

РАДИОПУЛЬСАРЫ



РАДИОПУЛЬСАРЫ

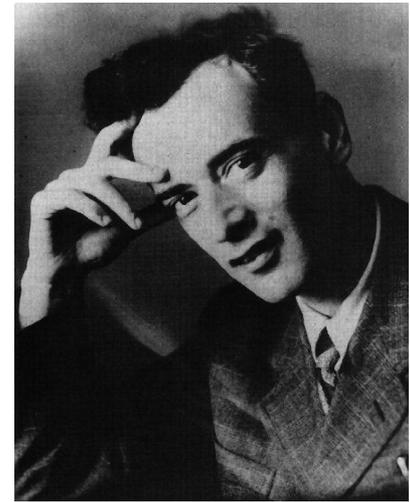


Предсказание ...

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.

Л.Д. Ландау: Звезда-ядро

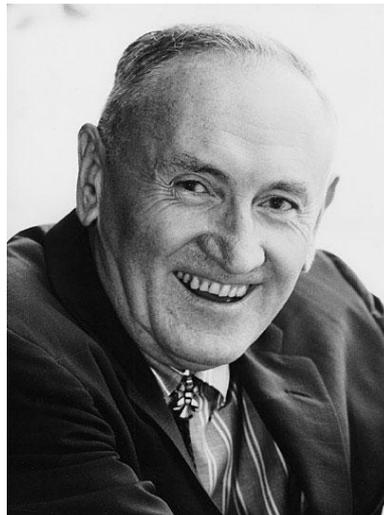
Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые



(Ландау)

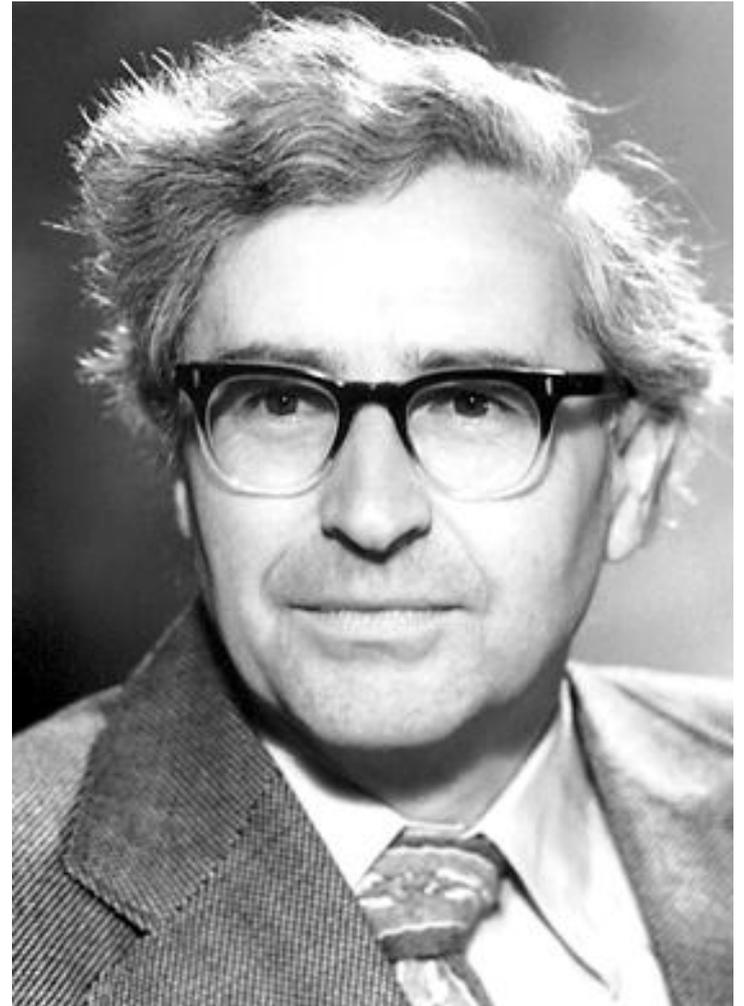


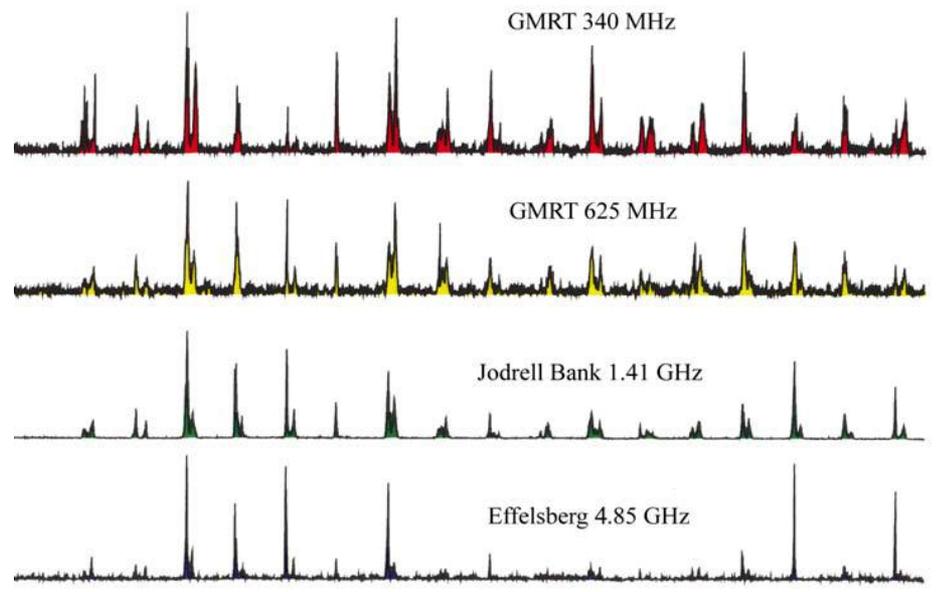
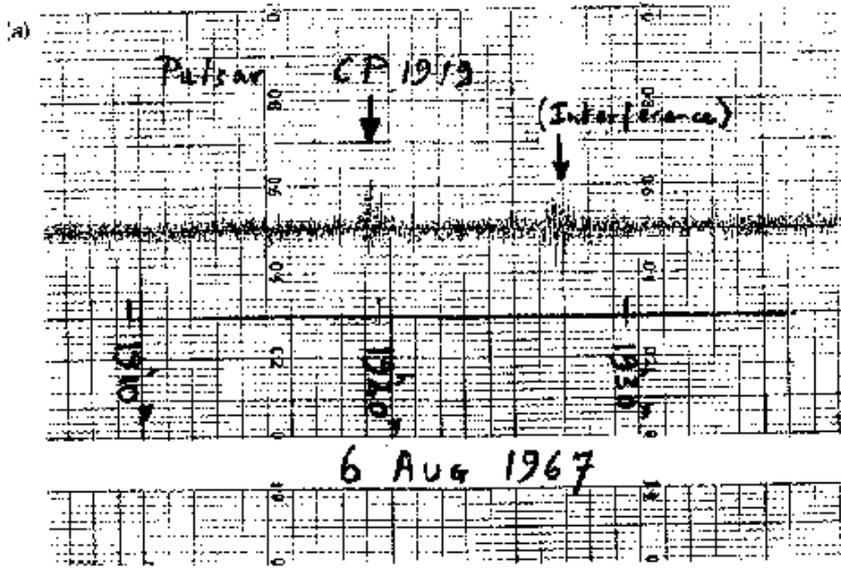
(Бааде)



(Цвикки)

Jocelyn Bell, Antony Hewish, 1967





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



Catalogue version: 1.44

TABLE

PLOT

Predefined Variables

- | | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|
| <input type="checkbox"/> Name | <input type="checkbox"/> JName | <input type="checkbox"/> RaJ | <input type="checkbox"/> DecJ | <input type="checkbox"/> PMRA | <input type="checkbox"/> PMDec |
|---|--|--|---|---|--|

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



Catalogue version: 1.44

Australia Telescope
National Facility

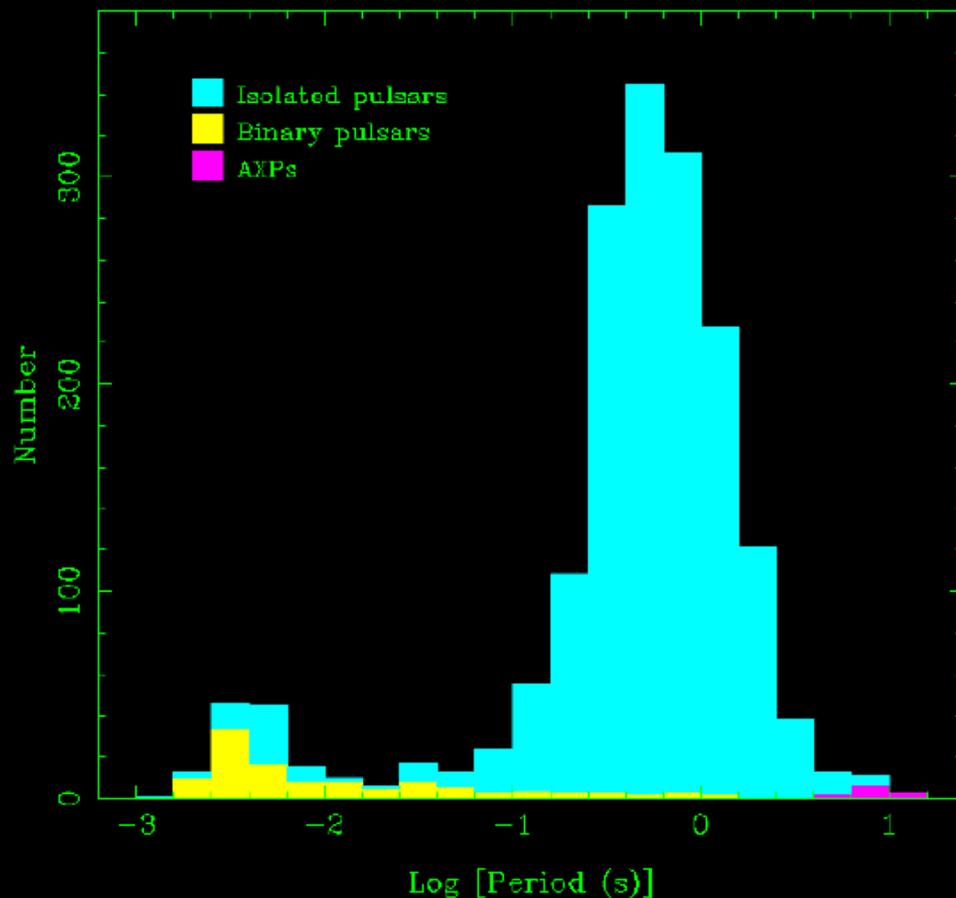


Predefined Variables

<input type="checkbox"/> Name	<input type="checkbox"/> JName	<input type="checkbox"/> RaJ	<input type="checkbox"/> DecJ	<input type="checkbox"/> PMRA	<input type="checkbox"/> 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

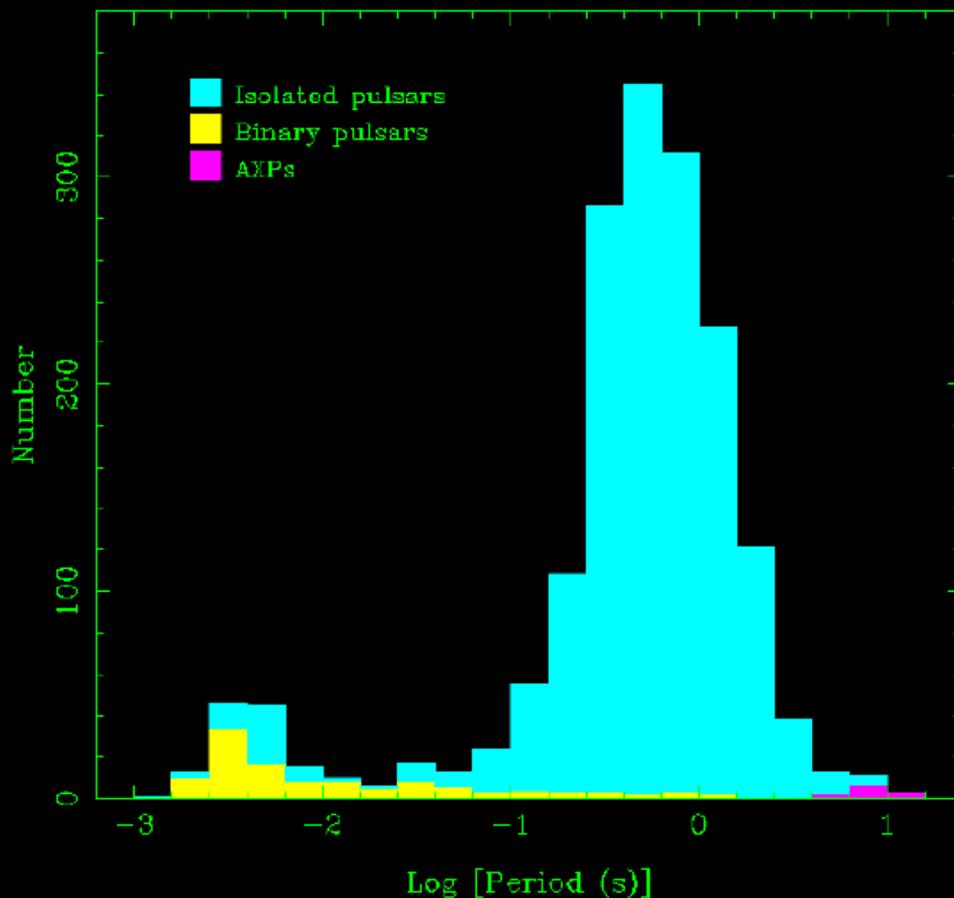


* Total known: 129 in 24 clusters
(Paulo Freire's web page)

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

Spin-Powered Pulsars: A Census

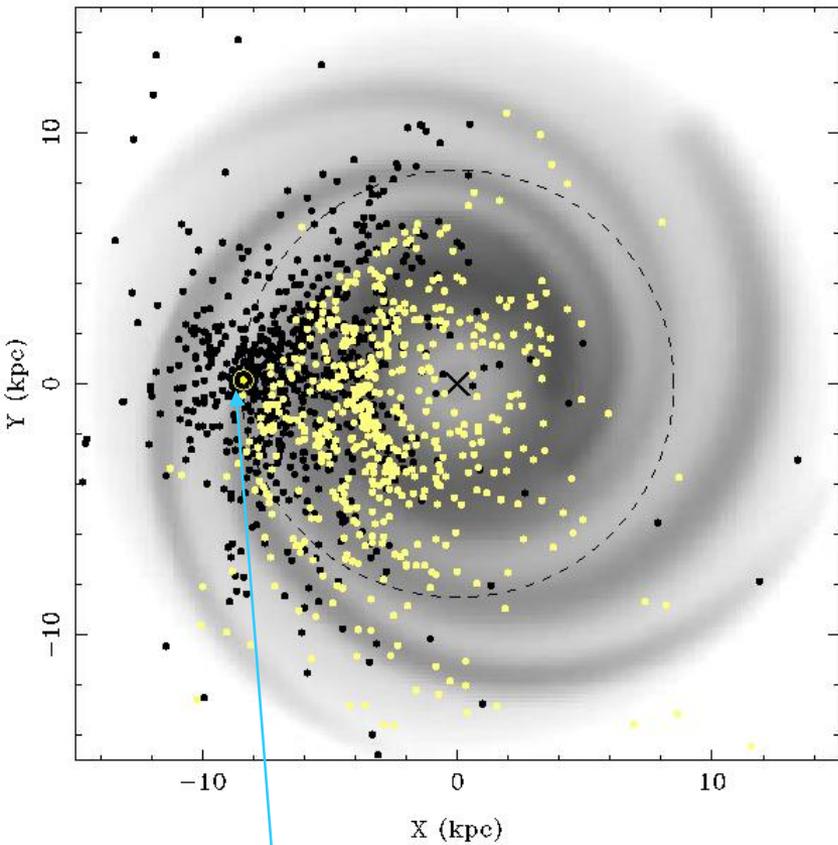
- Number of known pulsars: 2008
- Number of millisecond pulsars: 205
- Number of binary pulsars: 131
- Number of AXPs: 12
- Number of pulsars in globular clusters: 99*
- Number of extragalactic pulsars: 20



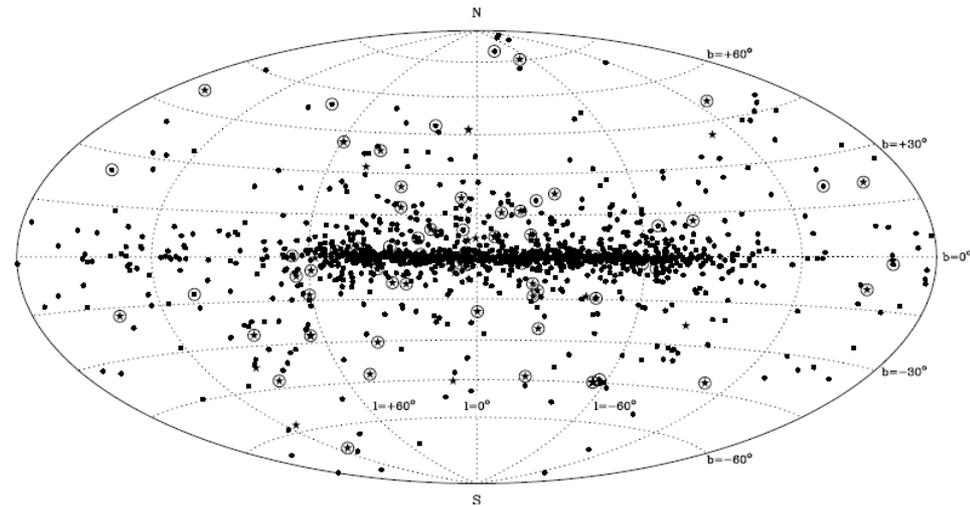
* Total known: 129 in 24 clusters
(Paulo Freire's web page)

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

Пространственное распределение радиопульсаров



Солнце

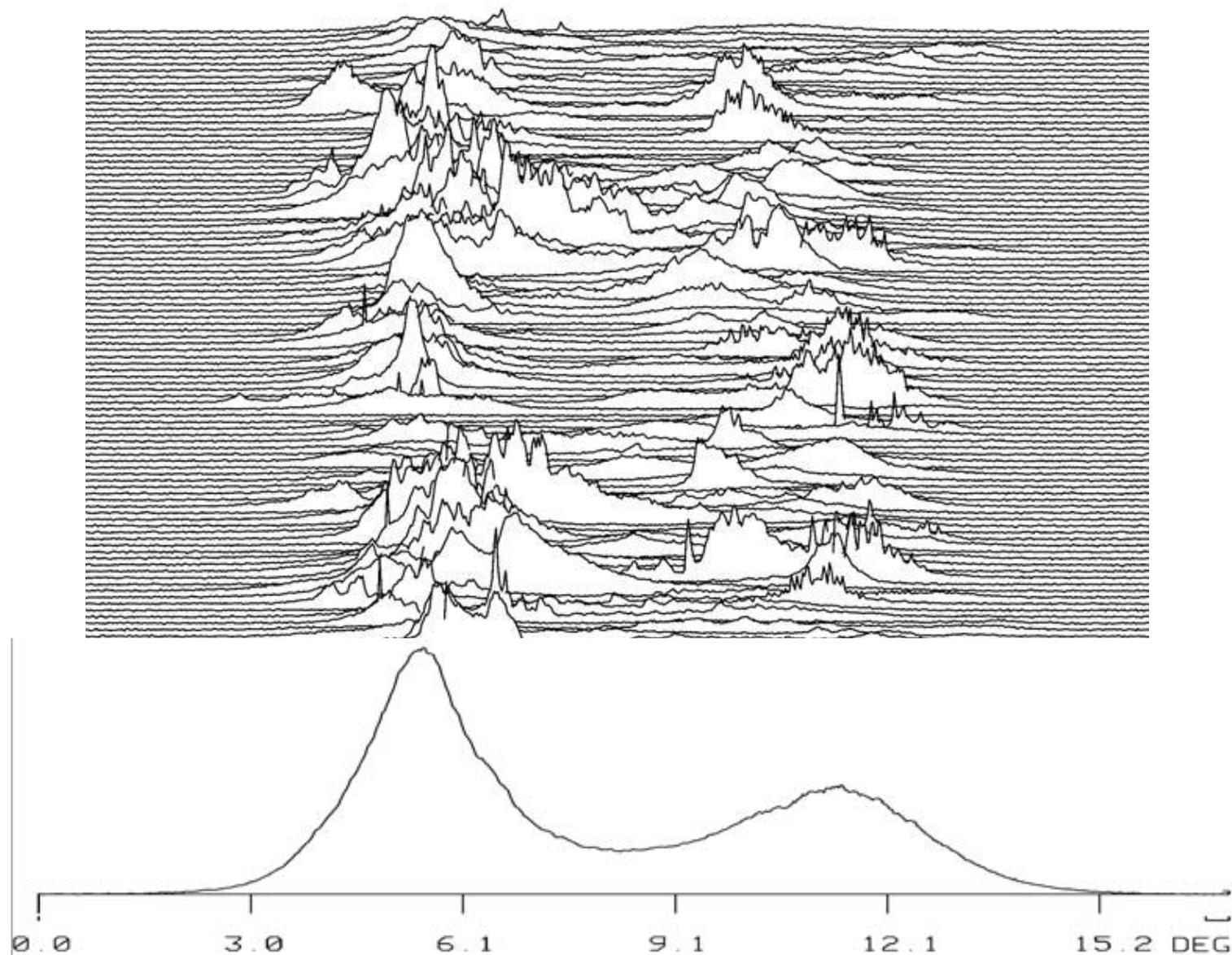


Паспортные данные

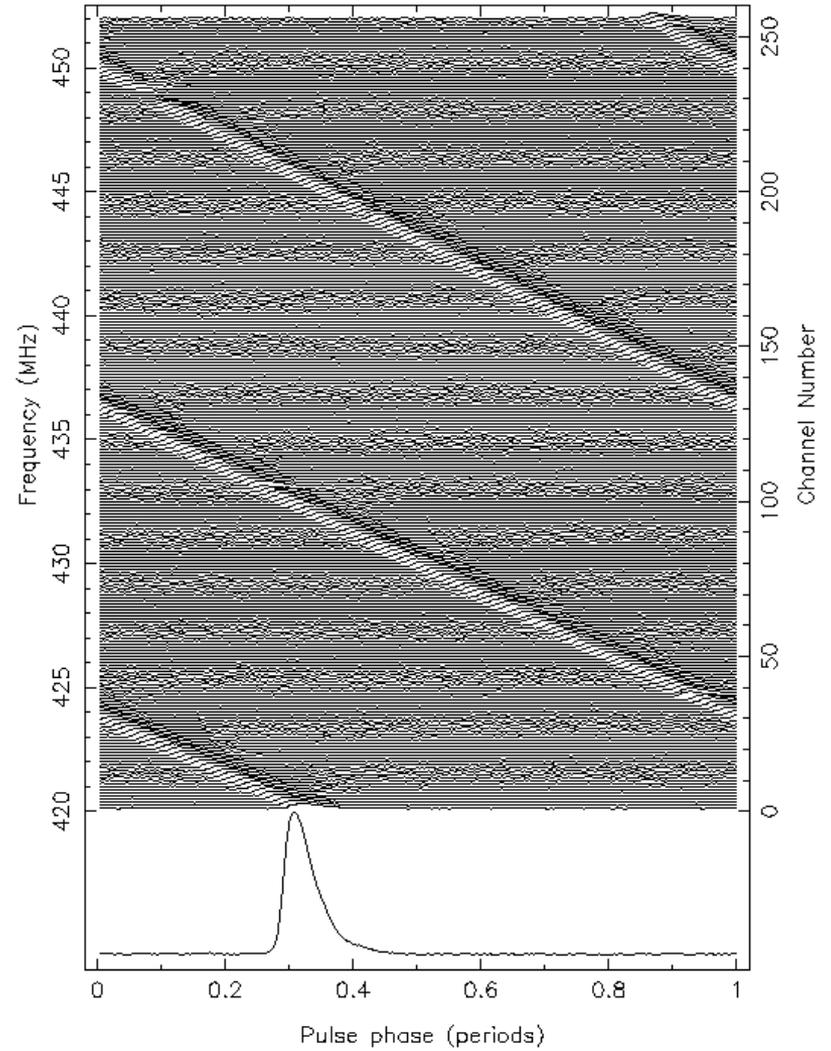
- Период P
- Производная периода dP/dt
- Средний профиль
- Мера дисперсии

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

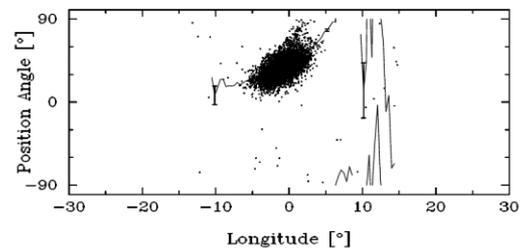
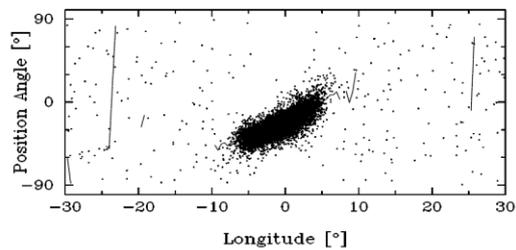
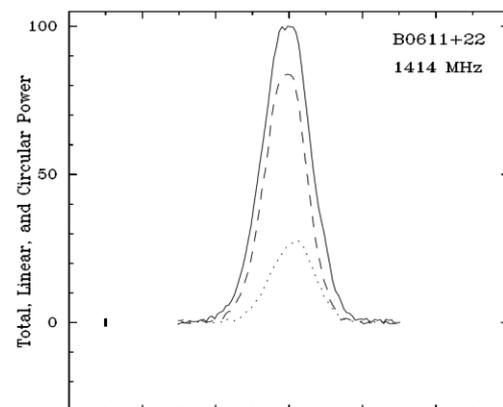
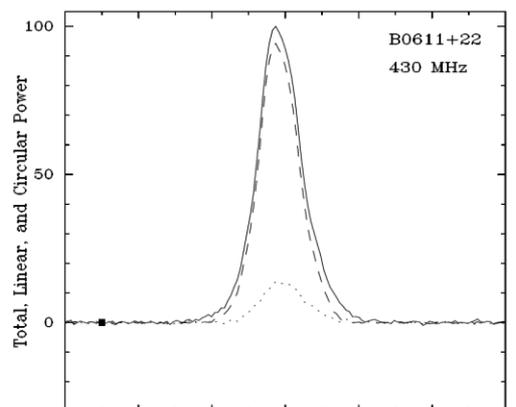
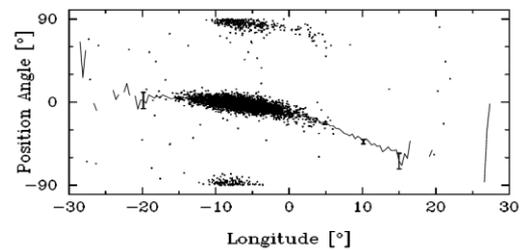
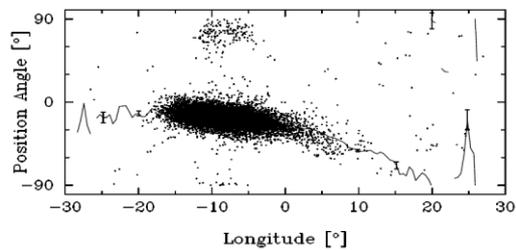
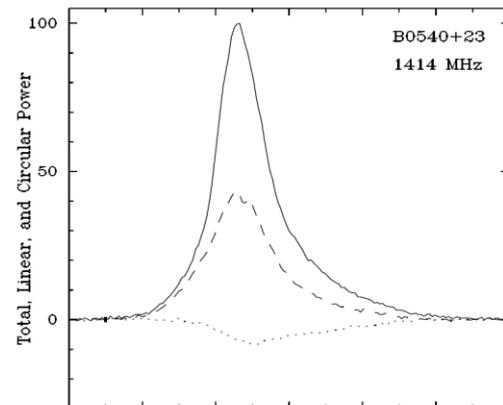
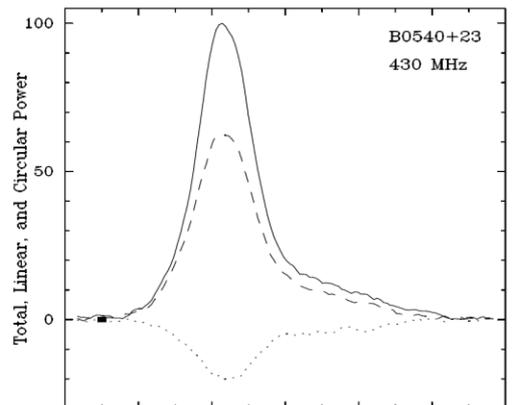
Средний профиль



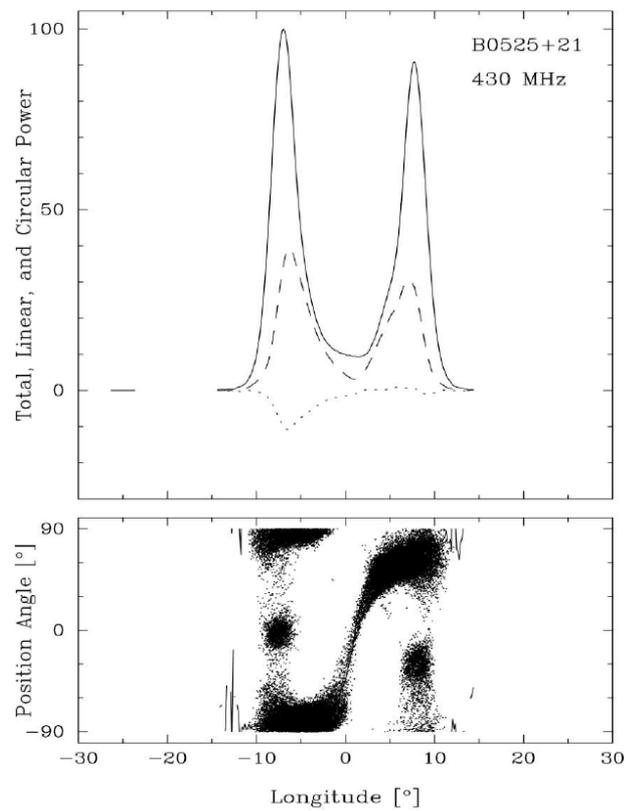
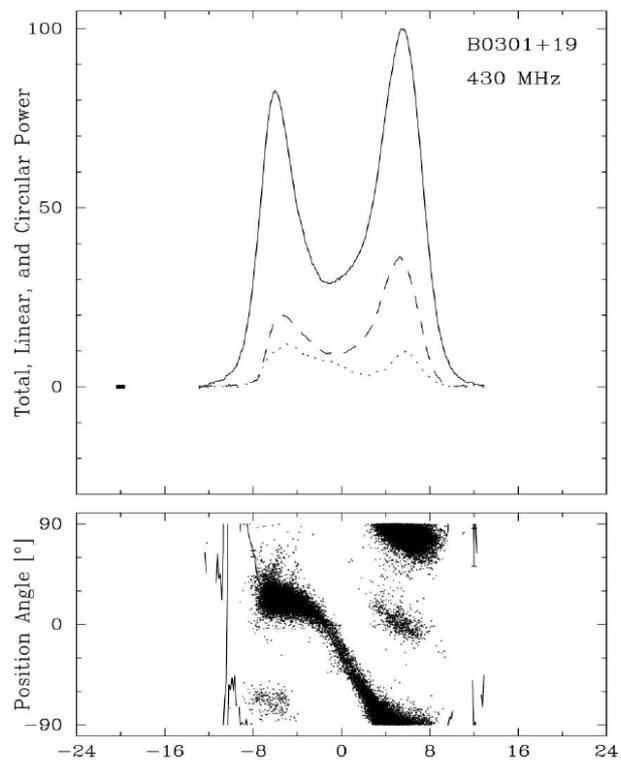
Мера дисперсии DM



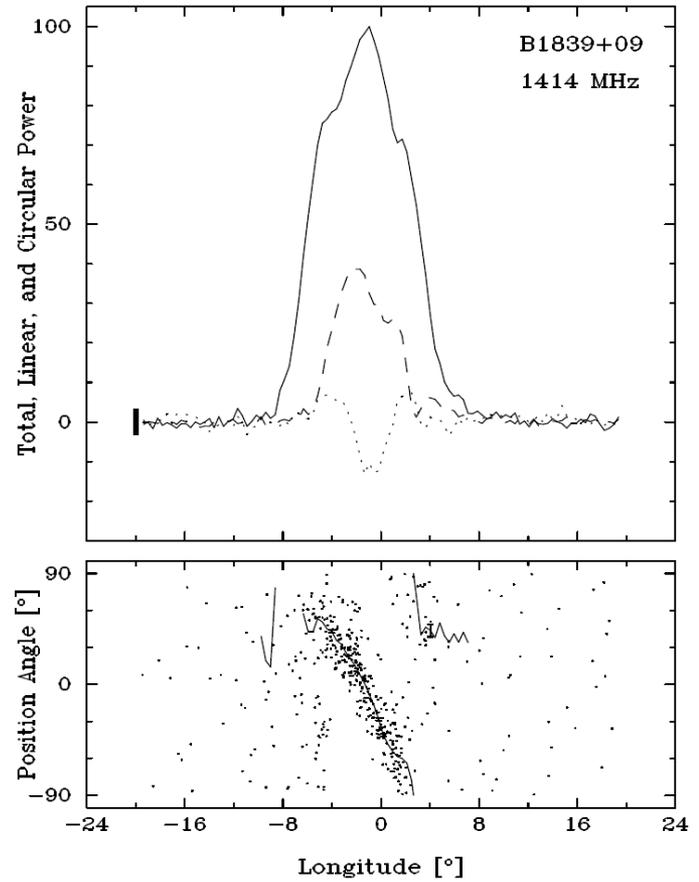
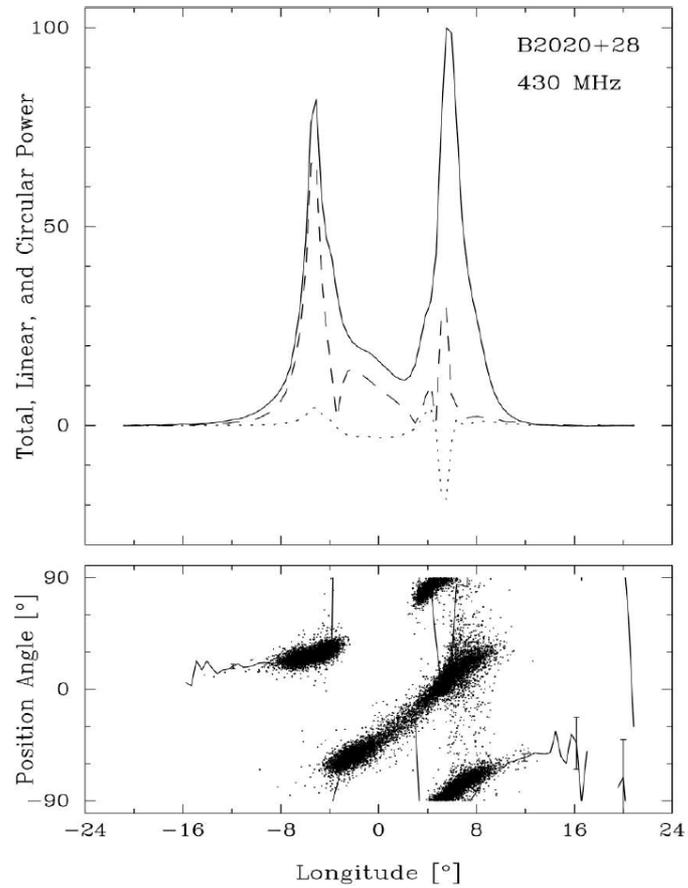
Одногорбые



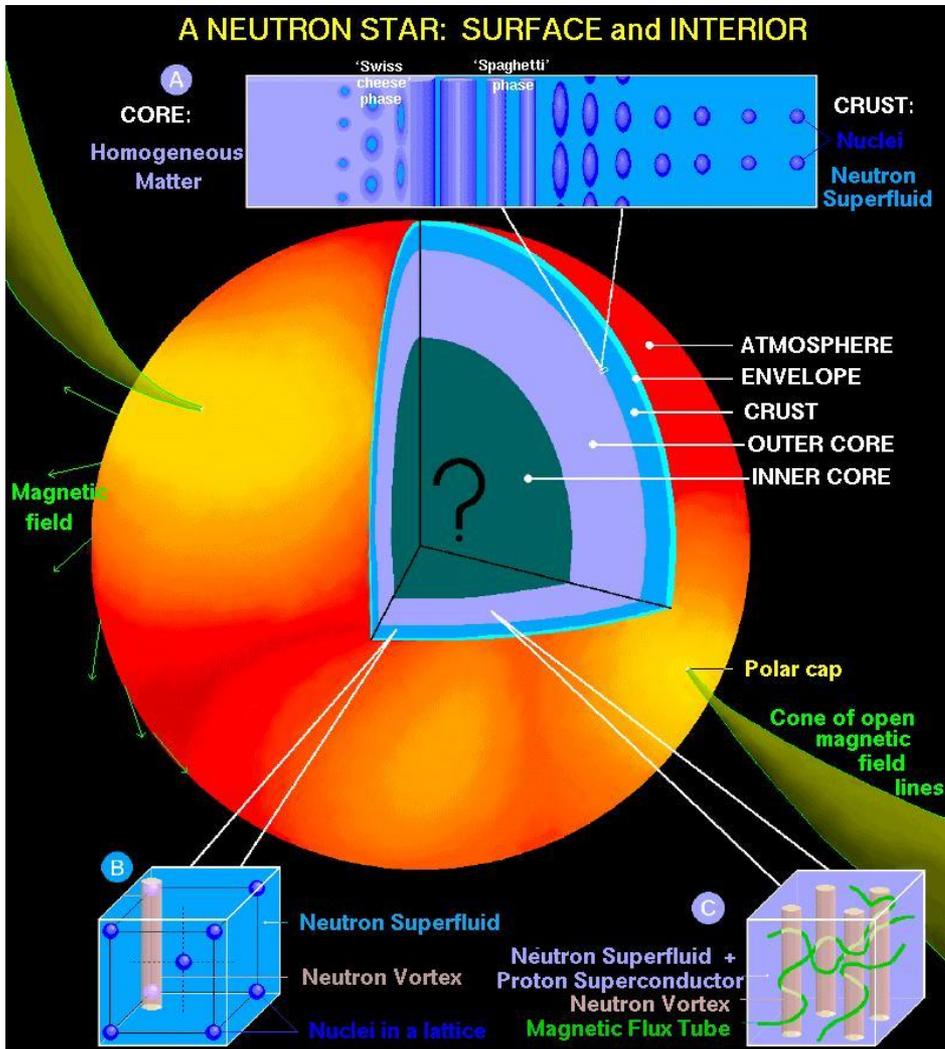
Двугорбые



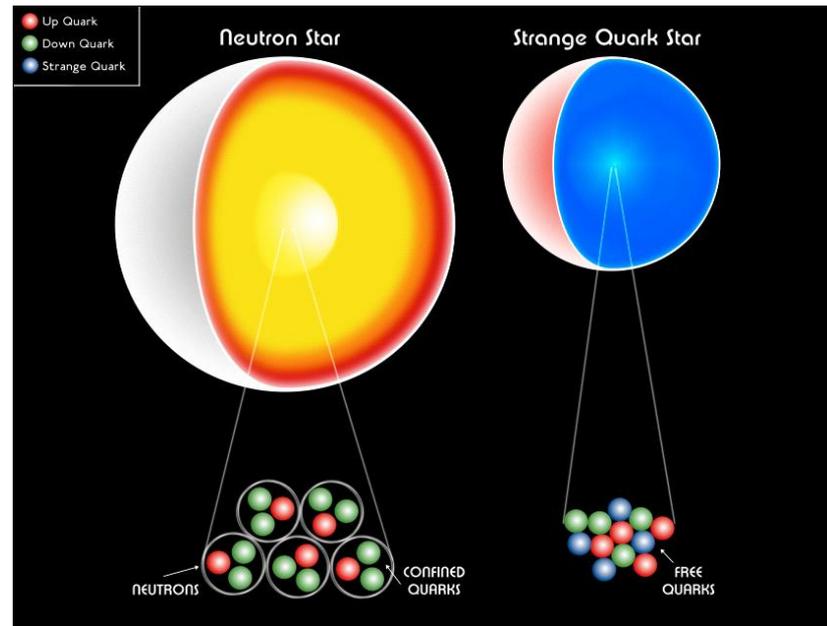
Сложные



Нейтронные звезды

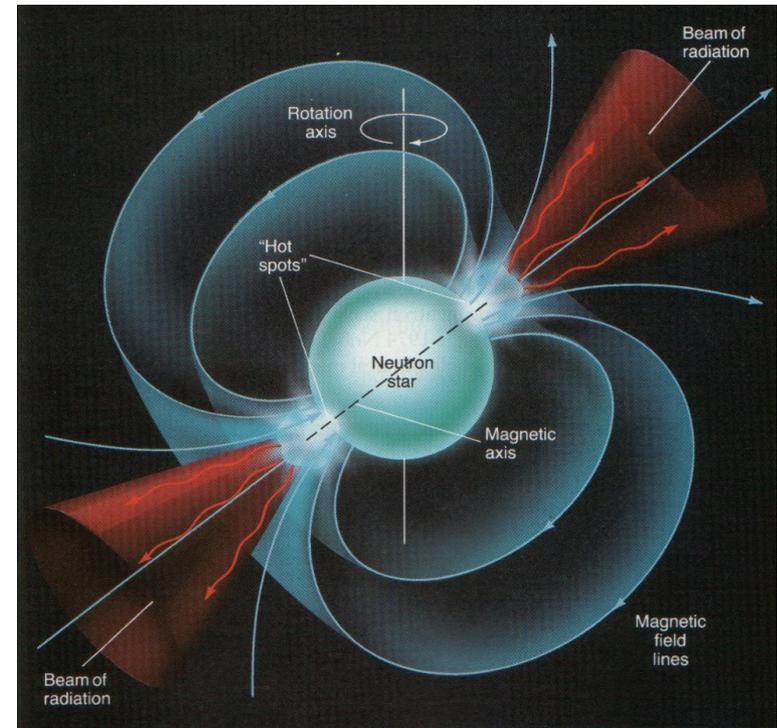
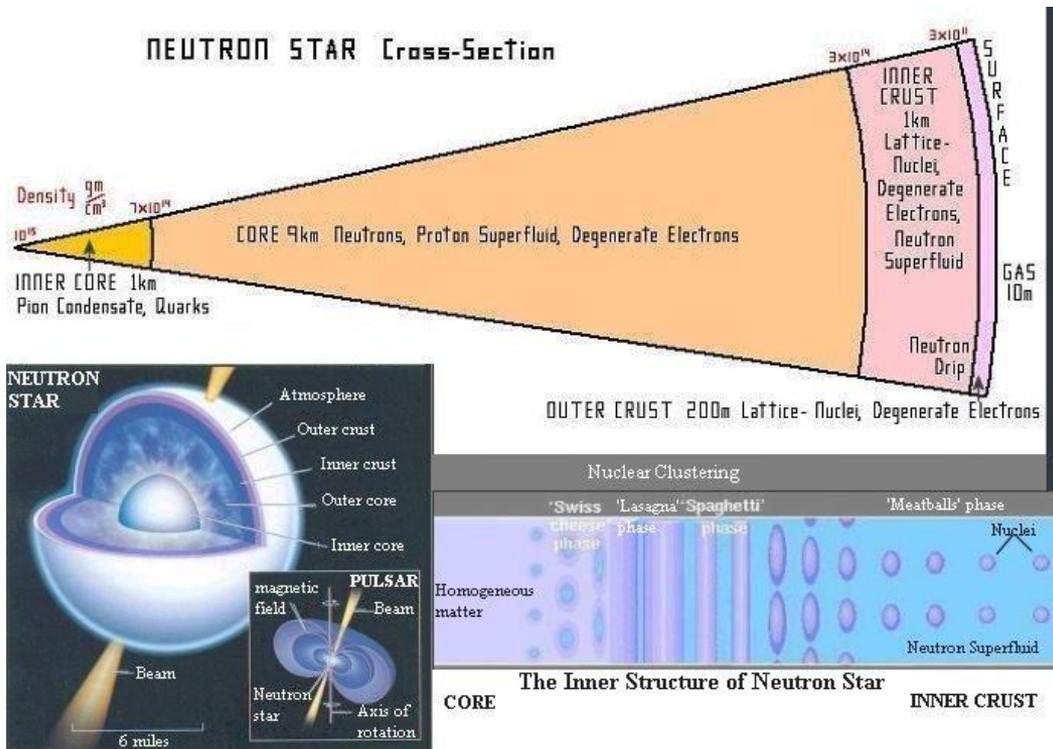


Радиус 10 км
 Масса 1-2 солнечной
 Плотность порядка ядерной
 Сильные магнитные поля

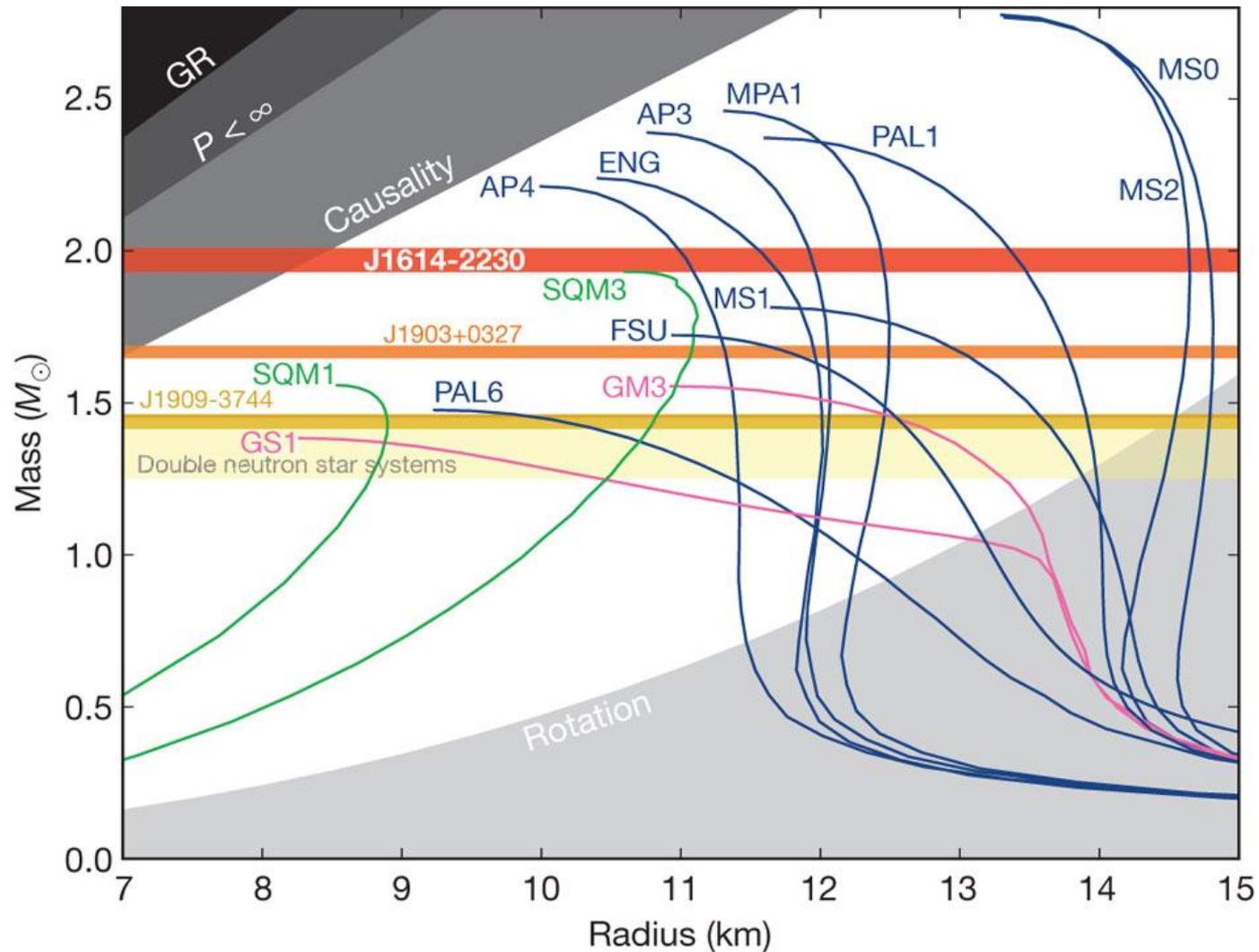


Нейтронные звезды - 2

Сверхплотное вещество и сверхсильные магнитные поля



Масса-радиус



Радиопульсары – вращающиеся одиночные* нейтронные звезды

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

* нет активного взаимодействия с компаньоном

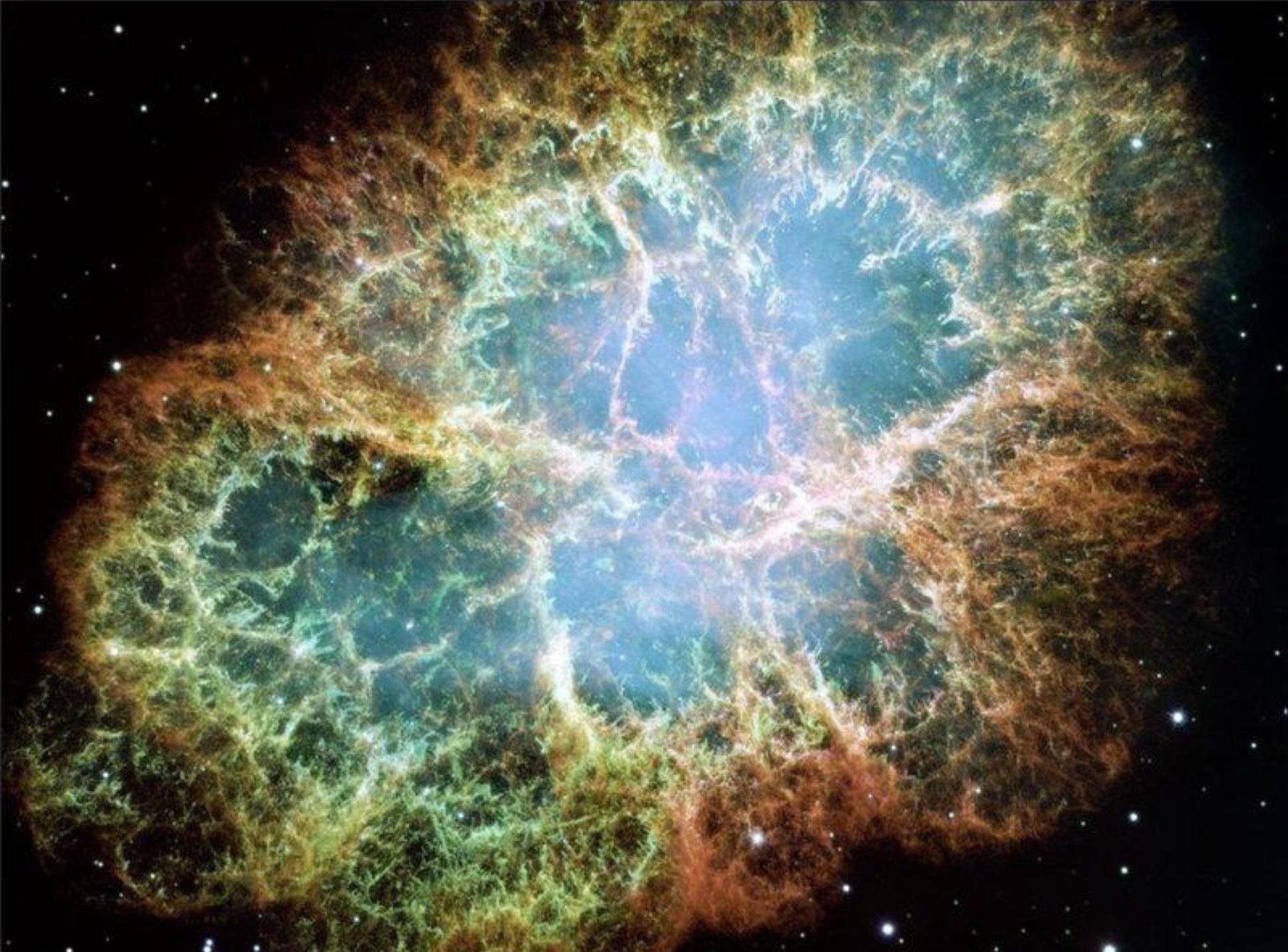
Ключевая электромагнитная идея

(Н.С.Кардашёв, 1964; Pacini, 1967)

Магнитодипольное излучение

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

$$W_{\text{tot}} \sim 10^{32} \text{ эрг/с}$$



Ключевая электромагнитная идея

Момент истины – пульсар в Крабовидной туманности

$$P = 0.033 \text{ с},$$

$$dP/dt = 4 \cdot 10^{-13}$$

Полные потери $W = -I \Omega d\Omega/dt \sim 5 \cdot 10^{38} \text{ эрг/с}$

Время жизни $\tau_D = P/(2 dP/dt) \sim 1000 \text{ лет}$

Оптические пульсации



Все ясно

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

Радиопульсары – вращающиеся одиночные* нейтронные звезды

Дано:

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

Найти:

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

2. Вакуум

I. Магнитодипольное излучение



Магнитный диполь

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

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

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)

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

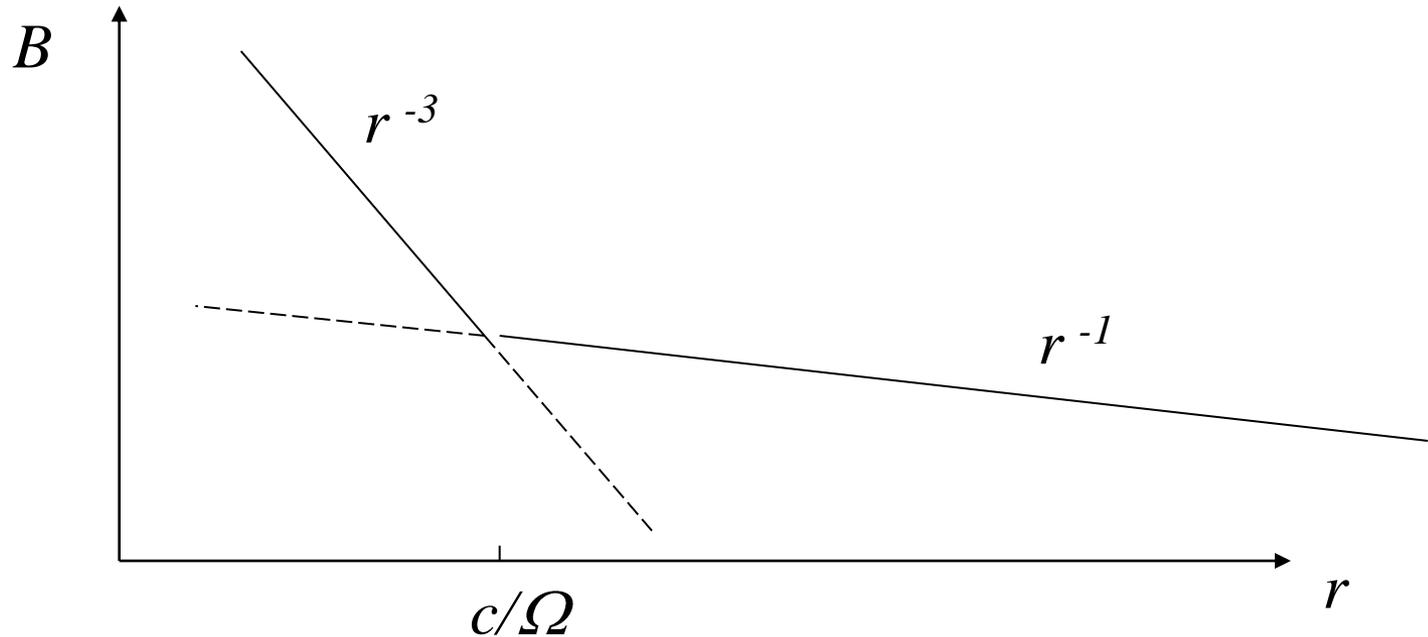
- Торможение током
- Эволюция угла
- Стабилизация угла?
- Аномальный момент?

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

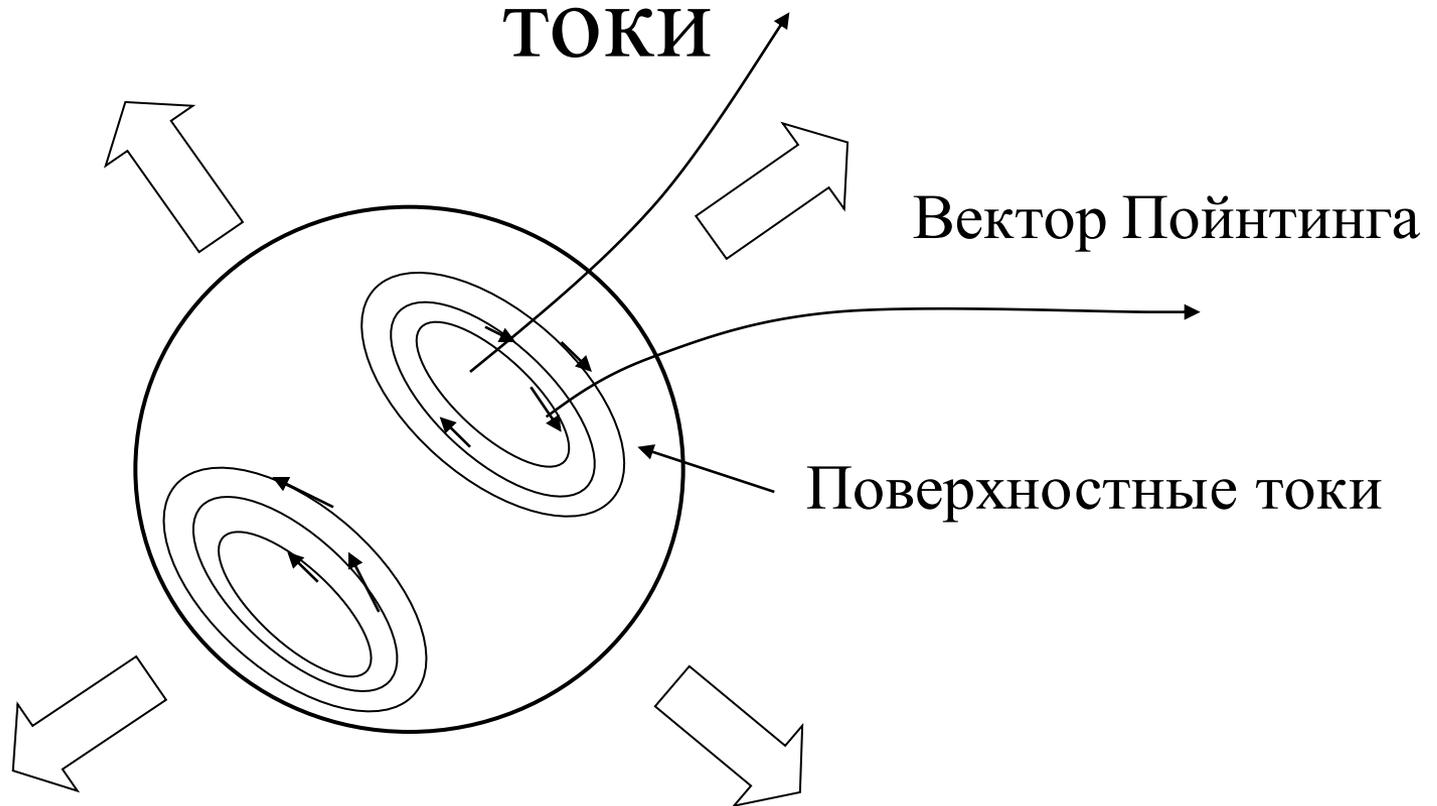
$$B_r = \frac{|\mathbf{m}|}{r^3} \sin \theta \operatorname{Re} \left(2 - 2i \frac{\Omega r}{c} \right) \exp \left(i \frac{\Omega r}{c} + i\varphi - i\Omega t \right),$$

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

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



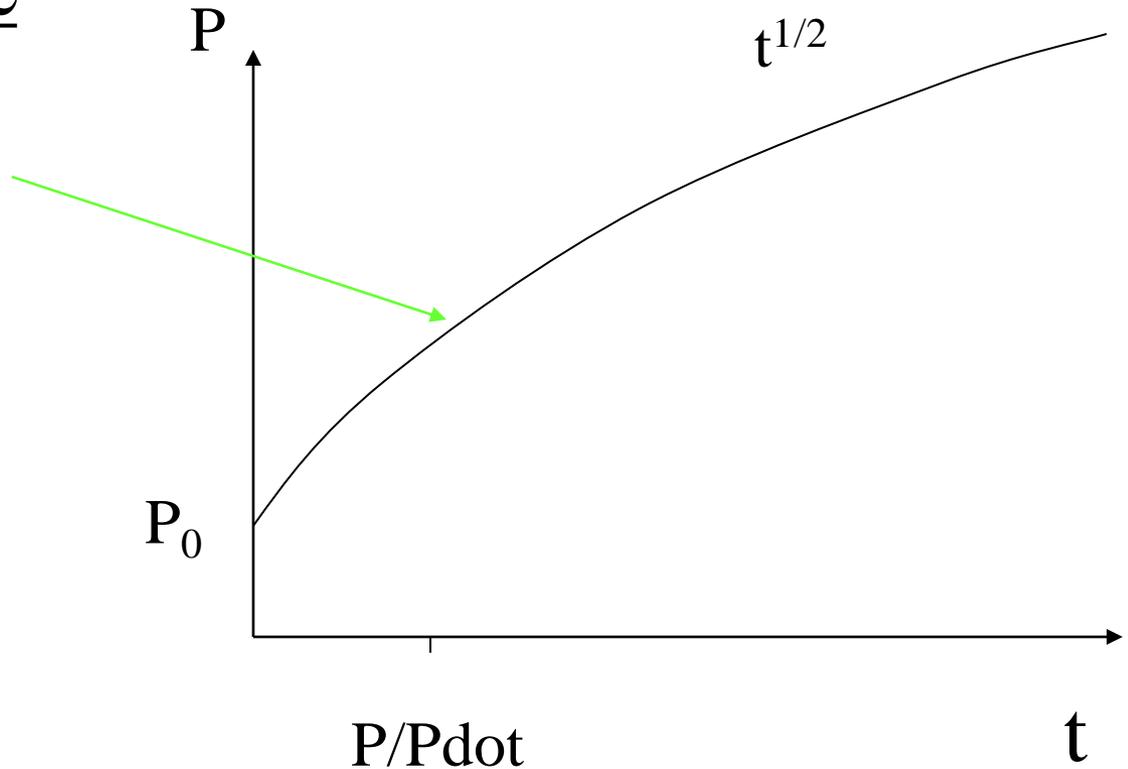
Энергия и угловой момент звезды передаются через поверхностные



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

Магнитодипольные

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

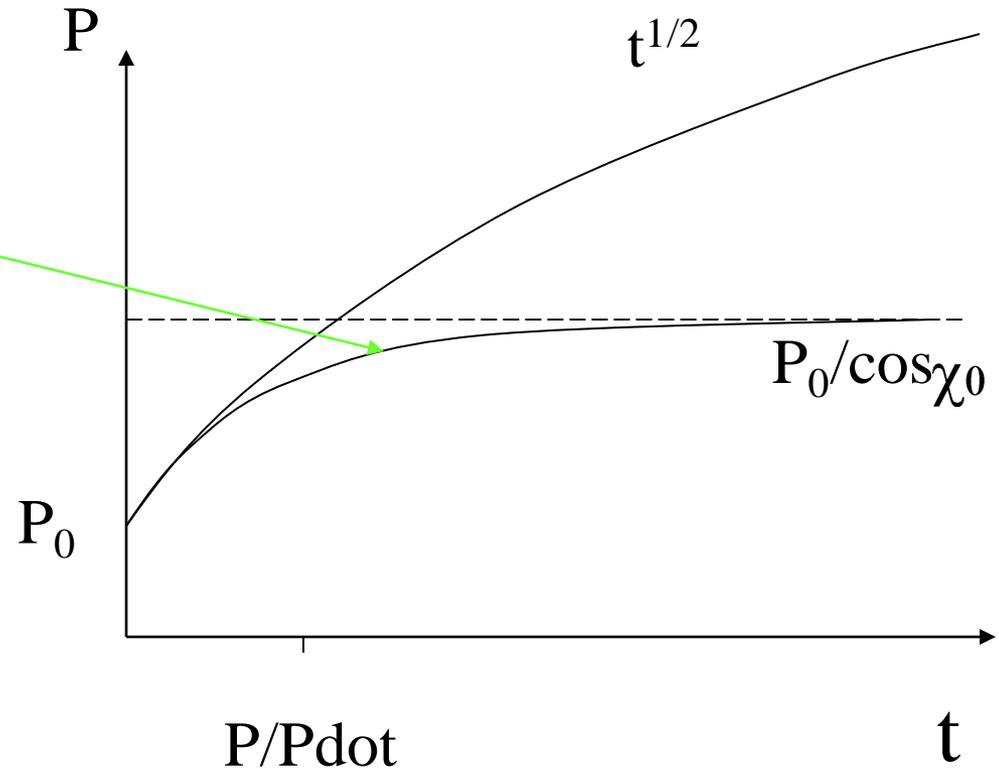


Энергетические потери при $\chi < \pi/2$

Магнитодипольные

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

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



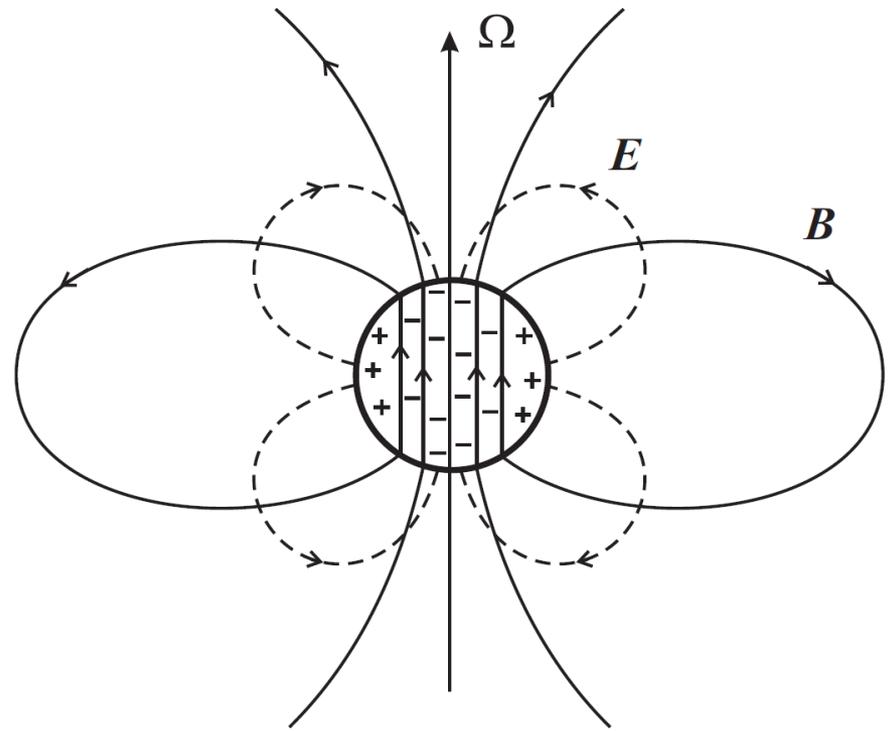
2. Вакуум

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

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

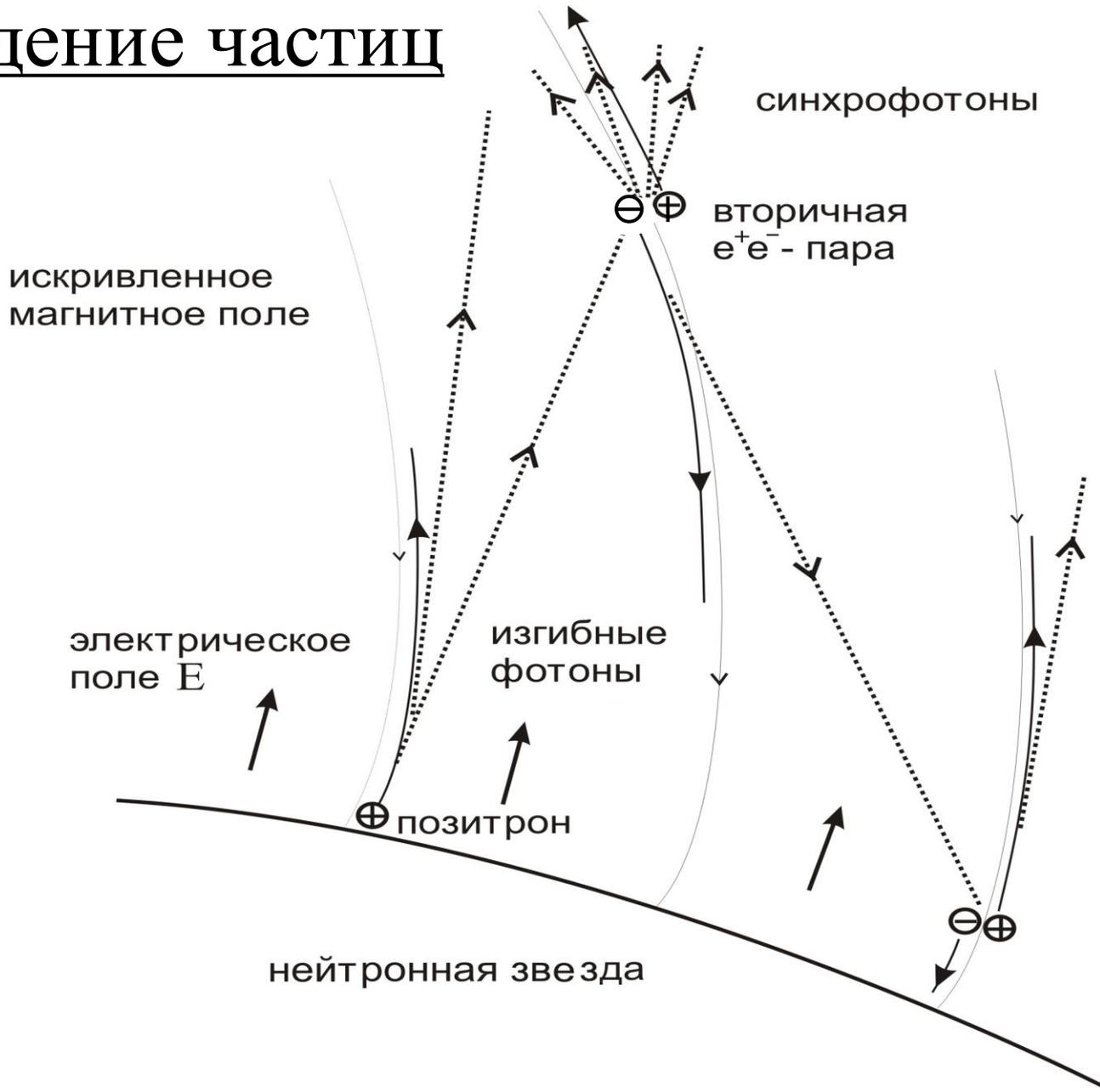
- Изгибное (curvature) излучение

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

- $B \sim 10^{12} \text{ Гс} \sim B_{\text{cr}} = m_e^2 c^3 / e \hbar = 4.4 \cdot 10^{13} \text{ Гс}$

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

Рождение частиц



Сильное магнитное поле

- Магнетары
- Двухлучепреломление вакуума

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

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

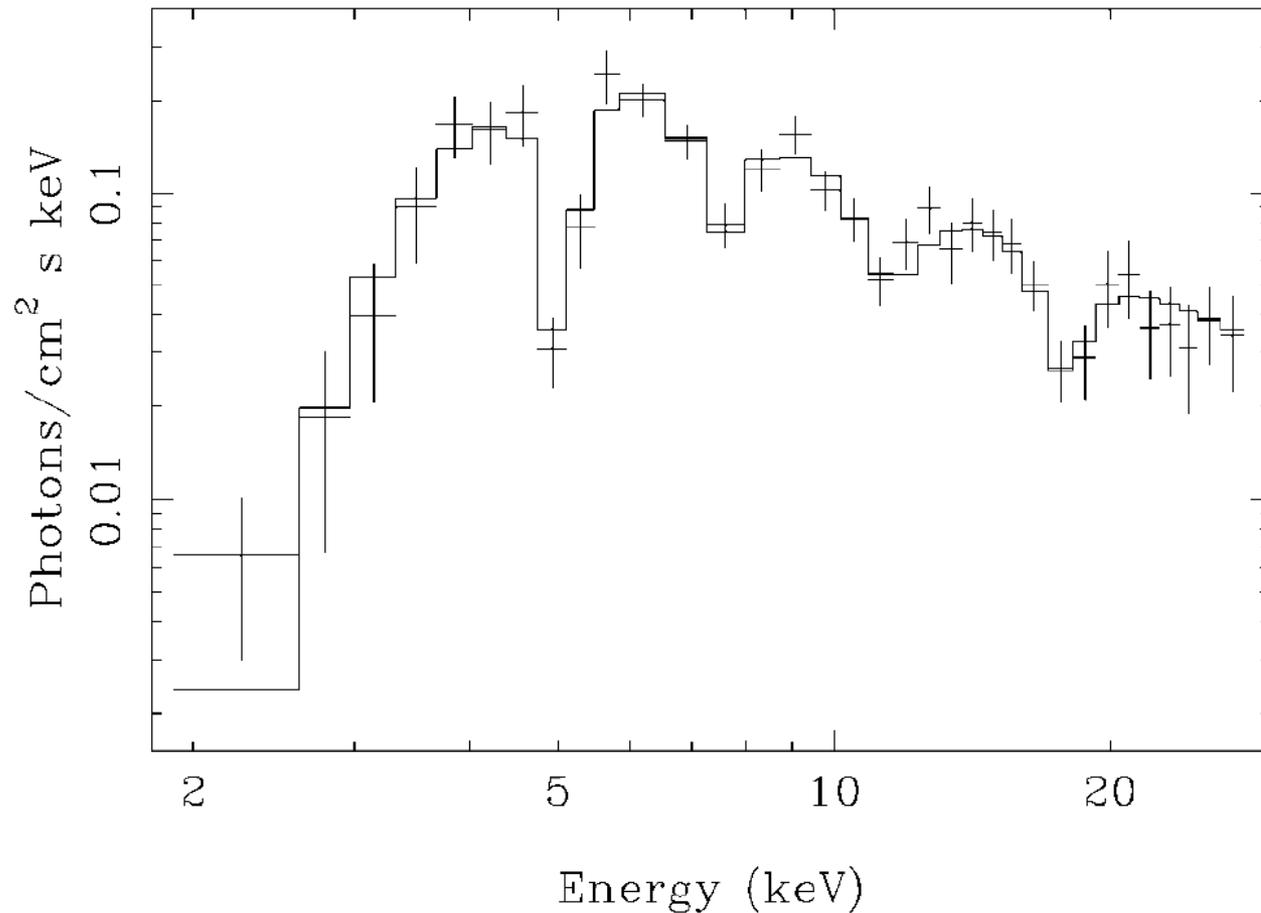
Сильное магнитное поле

Магнетары – $B \sim 10^{15}$ G?

- Магнитодипольная оценка магнитного поля.
- Протонная циклотронная линия?

SGR 1806-20 (Ibrahim et al. 2002)

Протонная циклотронная линия?

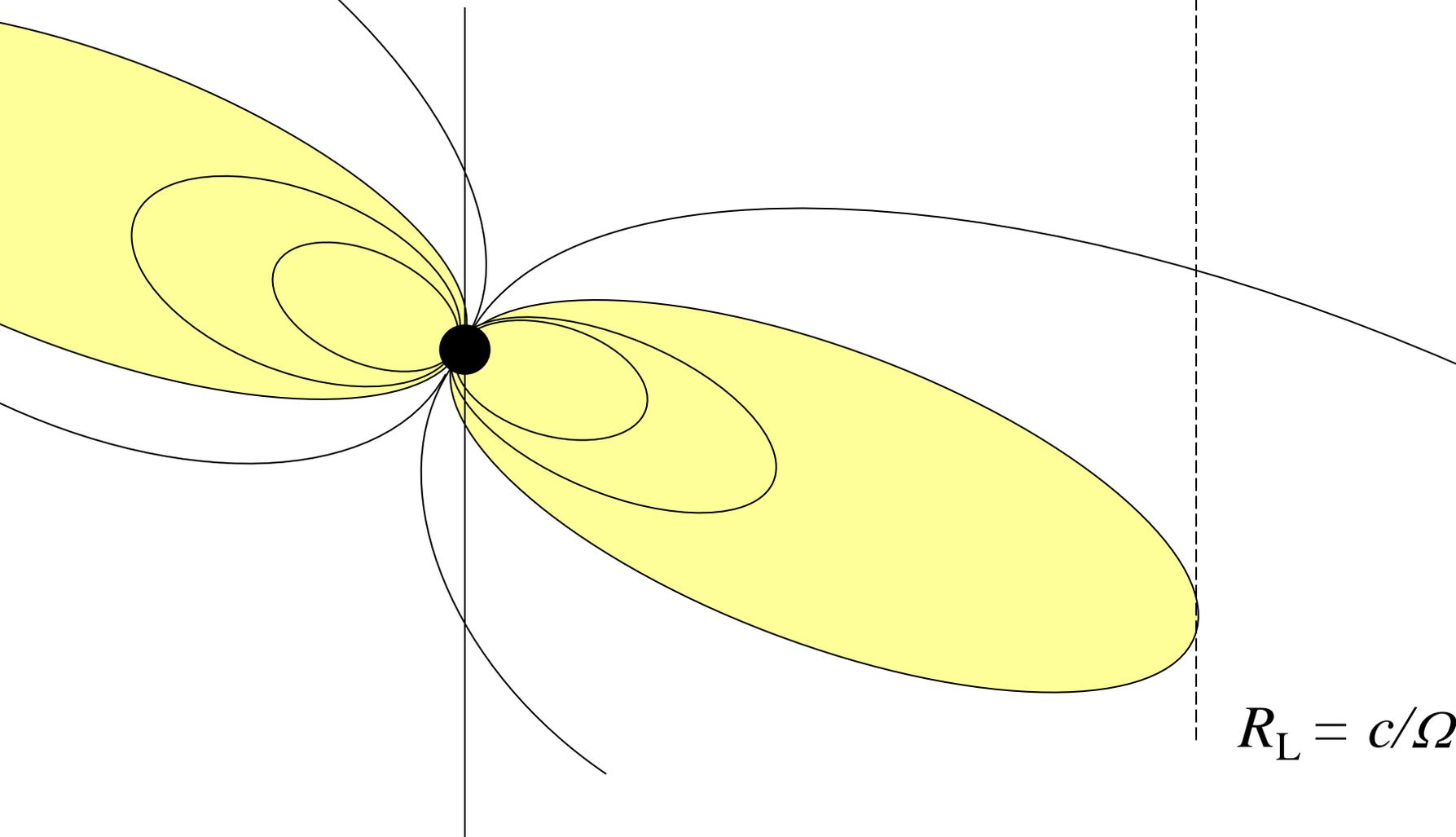


3. Рождение частиц



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

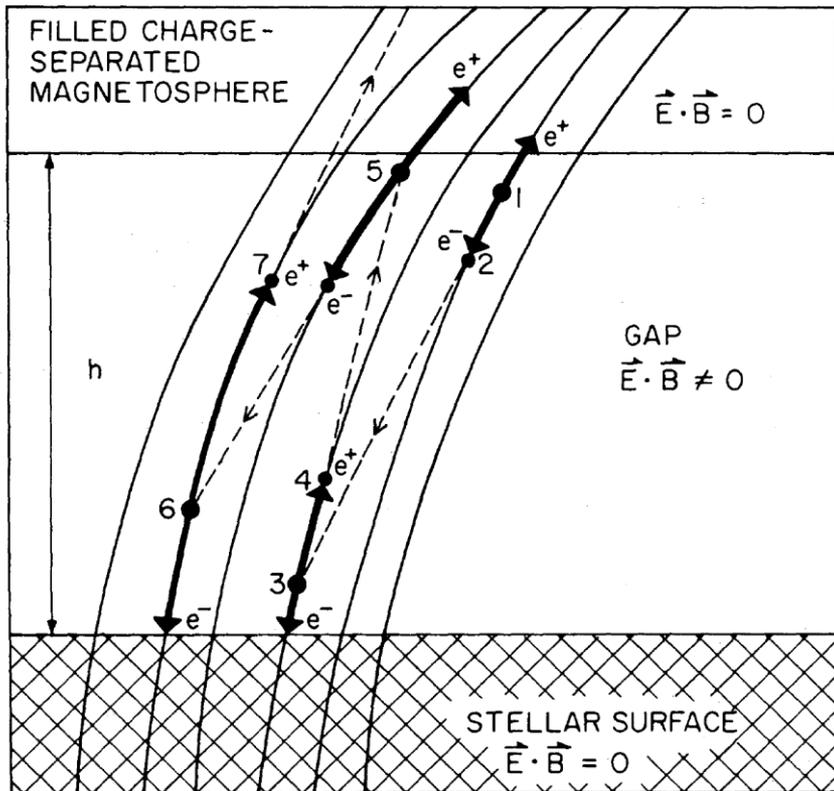
Коротация, световой цилиндр, полярная шапка



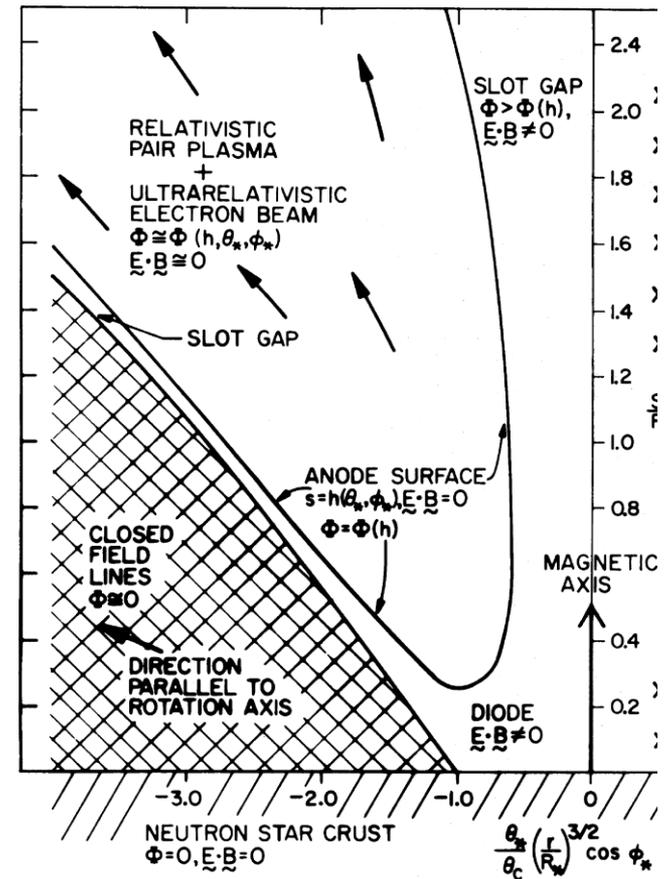
Основные параметры

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

Внутренний зазор



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



Arons et al (1977-1981)
Mestel et al

Две модели

$$\frac{dE_{\parallel}}{dh} = 4\pi(\rho_e - \rho_{GJ})$$

RS

Arons

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

$$\frac{dE_{\parallel}}{dh} = A_a \left(h - \frac{H}{2} \right)$$

$$E_{RS} = 4\pi\rho_{GJ}H \quad A_a = \frac{3}{2} \frac{\Omega B_0}{cR} \left[4 \frac{\omega}{\Omega} \cos \chi + \theta_m \cos \varphi_m \sin \chi \right]$$

$$H_{RS} \sim \lambda_C^{2/7} R_c^{2/7} R_L^{3/7} \left(\frac{B}{B_{\bar{h}}} \right)^{-4/7}$$

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{2}{5} \varepsilon_g \quad \varepsilon_A = \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{1/2}$$
$$\varepsilon_g = \frac{2|\varphi_g|}{c^2} \approx \frac{2\ddot{GM}}{Rc^2} \sim 0.2$$

Вывод высоты зазора RS

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

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

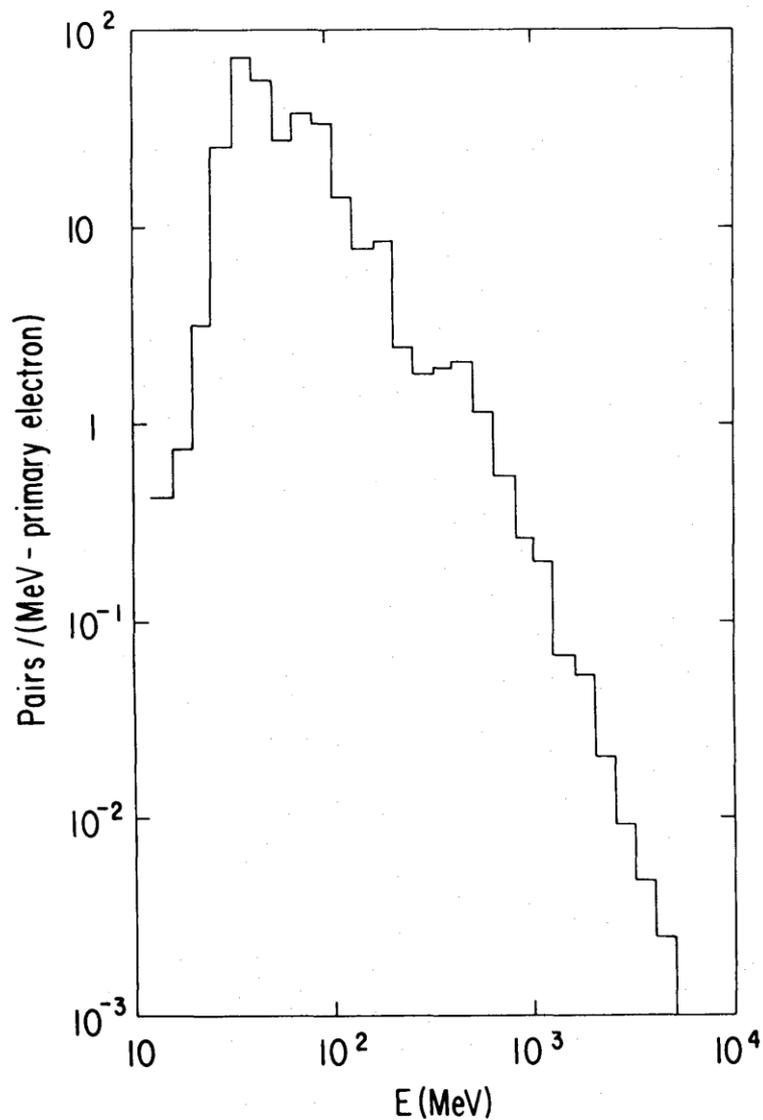
$$\omega_{\text{cur}} = 0.44 \frac{c}{R_c} \gamma^3$$

$$\gamma = \frac{eE_{\text{RS}}H}{m_e c^2}$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ph}} = \hbar\omega_{\text{cur}}$$

$$H_{\text{RS}} \sim \lambda_{\text{C}}^{2/7} R_c^{2/7} R_L^{3/7} \left(\frac{B}{B_{\bar{h}}} \right)^{-4/7}$$

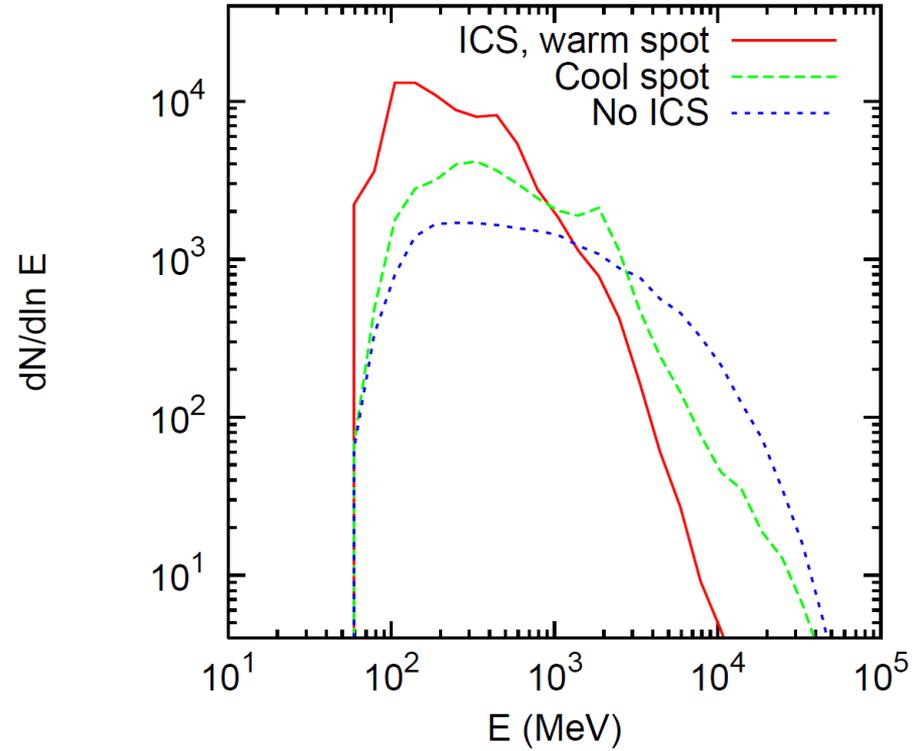
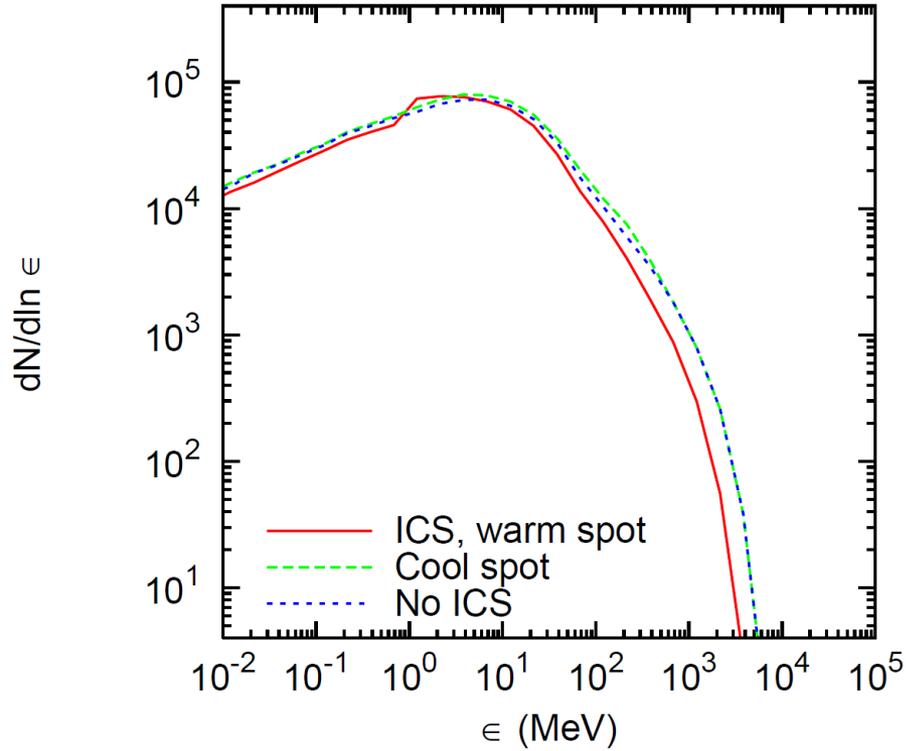


J. K. Daugherty, A. K. Harding.
ApJ, **252**, 337 (1982)

Длина пробега

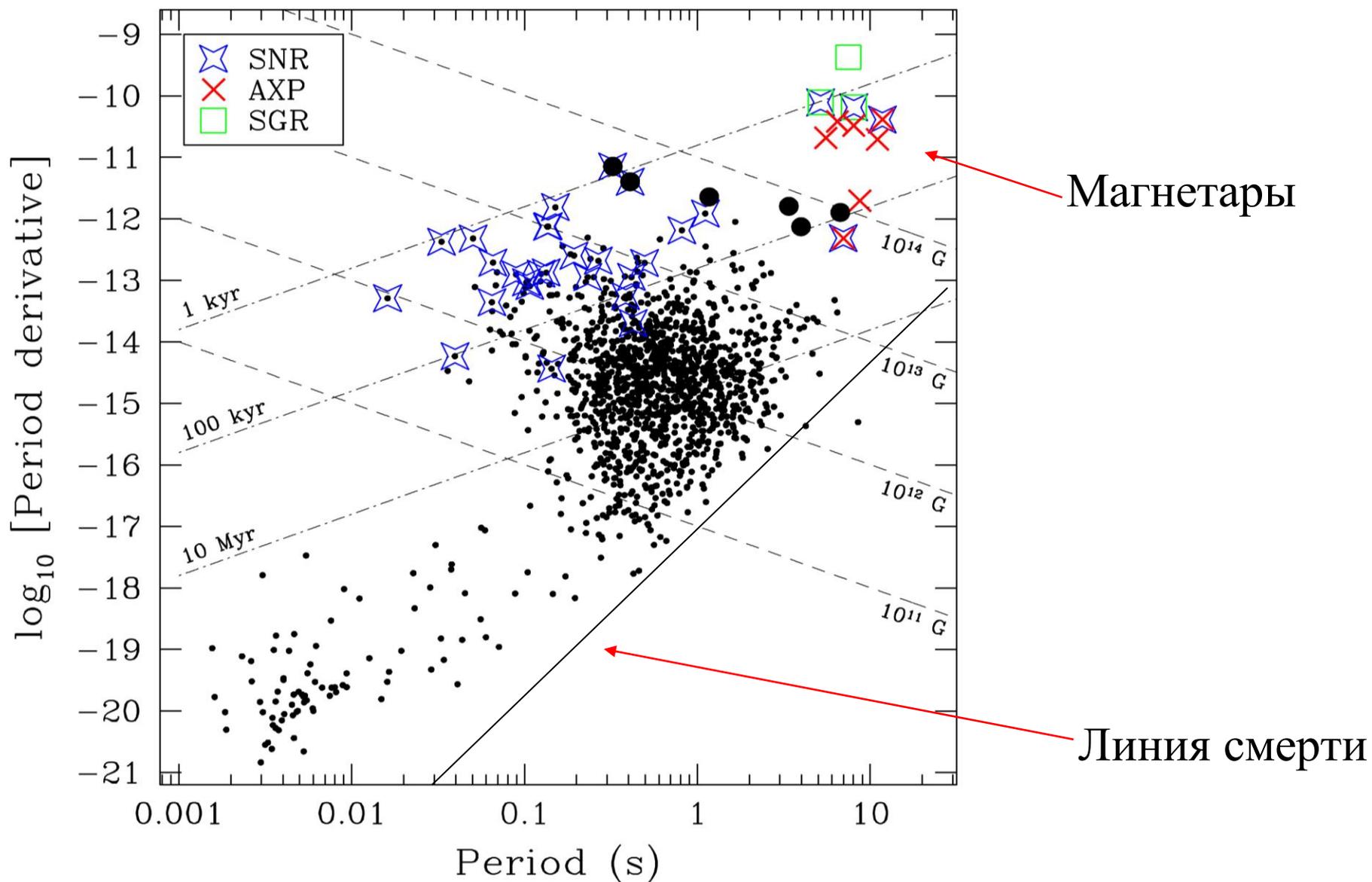
$$l_{\gamma} = \frac{8}{3\Lambda} R_c \frac{B_{\bar{h}}}{B} \frac{m_e c^2}{\mathcal{E}_{ph}}$$

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



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

PPdot – диаграмма



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



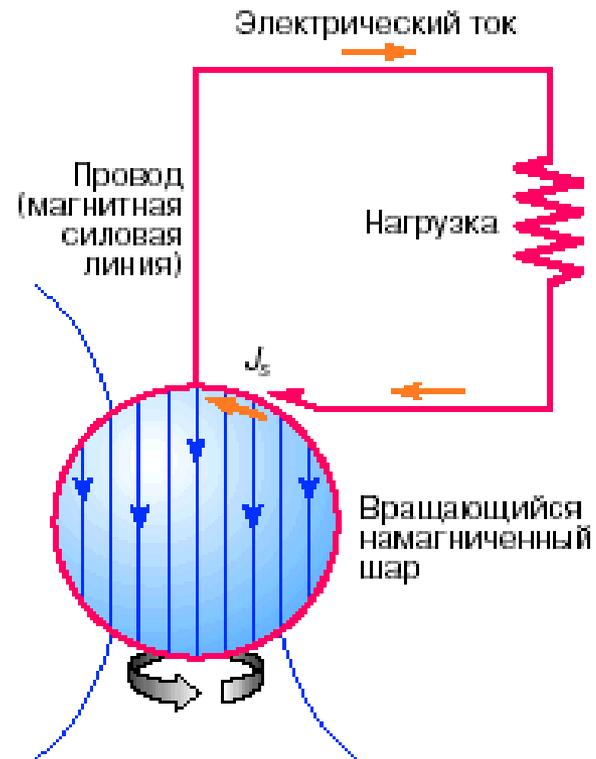
Униполярный индуктор

Вращающийся намагниченный шар может служить батареей постоянного электрического тока



Униполярный индуктор

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



Униполярный индуктор (теория)

- Условие вмороженности

$$E + V \times B/c = 0 \quad (E' = j / \sigma = 0)$$

- ЭДС (не связана с эффектом Фарадея)

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

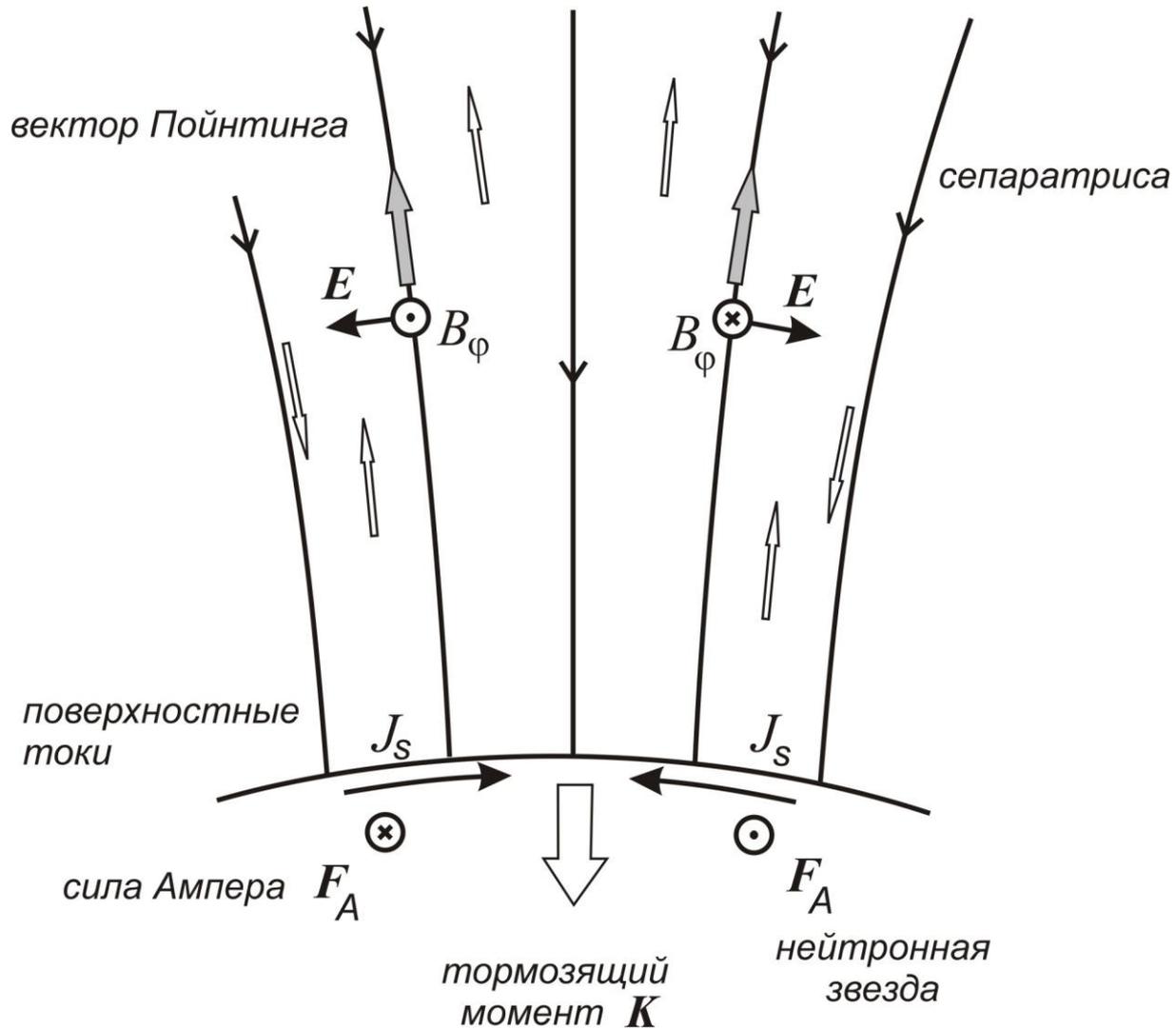
- Ненулевая плотность заряда

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

для вращения $V = \Omega r$

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

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 $W = UI$

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

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

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

Торможение радиопульсаров

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

Для величин, характерных для радиопульсаров

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

полное энергосвыделение $W \sim 10^{31} - 10^{33} \text{ эрг/с}$

близко к наблюдаемому $J_r \Omega \text{ d}\Omega/\text{d}t$

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

Магнитодипольные

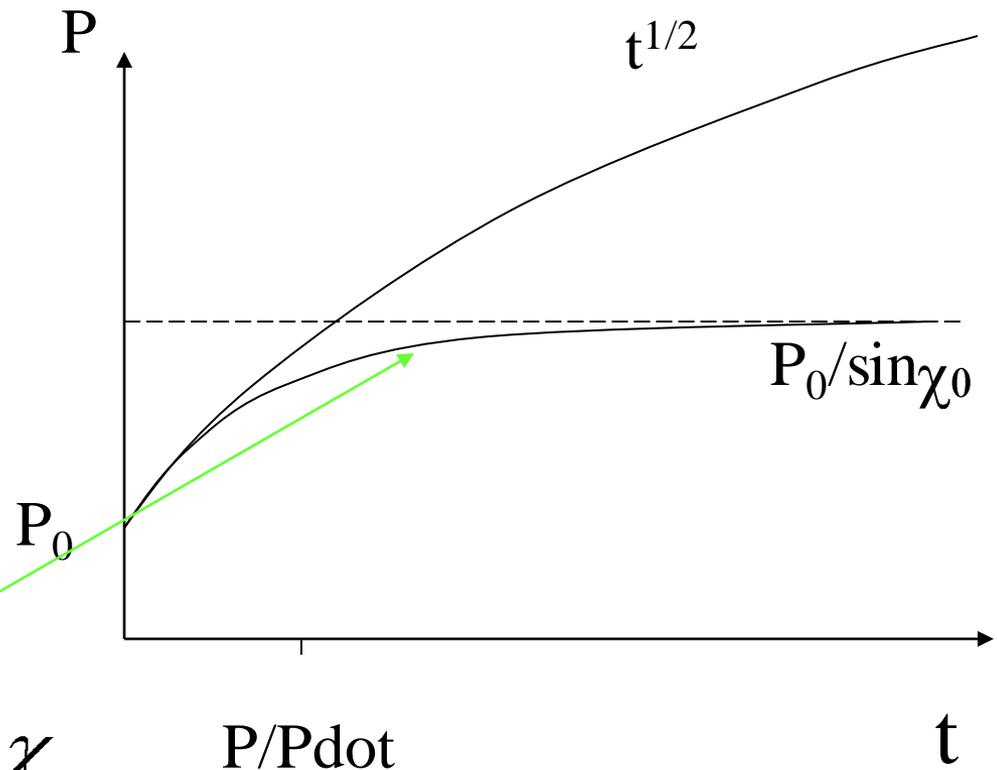
$$W_{\text{tot}} = \frac{1}{6} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2 \chi$$

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

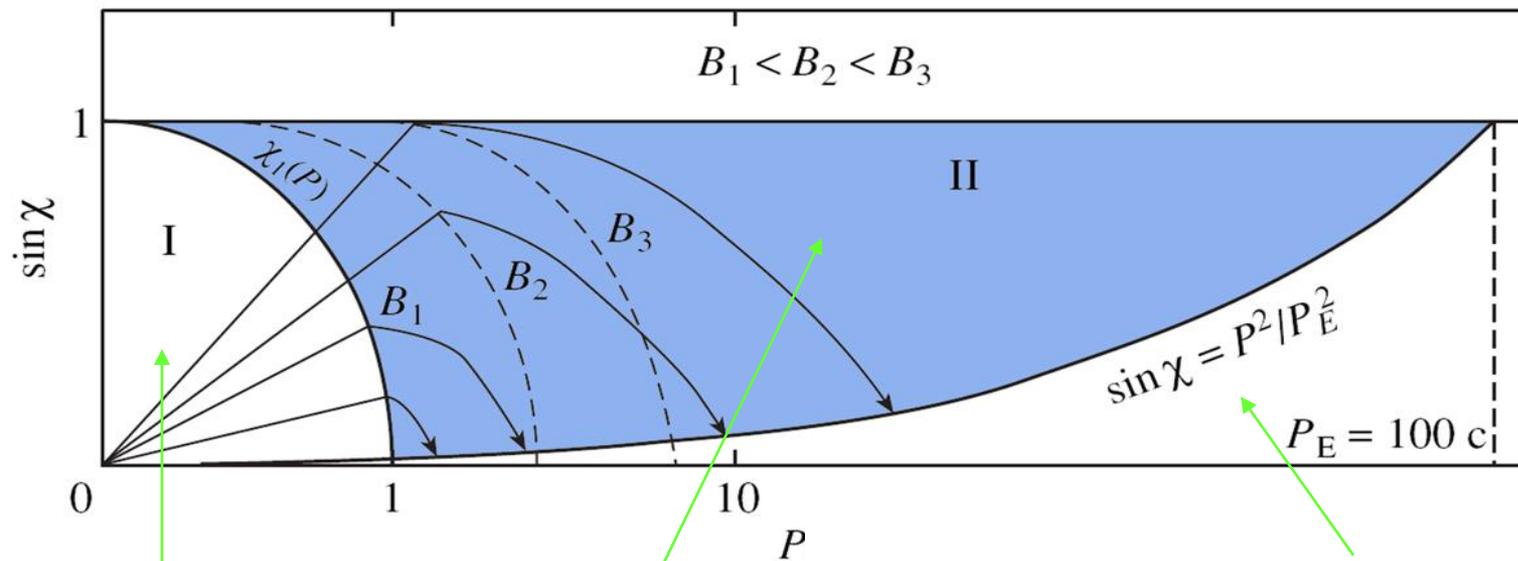
Токовые

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

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



Потухшие радиопульсары



радиопульсары

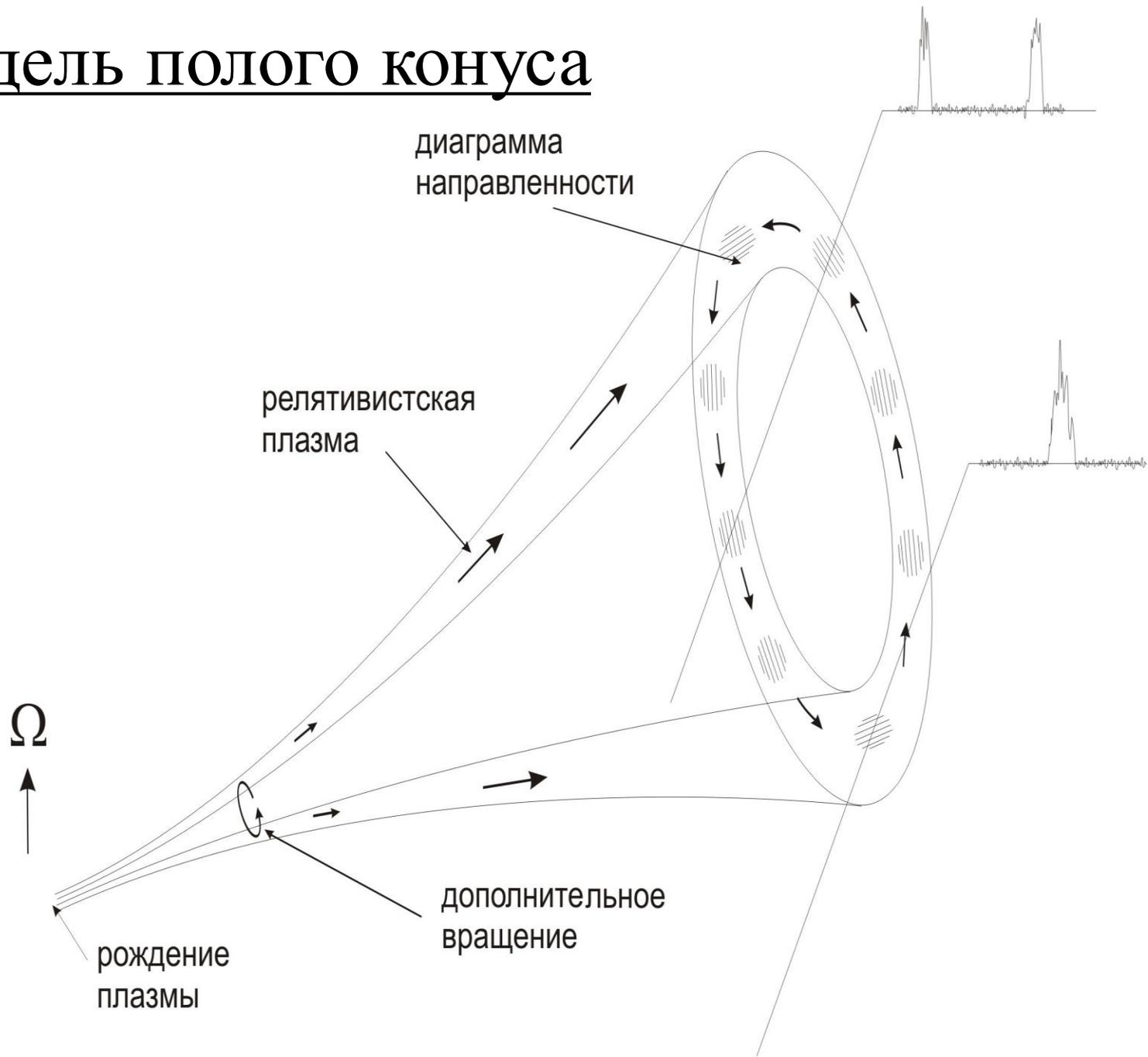
потухшие радиопульсары

пропеллеры

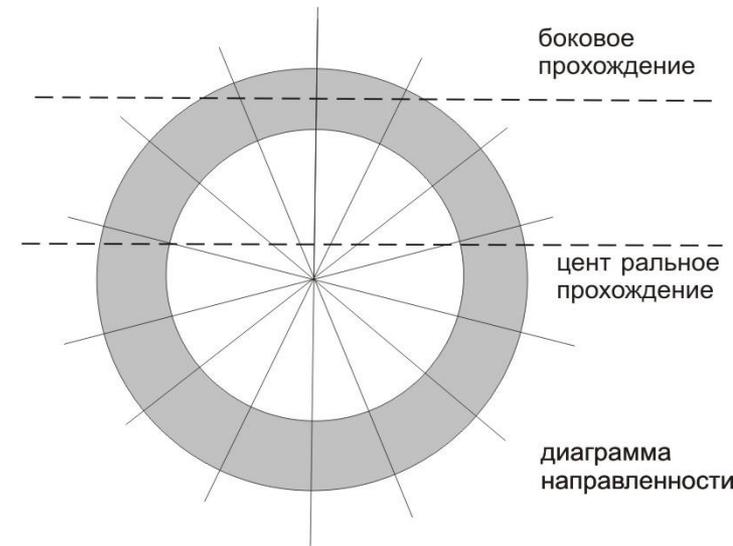
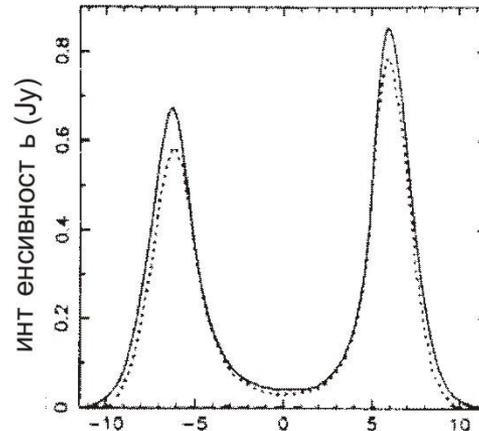
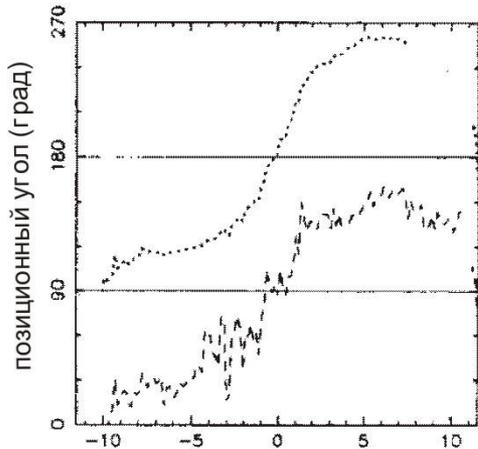
5. Модель “полого конуса”



Модель полого конуса



Корреляции, ортогональные моды



Боковое прохождение

– одnogорбые, малое изменение позиционного угла.

Центральное прохождение

– двугорбые, изменение позиционного угла близко к 180° .

Предсказания

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

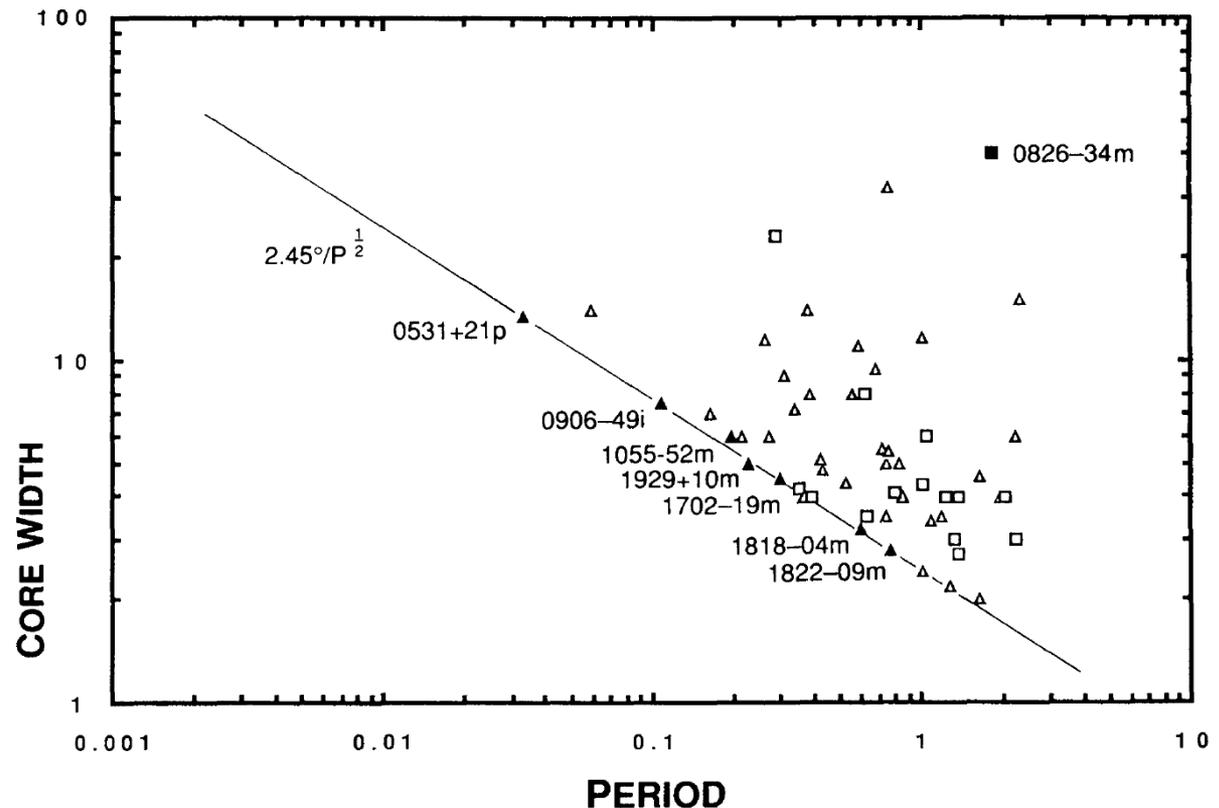
Если $r_0 \sim \text{const}$,

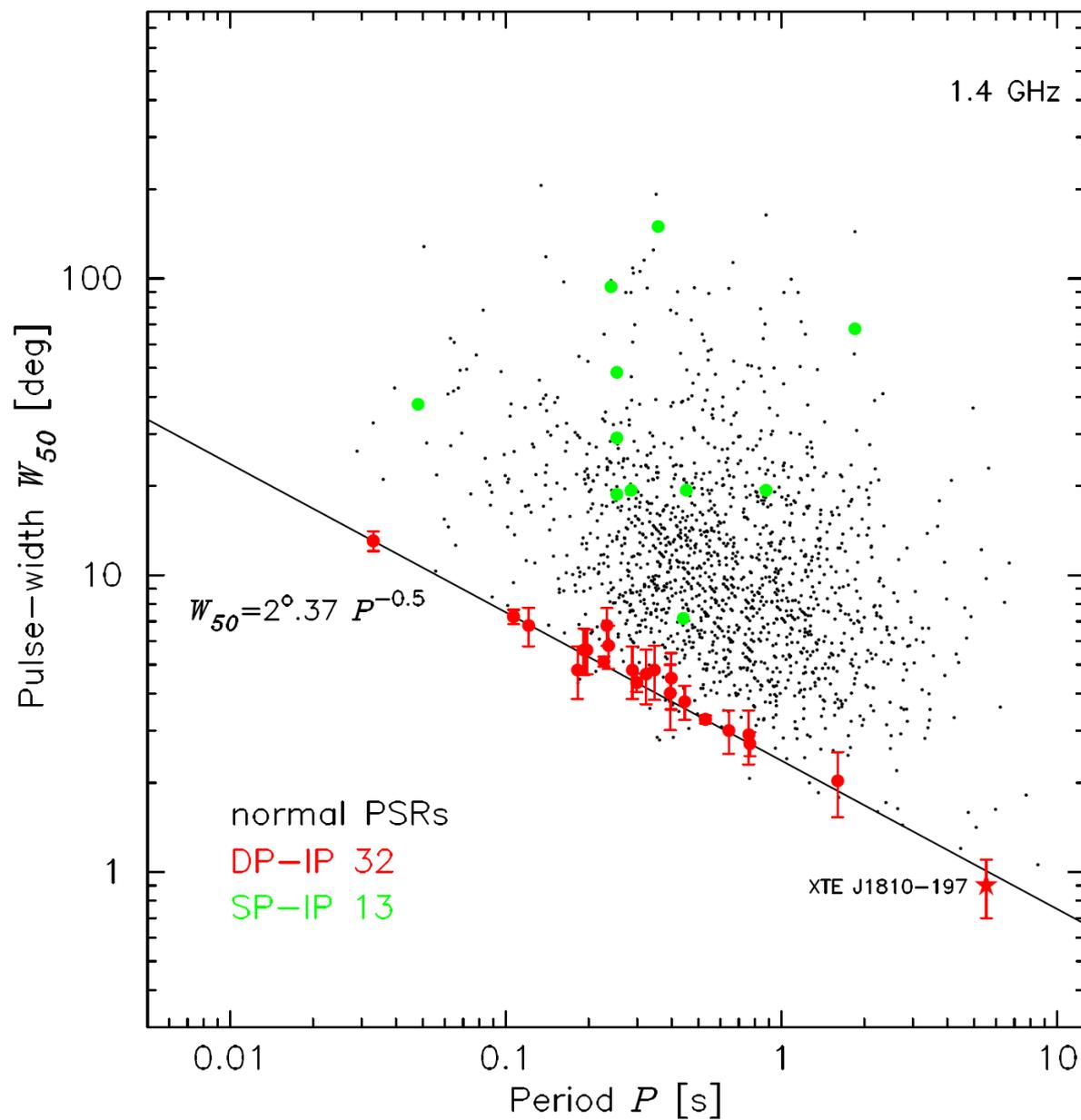
то

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

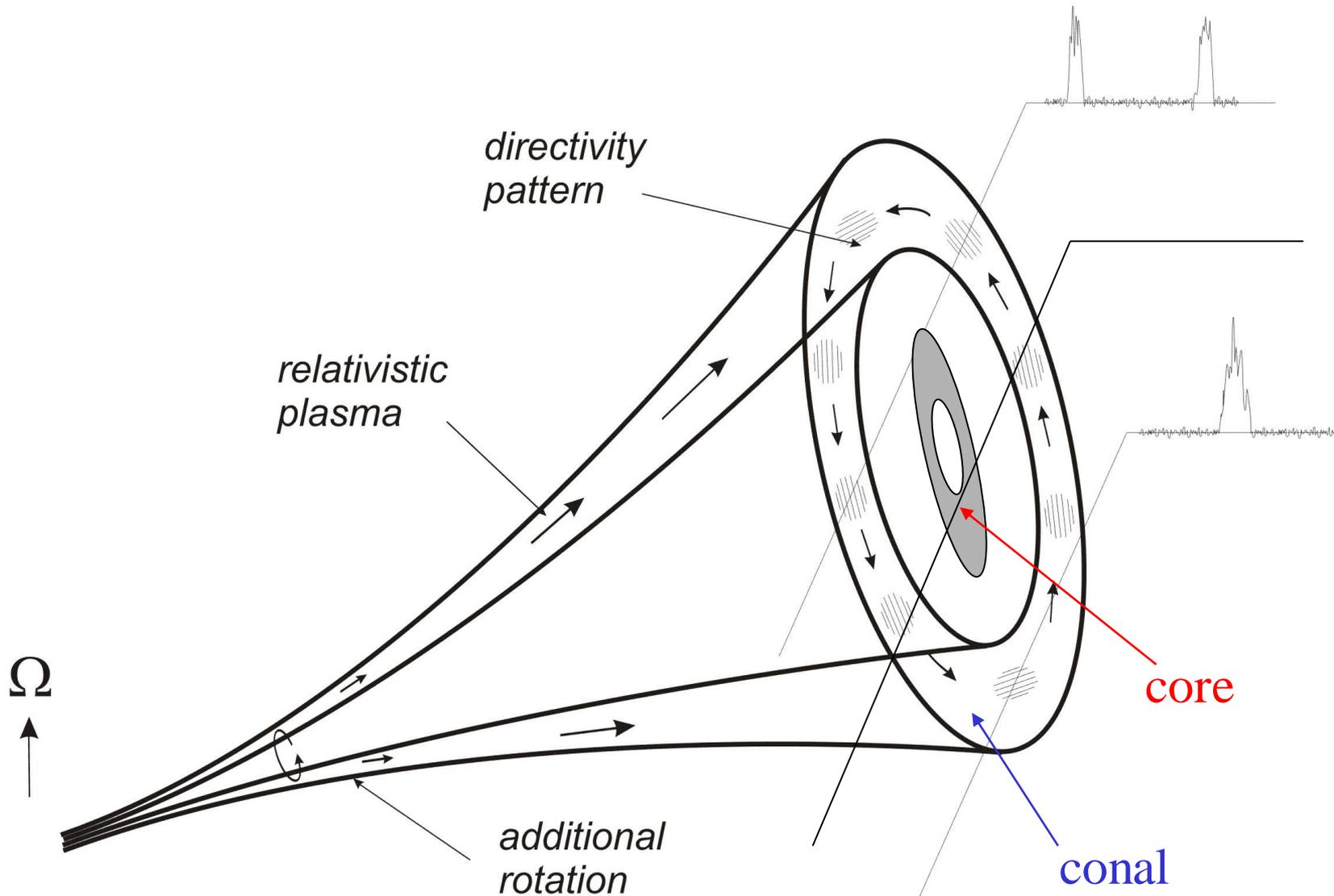
$$W = W / \sin \chi$$

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





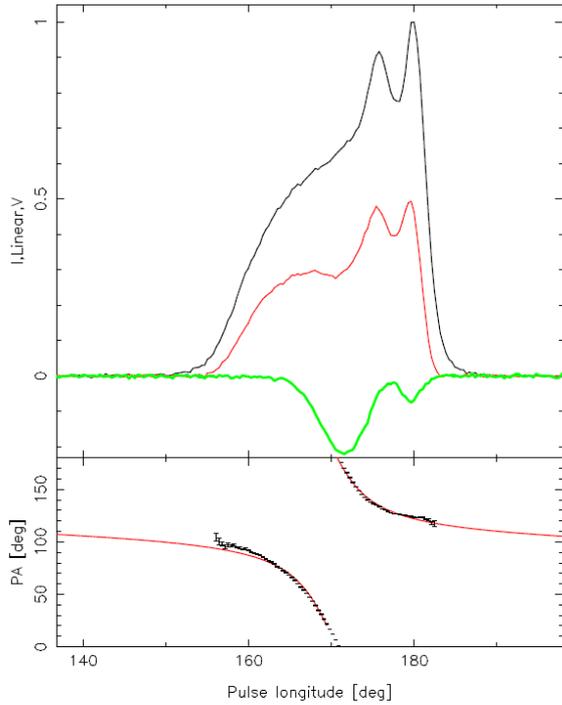
“Core-conal” model



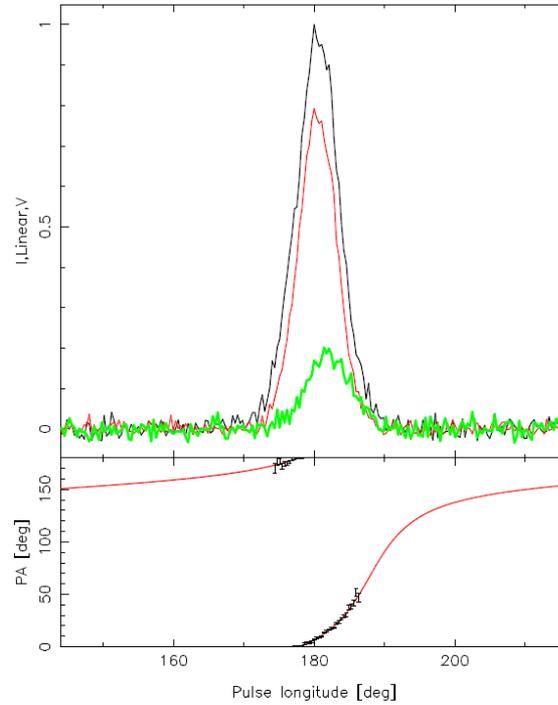
Ход позиционного угла $p.a.$

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

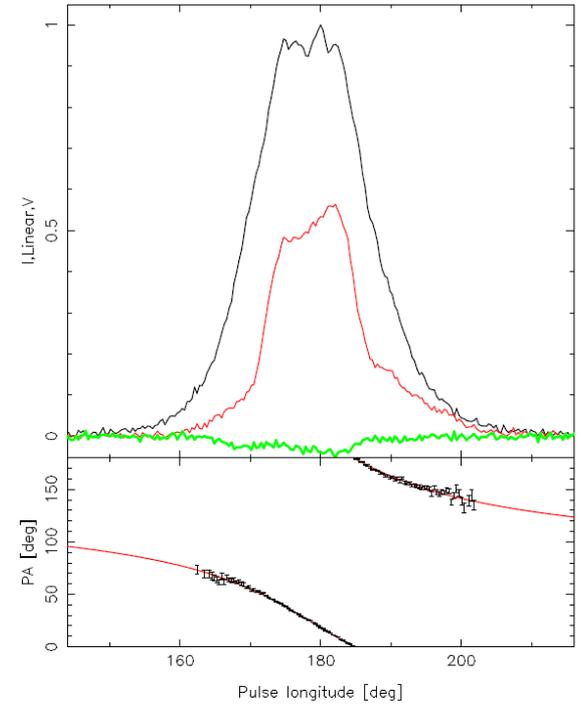
J0536-7543 20cm (1.1×10^{31})



J0614+2229 20cm (6.2×10^{34})

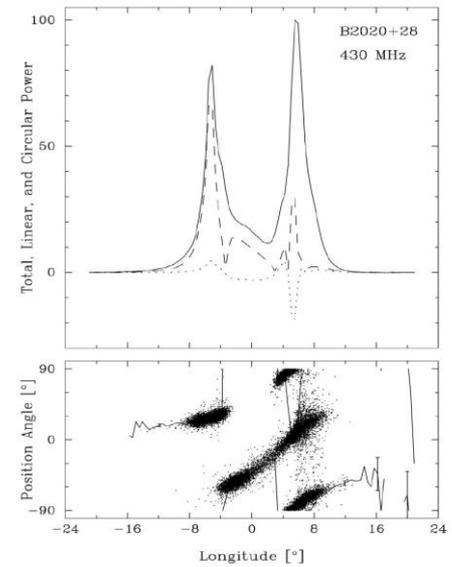
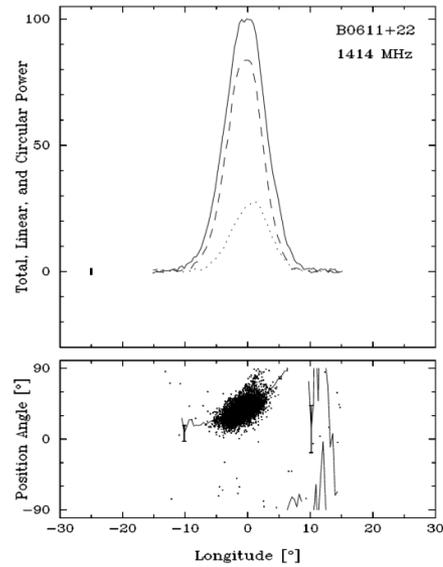
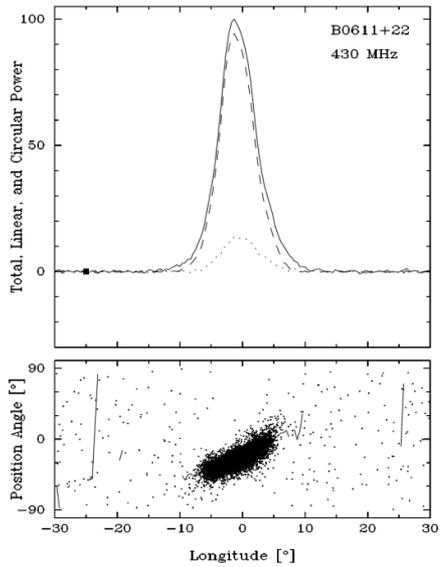
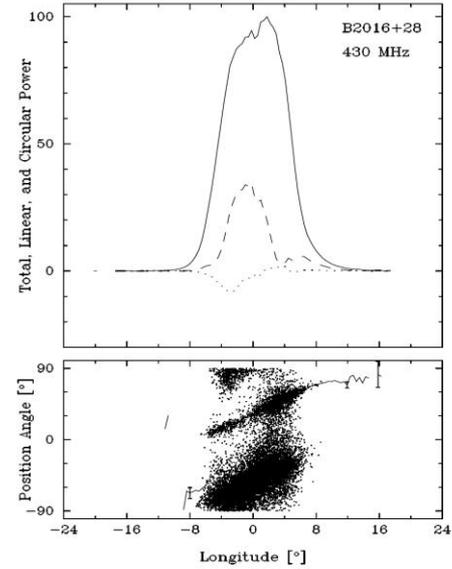
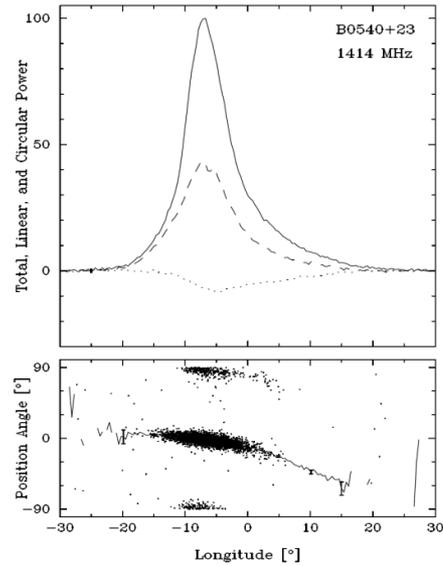
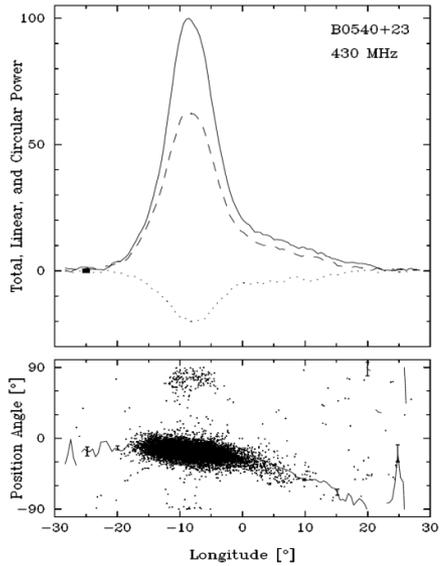


J0630-2834 20cm (1.5×10^{32})

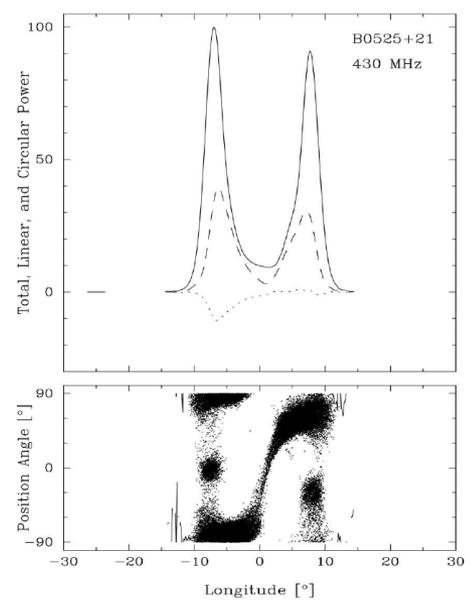
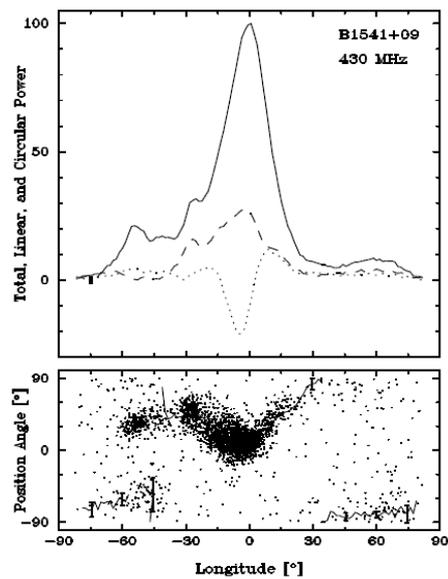
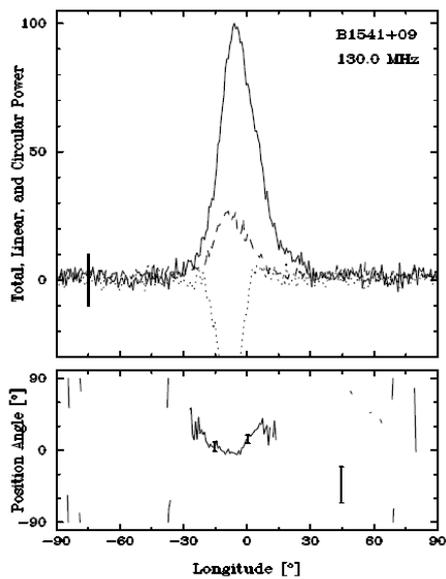
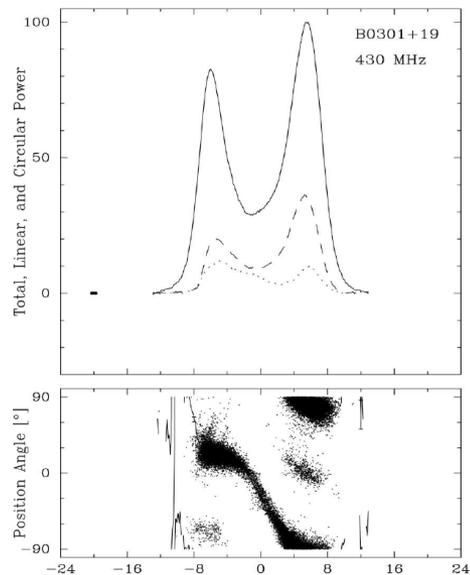
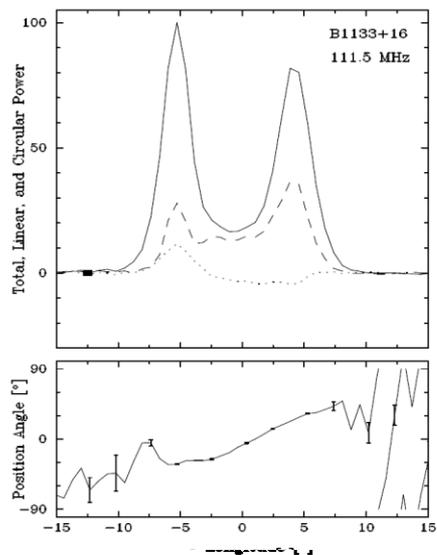
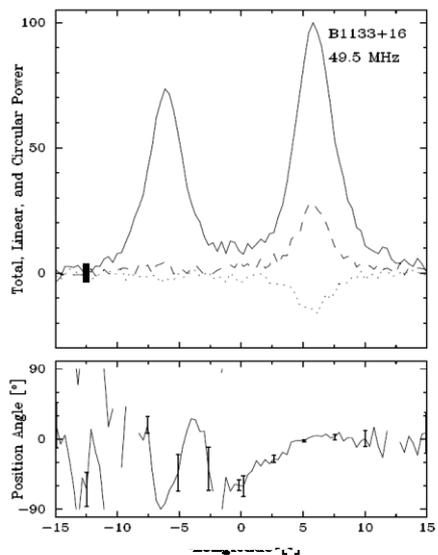


P.Weltevrede, S.Johnston. MNRAS, **391**, 1210 (2008)

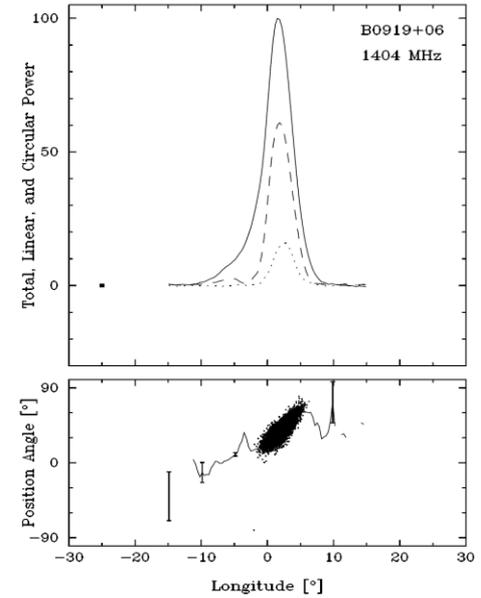
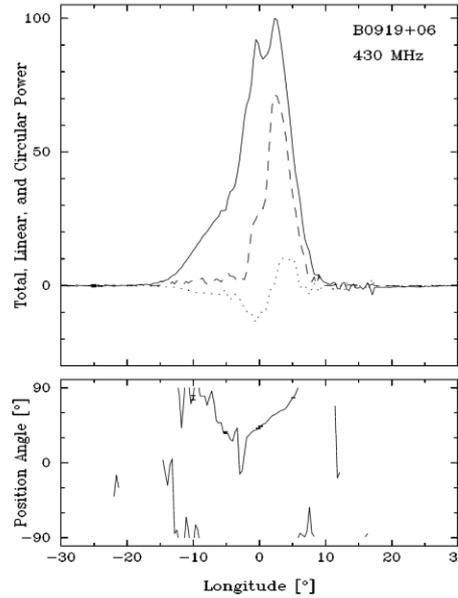
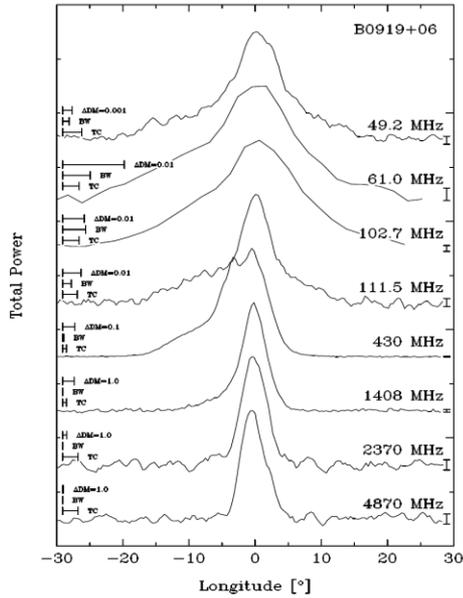
T.Hankins, J.Rankin, 2008



T.Hankins, J.Rankin, 2008



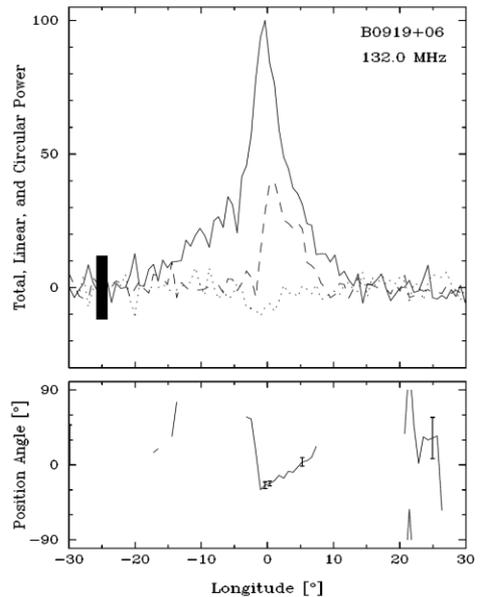
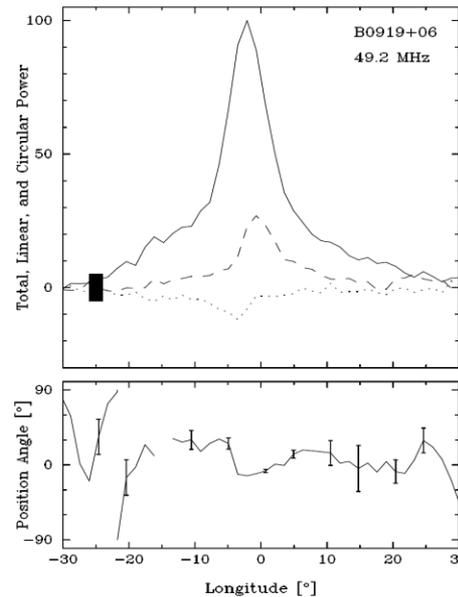
T.Hankins, J.Rankin, 2008



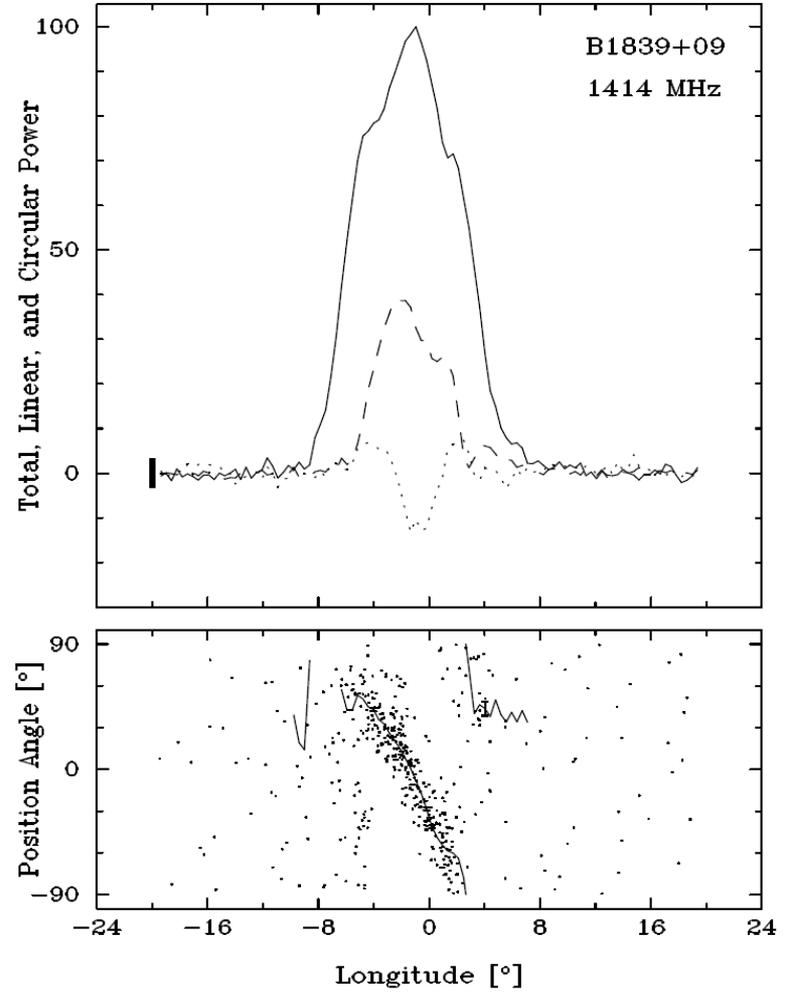
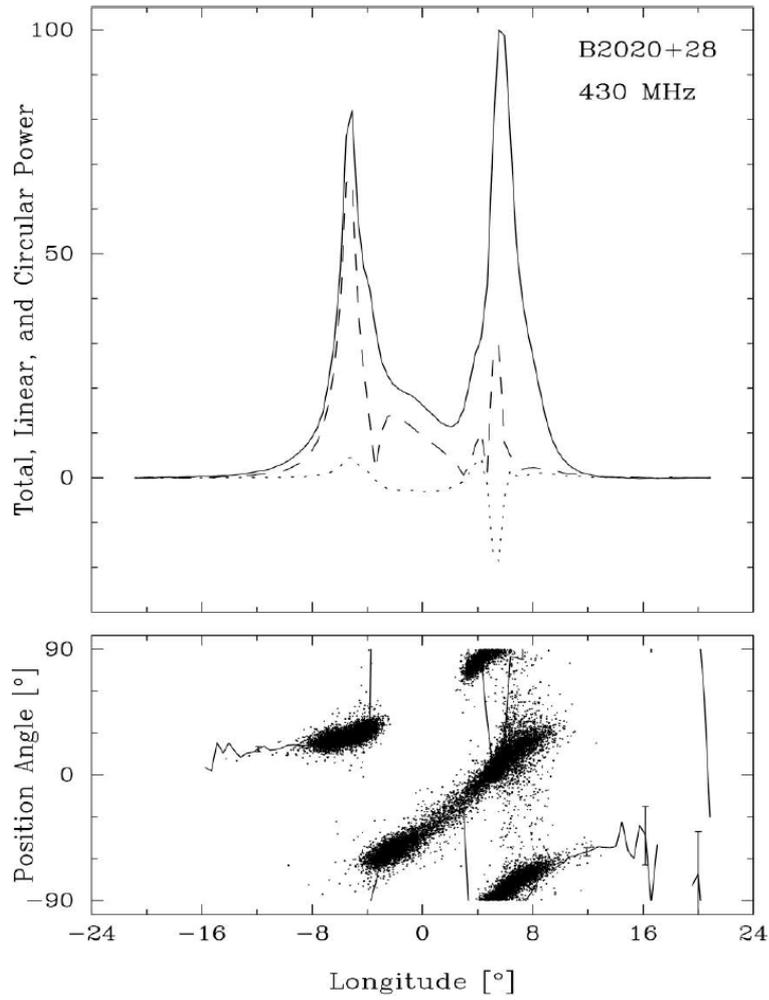
PSR B0919+06

$$P = 0.4 \text{ c}$$

$$\text{Pdot} = 13 \cdot 10^{-15}$$



T.Hankins, J.Rankin, 2008



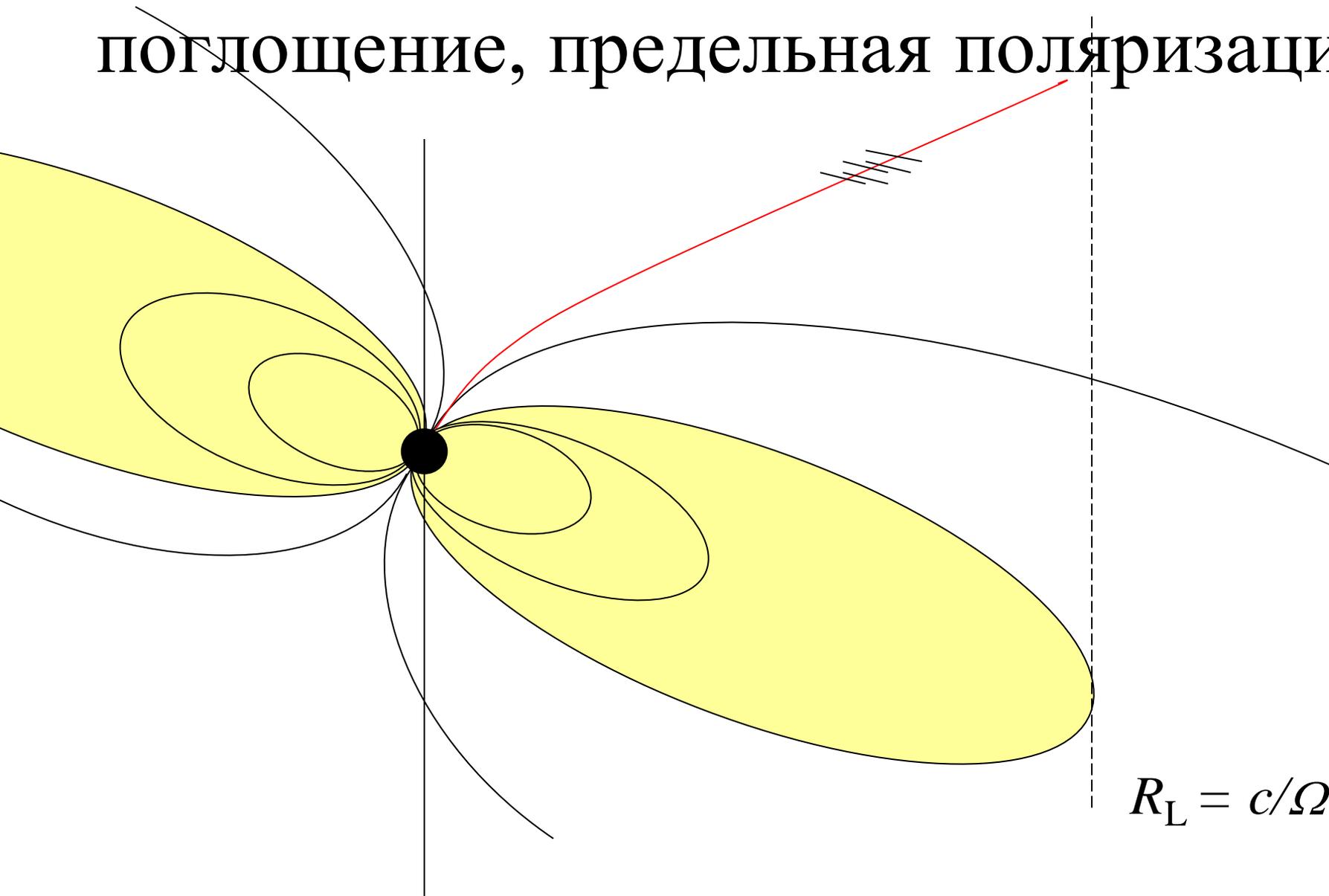
Неявные предположения

- Сигнал распространяется по прямой
- Отсутствует циклотронное поглощение
- Поляризация определяется в месте излучения

Неявные предположения

- ~~• Сигнал распространяется по прямой~~
- ~~• Отсутствует циклотронное поглощение~~
- ~~• Поляризация определяется в месте излучения~~
- Все эти положения неправильны

Преломление, циклотронное поглощение, предельная поляризация



Преломление

J.Barnard, J.Arons, ApJ, **302**, 138 (1986)

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \langle \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \gamma^3} \rangle \end{pmatrix}$$

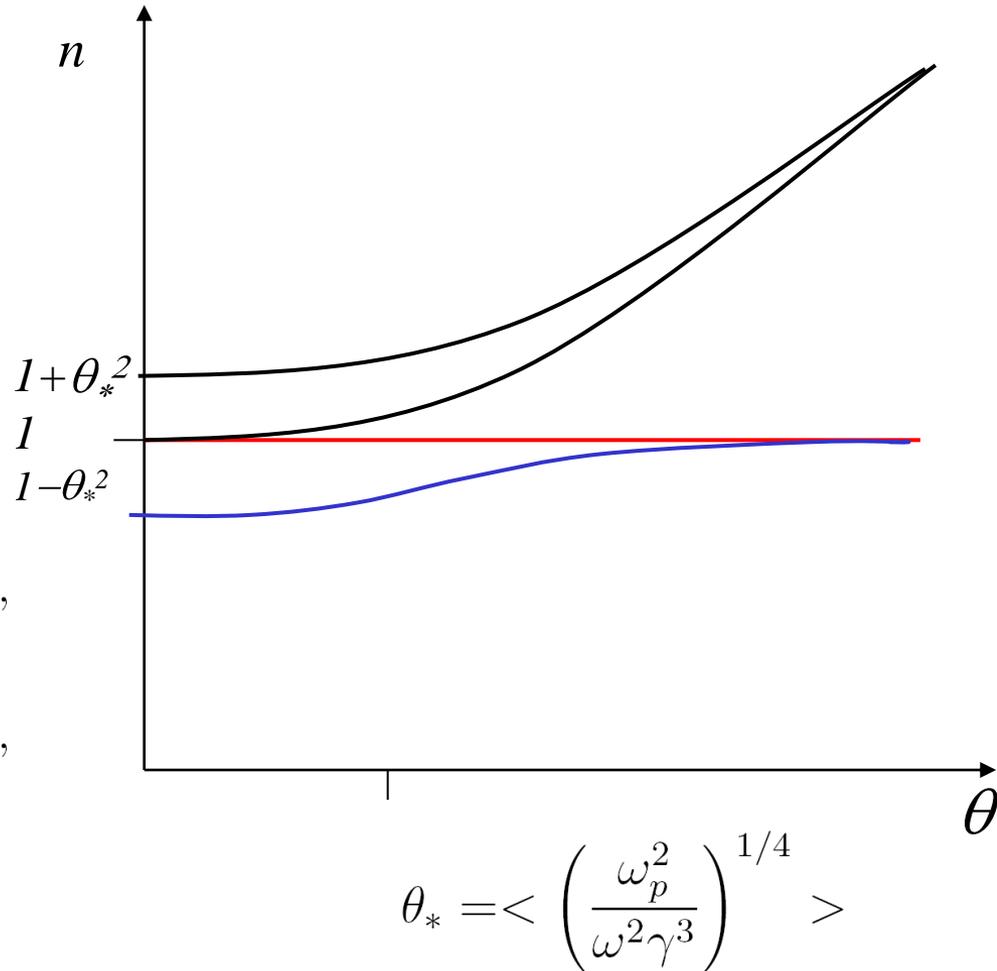
Если $A_p = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \gamma \rangle \gg 1$

$$n_1 = 1,$$

$$n_2 = 1 + \frac{\theta^2}{4} - \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \frac{1}{\gamma^3} \rangle + \frac{\theta^4}{16} \right)^{1/2},$$

$$n_3 = 1 + \frac{\theta^2}{4} + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \frac{1}{\gamma^3} \rangle + \frac{\theta^4}{16} \right)^{1/2},$$

$$n_4 = \frac{1}{\cos \theta}.$$



Траектории

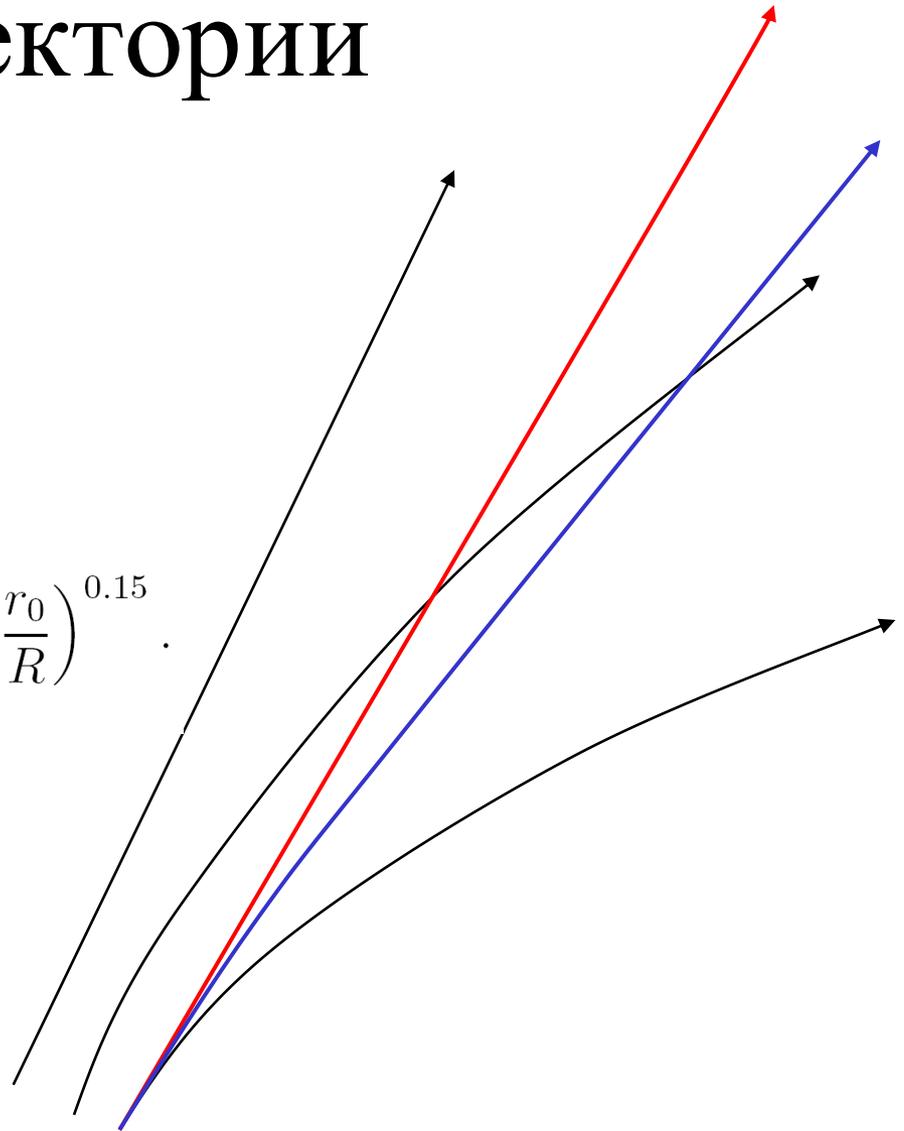
$$\frac{dr_{\perp}}{dl} = \frac{\partial}{\partial k_{\perp}} \left(\frac{k}{n_j} \right),$$

$$\frac{dk_{\perp}}{dl} = - \frac{\partial}{\partial r_{\perp}} \left(\frac{k}{n_j} \right)$$

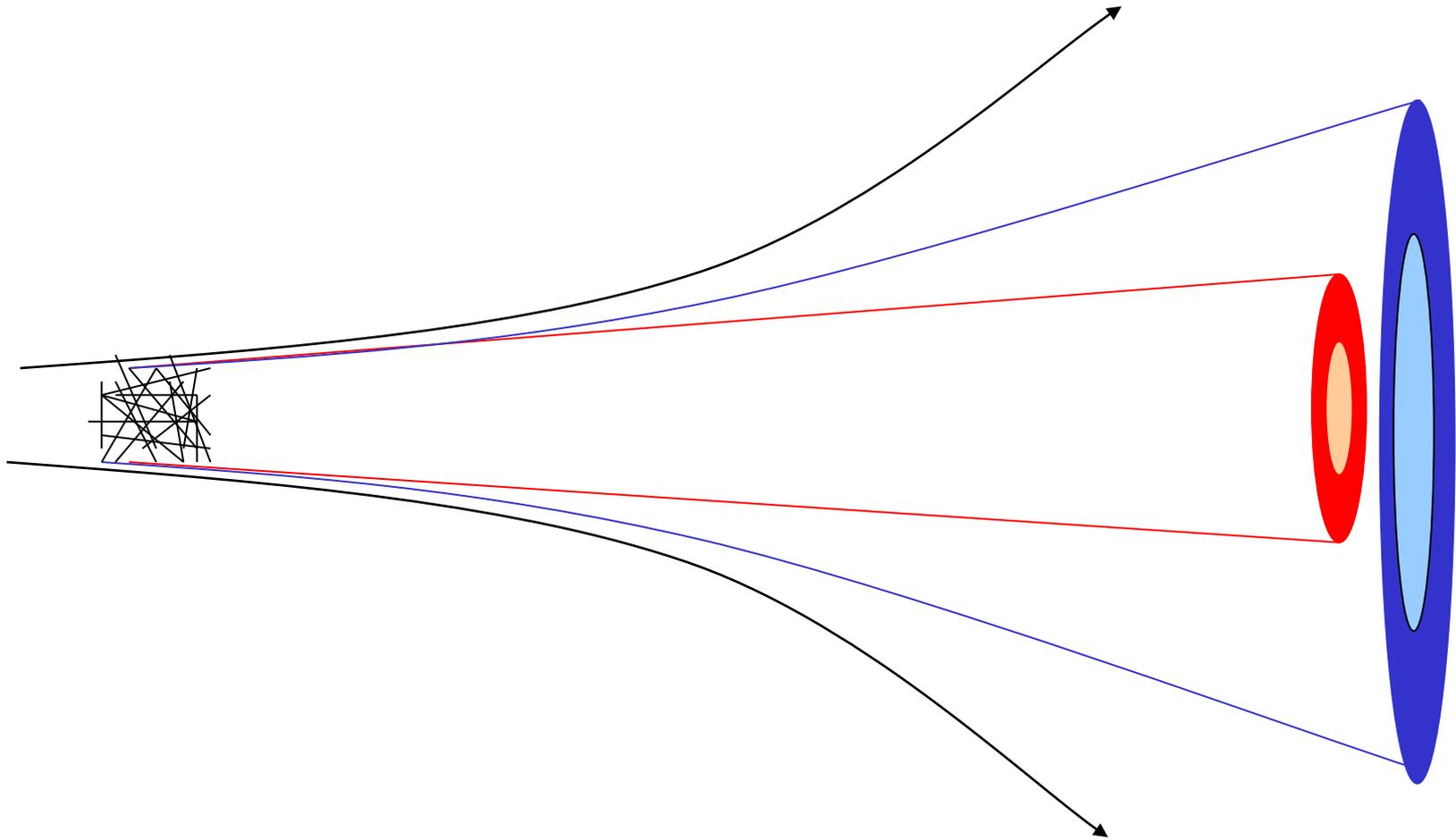
$$W \approx \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{0.36} \left(\frac{\omega_{p0}}{\omega} \right)^{0.14} \langle \gamma^{-3} \rangle^{0.07} \left(\frac{r_0}{R} \right)^{0.15} .$$

Нужно знать $r_0(\mathbf{v})$

Ю.Любарский, С.Петрова



Core & Conal



6. Магнитосфера



Бессиловое приближение

- Плазма в магнитосфере экранирует продольное электрическое поле: $E_{\parallel} = 0$.
- Плазма вторична, ее плотность энергии много меньше плотности энергии электромагнитного поля.

Бессиловое приближение

- Удобная запись магнитного

$$\mathbf{B} = \frac{\nabla\Psi \times \mathbf{e}_\varphi}{2\pi\omega} - \frac{2I}{c\omega} \mathbf{e}_\varphi \qquad \mathbf{j}_p = -\frac{\nabla I \times \mathbf{e}_\varphi}{2\pi\omega}$$

и электрического поля

$$\mathbf{E} = -\frac{\Omega_F}{2\pi c} \nabla\Psi$$

Здесь использовано

стационарность $E_\varphi = 0$,

экранировка $E_{||} = 0$.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

- Уравнение Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

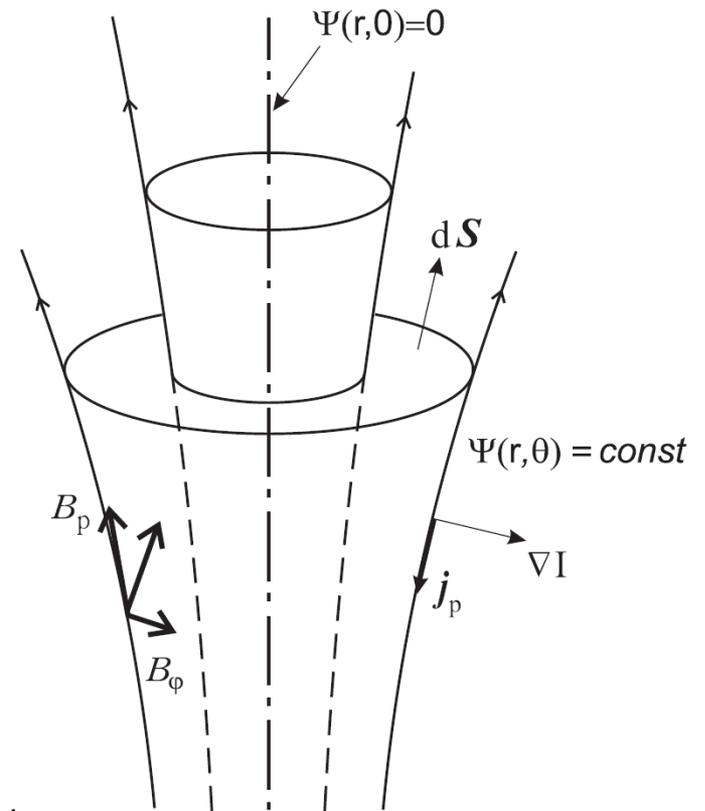
выполняется автоматически

- Потенциал Ψ имеет
СМЫСЛ МАГНИТНОГО ПОТОКА

$$d\Psi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

- Т.к. $\mathbf{B} \cdot \nabla\Psi = 0$ векторы
скорости лежат на поверхности

$$\Psi(r, \theta) = \text{const}$$



Бессиловое приближение

Интегралы движения

Из уравнения Максвелла $\nabla \times \mathbf{E} = 0$

следует, что $\nabla \Omega_F \times \nabla \Psi = 0$

т.е.

$$\Omega_F = \Omega_F(\Psi)$$

Из φ компоненты уравнения $\frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho_e \mathbf{E} = 0$,
следует, что

$$I = I(\Psi)$$

Бессиловое приближение

Уравнение равновесия – полоидальная
компонента уравнения

$$\frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho_e \mathbf{E} = 0,$$

$$-\left(1 - \frac{\Omega_F^2 \varpi^2}{c^2}\right) \nabla^2 \Psi + \frac{2}{\varpi} \frac{\partial \Psi}{\partial \varpi} - \frac{16\pi^2}{c^2} I \frac{dI}{d\Psi} + \frac{\varpi^2}{c^2} (\nabla \Psi)^2 \Omega_F \frac{d\Omega_F}{d\Psi} = 0$$

Осесимметричная магнитосфера

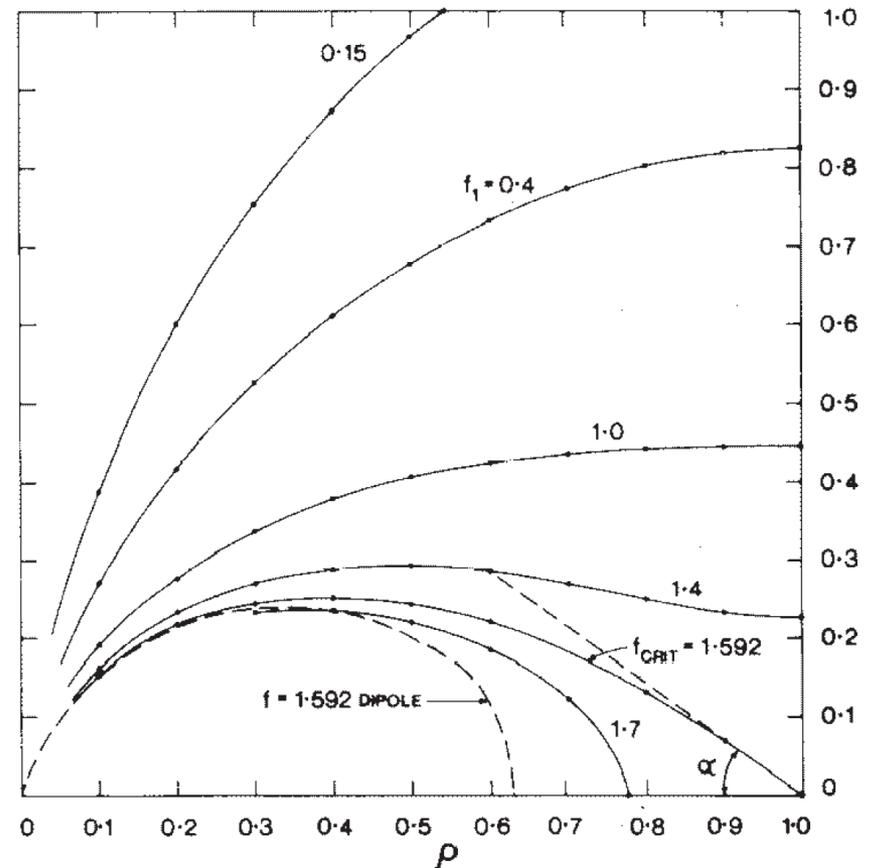
- Первые результаты – 70-е годы
(Michel 1973, Scharlemann & Wagoner 1973,
Okamoto 1974, Blandford, 1976,
Mestel & Wang 1979)

Michel, 1973

Нулевой продольный ток

ДИПОЛЬНОЕ ПОЛЕ

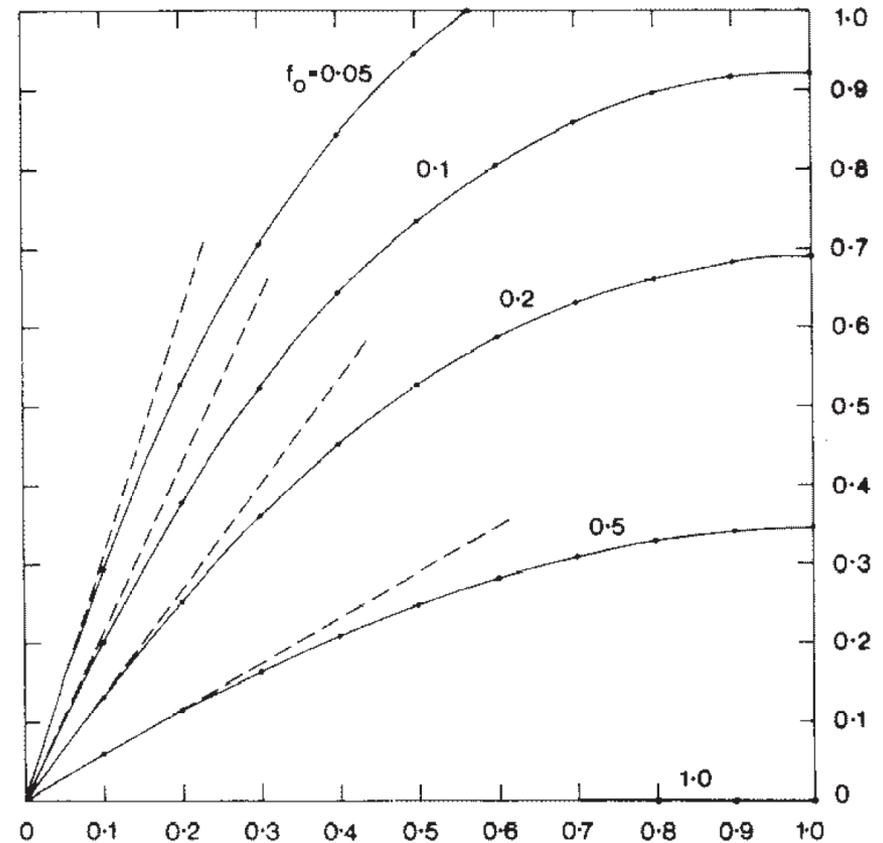
- Деколлимация
- Решение существует лишь до светового цилиндра (совпадающего со световой поверхностью $E = B$)



Michel, 1973

Нулевой продольный ток МОНОПОЛЬНОЕ ПОЛЕ

- Деколлимация
- Решение существует
лишь до светового цилиндра



Michel, 1973

Ненулевой продольный ток

МОНОПОЛЬНОЕ ПОЛЕ

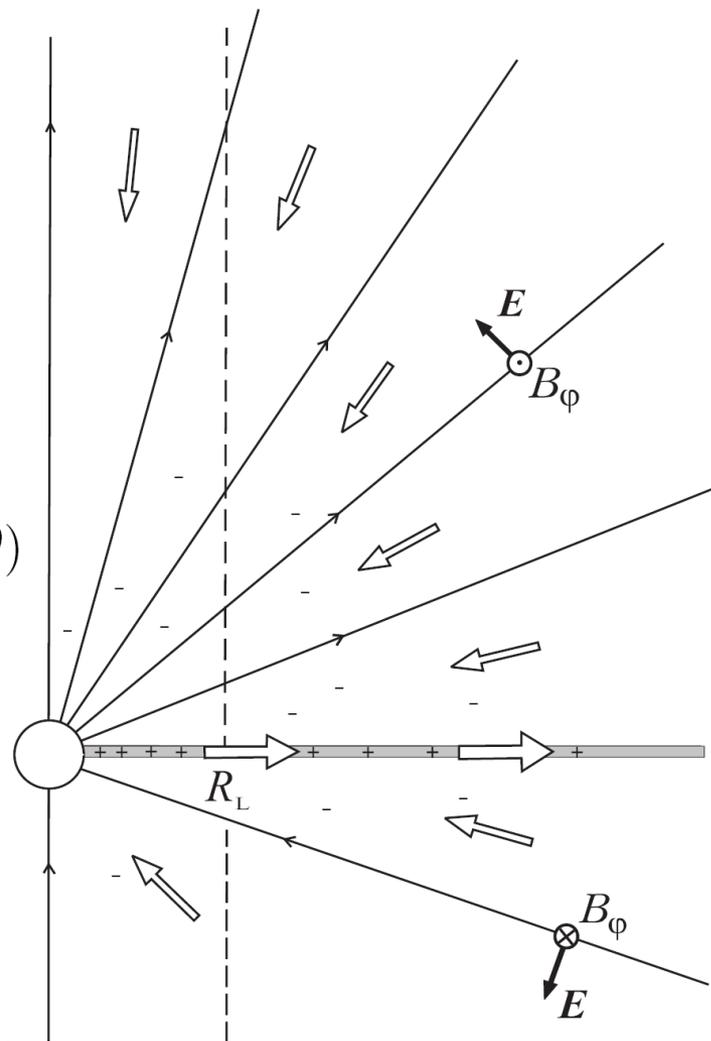
- Точная компенсация тороидального и полоидального токов

- Монопольное поле $\Psi(r, \theta) = \Psi_0(1 - \cos \theta)$ есть точное решение, если

$$4\pi I(\Psi) = \Omega_F(\Psi) \left(2\Psi - \frac{\Psi^2}{\Psi_0} \right).$$

ПОЛЯ

$$B_{\hat{\varphi}} = E_{\hat{\theta}} = -B_0 \left(\frac{\Omega R}{c} \right) \frac{R}{r} \sin \theta$$



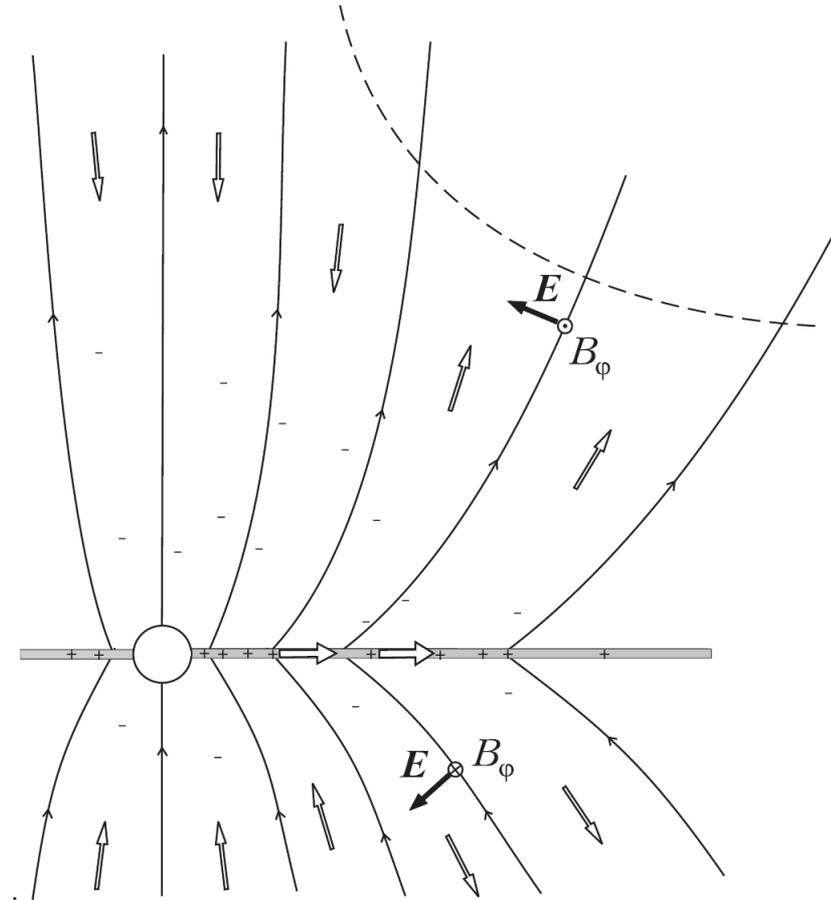
Blandford, 1976

Ненулевой продольный ток параболическое поле

$$X = r(1 - \cos \theta)$$

$$I(\Psi) = \frac{\mathcal{C}\Omega_F(X)X}{2 \left[1 + \frac{\Omega_F^2(X)X^2}{c^2} \right]^{1/2}}$$

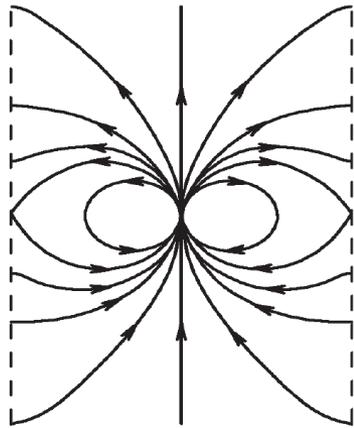
$$\frac{d\Psi}{dX} = \frac{\pi\mathcal{C}}{\left[1 + \frac{\Omega_F^2(X)X^2}{c^2} \right]^{1/2}}$$



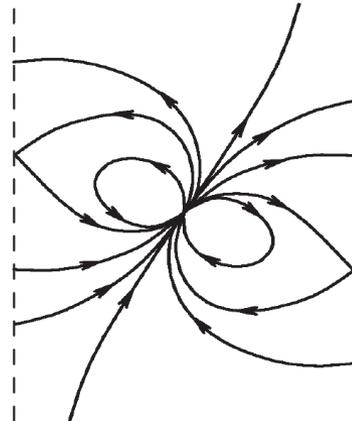
Общие свойства

- Продольный ток есть свободный параметр.
- При малых продольных токах световая поверхность находится на конечных расстояниях.

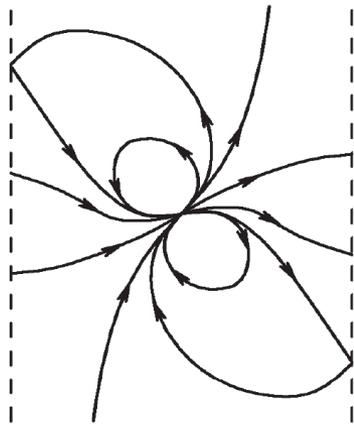
Наклонный ротатор, $I = 0$



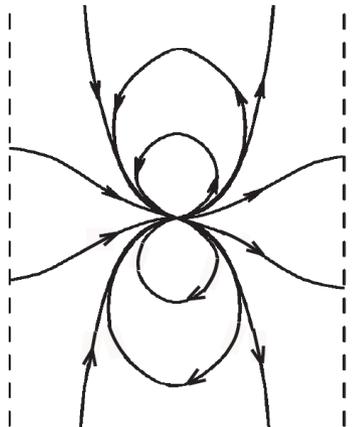
$\chi = 0^\circ$



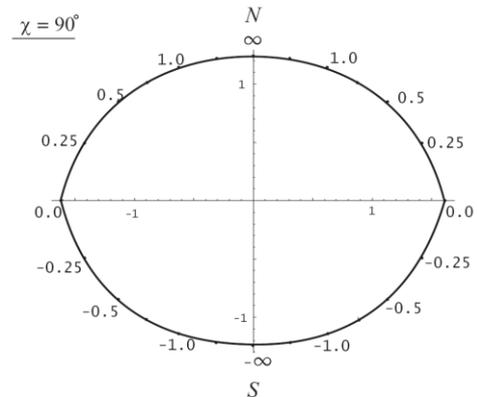
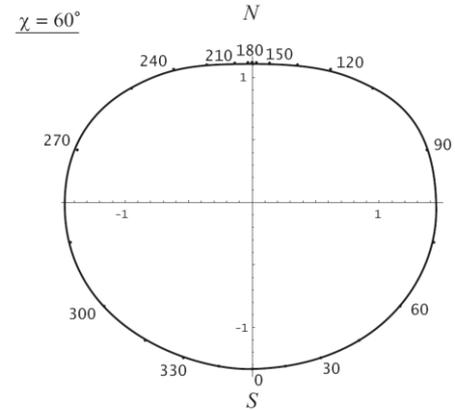
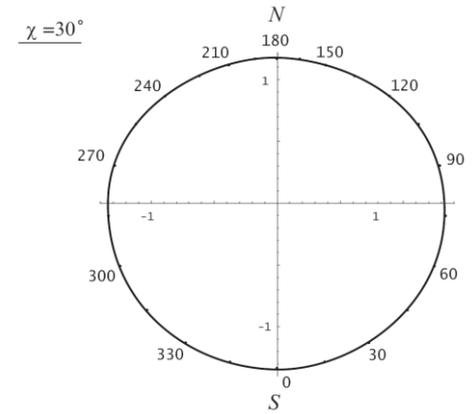
$\chi = 30^\circ$



$\chi = 60^\circ$

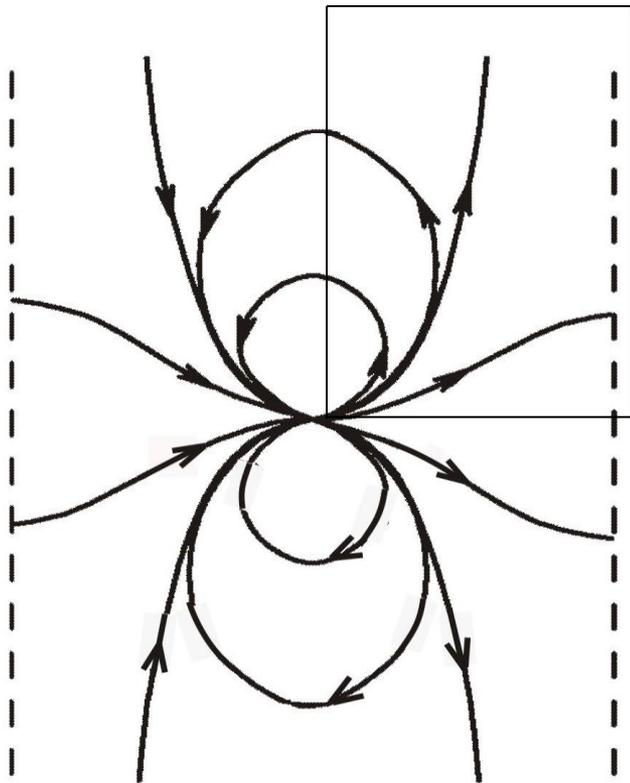


$\chi = 90^\circ$



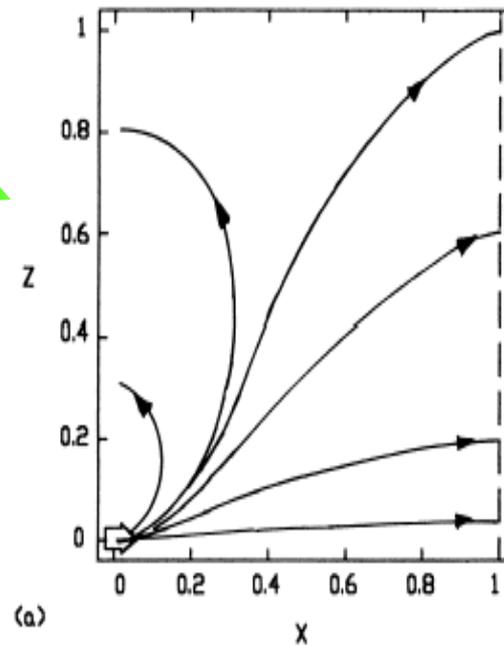
Beskin, Gurevich & Istomin (1983)

Ортогональный ротатор, $I = 0$



$$\chi = 90^\circ$$

Beskin, Gurevich
& Istomin (1983)



Mestel, Panagi
& Shibata (1999)

Ортогональный ротатор, $I = 0$

- При $I = 0$ тороидальное магнитное поле на световом цилиндре равно нулю.
- Это значит, что при $I = 0$ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ РАВНЫ НУЛЮ даже для ортогонального ротатора.
- Все потери энергии связаны с продольными электрическими токами.

Ортогональный ротатор–потери энергии

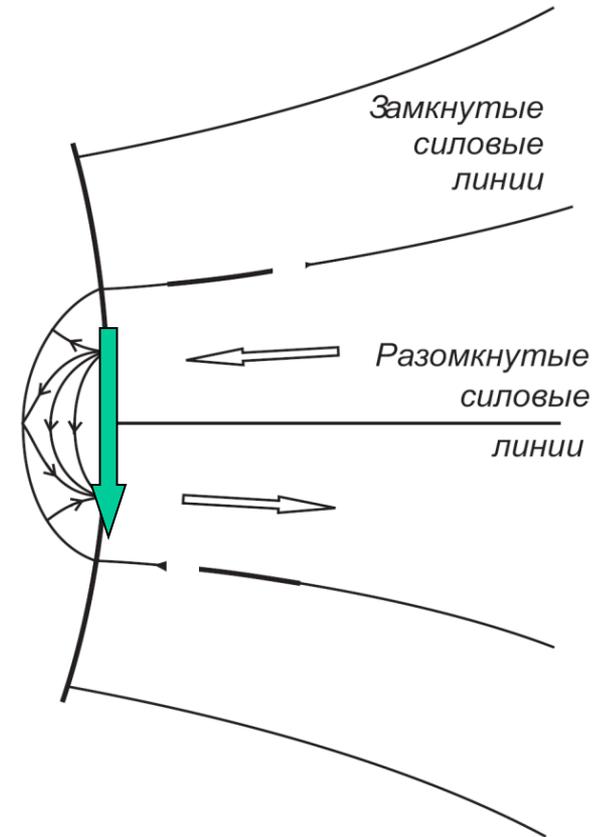
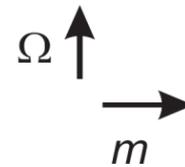
Бескин, Гуревич & Истомин, ЖЭТФ, 1983,

Бескин & Нохрина, АЖ, 2004

$$\rho_{GJ} = -\frac{\Omega \mathbf{B}}{2\pi c} \approx -\frac{\Omega B}{2\pi c} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{1/2}$$

$$W_{\text{tot}} = \Omega c^{-1} \oint [\mathbf{r} \times [\mathbf{J}_S \times \mathbf{B}]] dS$$

↑ ↑



Ортогональный ротатор–потери энергии

Бескин, Гуревич & Истомина, ЖЭТФ, 1983,

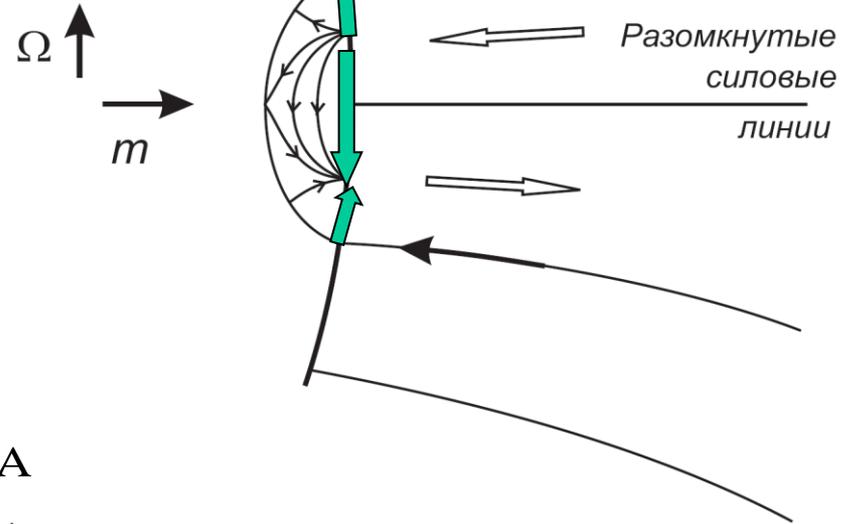
Бескин & Нохрина, АЖ, 2004

$$\rho_{GJ} = -\frac{\Omega \mathbf{B}}{2\pi c} \approx -\frac{\Omega \mathbf{B}}{2\pi c} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{1/2}$$

$$W_{\text{tot}} = \Omega c^{-1} \oint [\mathbf{r} \times [\mathbf{J}_S \times \mathbf{B}]] dS$$

↑ ↑

$$W_{\text{tot}} = \frac{f_*^3}{64} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) \mathbf{i}_A$$



$$\mathbf{i}_A = j_{\parallel} / \rho_{GJ} c$$

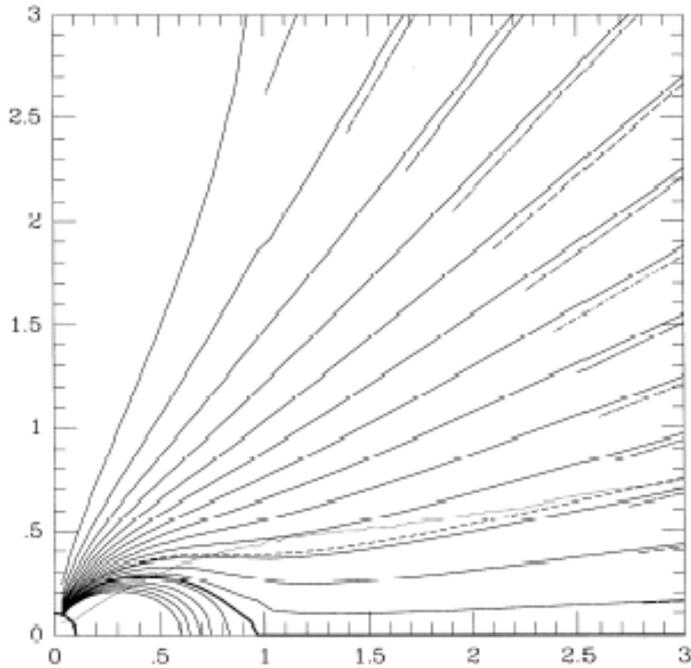
Осесимметричная магнитосфера

- Взрывное увеличение числа работ
(Contopoulos, Kazanas & Fendt, Грузинов, Узденский, Mestel et al, Ogura & Kojima, Harding & Muslimov, Спитковский, Тимохин, Комиссаров, McKinney, Arons et al, Гуревич, Истомин, Бескин & Нохрина)
- Во всех работах неявно предполагалось, что продольный ток может быть произвольным.

Осесимметричная магнитосфера

- Взрывное увеличение числа работ
(Contopoulos, Kazanas & Fendt, Грузинов, Узденский, Mestel et al, Ogura & Kojima, Harding & Muslimov, Спитковский, Тимохин, Комиссаров, McKinney, Arons et al, Гуревич, Истомин, Бескин & Нохрина)
- Во всех работах неявно предполагалось, что продольный ток может быть произвольным.

Contopoulos, Kazanas & Fendt, ApJ, 1999



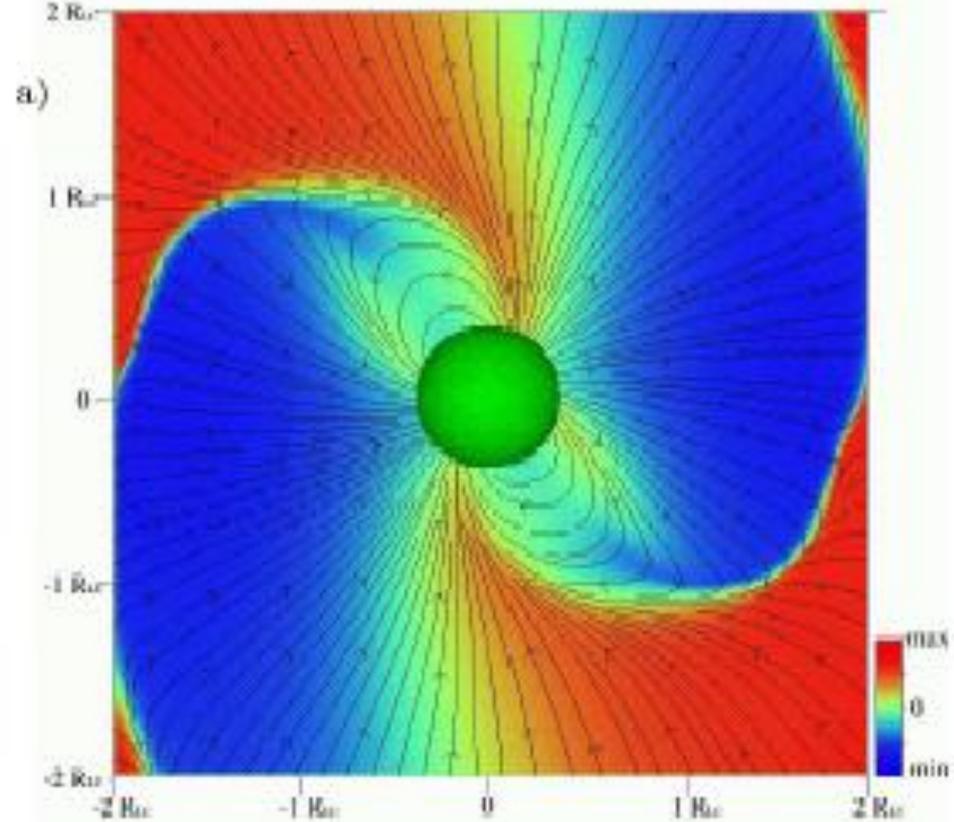
$$W_{\text{tot}} \sim \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3}$$

Ортогональный ротатор – энергетические потери

A. Spitkovsky, ApJ Lett., **648**, L51

(2000)

$$W_{\text{tot}} \approx \frac{1}{4} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \left(+ \sin^2 \chi \right)$$

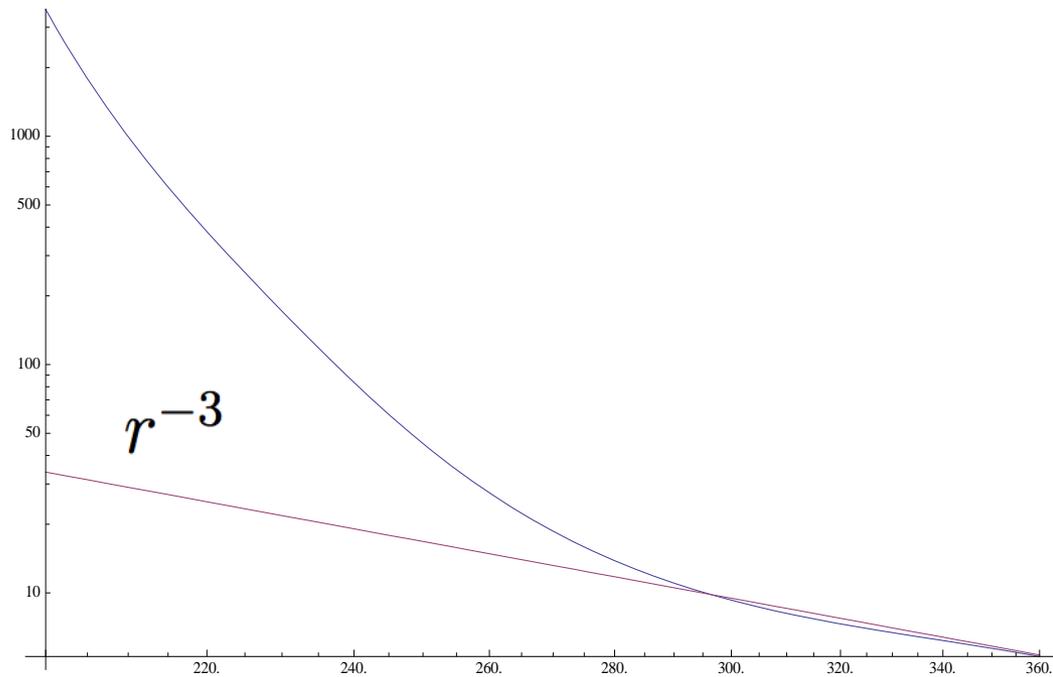


Нет противоречия!

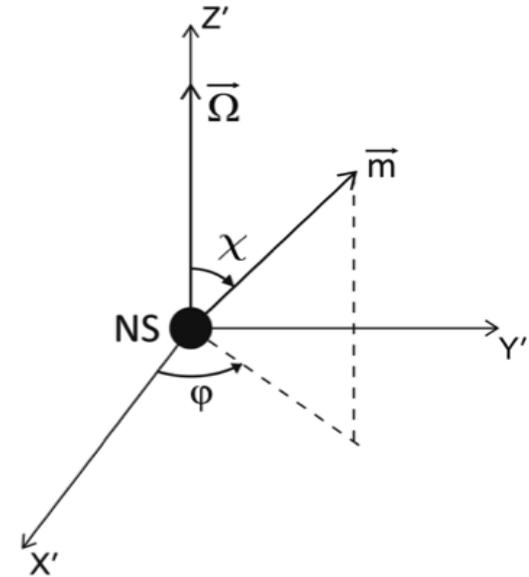
В решении Спитковского электрический ток больше, чем GJ ($i_A \gg 1$).

Решение Спитковского, $\chi = 60^\circ$

B_x

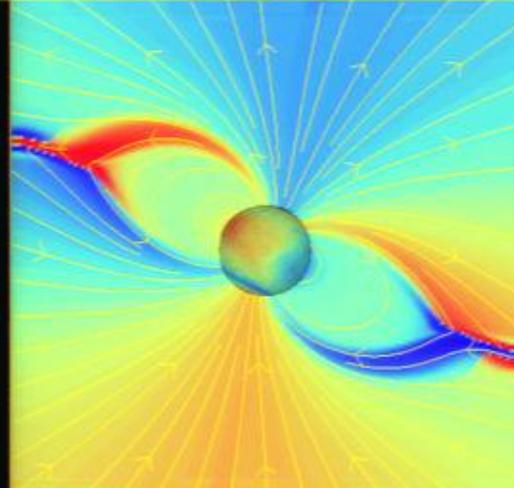
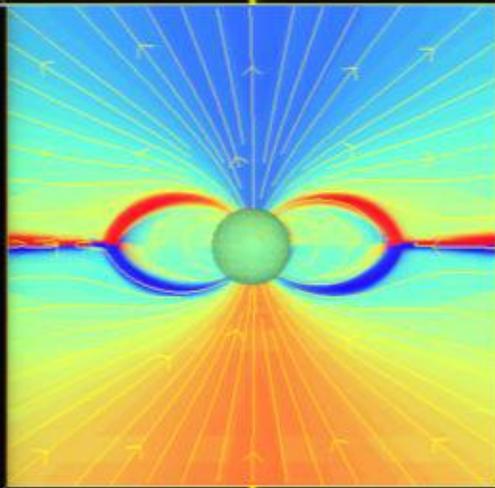


z



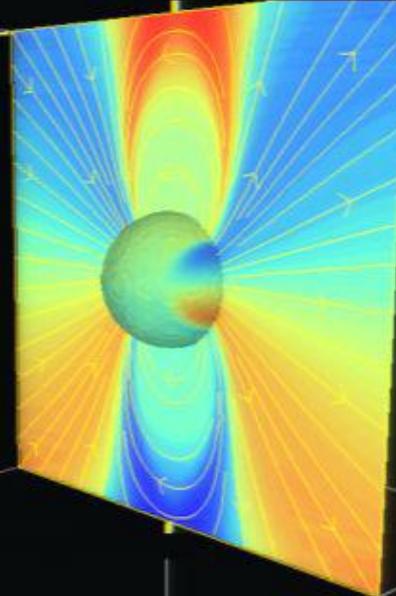
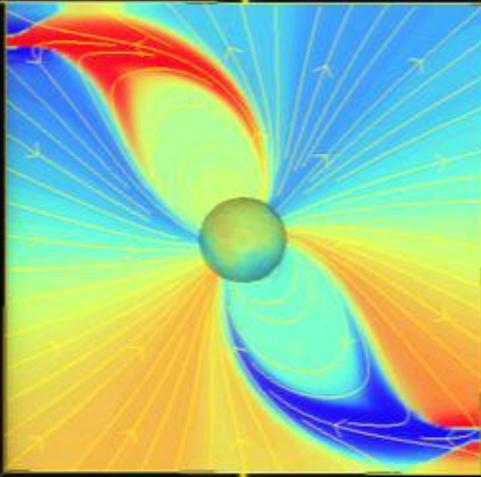
In vacuum $B_x = \frac{\ddot{d}}{cr}$

Magnetospheric currents

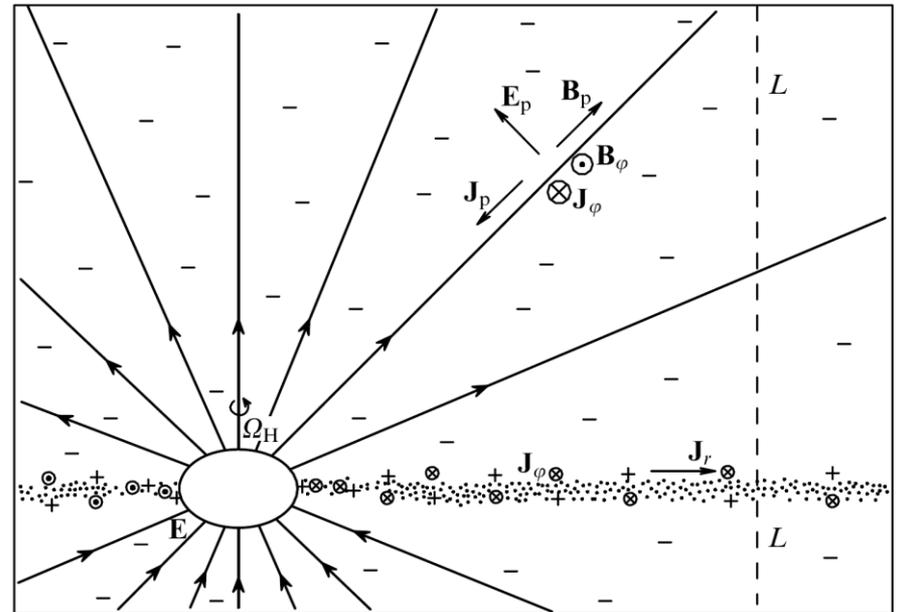
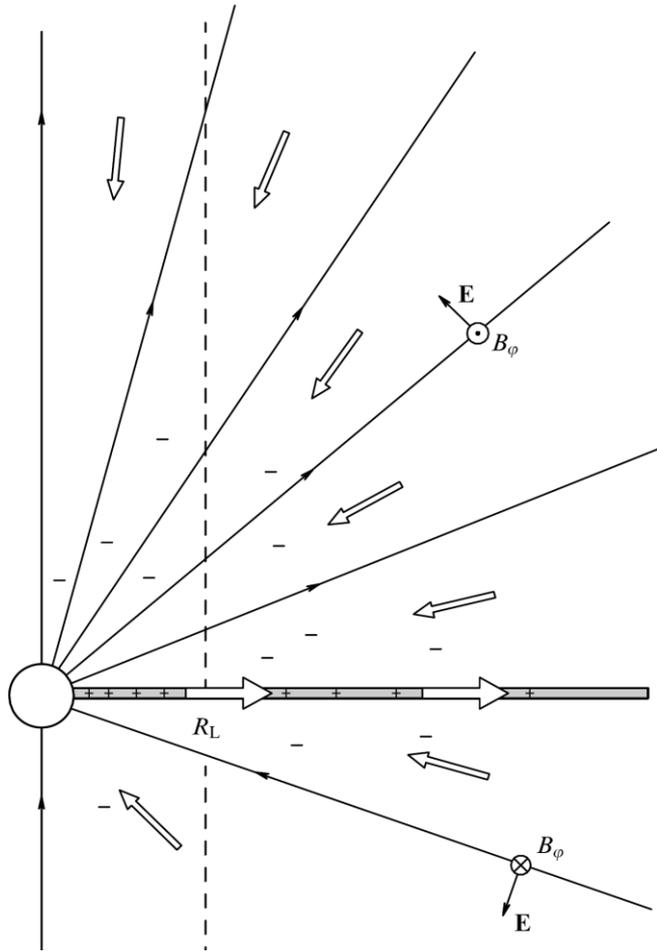


Oppositely flowing currents can occupy the same open flux tube. Does this have any observational implications?

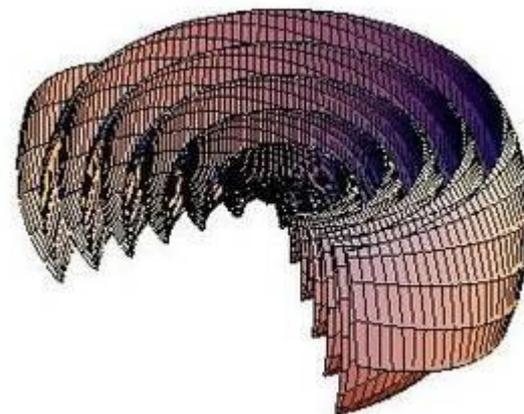
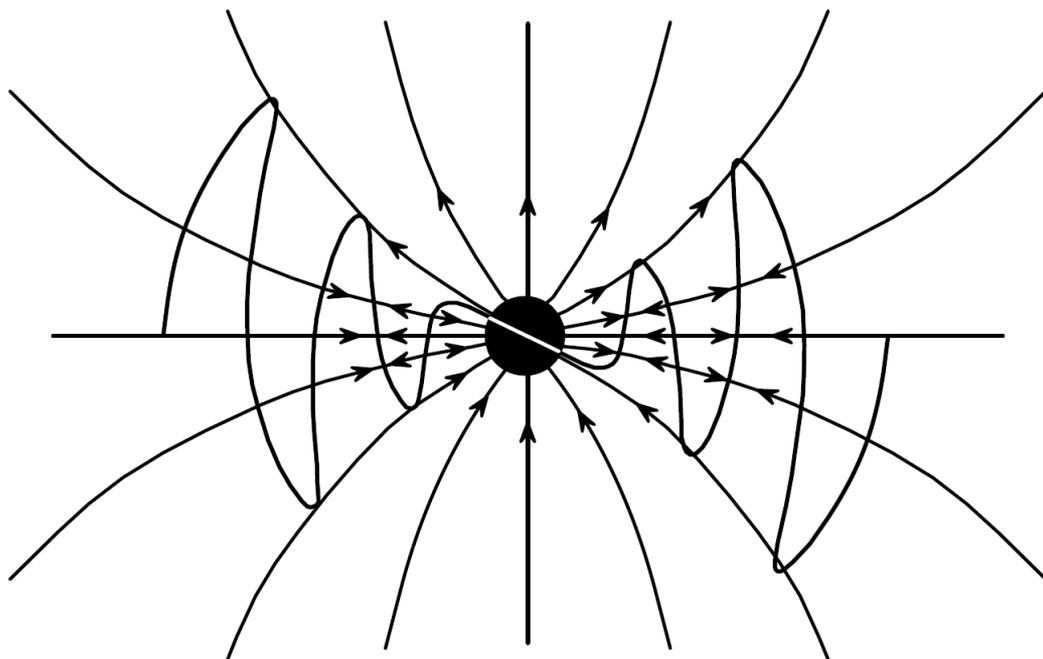
There is always a null-current field line in the open zone.



Решения Michel и ВЗ

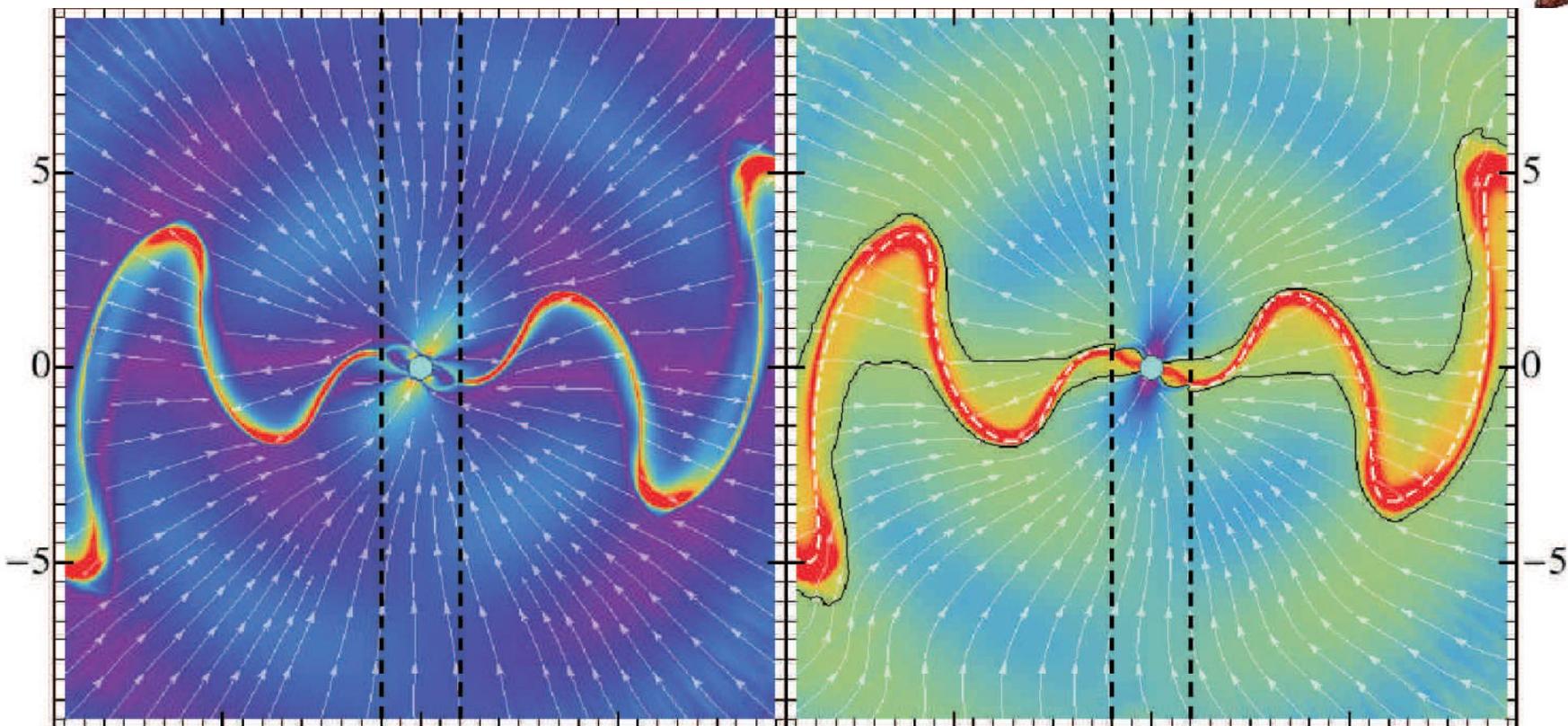
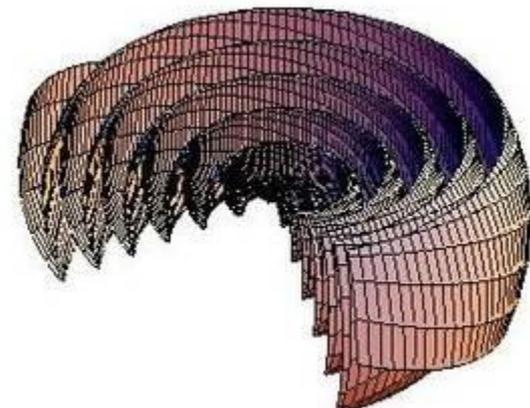


Решение Боговалова (1999)



Решение Боговалова (1999)

I. Contopoulos et al, 2012

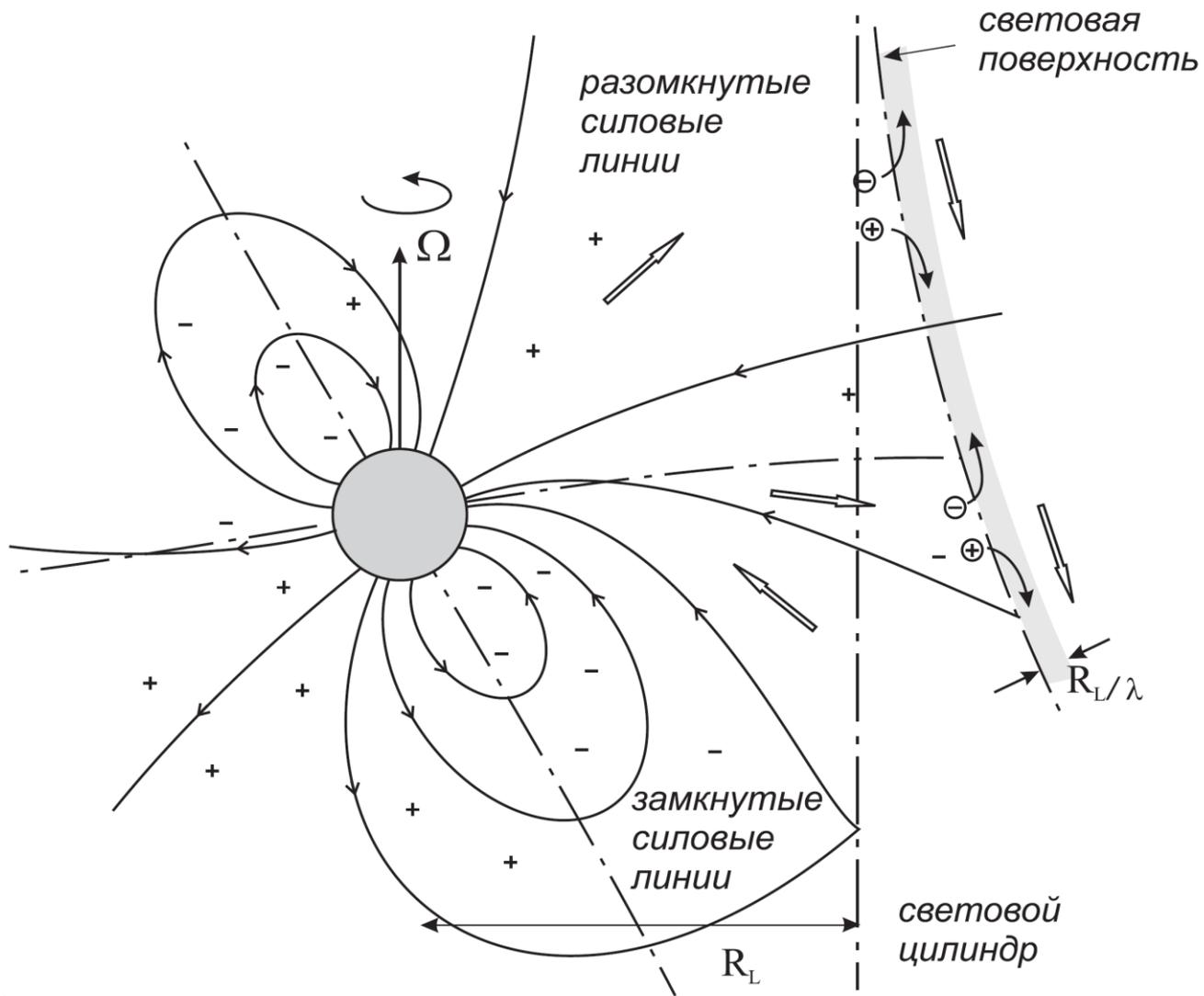


А здесь противоречие есть!

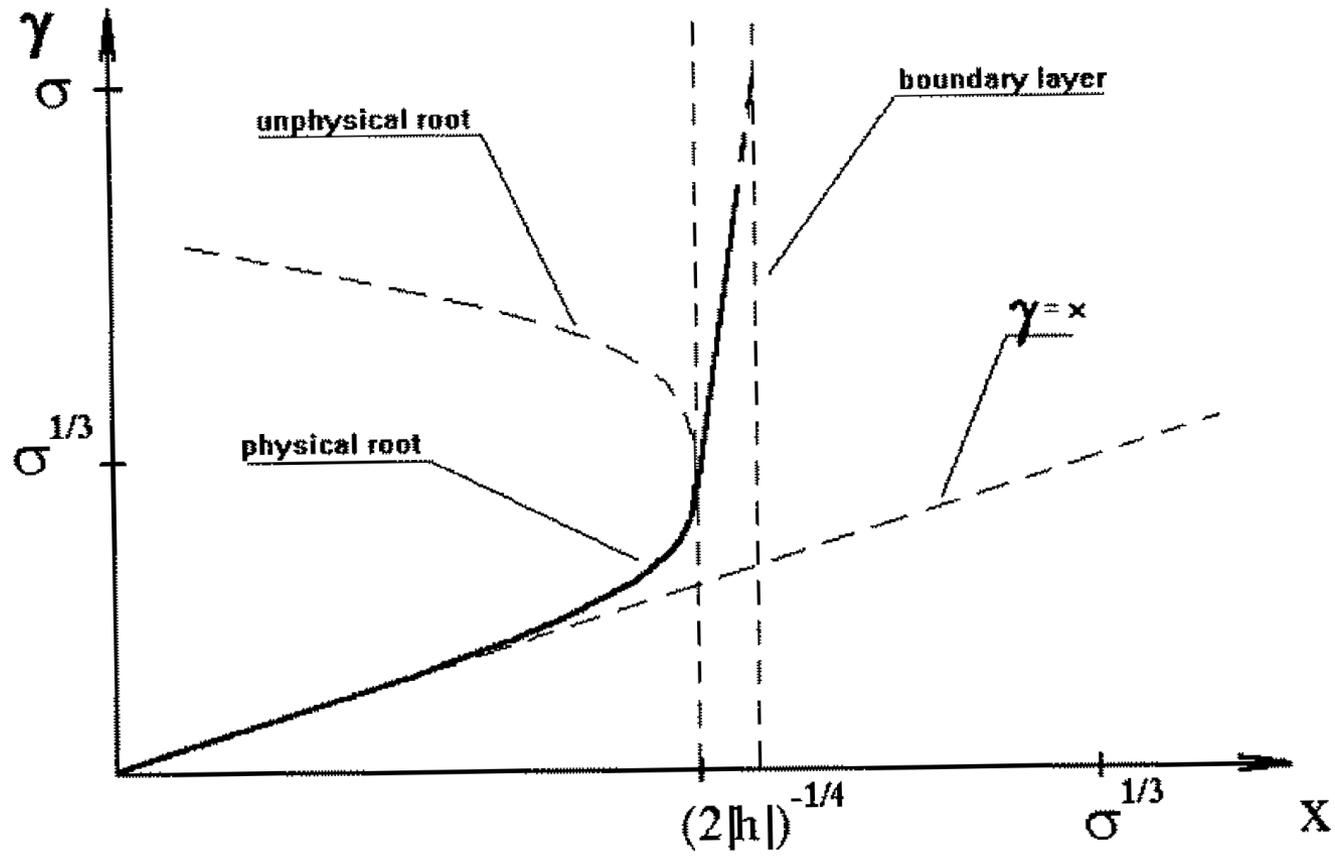
По крайней мере, есть вопрос...

Как можно сделать, чтобы ток был больше GJ ($i_A \gg 1$).

Предсказание



Предсказание

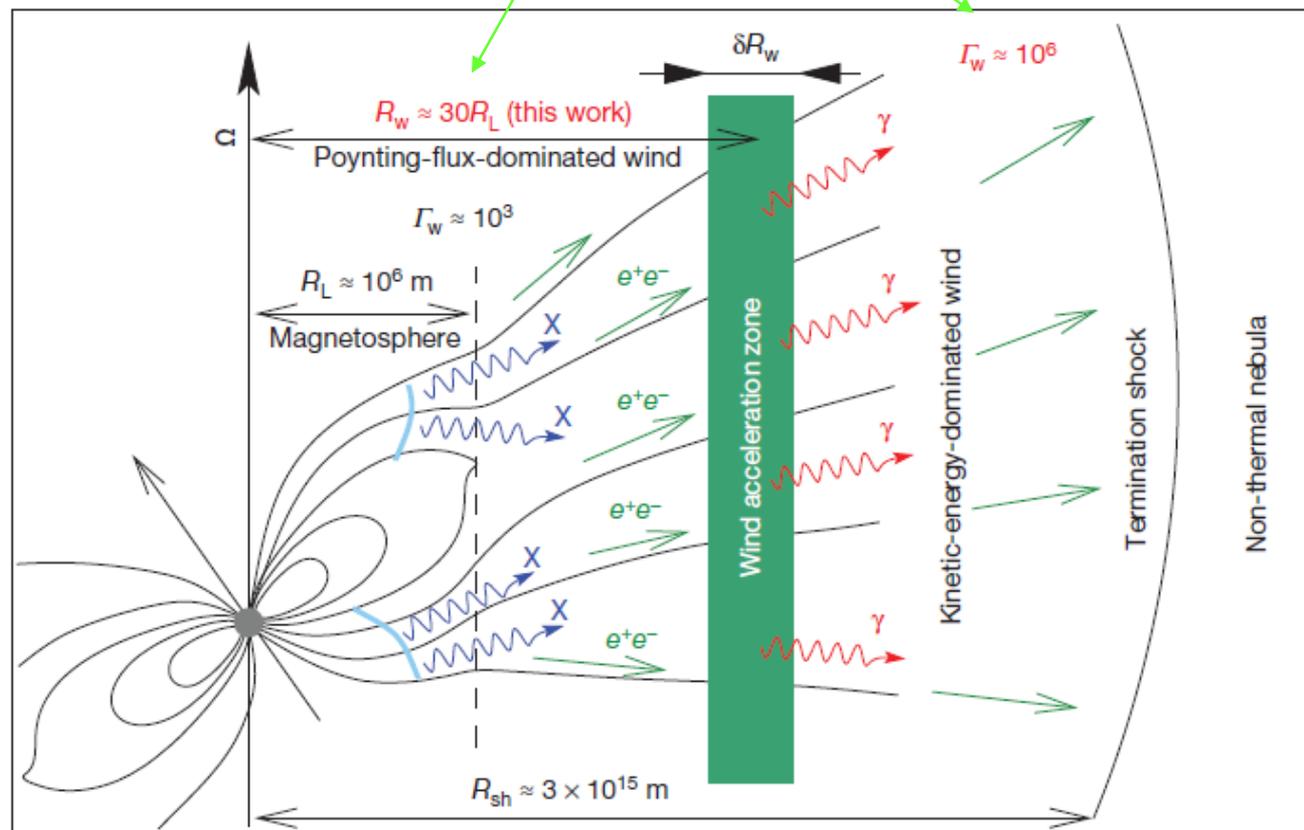


Предсказание

- Тонкий слой $\delta r \sim R_L/\lambda$
- Ускорение частиц за счет движения перпендикулярно магнитным поверхностям:
 $V_\theta \sim V_r$
- Ускорение вплоть до $\gamma \sim \sigma$

Abrupt acceleration of a 'cold' ultrarelativistic wind from the Crab pulsar

F. A. Aharonian^{1,2}, S. V. Bogovalov³ & D. Khangulyan⁴



b

Time profiles of pulsed emission

