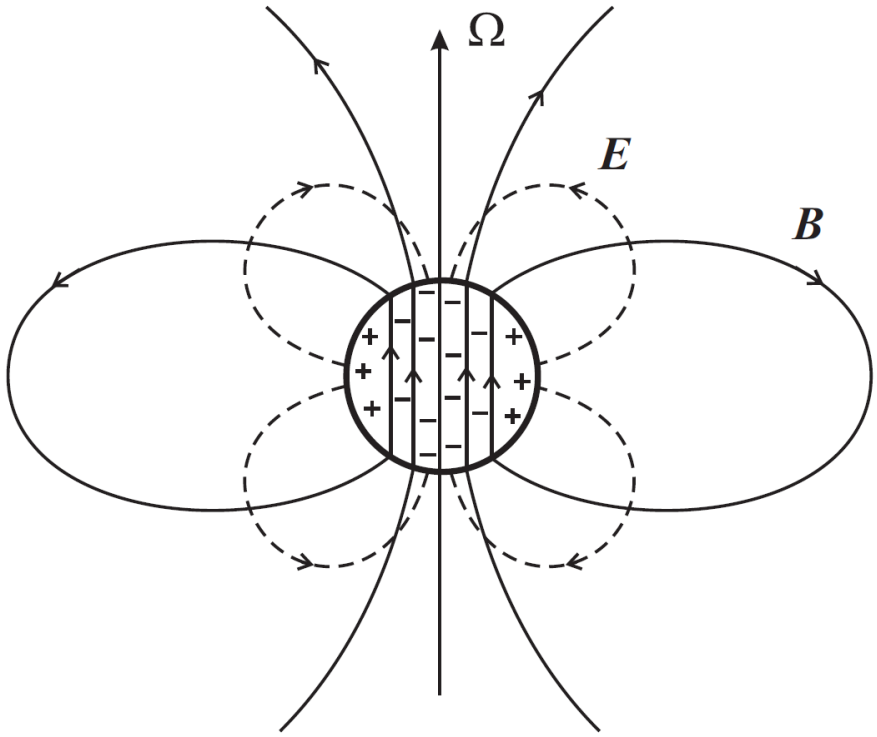


2. Вакуум

II. Электрическое поле

Вращение генерирует квадрупольное электрическое поле

$$E_{\parallel} \sim \frac{\Omega R}{c} B_0$$



2. Вакуум

III. Квантующее магнитное поле

Сильное магнитное поле

- Одномерное движение

$$\tau_s \approx \frac{1}{\omega_B}\left(\frac{c}{\omega_B r_e}\right) \sim 10^{-15}\text{c}$$

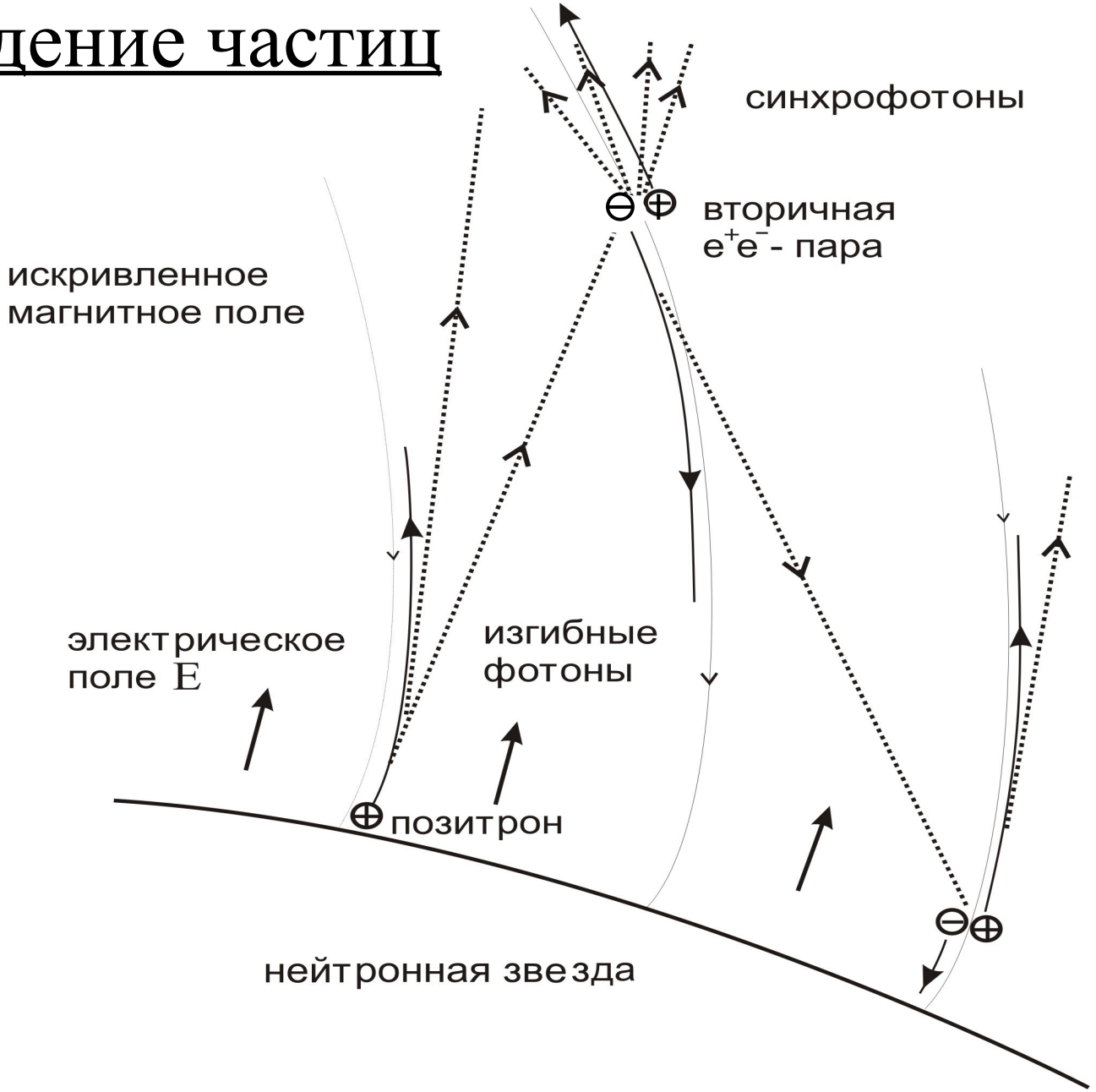
- Изгибное (curvature) излучение

$$\omega_{cur} = 0.44\frac{c}{R_c}\gamma^3.$$

- B ~ 10^{12} *Гс* ~ $B_{cr} = m_e^2c^3/eh^- = 4.4\ 10^{13}$ *Гс*

$$w = \frac{3\sqrt{3}}{16\sqrt{2}}\frac{e^3 B\sin\theta}{\hbar m_e c^3}\exp\left(-\frac{8}{3}\frac{B_{cr}}{B\sin\theta}\frac{m_e c^2}{\mathcal{E}_{ph}}\right)$$

Рождение частиц



Сильное магнитное поле

- Магнетары
- Двулучепреломление вакуума

$$n_{\perp,||} = 1 + [4,7]\frac{\alpha}{90\pi}\left(\frac{B}{B_{\rm cr}}\right)^2 \sin^2\theta$$

- Распад фотонов $\gamma + B \rightarrow \gamma + \gamma + B$
- Позитроний

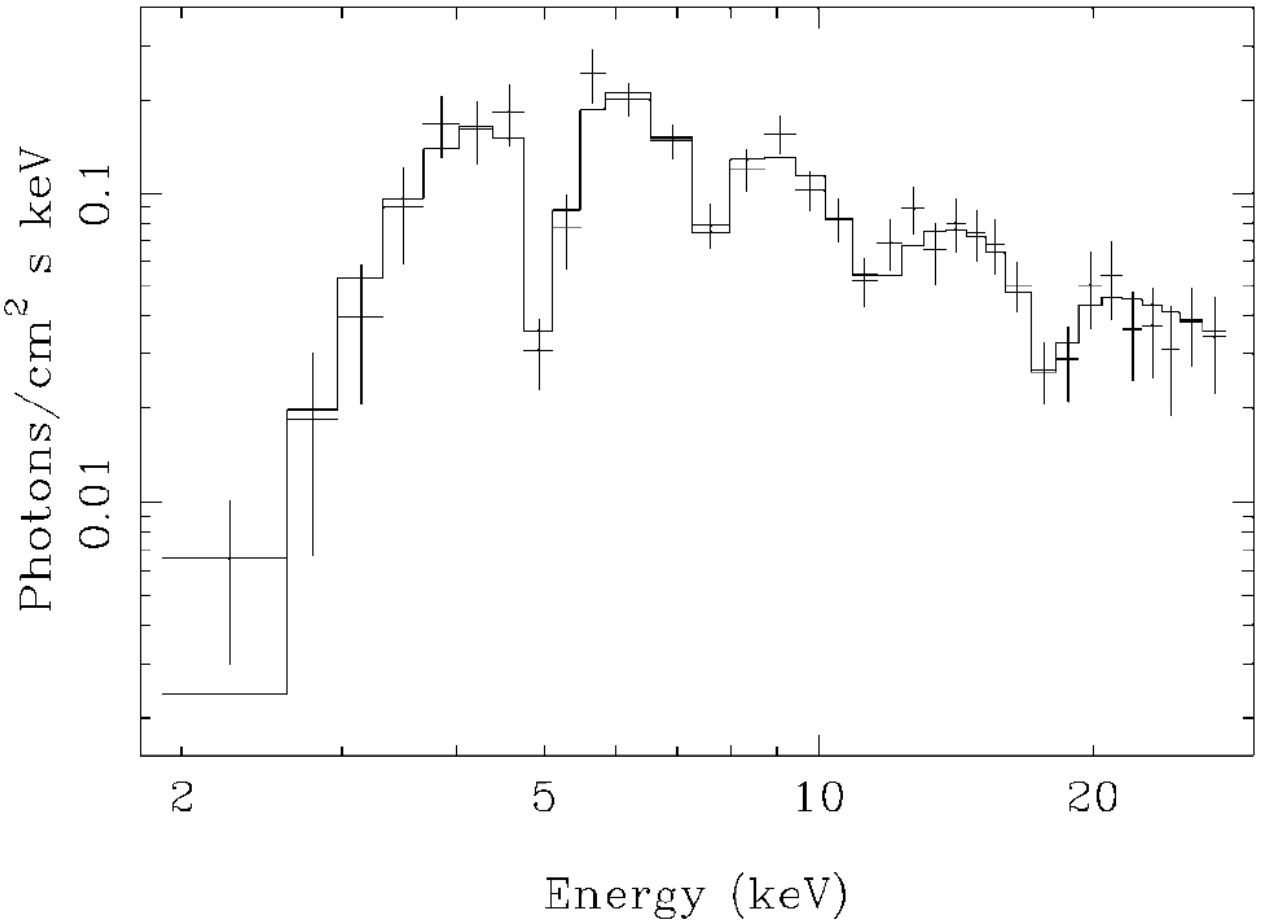
Сильное магнитное поле

Магнетары – $B \sim 10^{15}$ G?

- Магнитодипольная оценка магнитного поля.
- Протонная циклотронная линия?

SGR 1806-20 (Ibrahim et al. 2002)

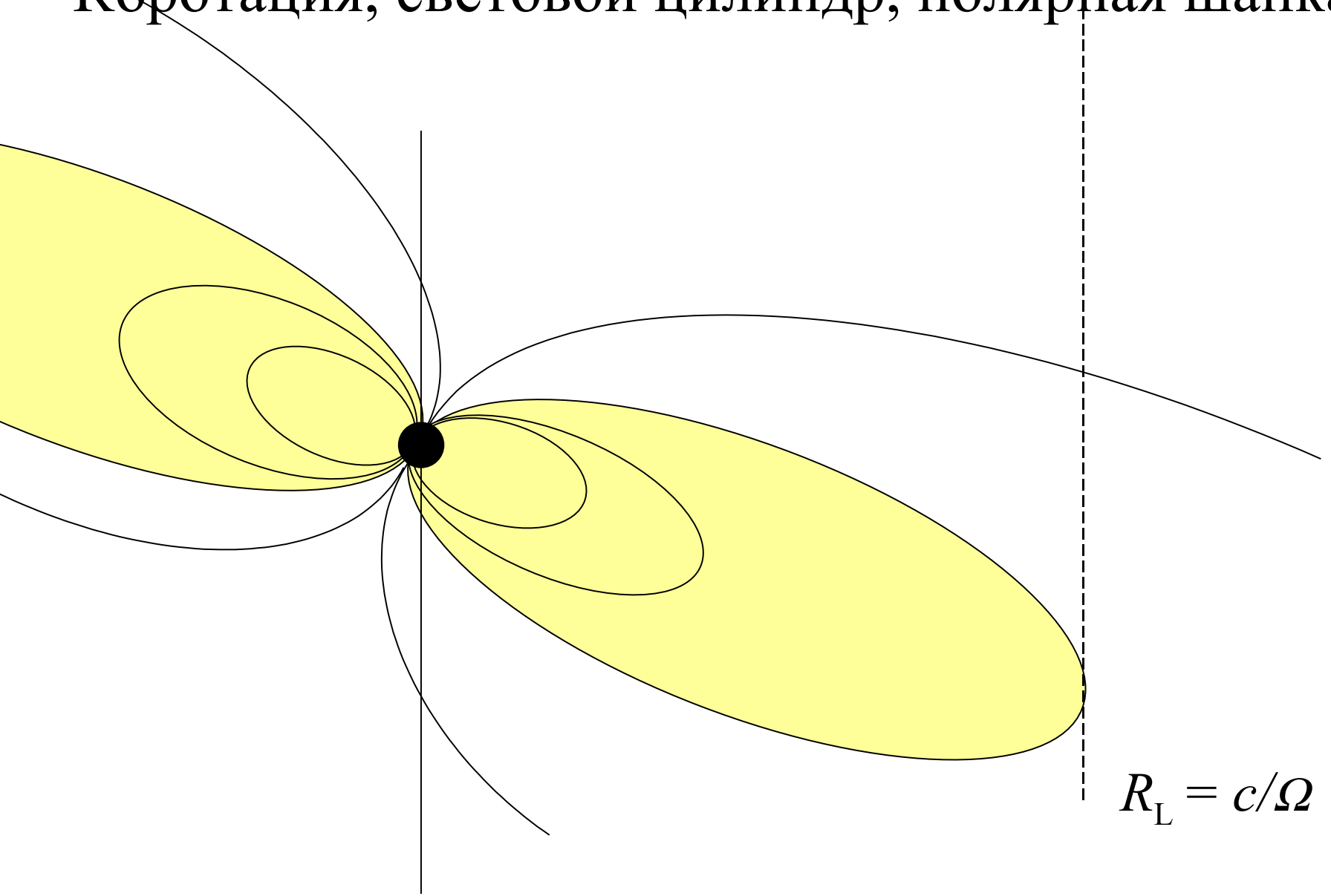
Протонная циклотронная линия?



3. Рождение частиц

- Вакуумное приближение далеко от реальности.
- Более разумная модель – это модель магнитосферы, полностью заполненной плазмой.

Коротация, световой цилиндр, полярная шапка

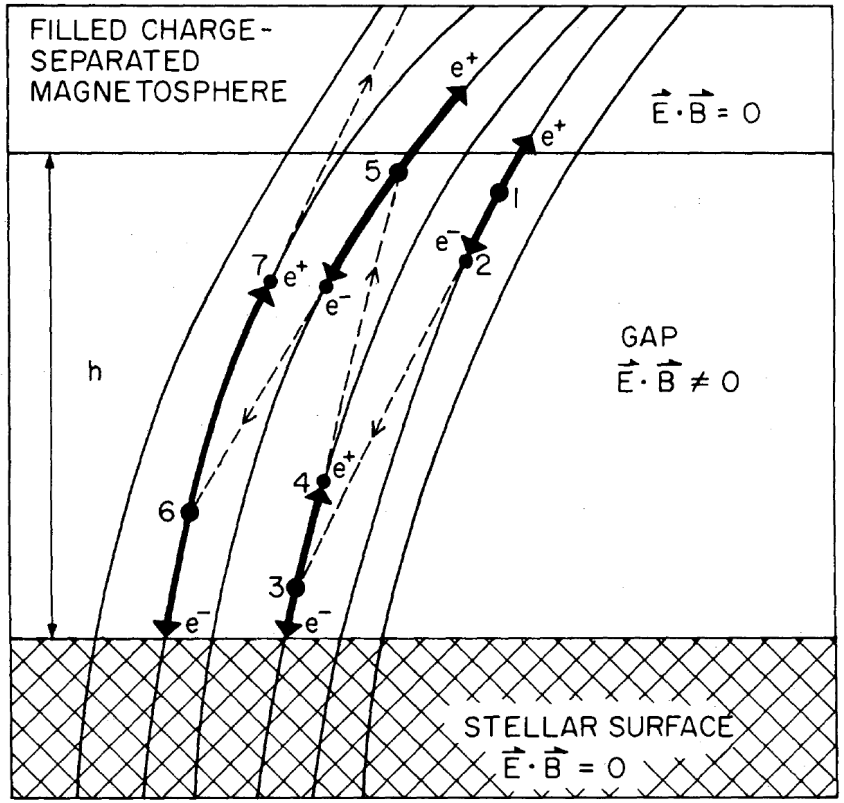


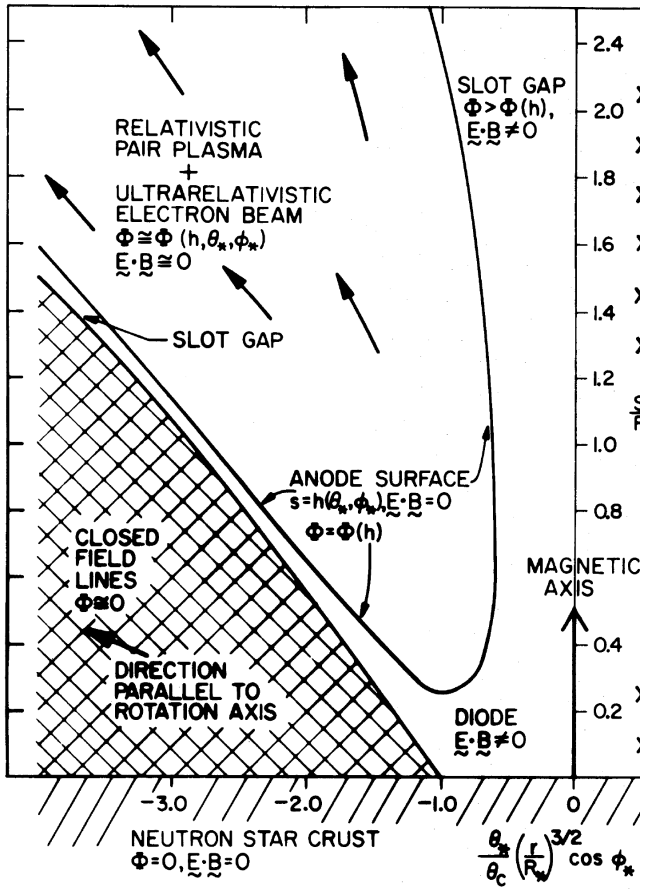
$R_{\mathrm{L}} = c/\Omega$

Основные параметры

- Условие экранировки $$\mathbf{E} + \frac{\Omega \times \mathbf{r}}{c} \times \mathbf{B} = 0$$
- Закон изоротации $$\mathbf{U}_{\mathrm{dr}} = c\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} = \Omega \times \mathbf{r} + j_{\|}\mathbf{B}$$
- Световой цилиндр $$R_{\mathrm{L}} = \frac{c}{\Omega}$$
- Полярная шапка $$R_0 = R\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2}$$
- Гольдрайховская плотность $$\rho_{\mathrm{GJ}} \approx -\frac{\Omega \cdot \mathbf{B}}{2\pi c}$$

Внутренний зазор





Ruderman & Sutherland (1975)
Эйдман и др. (1975)

Arons et al (1977-1981)
Mestel et al

Две модели

$$\frac{\mathrm{d}E_{\parallel}}{\mathrm{d}h} = 4\pi(\rho_{\mathrm{e}} - \rho_{\mathrm{GJ}})$$

RS

$$E_{\parallel} \approx E_{\mathrm{RS}} \frac{H-h}{H}$$

$$E_{\mathrm{RS}} = 4\pi\rho_{\mathrm{GJ}} H$$

$$H_{\mathrm{RS}} \sim \lambda_{\mathrm{C}}^{2/7} R_{\mathrm{c}}^{2/7} R_{\mathrm{L}}^{3/7} \left(\frac{B}{B_{\bar{h}}}\right)^{-4/7}$$

Arons

$$\frac{\mathrm{d}E_{\parallel}}{\mathrm{d}h} = A_a \left(h - \frac{H}{2}\right)$$

$$A_a = \frac{3}{2}\frac{\Omega B_0}{cR}\left[4\frac{\omega}{\Omega}\cos\chi + \theta_{\mathrm{m}}\cos\varphi_{\mathrm{m}}\sin\chi\right]$$

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{2}{5}\varepsilon_{\mathrm{g}} \qquad \varepsilon_{\mathrm{A}} = \left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{g}} = \frac{2|\varphi_{\mathrm{g}}|}{c^2} \approx \frac{2GM}{Rc^2} \sim 0.2$$

Вывод высоты зазора RS

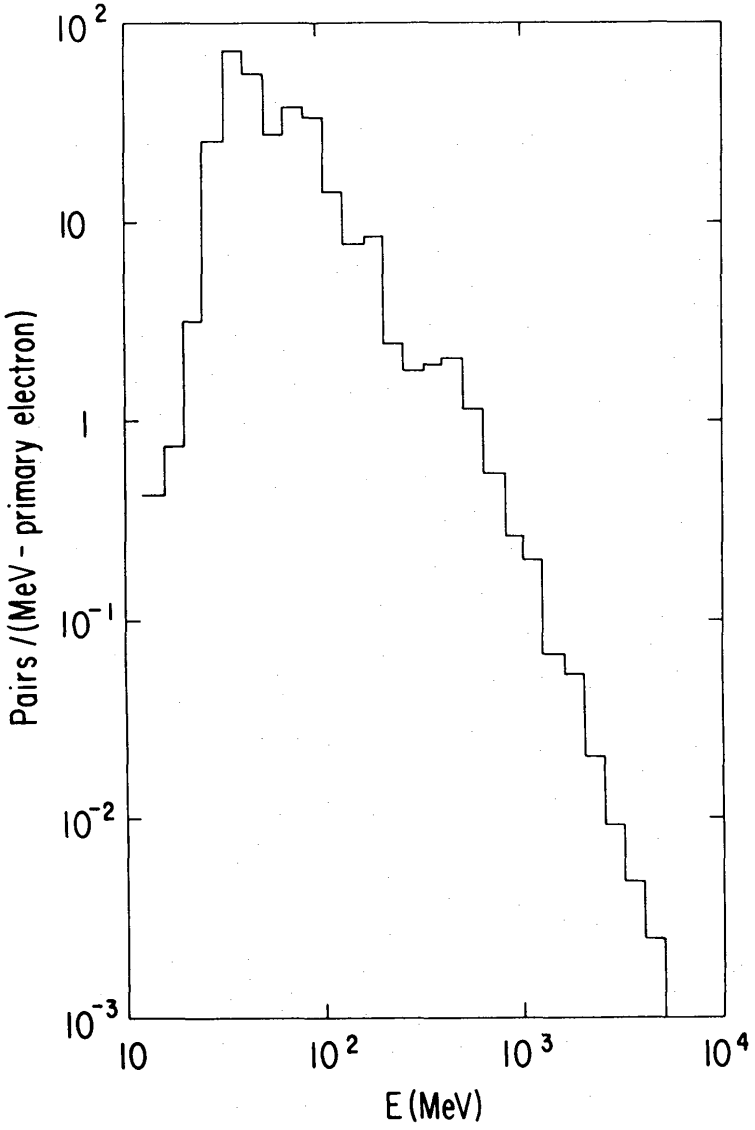
$$\rho_{\rm GJ} \approx -\frac{\boldsymbol{\Omega}\cdot\mathbf{B}}{2\pi c}$$

$$E_{\rm RS} = 4\pi\rho_{\rm GJ}H$$

$$\omega_{\rm cur} = 0.44\frac{c}{R_{\rm c}}\gamma^3 \qquad \gamma = \frac{eE_{\rm RS}H}{m_{\rm e}c^2}$$

$$l_\gamma = \frac{8}{3\Lambda}R_{\rm c}\frac{B_{\bar{\lambda}}}{B}\frac{m_{\rm e}c^2}{\mathscr{E}_{\rm ph}} \qquad \mathcal{E}_{\rm ph} = \hbar\omega_{\rm cur}$$

$$H_{\rm RS} \sim \lambda_{\rm C}^{2/7}R_{\rm c}^{2/7}R_{\rm L}^{3/7}\left(\frac{B}{B_{\bar{\lambda}}}\right)^{-4/7}$$

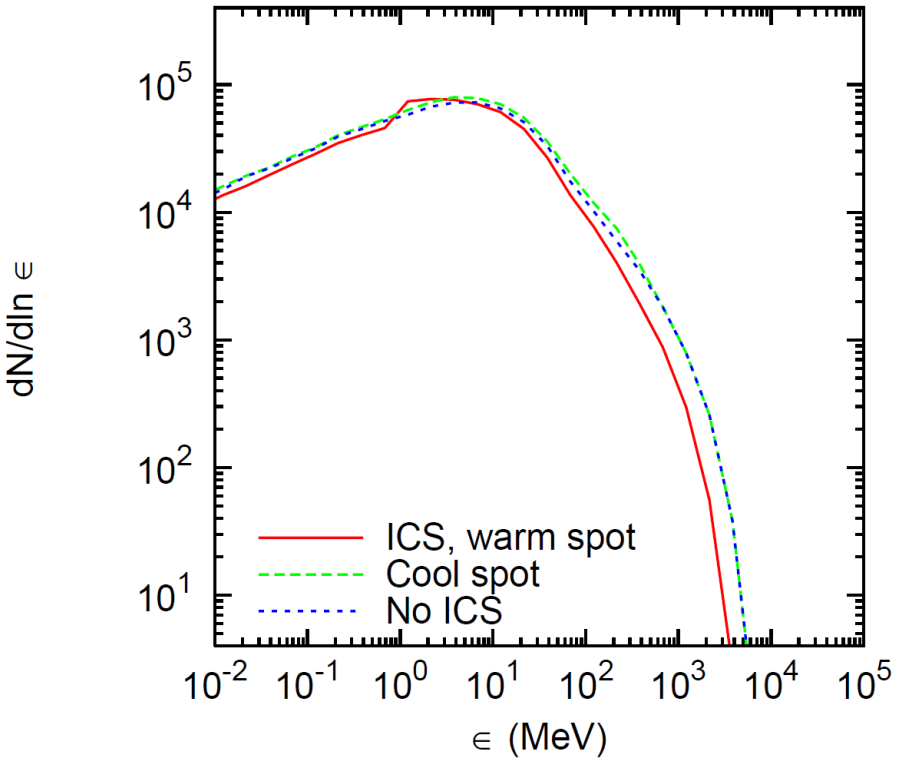


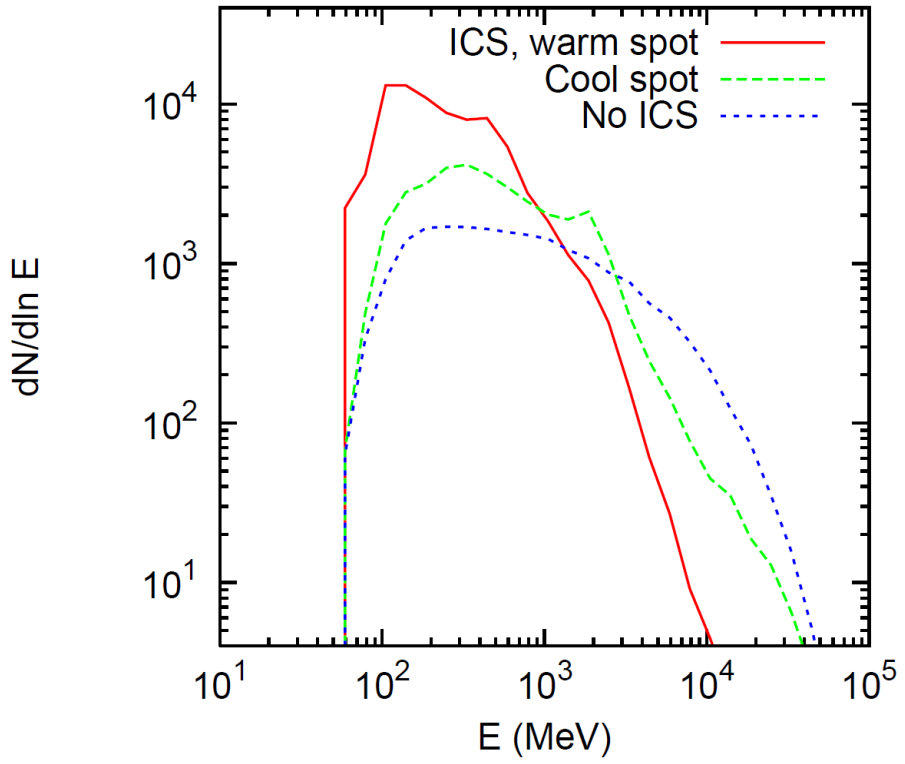
J. K. Daugherty, A. K.Harding.
ApJ, **252,** 337 (1982)

Длина пробега

$$l_\gamma = \frac{8}{3\Lambda} R_c \frac{B_{\bar{h}}}{B} \frac{m_e c^2}{\mathscr{E}_{ph}}$$

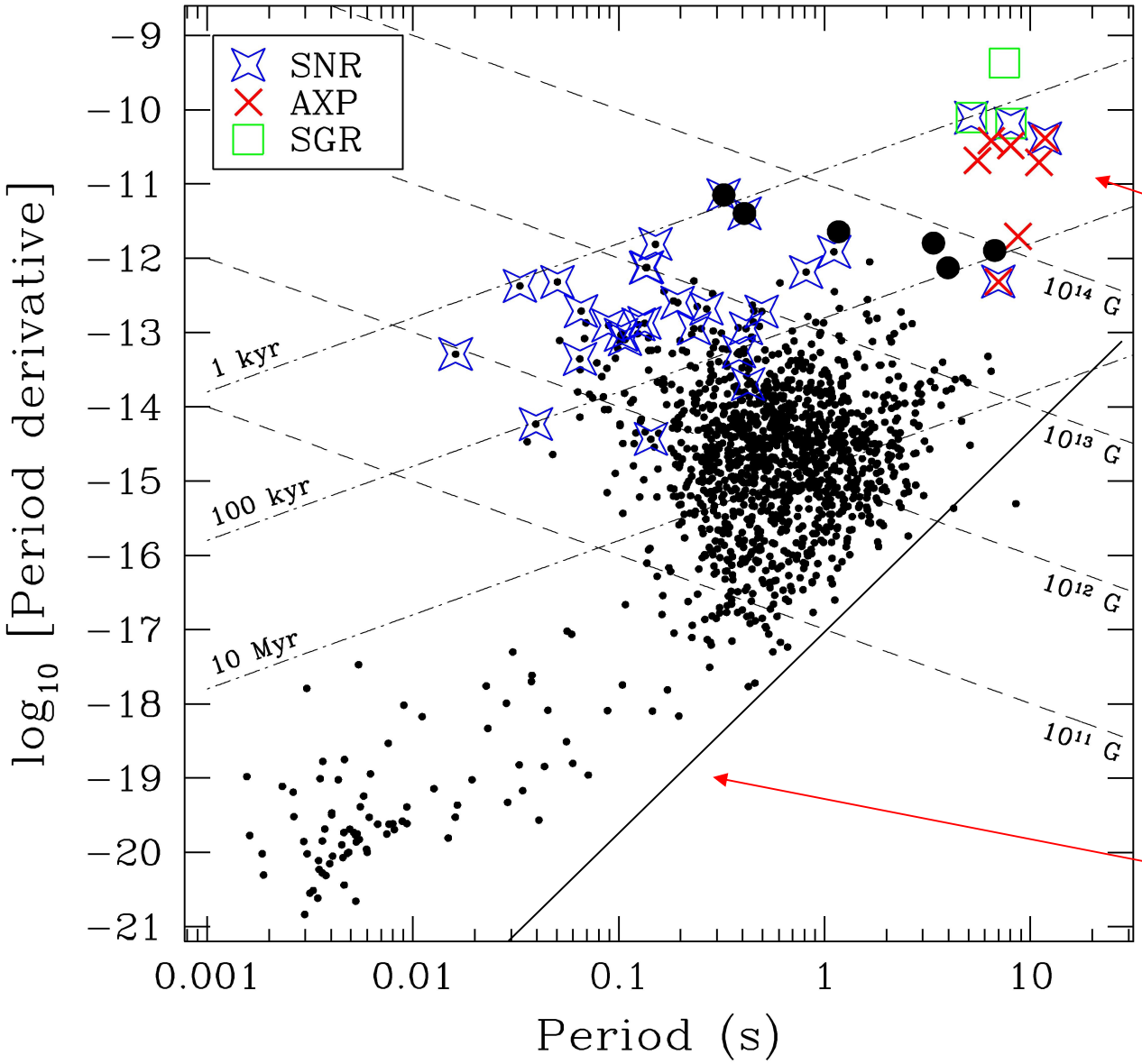
$$\gamma \approx \frac{1}{\theta} \approx \frac{R_c}{l_\gamma}$$





Z.Medin & D.Lai.
MNRAS, **406,** 1379 (2010)

PPdot – диаграмма



Магнетары

Линия смерти

Ответы на основные вопросы

- Стабильность пульсаций – вращение
- Энергетический источник – энергия вращения
- Механизм потерь – электродинамический
- Нейтронная звезда есть радиопульсар, если генерируется вторичная электронно-позитронная плазма

Токовые потери

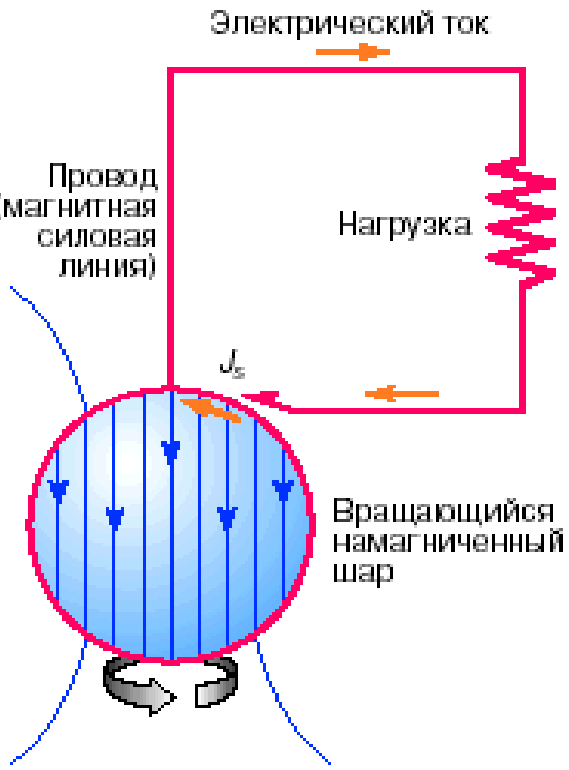
Вращающаяся нейтронная звезда работает как униполярный индуктор, теряя энергию вращения за счет электрических токов, текущих в магнитосфере

Униполярный индуктор

Вращающийся намагниченный шар может служить батареей постоянного электрического тока

Униполярный индуктор

- Электрический контур касается шара на разных широтах.
- Электрический контур вращается с угловой скоростью Ω, отличной от угловой скорости намагниченного шара.
- Источник энергии (ЭДС) – кинетическая энергия вращения.
- Батарея – сторонние силы.



Униполярный индуктор (теория)

- Условие вмороженности

$$\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B}/c = 0 \qquad (\boldsymbol{E}' = \boldsymbol{j}/\sigma = 0)$$

- ЭДС (не связана с эффектом Фарадея)

$$E \sim (V/c)B, \qquad U = E\,L$$

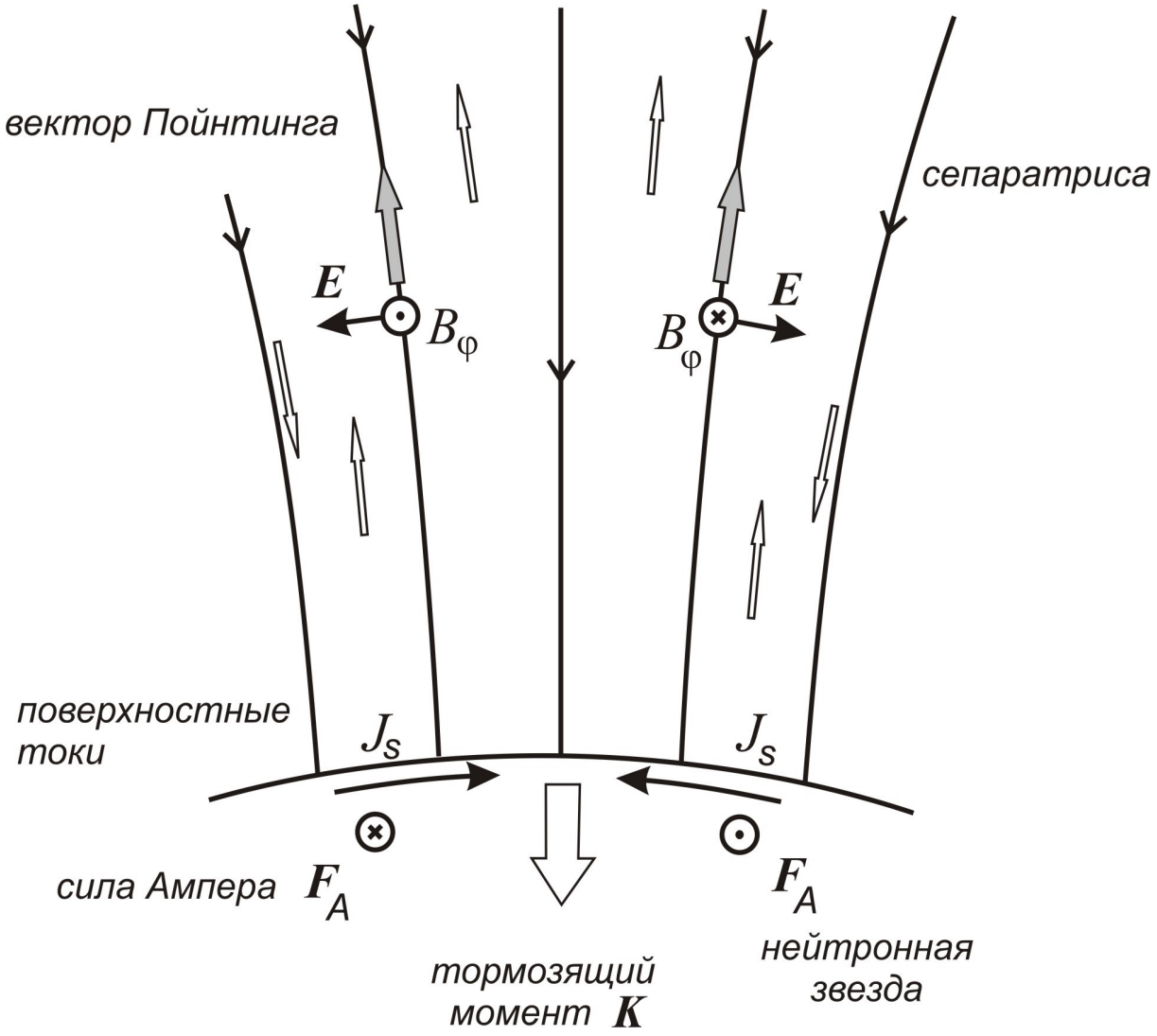
- Ненулевая плотность заряда

$$\rho_e \sim E/L \quad (E \sim Q/L^2) \qquad (\mathrm{div}\boldsymbol{E} = 4\pi\rho_e)$$

для вращения $V = \Omega\, r$

$$\rho_{GJ} = -\frac{\Omega\, B}{2\pi c}$$

Торможение соосного ротатора



Торможение радиопульсаров (теория)

- Коротация $V = \Omega\ r$
- Световой цилиндр $R_L = c / \Omega$
- Полярная шапка

$$R_0 = R\left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2}$$

- Энергетические потери $W = UI$

$$U \sim ER_0 \sim (\Omega R_0 / c) B_0 R_0$$

$$I \sim \rho_e c \pi R_0^2 \sim \Omega B_0 R_0^2$$

$$W_{\rm tot} = c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} i_0 \cos\chi$$

Торможение радиопульсаров

$$W_{\rm tot} = c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} i_0 \cos\chi$$

Для величин, характерных для радиопульсаров

- магнитное поле $B_0 \sim 10^{12}\, Гс$
- радиус нейтронной звезды $R \sim 10^6\, см$

полное энерговыделение $W \sim 10^{31} - 10^{33}\, эрг/с$
близко к наблюдаемому $J_r\, \Omega\, \mathrm{d}\Omega/\mathrm{d}t$

Энергетические потери при $\chi < \pi/2$

Магнитодипольные

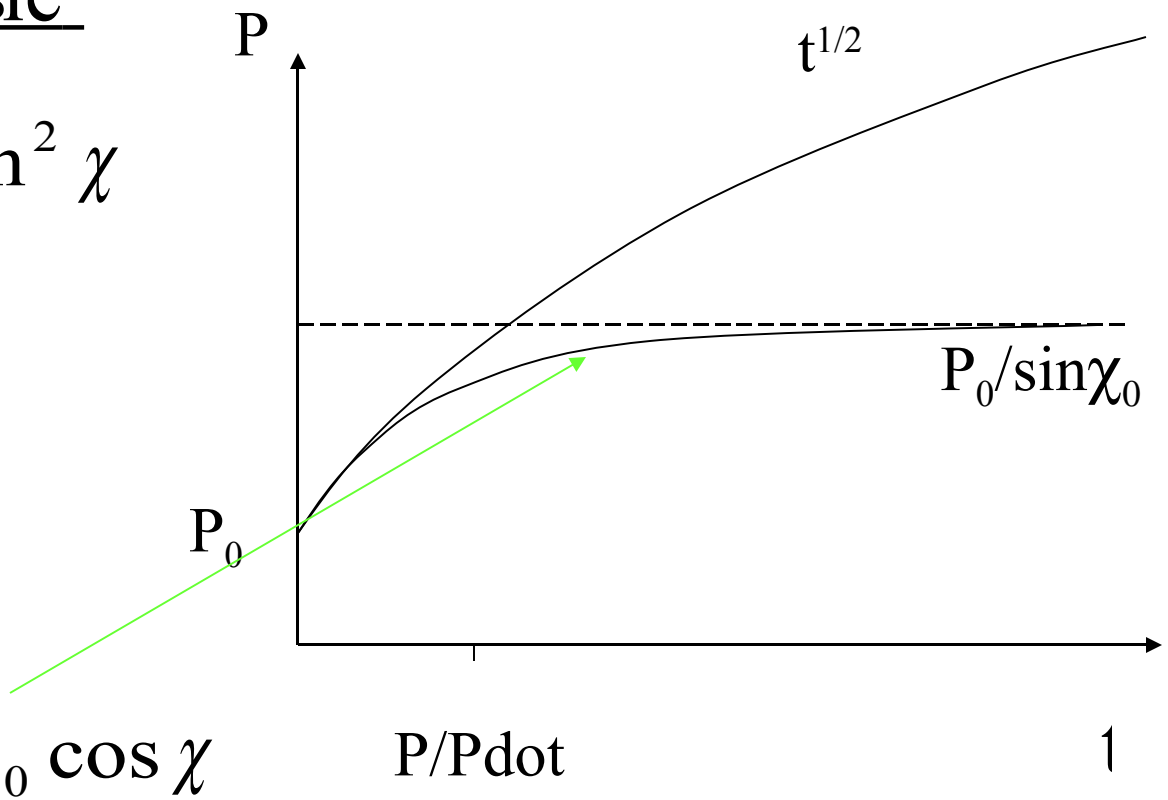
$$W_{\text{tot}} = \frac{1}{6}\frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3}\sin^2\chi$$

$$\Omega \cos\chi = \text{const}$$

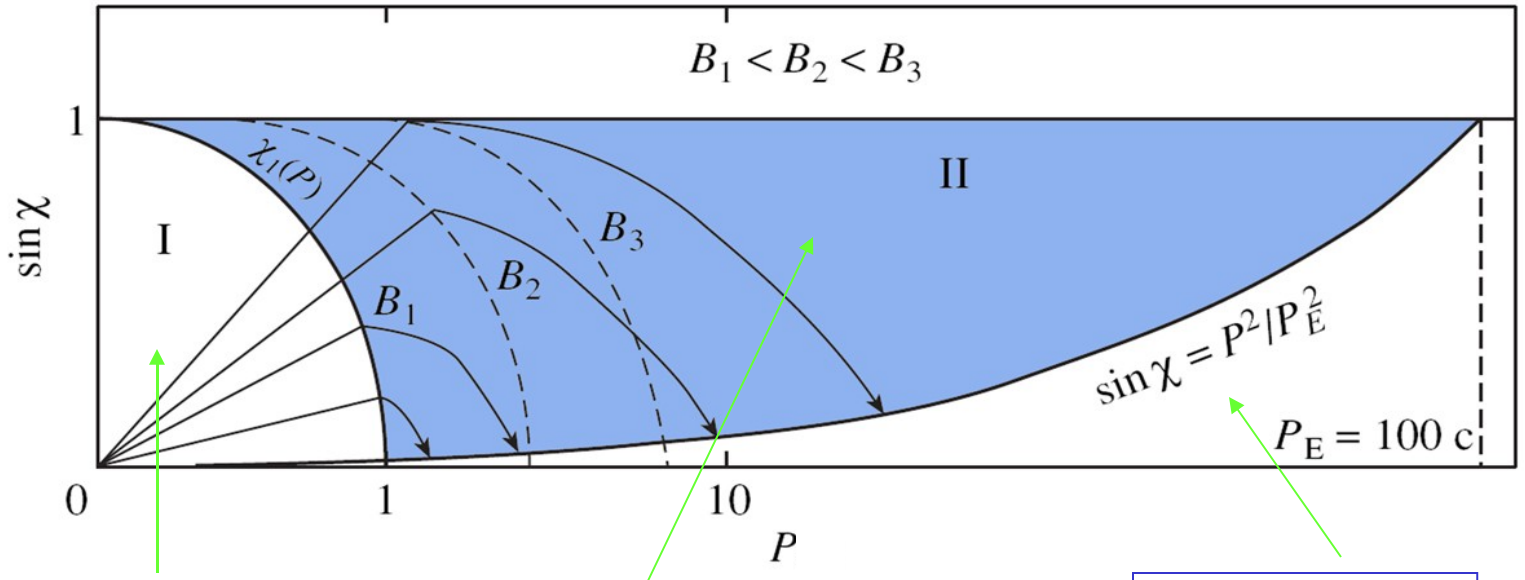
Токовые

$$W_{\text{tot}} = \frac{f_*^2}{4}\frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} i_0 \cos\chi$$

$$\Omega \sin\chi = \text{const}$$



Потухшие радиопульсары



радиопульсары

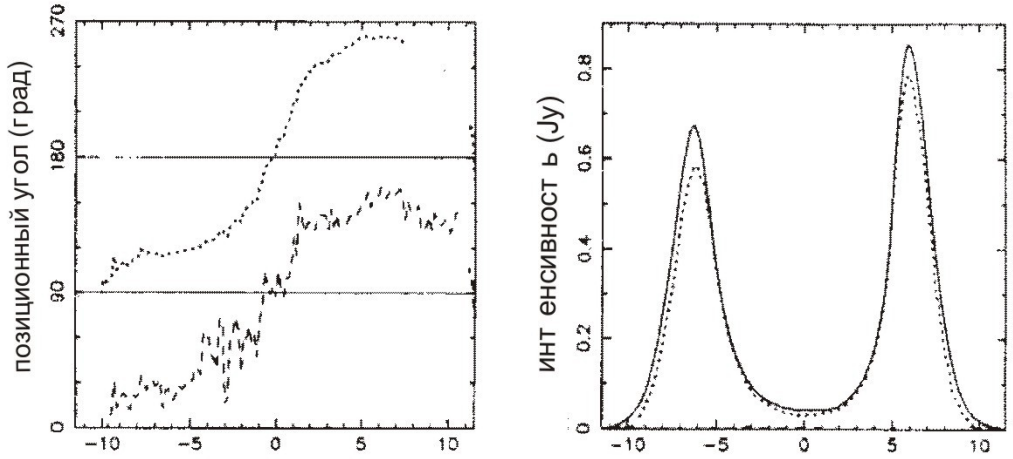
потухшие радиопульсары

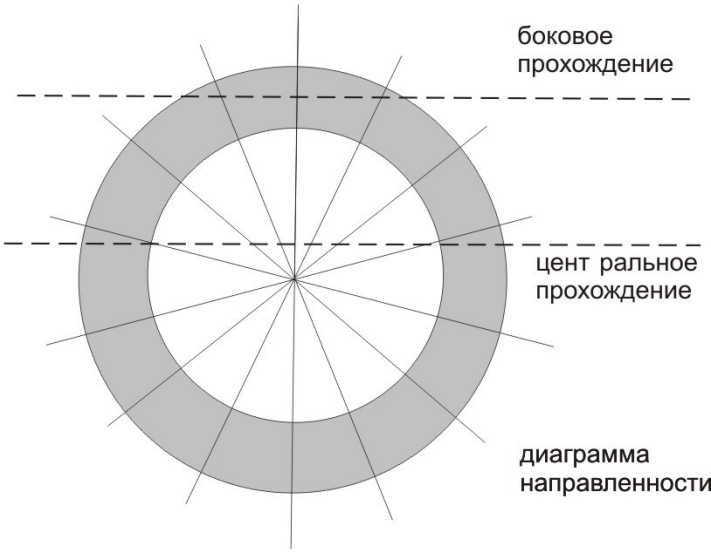
пропеллеры

5. Модель “полого конуса”

Модель полого конуса

Корреляции, ортогональные моды





Боковое прохождение

– одногорбые, малое изменение позиционного угла.

Центральное прохождение

– двугорбые, изменение позиционного угла близко к 180^{o}.

Предсказания

- Зависимость ширины среднего профиля от периода (J.Rankin, 1990)

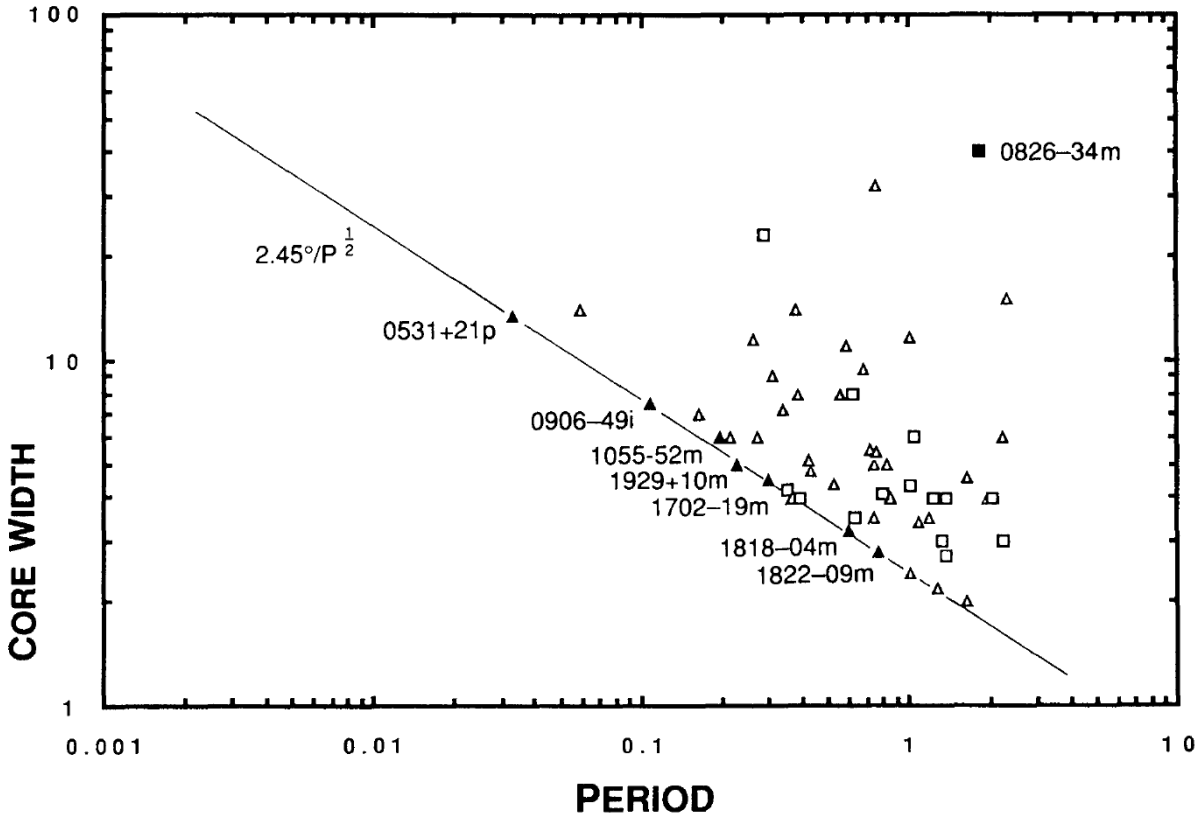
Если $r_0 \sim$ const,

то

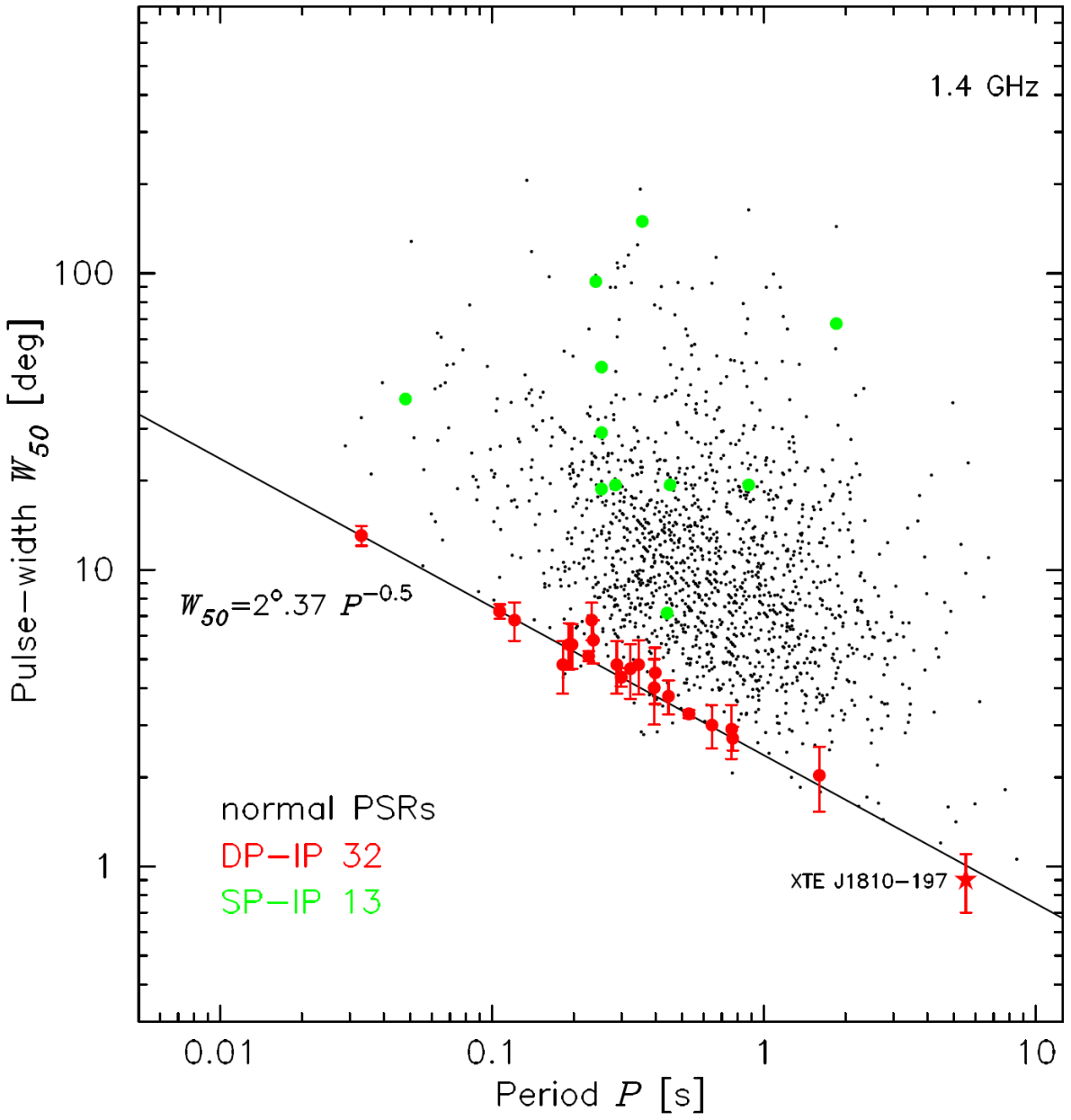
$$W = (\Omega\, r_0/c)^{1/2}$$

$$W = W/\sin\chi$$

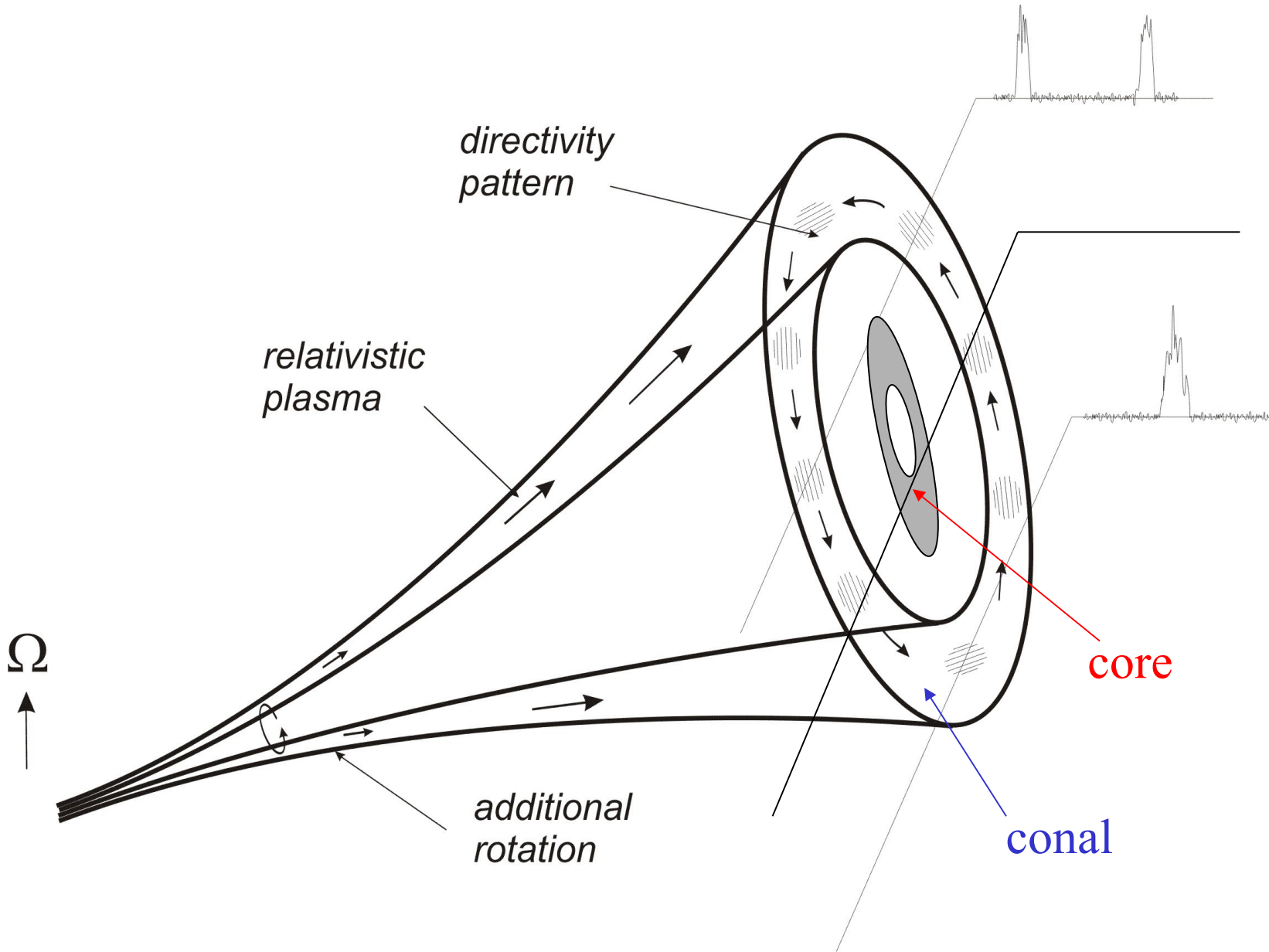
$$W \sim P^{-1/2}$$



Krzysztof Maciesiak[1]*, Janusz Gil[1], Giorgi Melikidze[1,2]

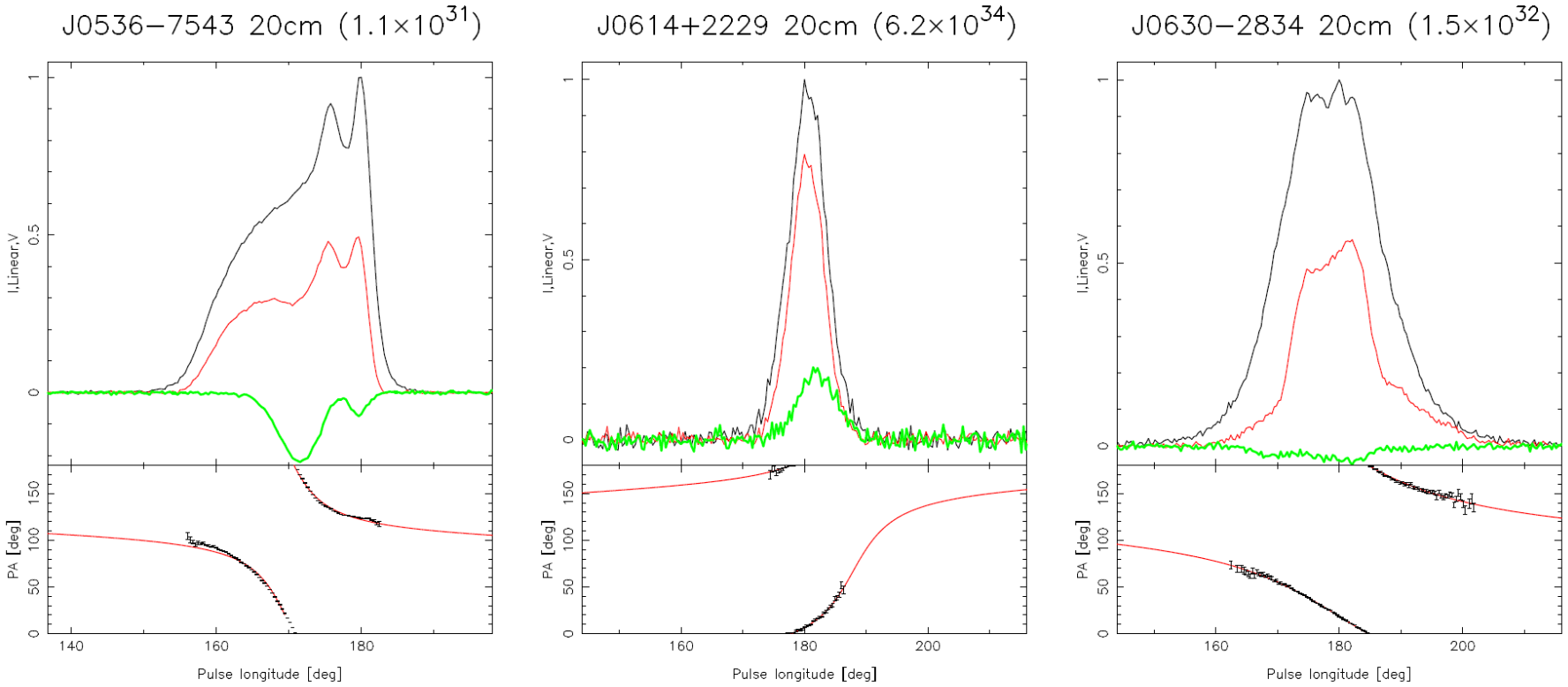


“Core-conal” model



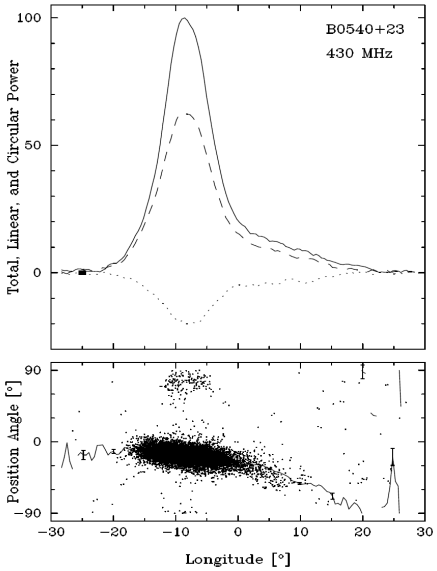
Ход позиционного угла *p.a.*

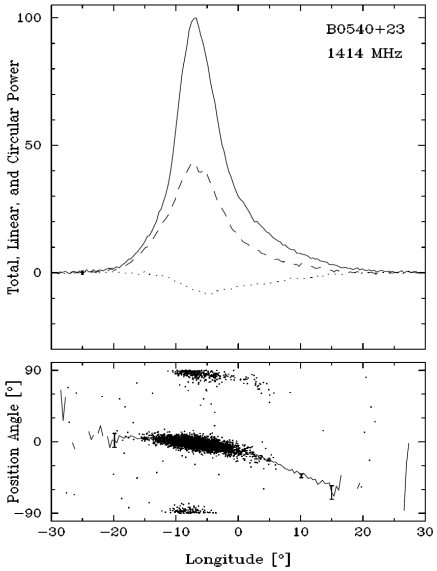
$$p.a. = \arctan\left(\frac{\sin\chi\sin\varphi}{\sin\xi\sin\chi - \sin\xi\cos\chi\cos\varphi}\right)$$

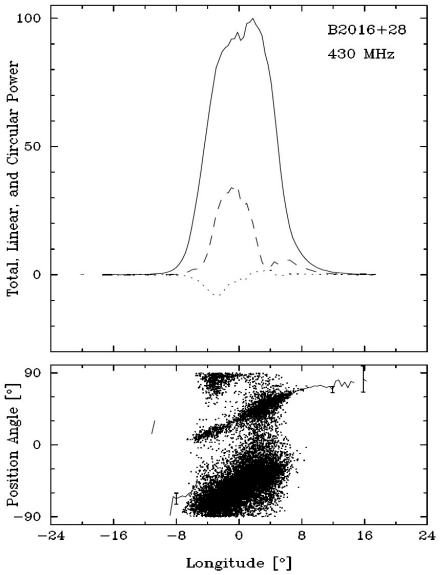


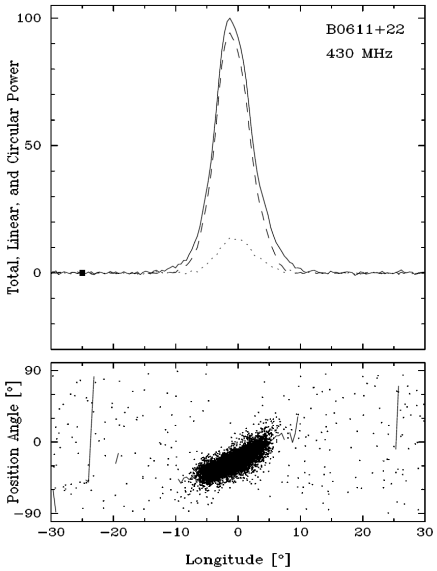
P.Weltevrede, S.Johnston. MNRAS, **391**, 1210 (2008)

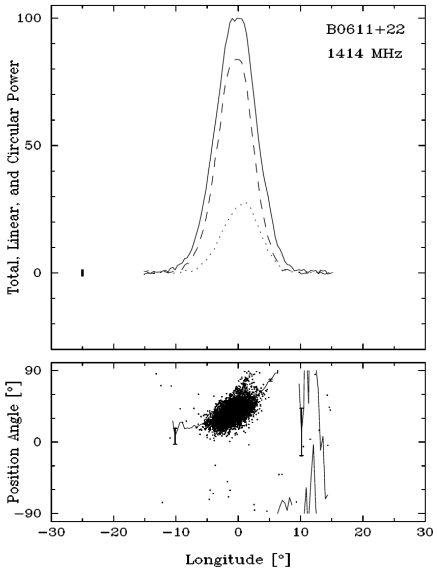
T.Hankins, J.Rankin, 2008

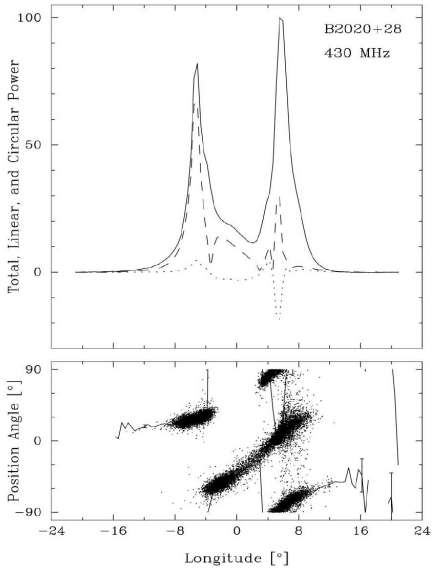




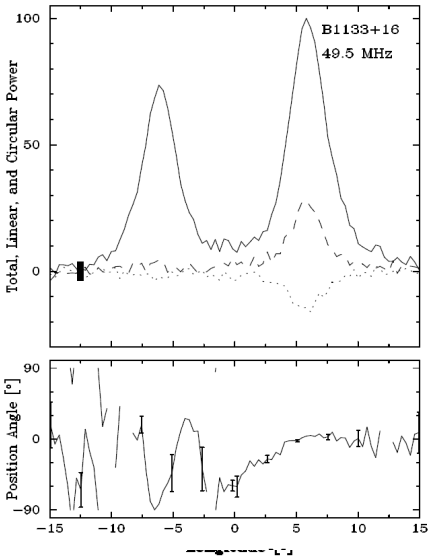


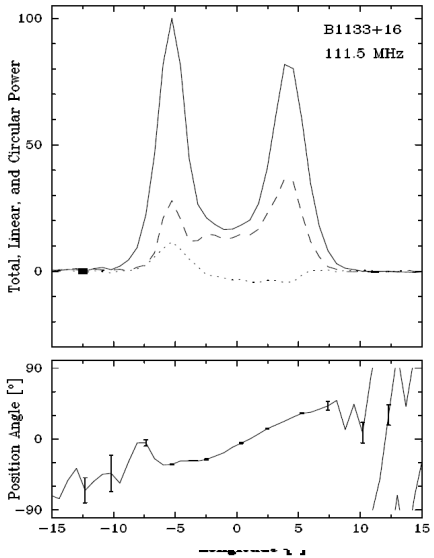


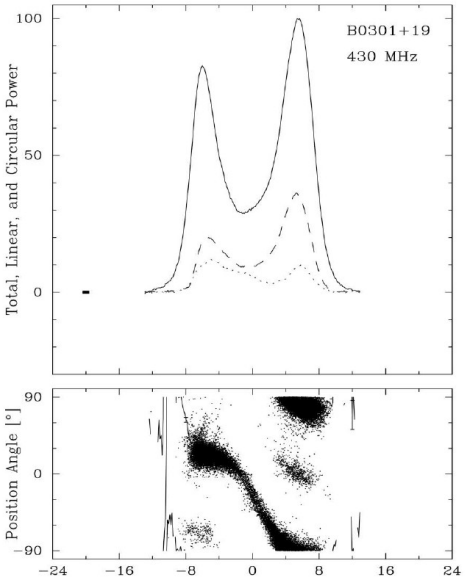


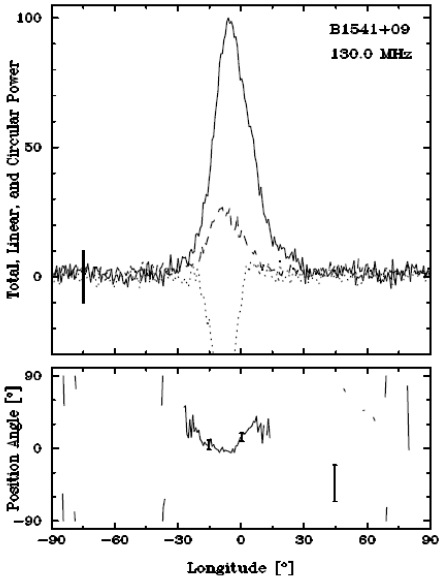


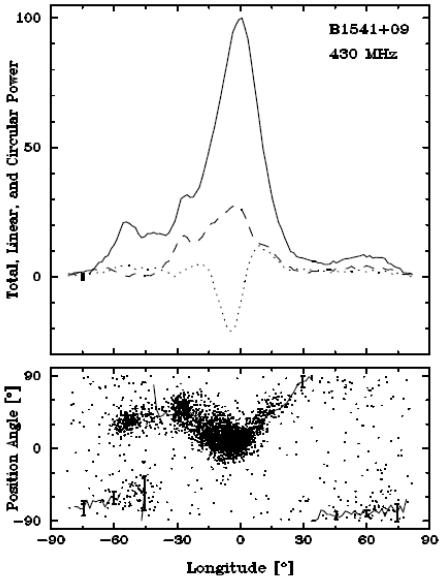
T.Hankins, J.Rankin, 2008

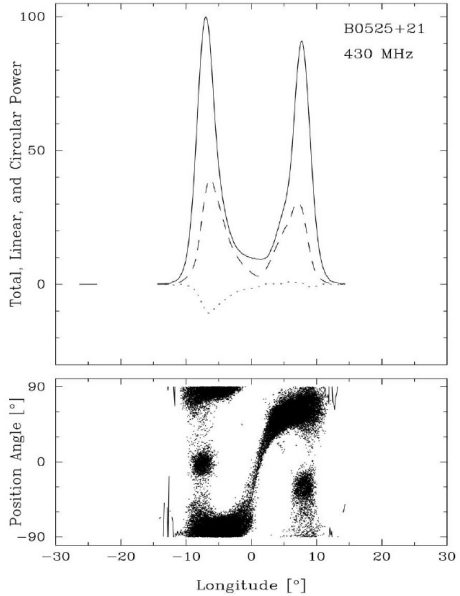




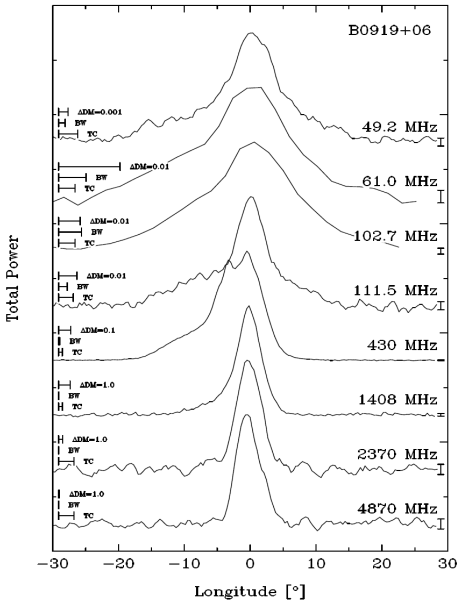


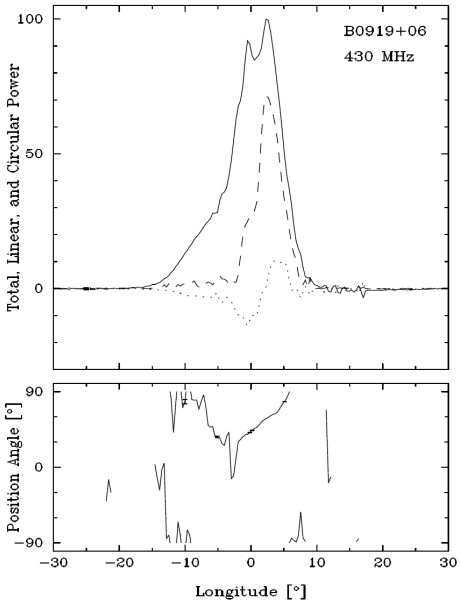


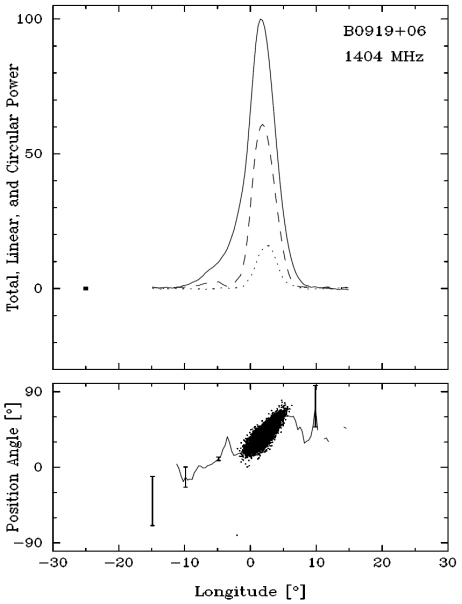




T.Hankins, J.Rankin, 2008



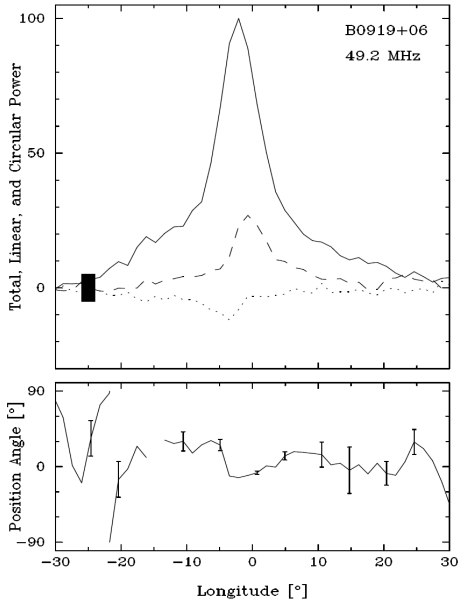


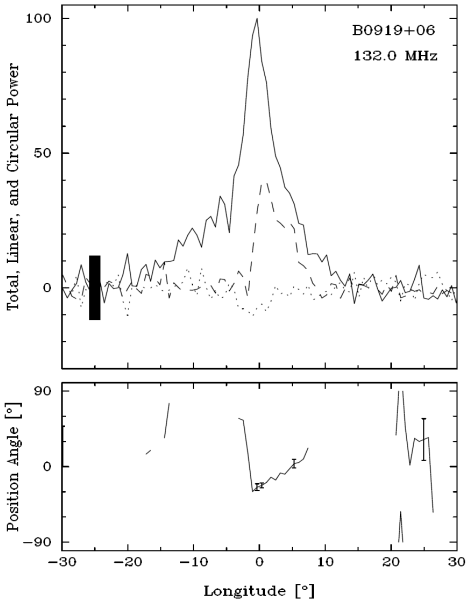
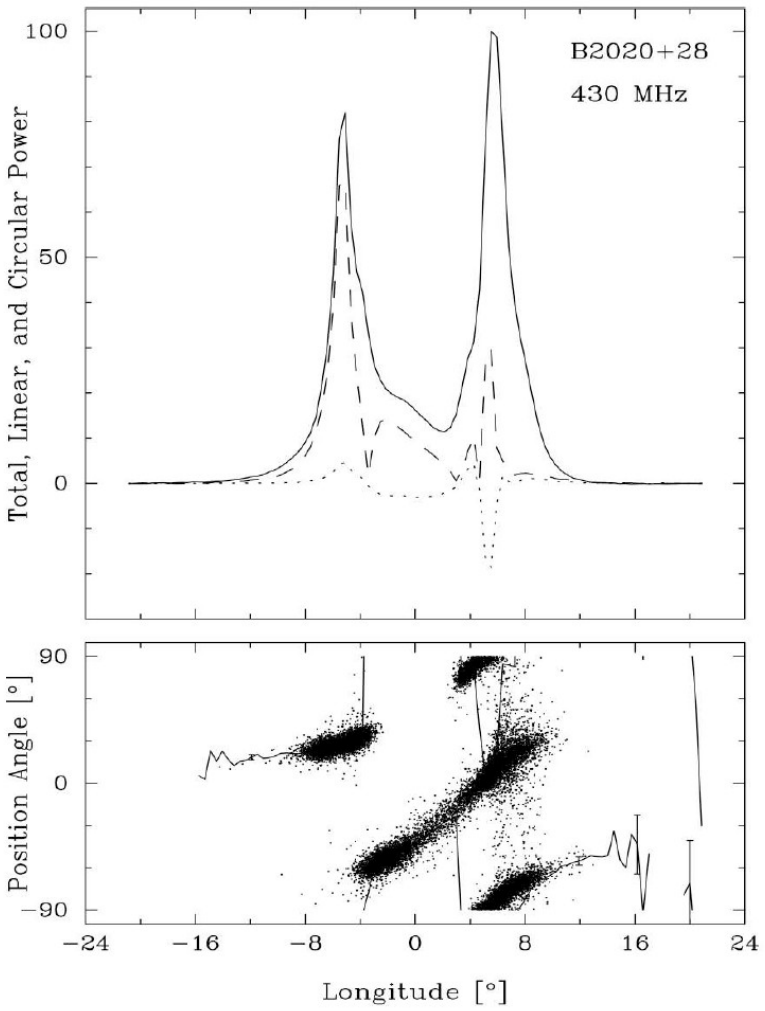
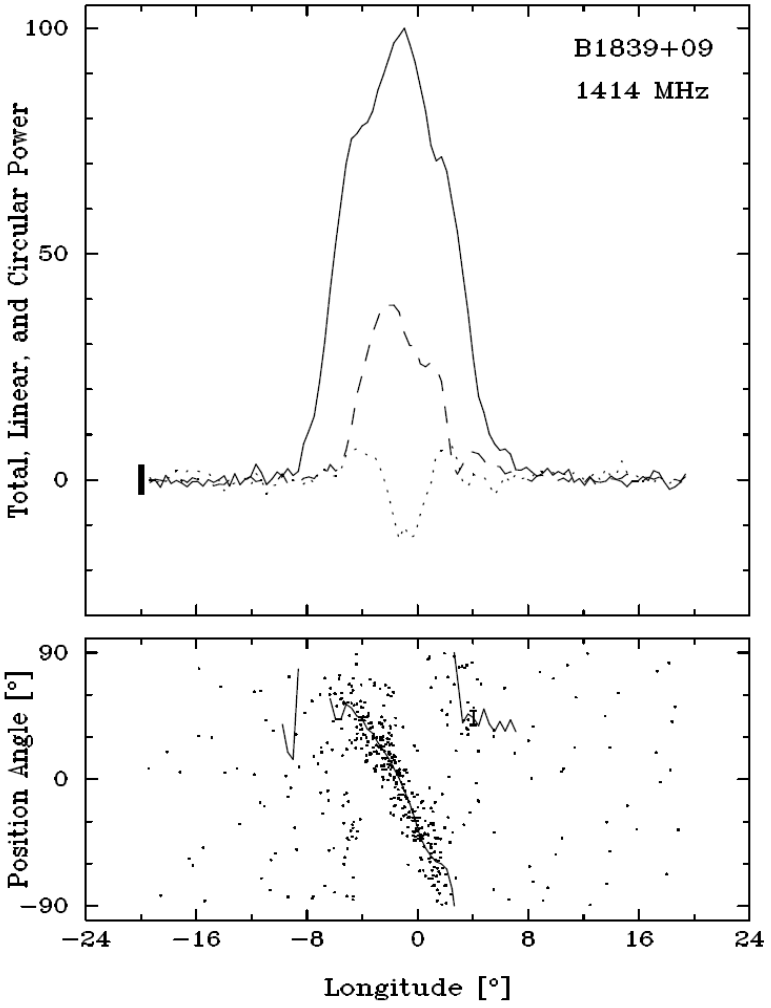


<u>PSR B0919+06</u>

P = 0.4 c

Pdot = 13 10^{-15}





T.Hankins, J.Rankin, 2008