

Радиопульсары – уже 50!

В.С.Бескин

ФИАН

МФТИ



ЧАСТЬ 1.

Введение



Восьмидесятые

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin

(1983, 1984, 1988, 1993)

Магнитосфера

Экранировка магниодипольного излучения

Токовые потери – точно

Статистика

Радиоизлучение

Диэлектрический тензор в неоднородном поле

Неустойчивость изгибно-плазменных волн

Насыщение за счет нелинейного взаимодействия

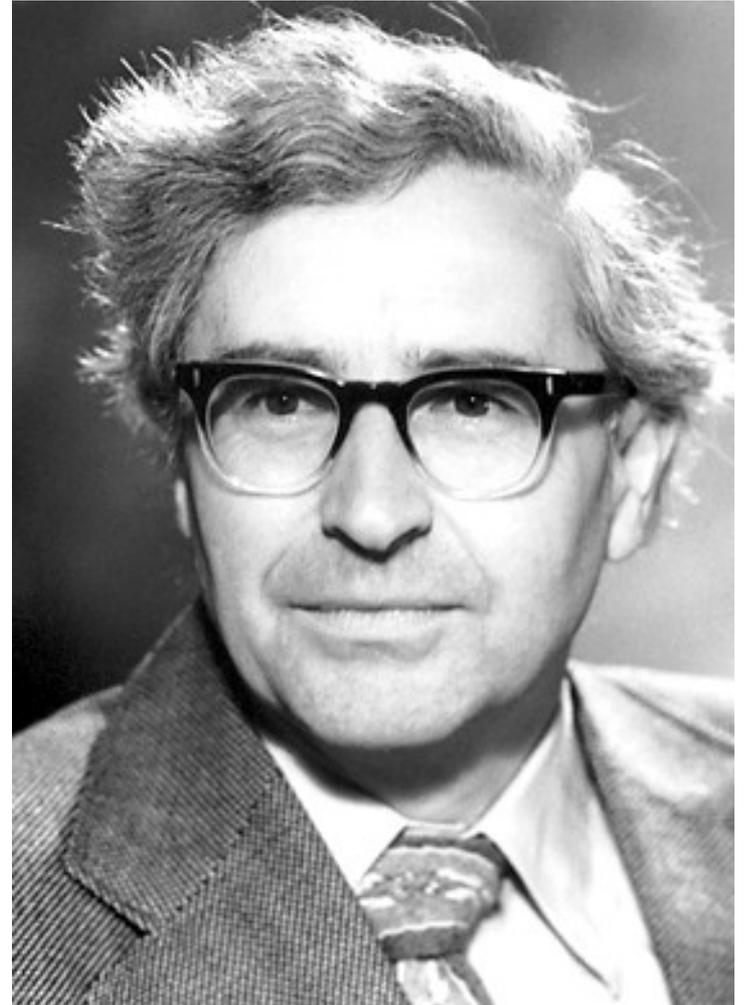
Определение диаграммы направленности

9+11 published papers (radio pulsars)

- [1] VB, [A.A.Philippov](#), MNRAS, **425**, 814-840 (2012)
- [2] VB, Ya.N.Istomin, [A.A.Philippov](#), Physics Uspekhi, **56**, 164 (2014)
- [3] Ya. N.Istomin, [A.A.Philippov](#), VB, MNRAS, **422**, 23 (2014)
- [4] V.V.Prokofev, [L.I.Arzamasskiy](#), VB, MNRAS, **453**, 3540 (2015)
- [5] [L.I.Arzamasskiy](#), VB, K.K.Pirov, MNRAS, **466**, 2325 (2016)
- [6] [H.L.Hakobyan](#) VB, [A.A.Philippov](#), MNRAS, **469**, 2704 (2016)
- [7] VB, A.K.Galishnikova, E.M.Novoselov, [A.A.Philippov](#), M.M.Rashkovetskiy, JPCS, **932**, (2017)
- [8] [H.L.Hakobyan](#) VB, A.K.Galishnikova, E.M.Novoselov, [A.A.Philippov](#), M.M.Rashkovetskiy, JPCS, **932**, (2017)
- [9] [L.I.Arzamasskiy](#), VB, V.V.Prokofev, MNRAS, **474**, 1526 (2018)

- [1] G.Li, A.Spitkovsky, [A.Tchekhovskoy](#), ApJ, **746**, 12 (2012)
- [2] G.Li, A.Spitkovsky, [A.Tchekhovskoy](#), ApJ, **746**, L24 (2012)
- [3] [A.Tchekhovskoy](#), A.Spitkovsky, J.G.Li, MNRAS, **435**, L1 (2013)
- [4] [A.Philippov](#), A.Spitkovsky, ApJ, **785**, L33 (2014)
- [5] [A.Philippov](#), [A.Tchekhovskoy](#), J.C.Li, MNRAS, **441**, 1879 (2014)
- [6] B.Cerutti, [A.Philippov](#), K.Parfrey, A.Spitkovsky, MNRAS, **448**, 606 (2015)
- [7] [A.A.Philippov](#), A.Spitkovsky, B.Cerutti, ApJ, 801, L19 (2015)
- [8] [L.Arzamasskiy](#), [A.Philippov](#), [A.Tchekhovskoy](#), MNRAS, **453**, 3540 (2015)
- [9] [A.Philippov](#), B.Cerutti, [A.Tchekhovskoy](#), A.Spitkovsky, ApJ, **815**, L19 (2015)
- [10] B.Cerutti, [A.Philippov](#), A.Spitkovsky, MNRAS, **457**, 2401 (2016)
- [11] [A.Tchekhovskoy](#), [A.Philippov](#), A.Spitkovsky, MNRAS, **457**, 3384 (2016)

Jocelyn Bell, Antony Hewish, 1967



Первая публикация

Nature, 24 февраля 1968 года

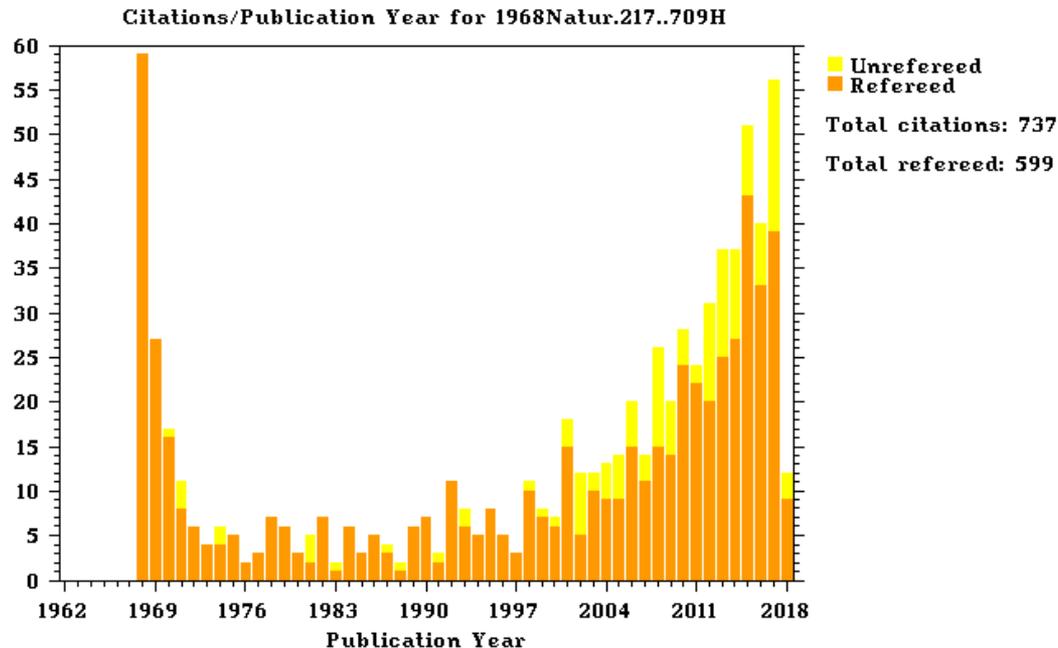
Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source

by

A. HEWISH
S. J. BELL
J. D. H. PILKINGTON
P. F. SCOTT
R. A. COLLINS

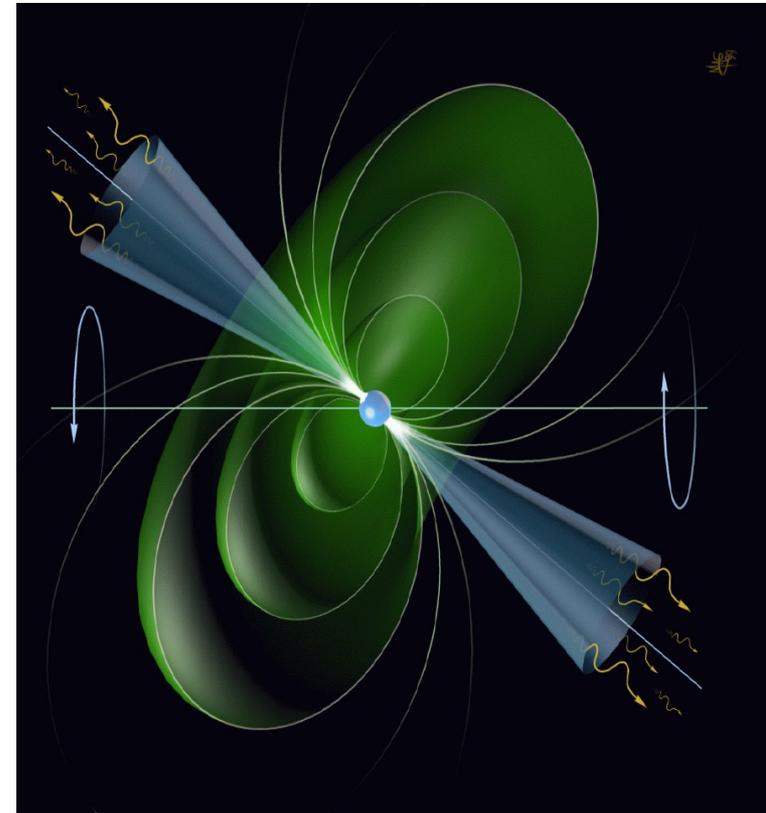
Mullard Radio Astronomy Observatory,
Cavendish Laboratory,
University of Cambridge

Unusual signals from pulsating radio sources have been recorded at the Mullard Radio Astronomy Observatory. The radiation seems to come from local objects within the galaxy, and may be associated with oscillations of white dwarf or neutron stars.

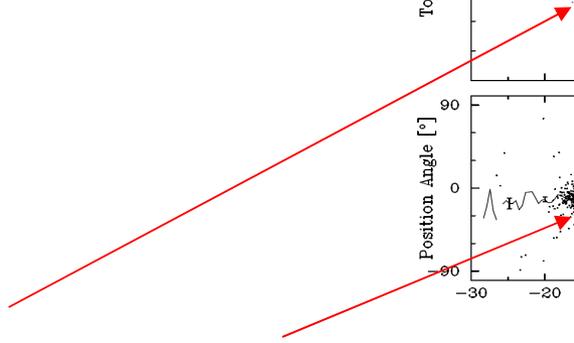
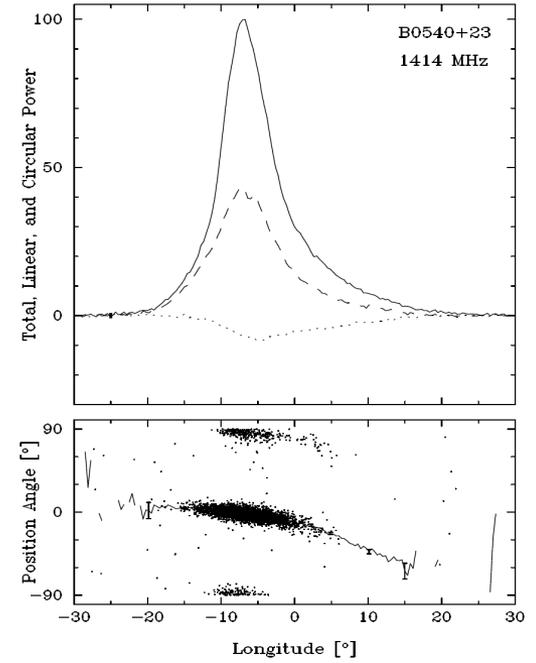
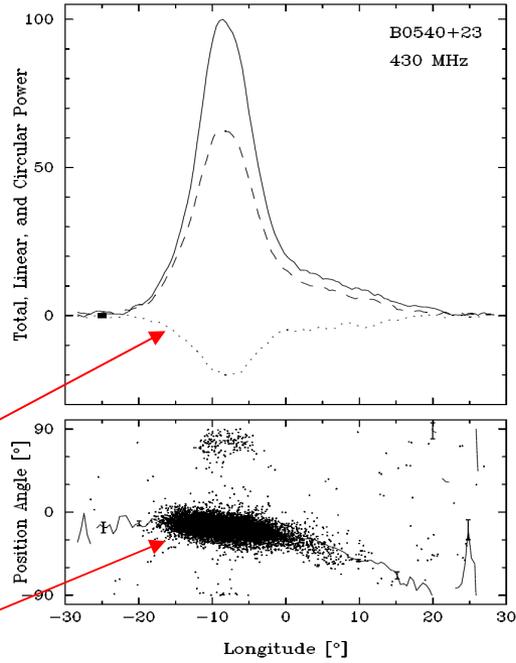


Радиопульсары – вращающиеся нейтронные звезды

- Масса $M \sim 1.4 M_{\odot}$
- Радиус $R \sim (10-15) \text{ km}$
- Период вращения $P \sim 1 \text{ s}$
- Магнитное поле $B_0 \sim 10^{12} \text{ G}$
- Радио светимость $L_r \sim 10^{28} \text{ erg/s}$ ($\sim 10^{-4} - 10^{-6}$)
- Когерентность: $T \sim 10^{28} \text{ K}$ ($\sim 10^{40} \text{ ???}$)

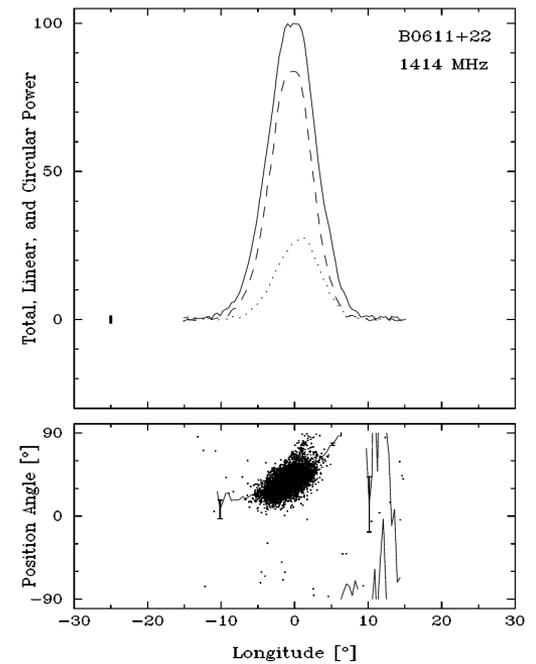
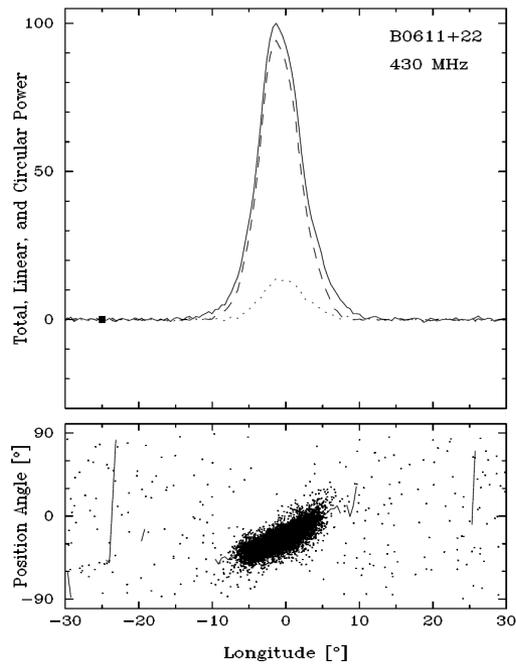


T.Hankins, J.Rankin.
Astron. J., **139**, 168
(2010)



V и $dp.a./d\phi$
корреляция

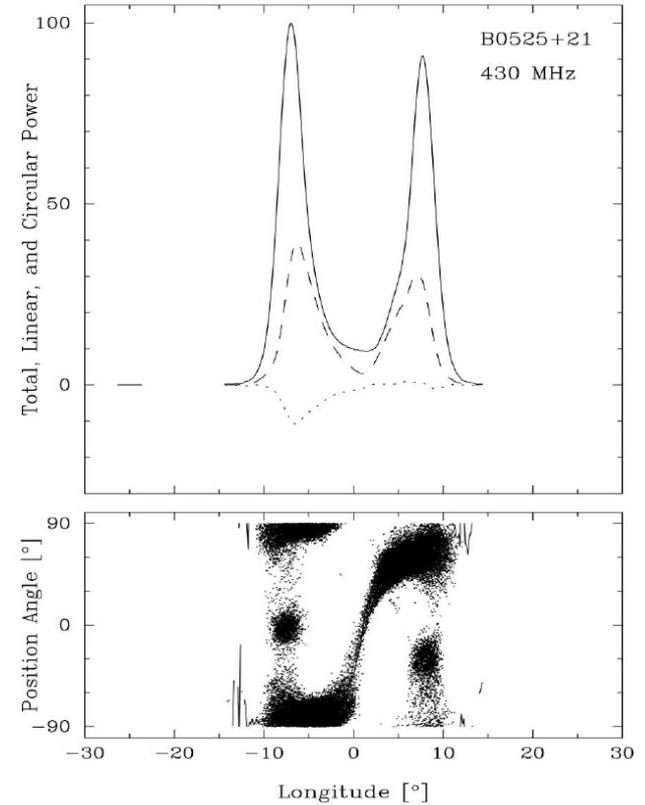
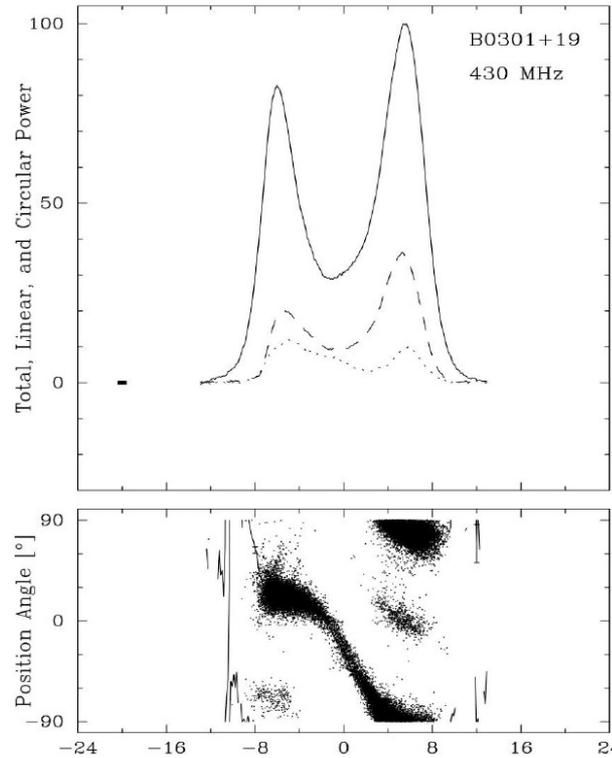
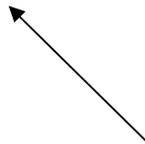
Одиночные – знаки
одинаковые



T.Hankins, J.Rankin.
Astron. J., **139**, 168
(2010)

V и $dp.a./d\phi$
корреляция

Двойные –
знаки разные

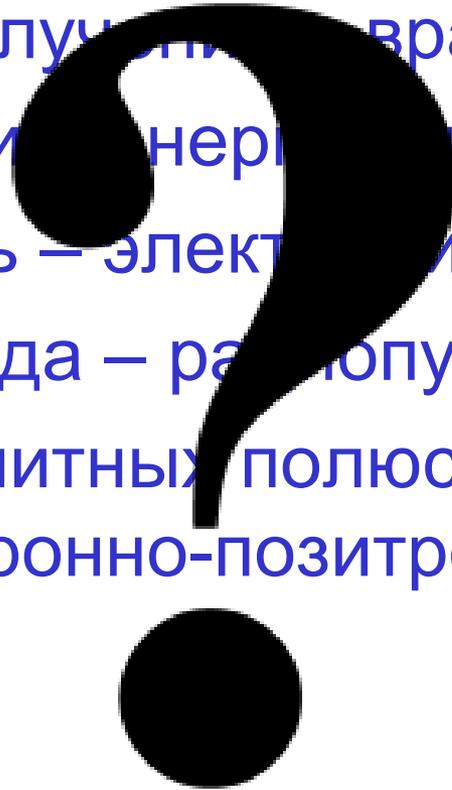


J.Han, R.Manchester, R.Xu, G.Qiao. MNRAS, **300**, 373 (1998)

Все ясно

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

Все ясно



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


Все ясно

- Как тормозится нейтронная звезда
(какова структура электрических токов в магнитосфере, ответственная за такое торможение).

ЧАСТЬ 2.

Немного истории



Ключевая электромагнитная идея

(Н.С.Кардашев, 1964; F.Pacini, 1967)

Магнито-дипольные (вакуумные) потери

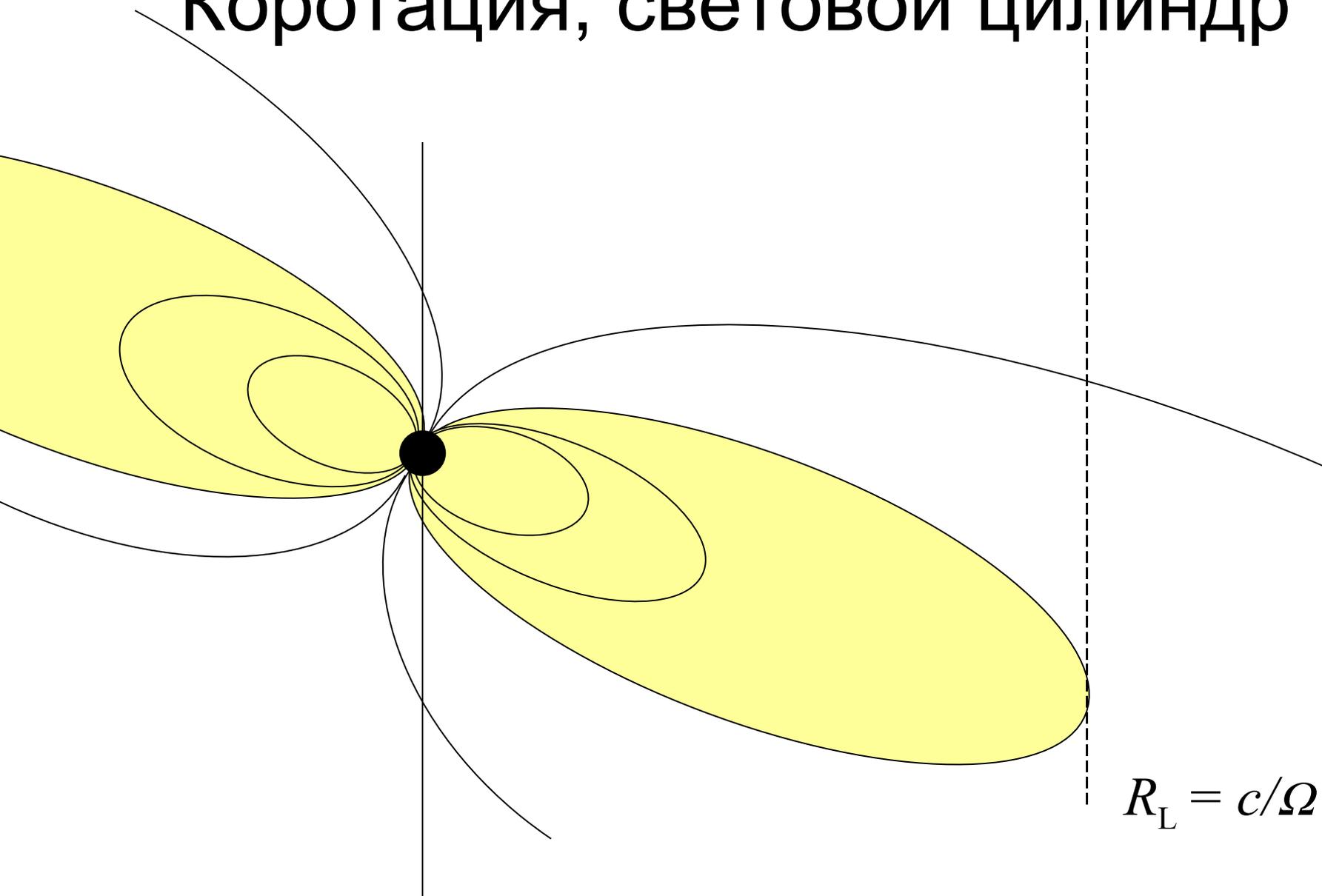
$$W_{\text{tot}} = -J_r \Omega \dot{\Omega} \approx \frac{1}{6} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2 \chi$$

$$W_{\text{tot}} \sim 10^{32} \text{ erg/s}$$

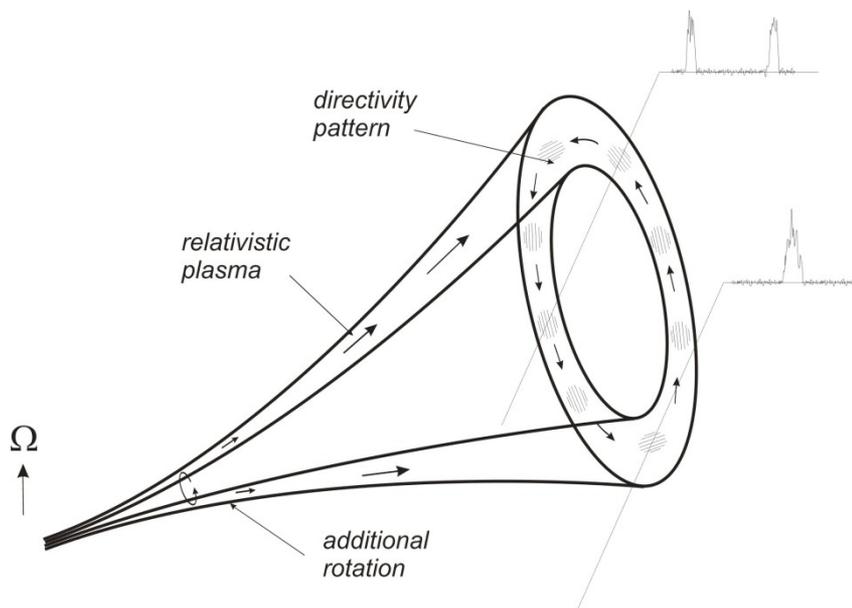
На самом деле все не так (магнитосфера заполняется плазмой),
но для оценки сойдет.



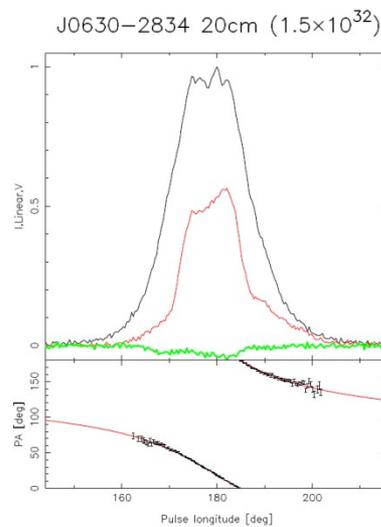
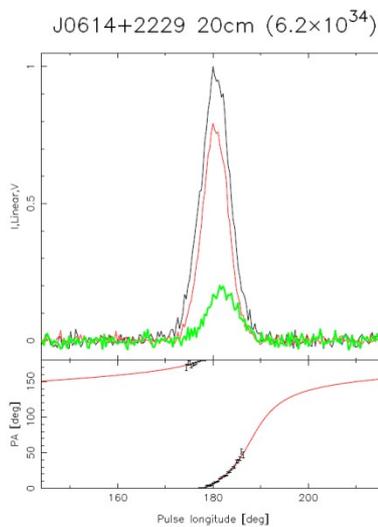
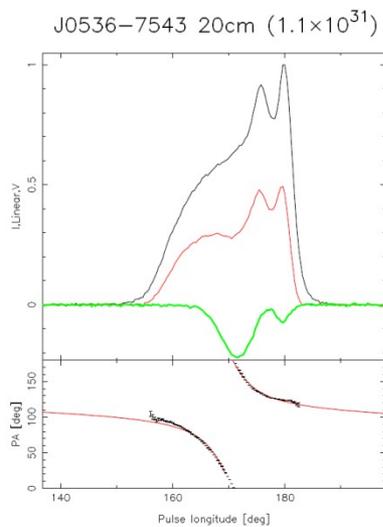
Коротация, световой цилиндр



Модель “полого конуса”



$$p.a. = \arctan \left(\frac{\sin \alpha \sin \phi}{\sin \alpha \cos \zeta \cos \phi - \sin \zeta \cos \alpha} \right)$$



“Hollow cone” model

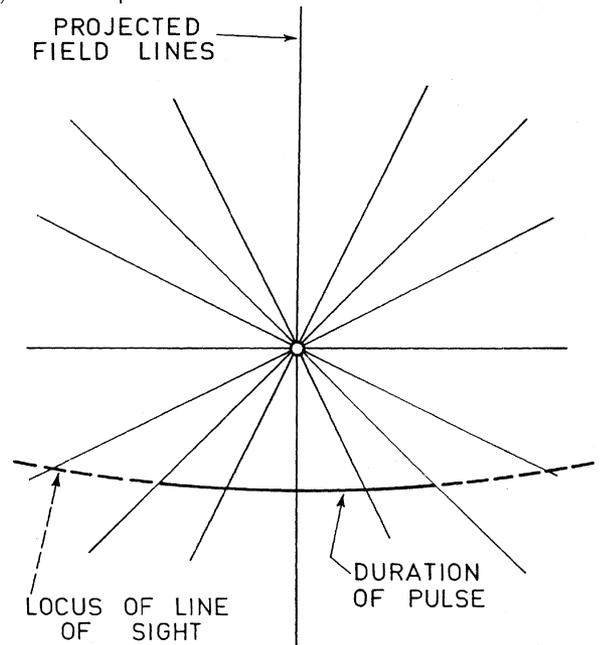
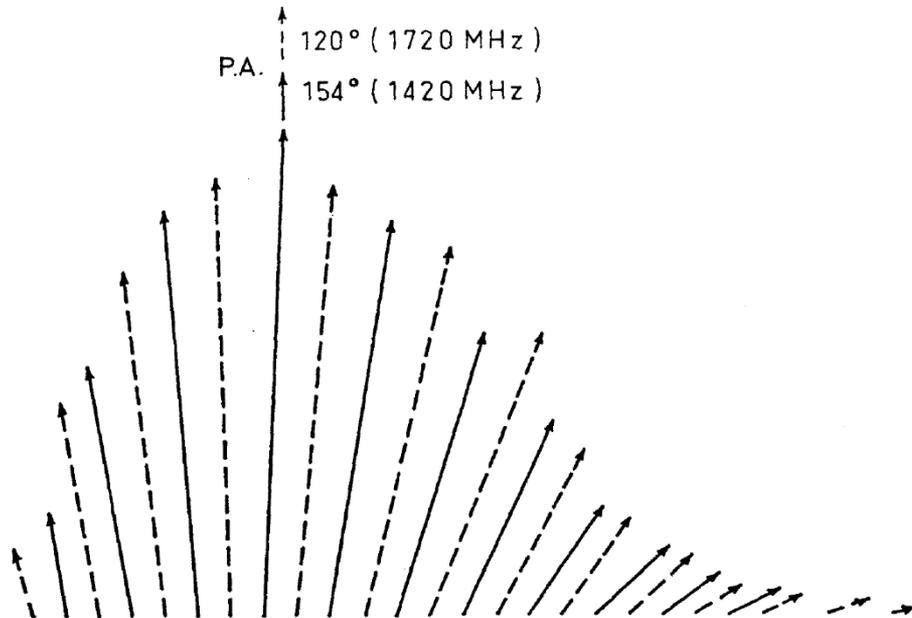
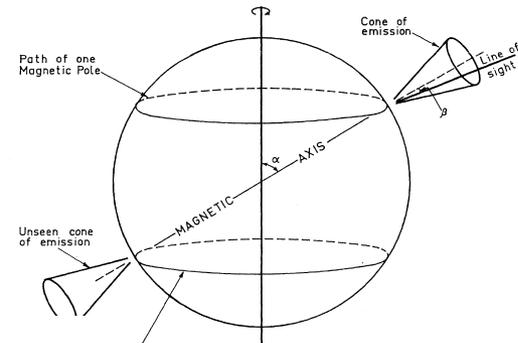
MAGNETIC POLES AND THE POLARIZATION STRUCTURE OF PULSAR RADIATION

V. RADHAKRISHNAN AND D. J. COOKE
Radiophysics Laboratory, CSIRO, Sydney, Australia

The very beginning:

V.Radhakrishnan, D.J.Cooke. *Ap Lett.*, **3**, 225 (1969)

Rotation Vector Model (RVM)



“Hollow cone” model

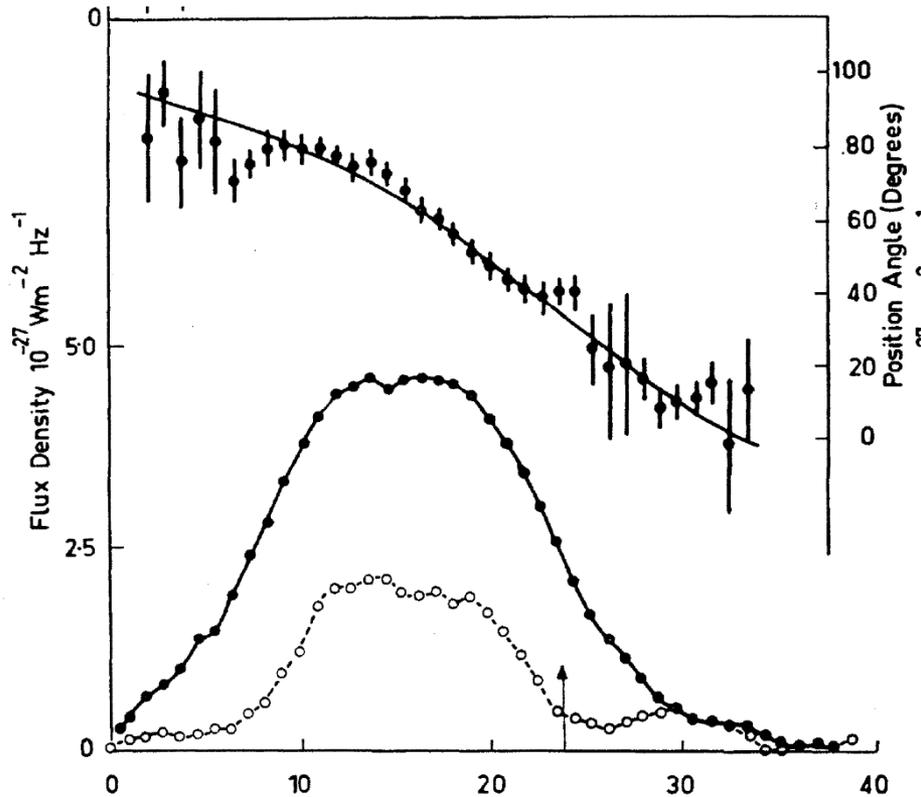
MEASUREMENTS OF THE LINEAR POLARIZATION OF SEVEN PULSARS AT 11-CM WAVELENGTH

D. MORRIS, U. J. SCHWARZ AND D. J. COOKE
Division of Radiophysics, CSIRO, Sydney, Australia

The very beginning

D. Morris, U.J. Schwarz, D.J. Cooke. *Ap Lett.* **5**, 181 (1970)

:



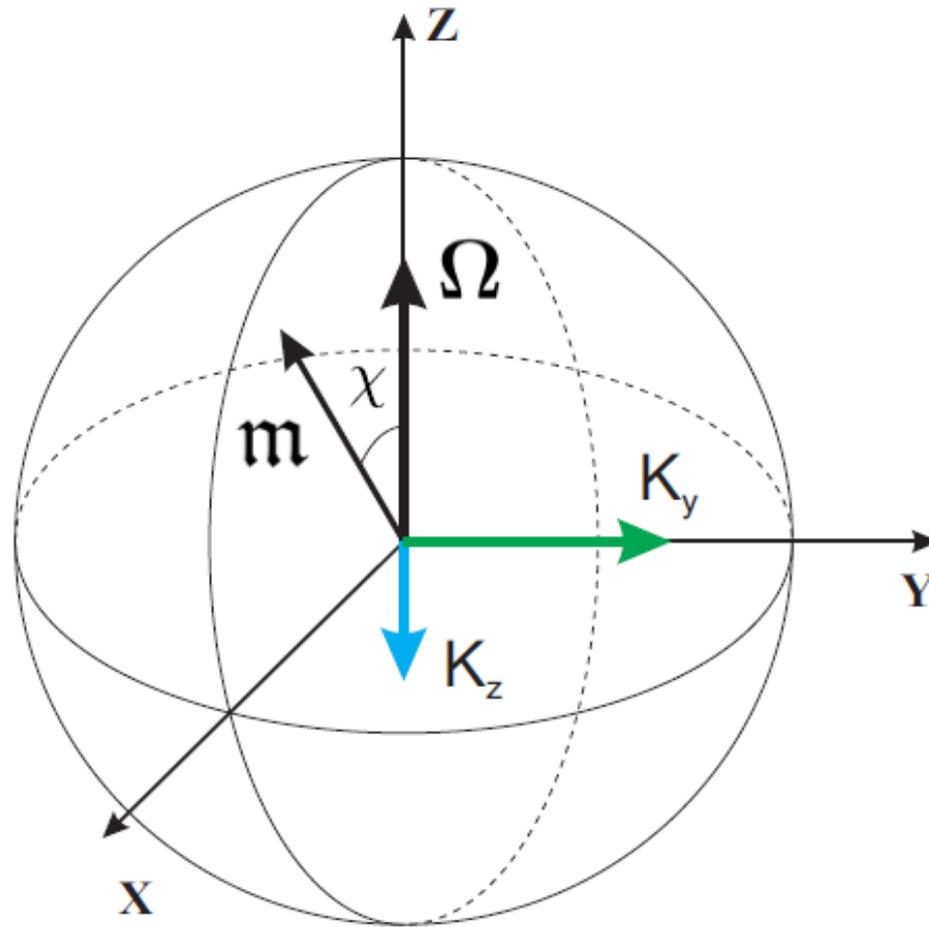
Sign!

$$\tan \theta = \frac{\sin D \sin \lambda}{\sin \phi \cos D - \cos \phi \sin D \cos \lambda}$$

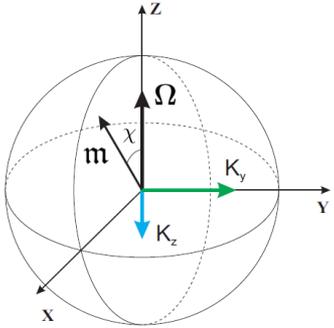
$$= \frac{\sin \lambda}{a_0^{-1} + \cos \phi (1 - \cos) \lambda},$$

$$a_0 = \left(\frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=0} \equiv \frac{\sin D}{\sin (\phi - D)}$$

Тормозящий момент



Магнито-дипольные потери



$$\mathbf{K} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{r} \times [\mathbf{J}_s \times \mathbf{B}]] dS$$

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

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

Магнито-дипольные потери

$$W_{\text{tot}} = -\Omega \mathbf{K}$$

Потери энергии

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

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

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

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\omega = \frac{R^3}{4\pi} \int \{ [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n}) \} d\omega$$

$$W_{\text{tot}} = \frac{c}{4\pi} \int (\beta_R \mathbf{B})(\mathbf{B}d\mathbf{S})$$

Магнито-дипольные потери

Потери энергии

$$\beta_R = \frac{\Omega \times \mathbf{r}}{c}$$

$$W_{\text{tot}} = \frac{c}{4\pi} \int (\beta_R \mathbf{B})(\mathbf{B} d\mathbf{S})$$

Вакуум (Deutsch)

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\omega = \frac{R^3}{4\pi} \int \{ [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + \cancel{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})} \} d\omega$$

$$H_r = R_1(a) \left\{ \frac{a^3}{r^3} \cos \chi \cos \theta + \frac{h_1/\rho}{(h_1/\rho)_\alpha} \sin \chi \sin \theta e^{i\lambda} \right\}$$

Магнито-дипольные потери

Потери энергии

$$\beta_R = \frac{\Omega \times \mathbf{r}}{c}$$

Вакуум (Deutsch)

$$1 \quad \Omega \quad \Omega^3 \quad 1 \quad 1 \quad = \Omega^4$$

$$H_r = R_1(a) \left\{ \frac{a^3}{r^3} \cos \chi \cos \theta + \frac{h_1/\rho}{(h_1/\rho)_\alpha} \sin \chi \sin \theta e^{i\lambda} \right\}$$

$$H_\theta = \frac{1}{2} R_1(a) \left\{ \frac{a^3}{r^3} \cos \chi \sin \theta + \left[\left(\frac{\rho^2}{\rho h'_2 + h_2} \right)_\alpha h_2 + \left(\frac{\rho}{h_1} \right)_\alpha \left(h'_1 + \frac{h_1}{\rho} \right) \right] \sin \chi \cos \theta e^{i\lambda} \right\}$$

$$H_\varphi = \frac{1}{2} R_1(a) \left\{ \left(\frac{\rho^2}{h'_2 + h_2} \right)_\alpha h_2 \cos 2\theta + \left(\frac{\rho}{h_1} \right)_\alpha \left(h'_1 + \frac{h_1}{\rho} \right) \right\} i \sin \chi e^{i\lambda}$$

$$E_r = \frac{1}{2} \omega \mu_0 a R_1(a) \left\{ -\frac{1}{2} \frac{a^4}{r^4} \cos \chi (3 \cos 2\theta + 1) + 3 \left(\frac{\rho}{\rho h'_2 + h_2} \right)_\alpha \frac{h_2}{\rho} \sin \chi \sin 2\theta e^{i\lambda} \right\}$$

$$E_\theta = \frac{1}{2} \omega \mu_0 a R_1(a) \left\{ -\frac{a^4}{r^4} \cos \chi \sin 2\theta + \left[\left(\frac{\rho h'_2 + h_2}{\rho} \right)_\alpha \frac{\rho}{\rho h'_2 + h_2} \cos 2\theta - \frac{h_1}{h_1(\alpha)} \right] \sin \chi e^{i\lambda} \right\}$$

$$E_\varphi = \frac{1}{2} \omega \mu_0 a R_1(a) \left\{ \left(\frac{\rho}{\rho h'_2 + h_2} \right)_\alpha \frac{\rho h'_2 + h_2}{\rho} - \frac{h_1}{h_1(\alpha)} \right\} i \sin \chi \cos \theta e^{i\lambda}$$

Ландау, Лифшиц, Теория поля

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

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

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

$$E_r^\perp = 0,$$

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

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

Vacuum: magneto-dipole

Потери энергии

$$\beta_R = \frac{\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}}{c}$$

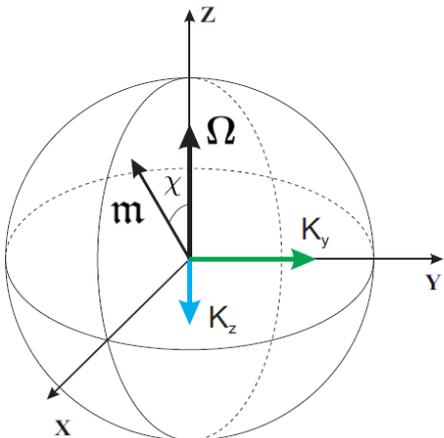
$$W_{\text{tot}} = \frac{c}{4\pi} \int (\beta_R \mathbf{B})(\mathbf{B} d\mathbf{S})$$

Vacuum (Deutsch)

$$1 \quad \Omega \quad \Omega^3 \quad 1 \quad 1 \quad = \Omega^4$$

Vacuum (L&L) (2/3)

$$1 \quad \Omega \quad \Omega^3 \quad 1 \quad 1 \quad = \Omega^4$$



Vacuum: magneto-dipole

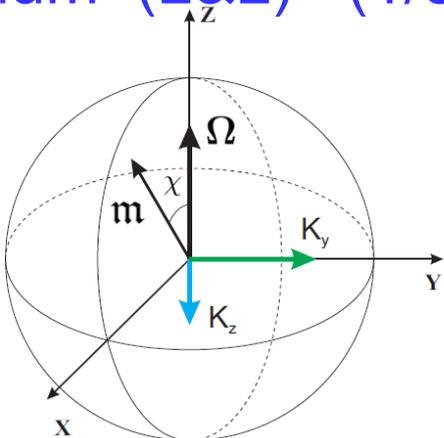
Потери энергии

$$\beta_R = \frac{\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}}{c}$$

$$W_{\text{tot}} = \frac{c}{4\pi} \int (\beta_R \mathbf{B})(\mathbf{B} d\mathbf{S})$$

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\omega = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\omega$$

Vacuum (Deutsch)	1	Ω	Ω^3	1	1	$= \Omega^4$
Vacuum (L&L) (2/3)	1	Ω	Ω^3	1	1	$= \Omega^4$
Vacuum (L&L) (1/3)	1	Ω	1	Ω^3	1	$= \Omega^4$



$$\mathbf{B}^{(3)} = -\frac{2}{3} \frac{m}{R^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^3 \mathbf{e}_{y'}$$

ВАЖНЫЙ ВЫВОД

Могут играть роль оба слагаемых

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\sigma = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\sigma$$

Магнитосфера – первые решения

- Уравнение Mestel'я
- Пульсарное уравнение + первые аналитические решения
- Зазор Ruderman-Sutherland (нет эжекции с поверхности)
- Зазор Arons (свободный выход)
- БГИ – полная экранировка магнитодипольного излучения
- БГИ – предсказание областей с $E > B$

Бессиловое приближение

Пренебрегаем энергией частиц

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

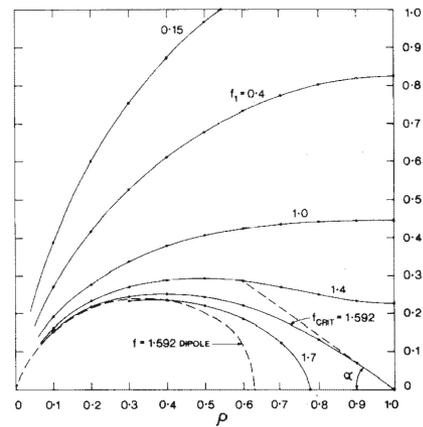
Пульсарное уравнение

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

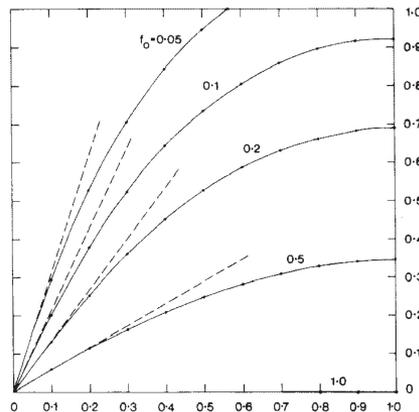
(Michel 1973, Mestel 1993, Scharlemann & Wagoner 1973,
Okamoto 1974, Mestel & Wang 1979)

Первые решения

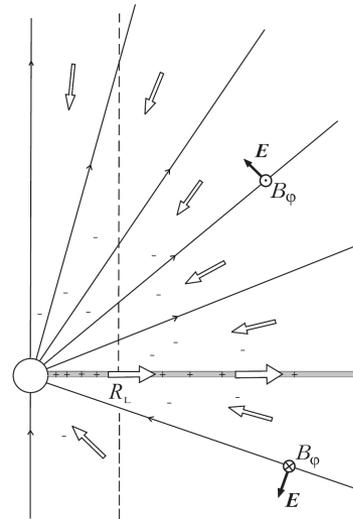
$$-\left(1 - \frac{\Omega_F^2 \varpi^2}{c^2}\right) \nabla^2 \Psi + \frac{2}{\varpi} \frac{\partial \Psi}{\partial \varpi} - \frac{16\pi^2}{c^2} I \frac{dI}{d\Psi} + \frac{\varpi^2}{c^2} (\nabla \Psi)^2 \Omega_F \frac{d\Omega_F}{d\Psi} = 0$$



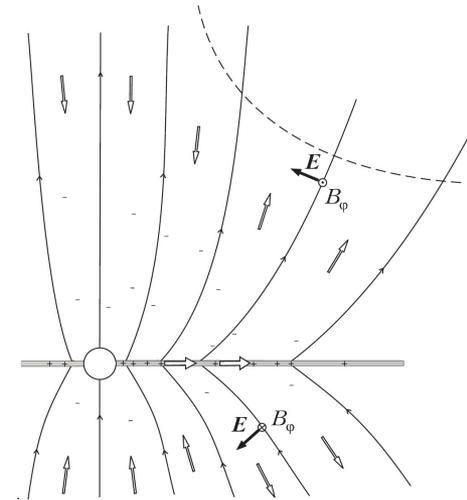
F. Michel (1973)



F. Michel (1973)

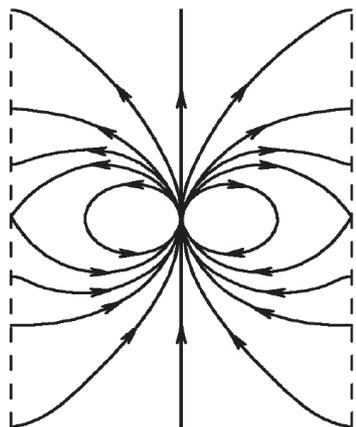


F. Michel (1973)

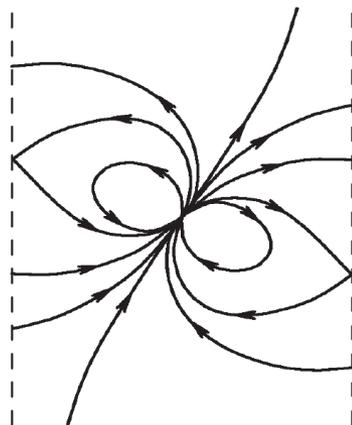


R. Blandford (1976)

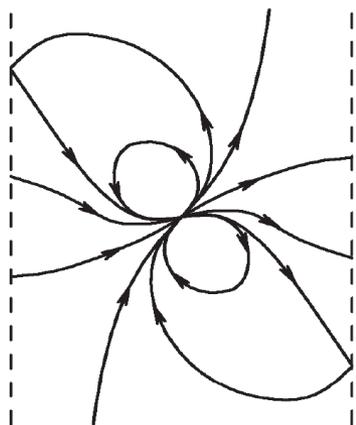
Наклонный ротатор, $I = 0$



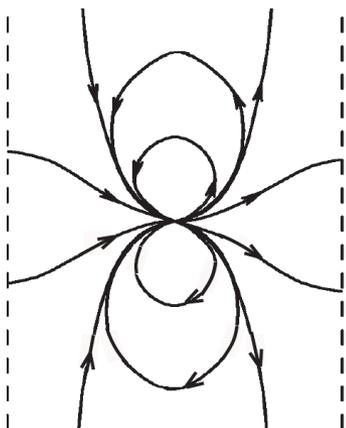
$\chi = 0^\circ$



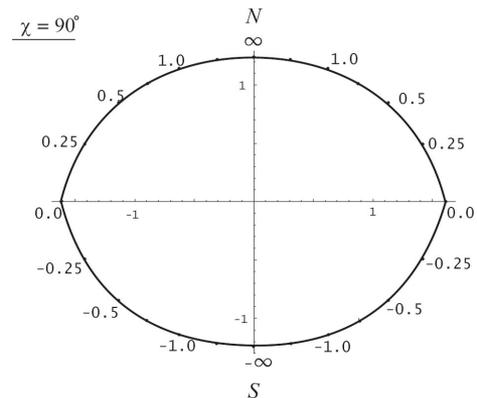
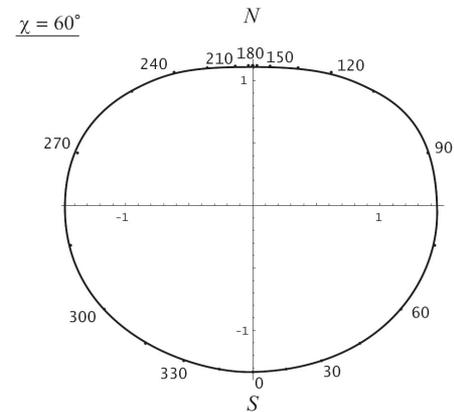
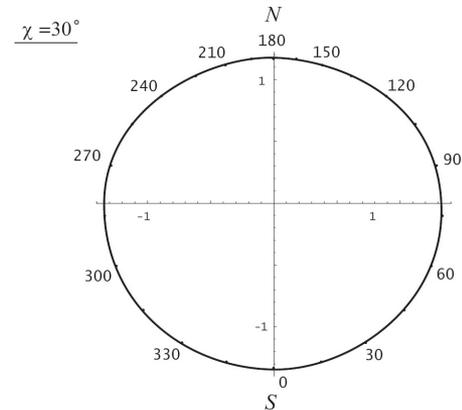
$\chi = 30^\circ$



$\chi = 60^\circ$



$\chi = 90^\circ$

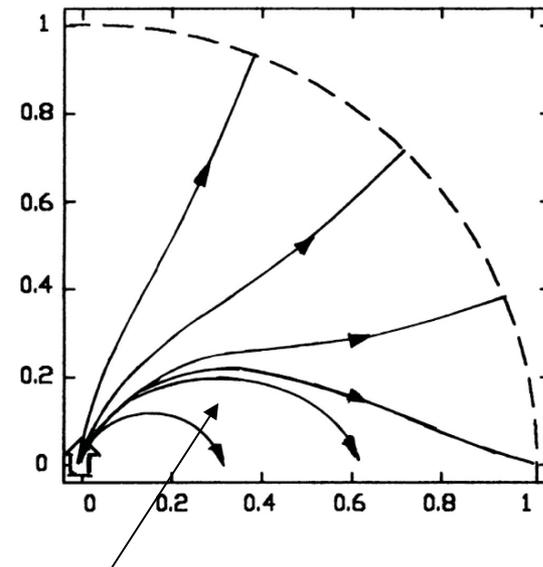
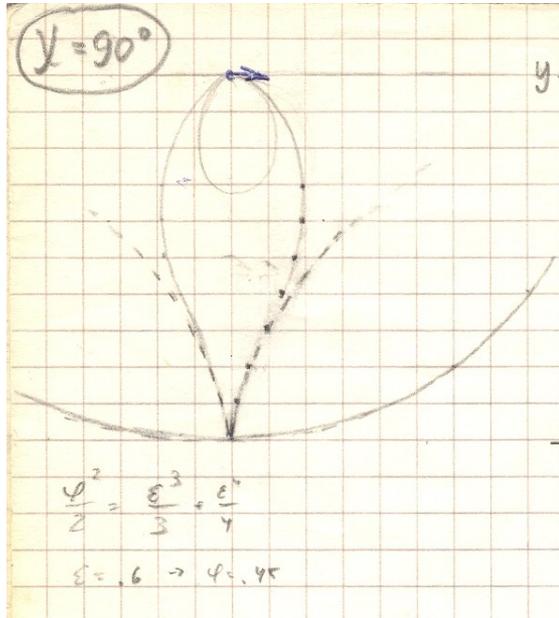


ВБ, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин, ЖЭТФ, **85**, 235 (1983)

Ортогональный ротатор

ВБ, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин, ЖЭТФ, **85**, 235 (1983)

L.Mestel, P.Panagi, S.Shibata, MNRAS, **309**, 388 (1999)



Экваториальная плоскость

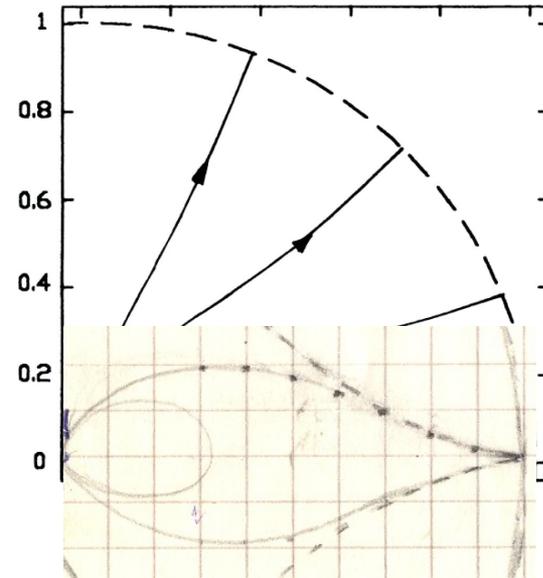
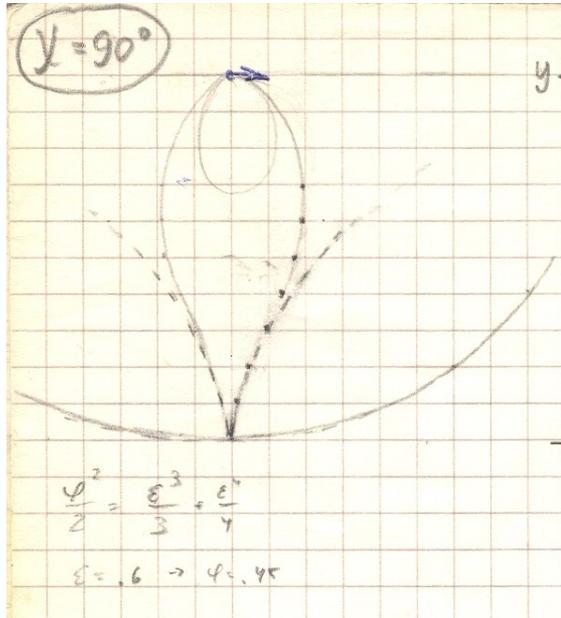
Нет потока энергии через световой цилиндр

$$B_\varphi \propto (1 - x_r^2)^2$$

Ортогональный ротатор

ВБ, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин, ЖЭТФ, **85**, 235 (1983)

L.Mestel, P.Panagi, S.Shibata, MNRAS, **309**, 388 (1999)



Экваториальная плоскость

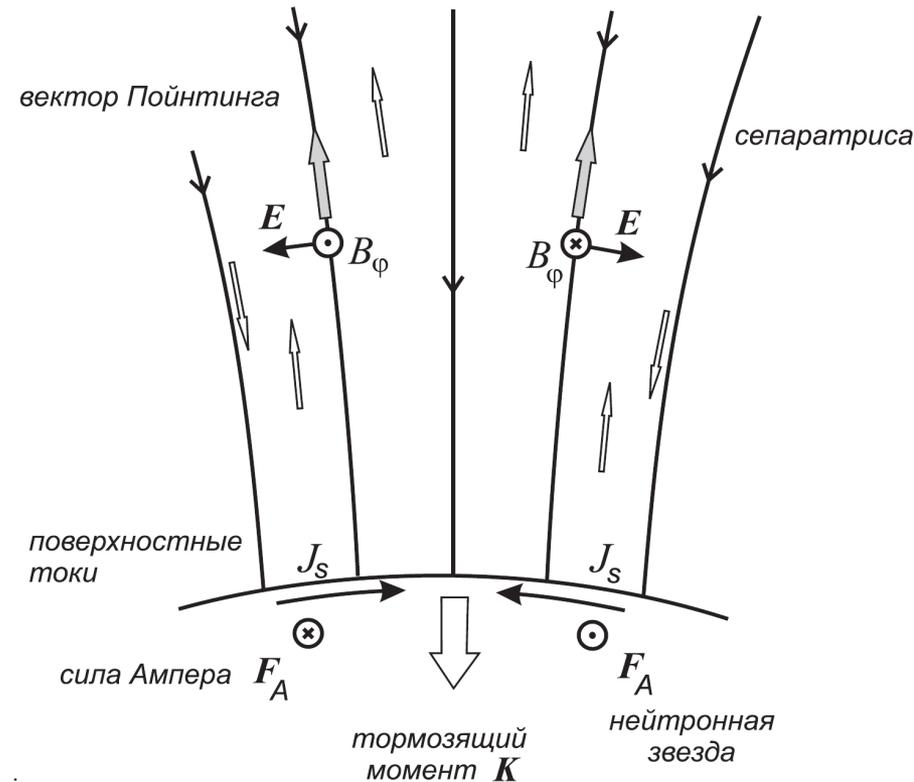
Нет потока энергии через световой цилиндр

$$B_\varphi \propto (1 - x_r^2)^2$$

Токовые потери

Для токовых потерь необходимо

- Плазма в магнитосфере,
- Регулярное магнитное поле,
- Вращение (поле E , потенциал δU),
- Продольный ток I (тороидальное магнитное поле B).



Ортогональный ротатор

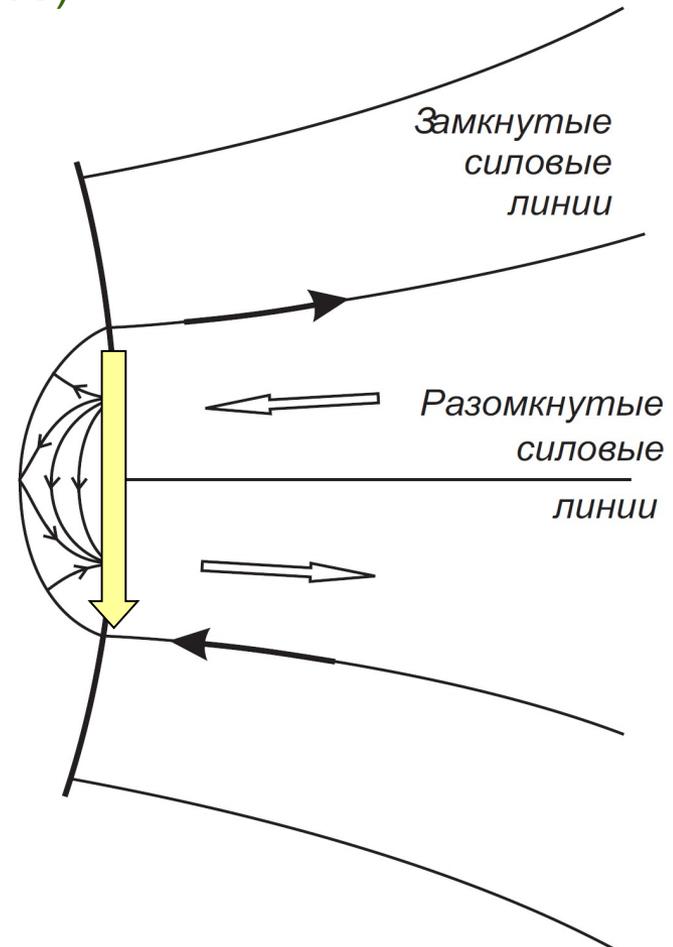
ВБ, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин, ЖЭТФ, **85**, 235 (1983)

$$j_{GJ} \approx \frac{\Omega B}{2\pi} \cos \theta$$

$$\mathbf{K} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{r} \times [\mathbf{J}_s \times \mathbf{B}]] dS$$

↑ ↑

$\Omega \uparrow$ $m \rightarrow$



Ортогональный ротатор

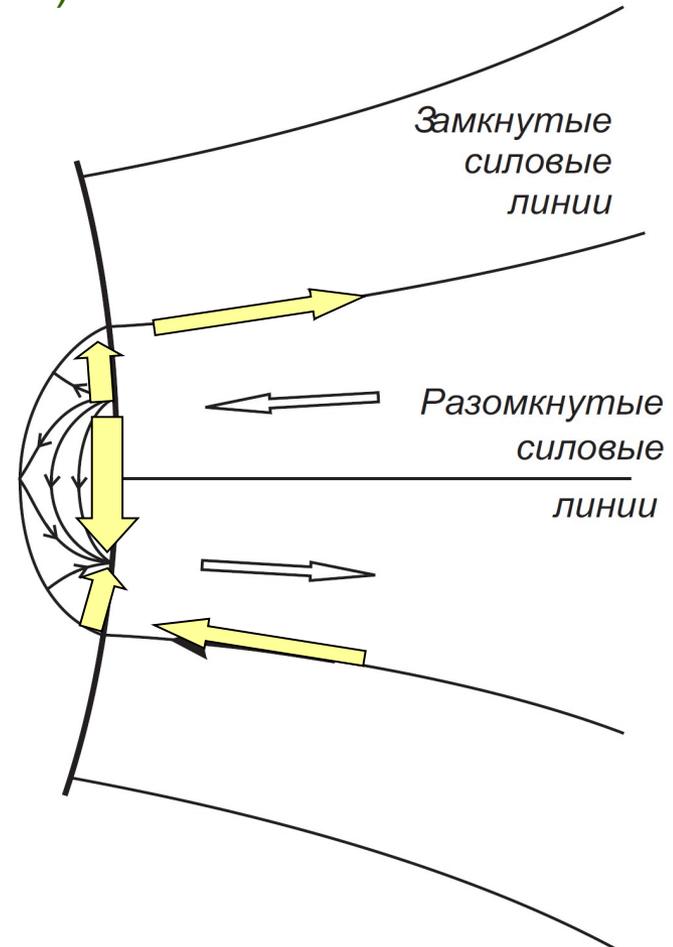
ВБ, А.В.Гуревич, Я.Н.Истомин, ЖЭТФ, **85**, 235 (1983)

$$\dot{j}_{GJ} \approx \frac{\Omega B}{2\pi} \cos \theta$$

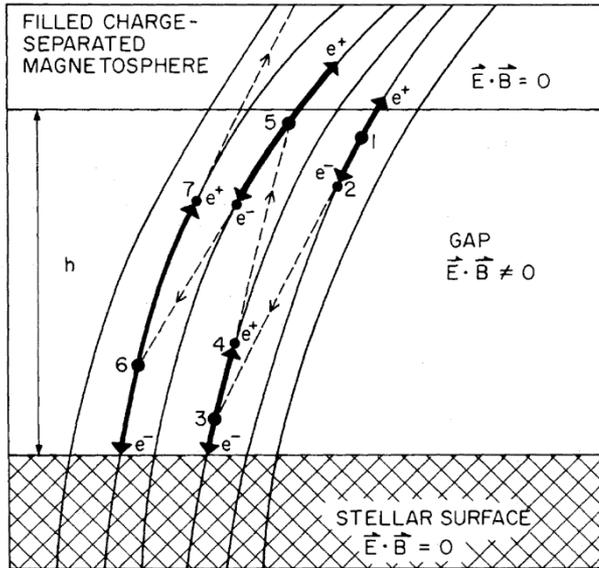
$$\mathbf{K} = \frac{1}{c} \int [\mathbf{r} \times [\mathbf{J}_s \times \mathbf{B}]] dS \quad \Omega \uparrow \quad m \rightarrow$$

↑ ↑

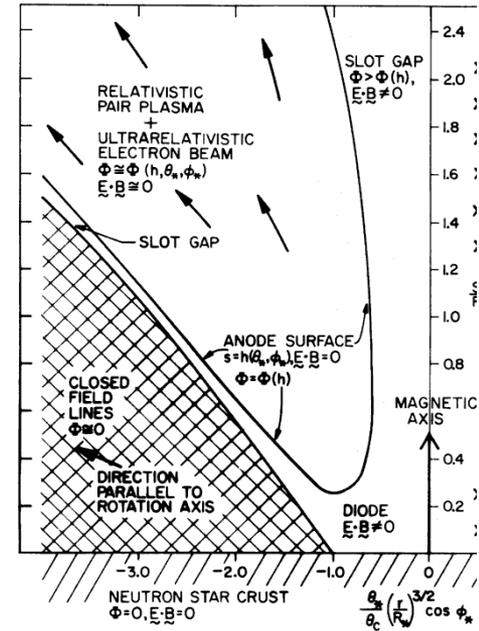
$$W_{\text{tot}} = c_{\perp} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) \dot{i}_A$$



Внутренний зазор

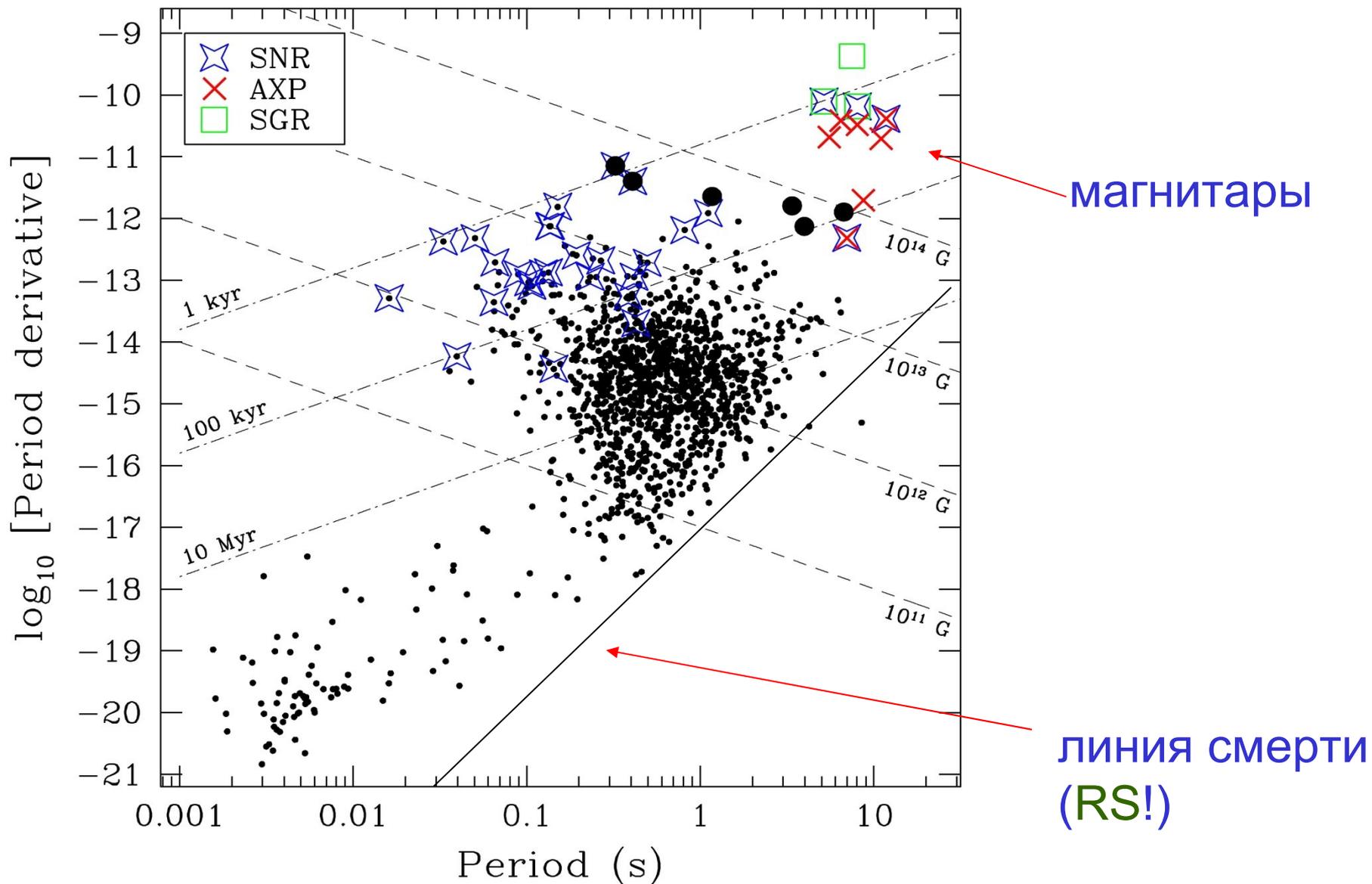


Ruderman & Sutherland (1975)
Eidman et al (1975)



Arons et al (1977-1981)
Mestel et al

RRdot – линия смерти



1983 – первые результаты

Основные результаты

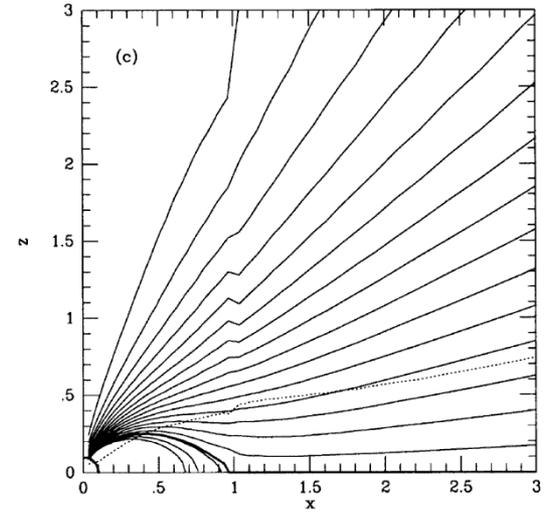
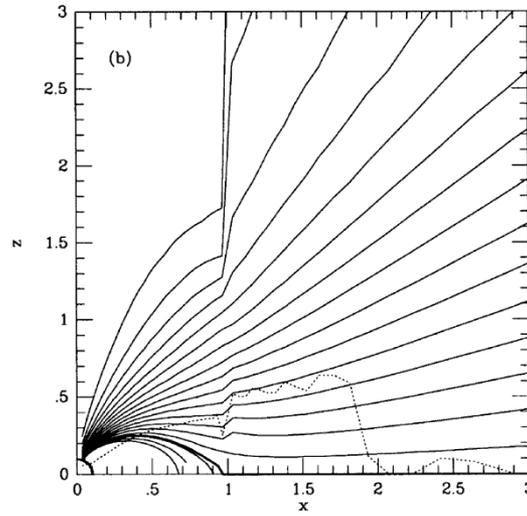
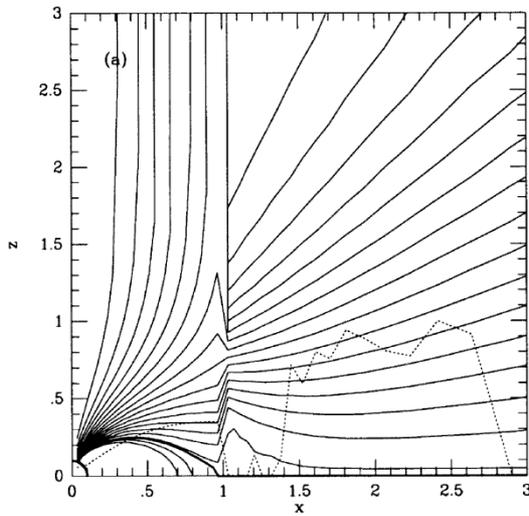
- Нейтронная звезда работает как радиопульсар, если в районе магнитных полюсов генерируется электронно-позитронная плазма
- **Arons** model forever
- Поняты основные свойства магнитосферы
- Нет магнитодипольных потерь

Проблемы

- Линия смерти соответствует **RS** (сдвинутый диполь? $n > 2$?)
- Нет самосогласованного решения с ветром
- Alignment/counter-alignment

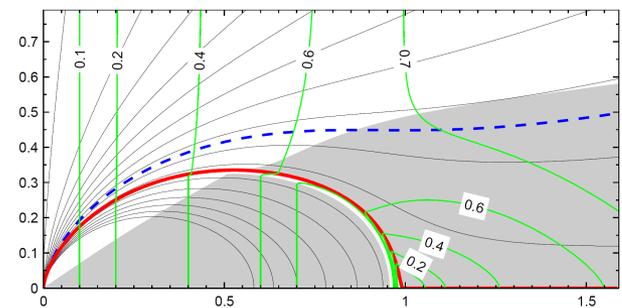
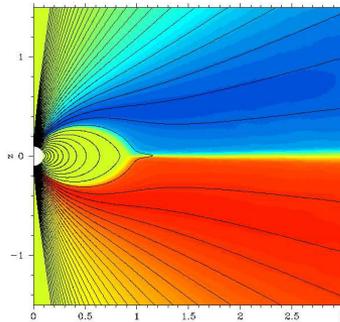
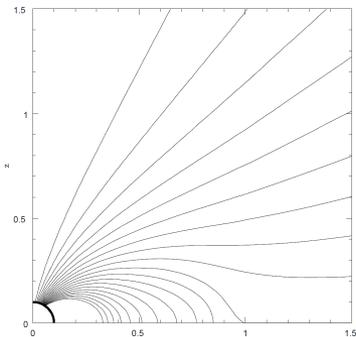
Ренессанс (1999 – 2006)

- **Contopoulos-Kazanas-Fendt** – первыми численно решили пульсарное (осесимметричное) уравнение: экваториальный слой, HE **GJ** ток
- Многочисленные подтверждения
- **Vogovalov** – бессилловое решение для монополярного ветра в неортогональном случае



I.Contopoulos, D.Kazanas & Ch.Fendt, ApJ, **511**, 351 (1999)

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



A.Gruzinov (2005)

S.Komissarov (2005)

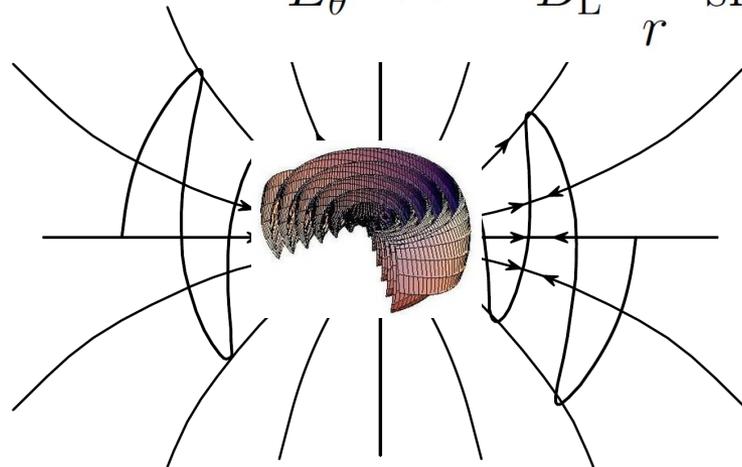
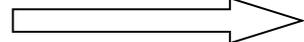
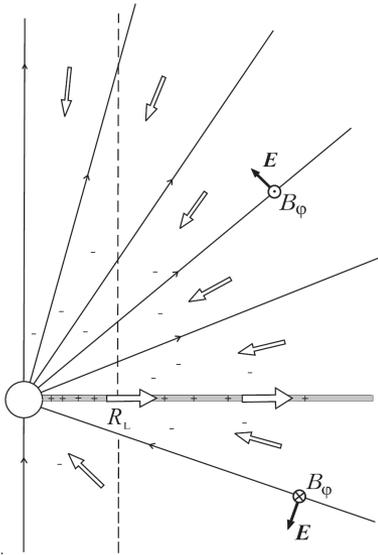
A.Timokhin (2005)

Аналитически – striped wind

$$B_r = B_L \frac{R_L^2}{r^2} \Theta(\Phi),$$

$$B_\varphi = -B_L \frac{R_L}{r} \sin \theta \Theta(\Phi),$$

$$E_\theta = -B_L \frac{R_L}{r} \sin \theta \Theta(\Phi).$$



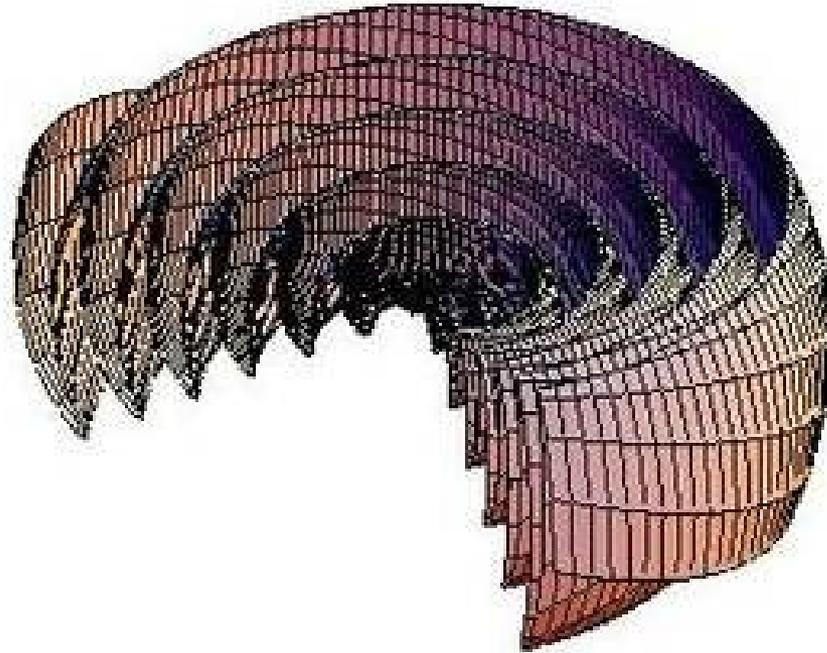
F.C.Michel (1973)

S.V.Bogovalov (1999)

$$\Phi = \cos \theta \cos \chi - \sin \theta \sin \chi \cos [\varphi - \Omega (t - r/c)]$$

$$S \propto \sin^2 \theta$$

Аналитически – striped wind



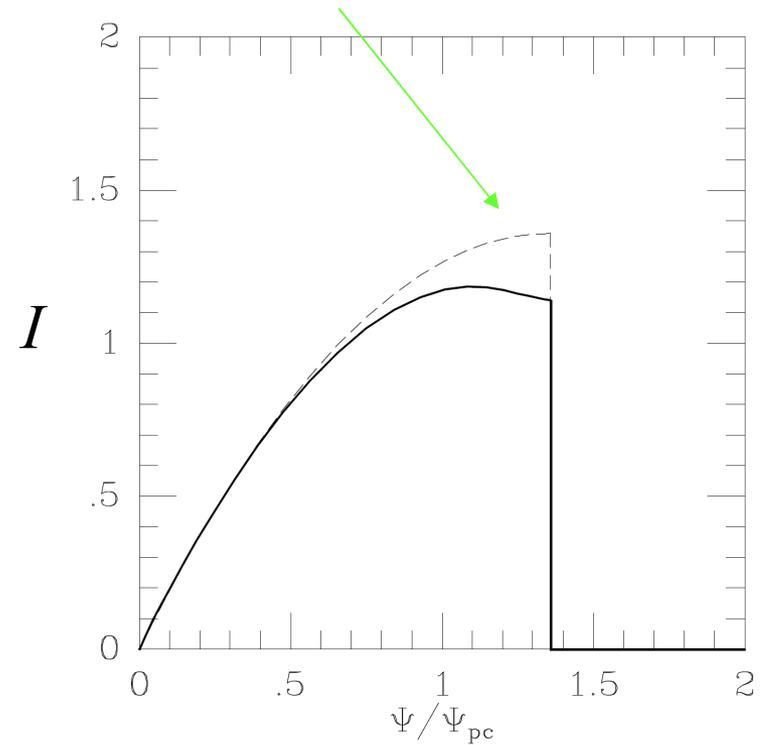
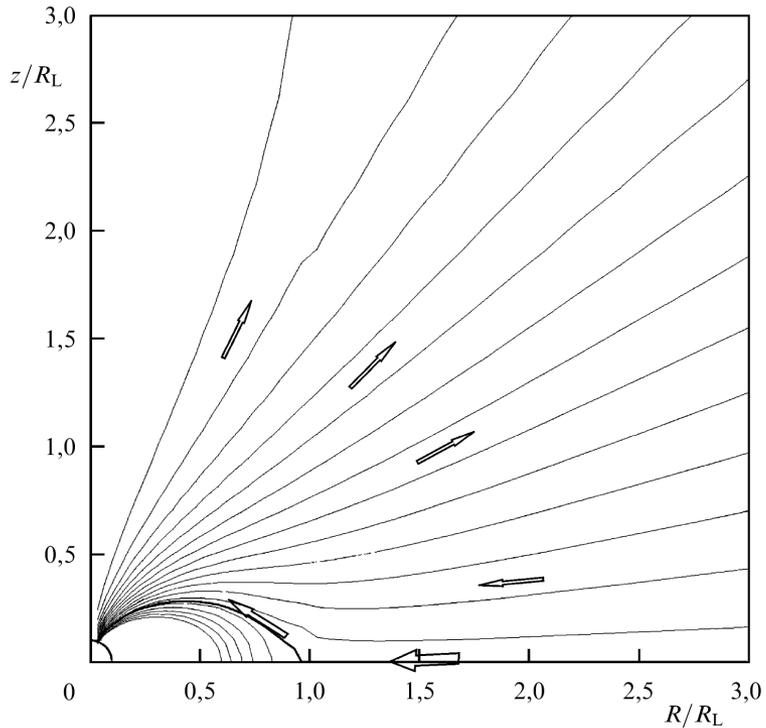
S.V.Bogovalov (1999)

$$\Phi = \cos \theta \cos \chi - \sin \theta \sin \chi \cos [\varphi - \Omega (t - r/c)]$$

$$S \propto \sin^2 \theta$$

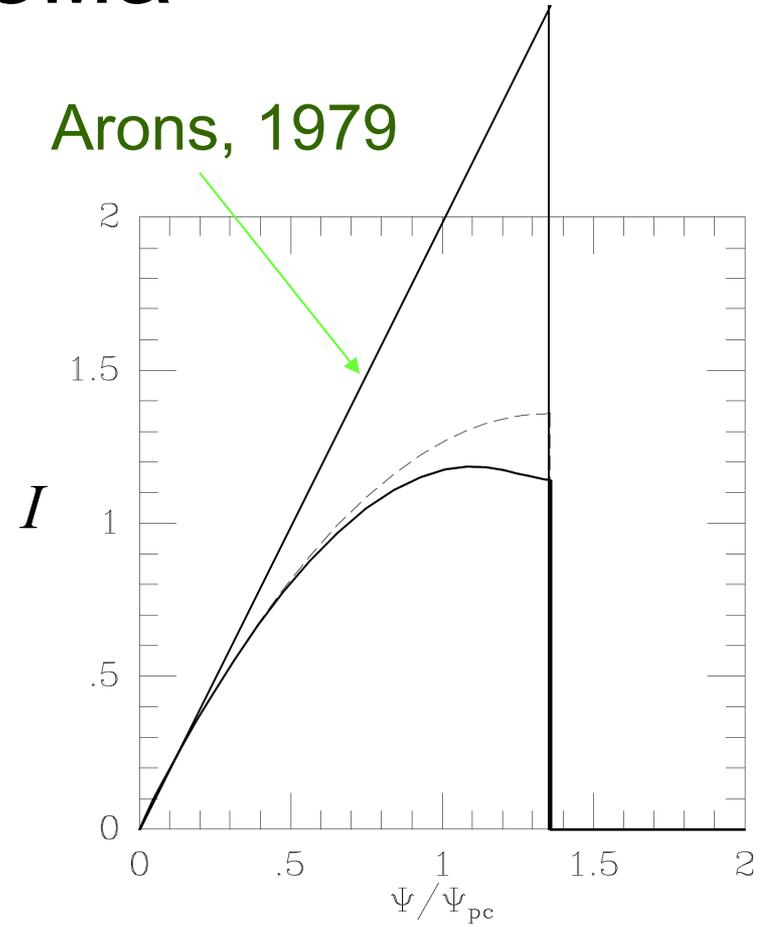
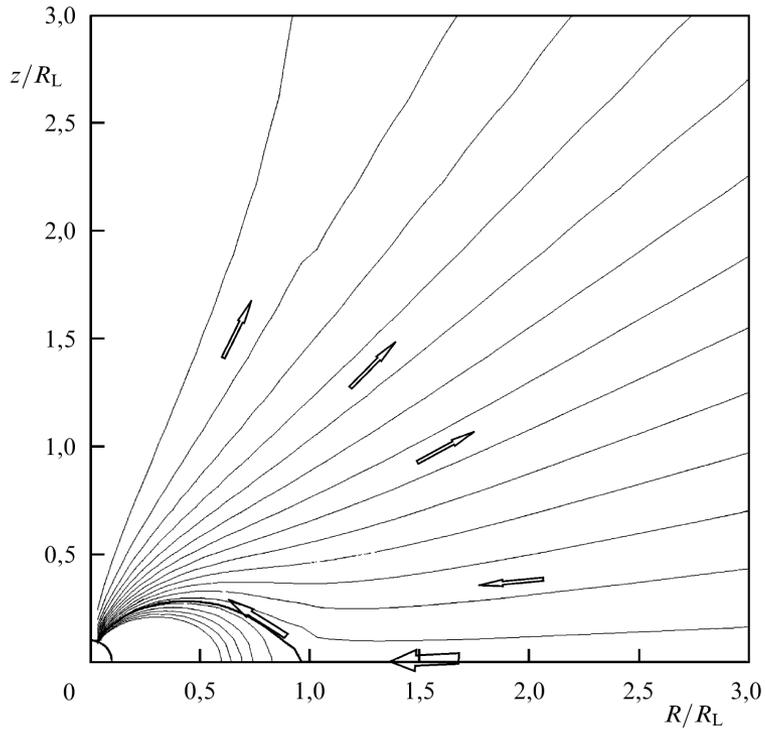
Проблема

Michel, 1973



I.Contopoulos, D.Kazanas & Ch.Fendt,
ApJ, **511**, 351 (1999)

Проблема



I.Contopoulos, D.Kazanas & Ch.Fendt,
ApJ, **511**, 351 (1999)

Ренессанс (1999 – 2006)

Основные результаты

- Получено ‘универсальное решение’ (осесимметричное) (с определенным продольным током!)
- Токовый слой, split-monopole, Y-точка
- Нет магнитодипольных потер

Проблемы

- Модель Arons’а и ‘универсальное решение’ противоречат друг другу
- Как поддержать необходимый ток (Mestel & Shibata, Beloborodov)?

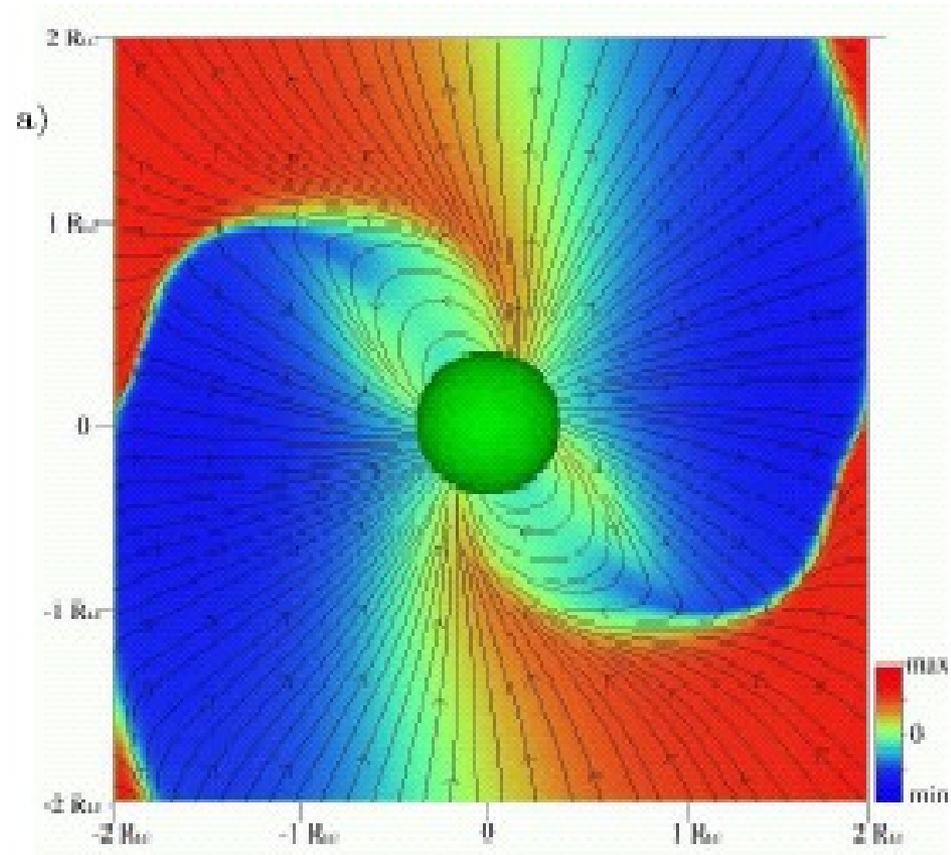
Новое время (2006 –

- **Spitkovsky** – бессиловое решение для наклонного ротатора
- Princeton: MHD – наклонный случай
- Первые PIC-расчеты для внутреннего зазора

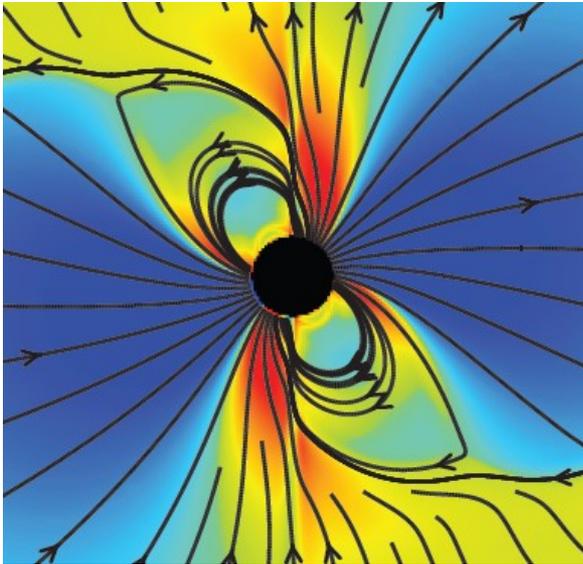
Наклонный ротатор

A.Spitkovsky, ApJ Lett., **648**, L51 (2006)

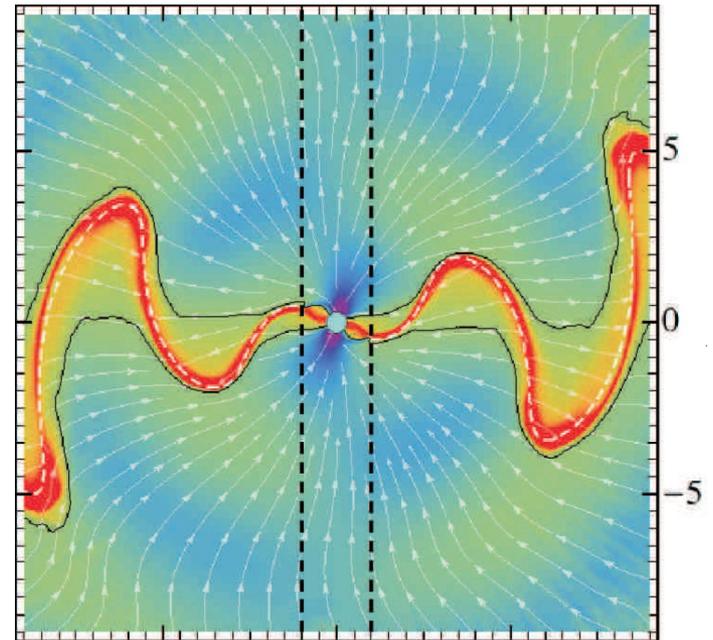
$$W_{\text{tot}}^{(\text{MHD})} \approx \frac{1}{4} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^2} (1 + \sin^2 \chi)$$



Наклонный ротатор



A.Tchekhovskoy,
A.Spitkovsky, J.Li,
MNRAS, **431**, 1 (2013)



I.Contopoulos et al

Ветер – не split-monopole

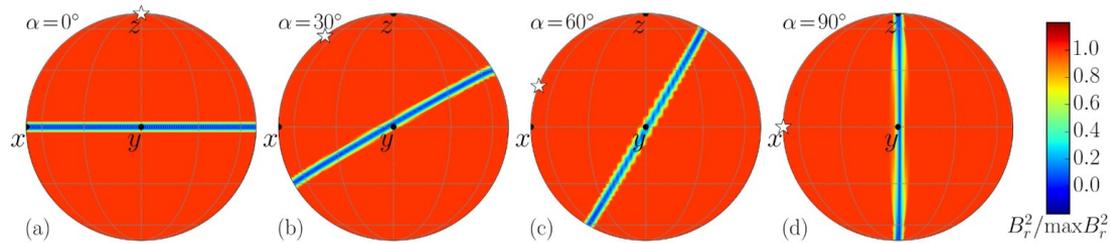
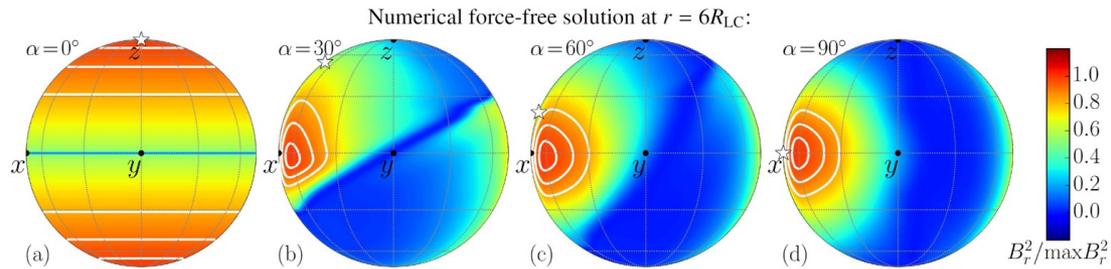


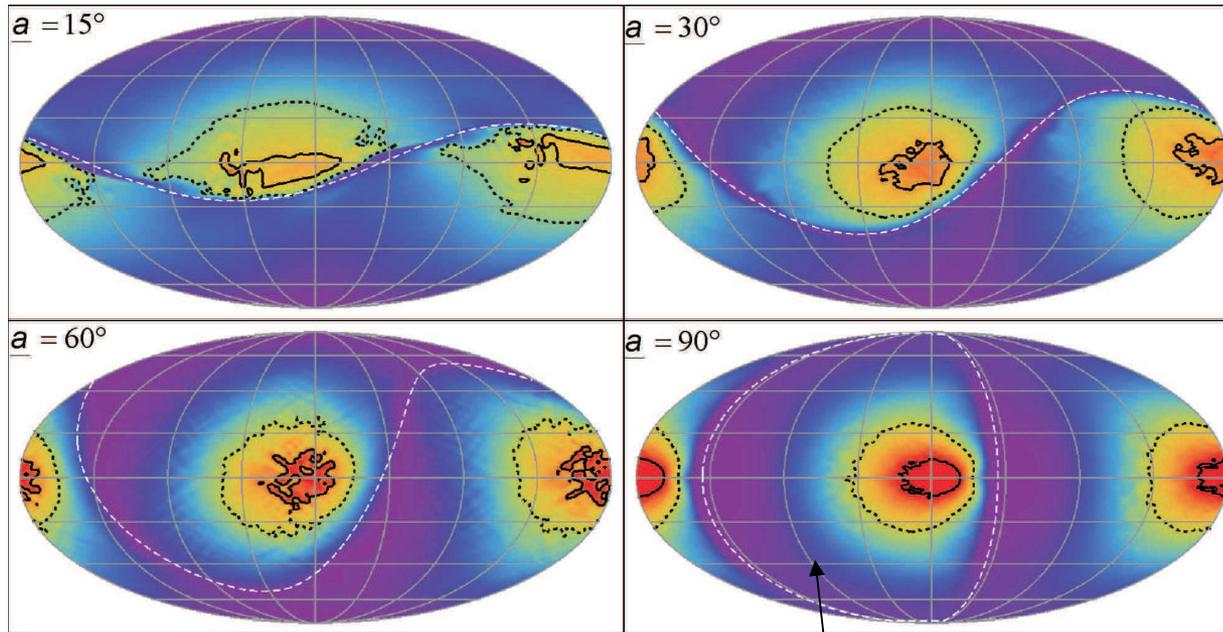
Figure 12. Colour-coded surface distribution of B_r^2 in the split-monopole solution (Bogovalov 1999). The current sheet, in which the radial magnetic field vanishes, describes the orientation of the current sheet in the numerical force-free solutions shown in Fig. 6.



A.Tchekhovskoy, A.Philippov, A.Spitkovsky MNRAS, **457**, 3384 (2015)

$$W_{\text{tot}}(\theta) = \sin^2 \theta B_r^2(\theta)$$

Ветер – не split-монополь



C.Kalapocharakos, I.Contopoulos, D.Kazanas, *MNRAS*, **420**, 2793 (2012)

Новое решение

$$B_r \approx B_0 \frac{R^2}{r^2} \sin \theta \cos(\varphi - \Omega t + \Omega r/c),$$

$$B_\varphi = E_\theta \approx -B_0 \frac{\Omega R^2}{cr} \sin^2 \theta \cos(\varphi - \Omega t + \Omega r/c).$$

Главные результаты

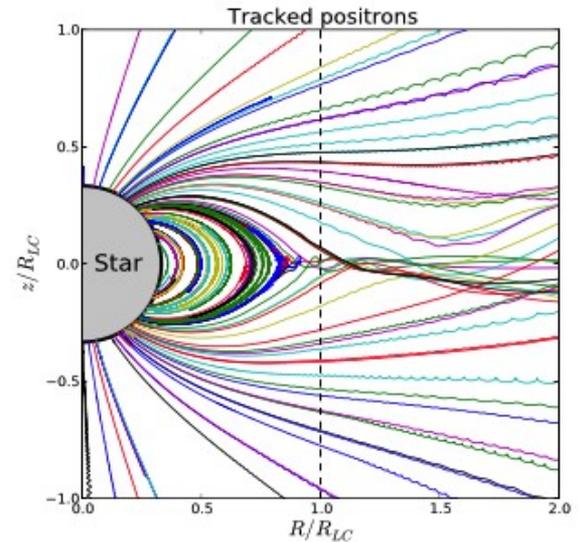
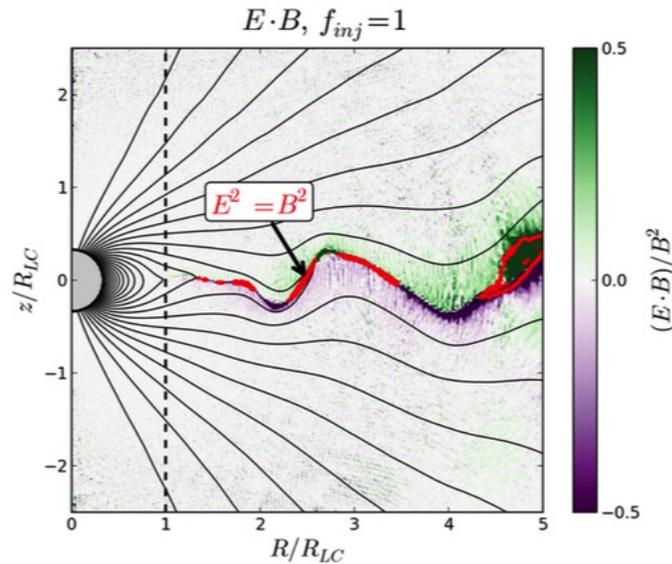
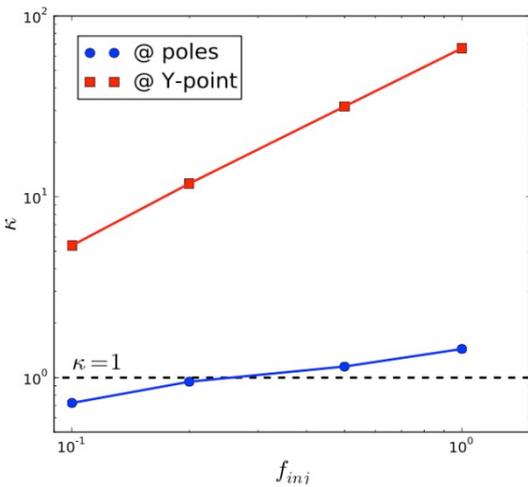
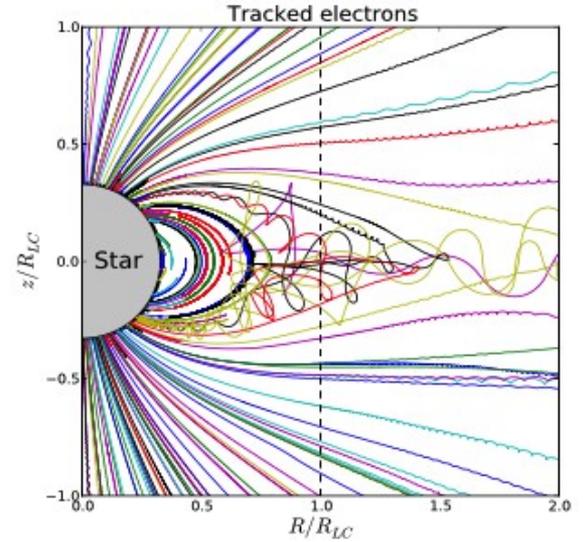
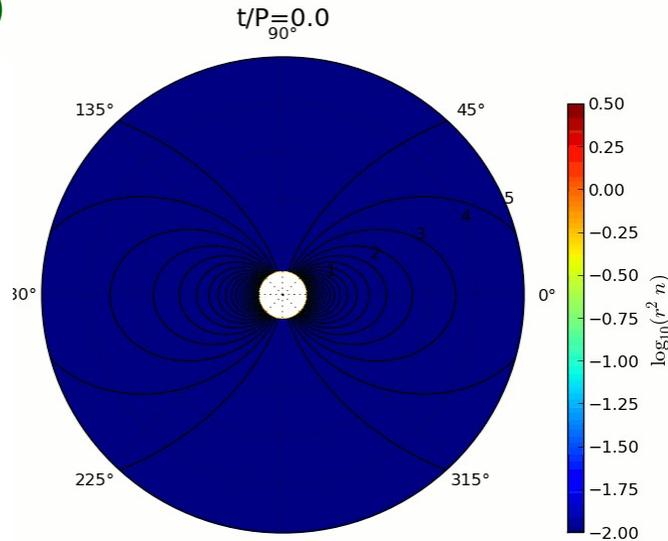
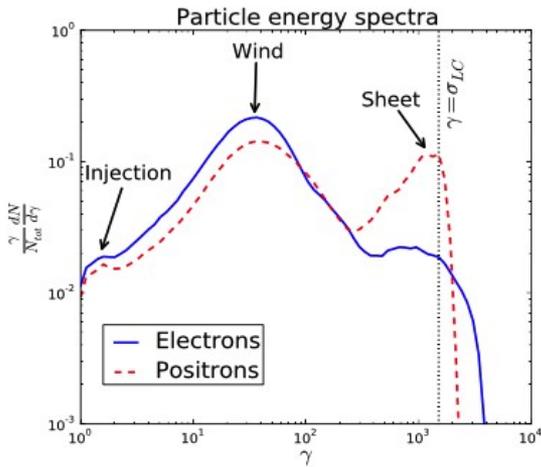
- Получено 'универсальное решение' для наклонного ротатора (с определенной плотностью тока!)
- No disagreement with the current losses model
- HE Michel-Vogovalov split-monopole!
- Alignment для 'универсального решения'
- Back to Ruderman-Sutherland (но зазор существенно нестационарный!)

Проблемы

- Sparking if there is not enough plasma

Particle in cell (PIC)

B. Cerutti, A. Philippov, K. Parfrey, A. Spitkovsky
MNRAS, **448**, 606 (2015)



Современность (2014 – ...)

Основные результаты

- Ускорение частиц до $\Gamma \sim \sigma_M$ за световым цилиндром
- Disk-dome для малых углов наклона
- ОТО важно и здесь!

Проблемы

- Необходимо рождать плазму ЗА световым цилиндром
- Нет чистого эксперимента

ЧАСТЬ 3.

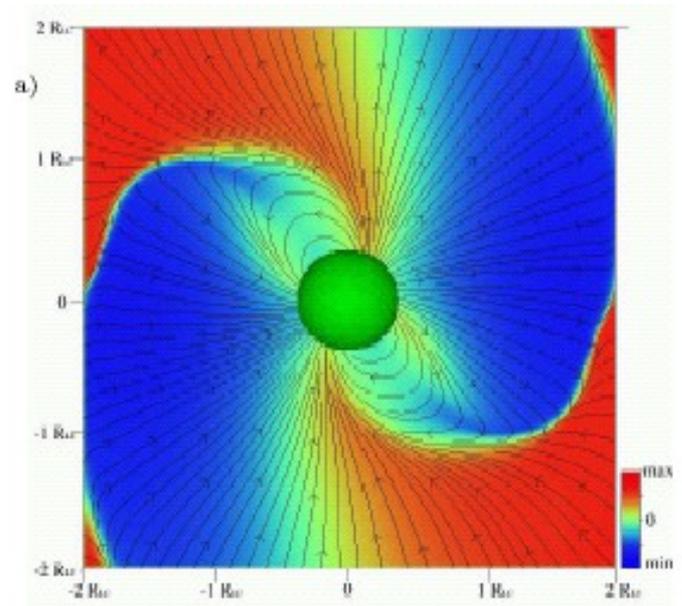
Так как же они тормозятся?



Вопрос № 1

Как объяснить МГД-потери
универсального решения?

$$W_{\text{tot}}^{\text{MHD}} \approx \frac{1}{4} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} (k_1 + k_2 \sin^2 \chi)$$



Прямые токовые потери?

$$\begin{aligned} I_r \dot{\Omega} &= K_{\parallel} \cos \chi + K_{\perp} \sin \chi, \\ I_r \Omega \dot{\chi} &= K_{\perp} \cos \chi - K_{\parallel} \sin \chi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_r \dot{\Omega} &= K_{\parallel}^A + [K_{\perp}^A - K_{\parallel}^A] \sin^2 \chi, \\ I_r \Omega \dot{\chi} &= [K_{\perp}^A - K_{\parallel}^A] \sin \chi \cos \chi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{\parallel} &= -c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} i_s, \\ K_{\perp} &= -c_{\perp} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) i_a. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_s &= i_s^A \cos \chi, \\ i_a &= i_a^A \sin \chi. \end{aligned}$$

$$K_{\perp}^A \approx \left(\frac{\Omega R}{c} \right) K_{\parallel}^A$$

$$i_s \approx i_a \approx 1$$

$$i_A \sim (\Omega R / c)^{-1}$$

БГИ

Princeton (MHD)

Не проходит!

$$B_r \approx B_0 \frac{R^2}{r^2} \sin \theta \cos(\varphi - \Omega t + \Omega r/c),$$

$$B_\varphi = E_\theta \approx -B_0 \frac{\Omega R^2}{cr} \sin^2 \theta \cos(\varphi - \Omega t + \Omega r/c).$$

В ветре

$$i_{\parallel} = -3 \frac{\Omega}{c} \cos \theta$$

На полярной шапке

$$i_a^A \approx f_*^{-1/2} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{-1/2}$$

Ток слишком мал!

Эволюция пульсаров – токовые потери?

Токовые потери

Прямые токовые потери

$$K_{\parallel} = -c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} i_s,$$
$$K_{\perp} = -c_{\perp} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) i_a.$$

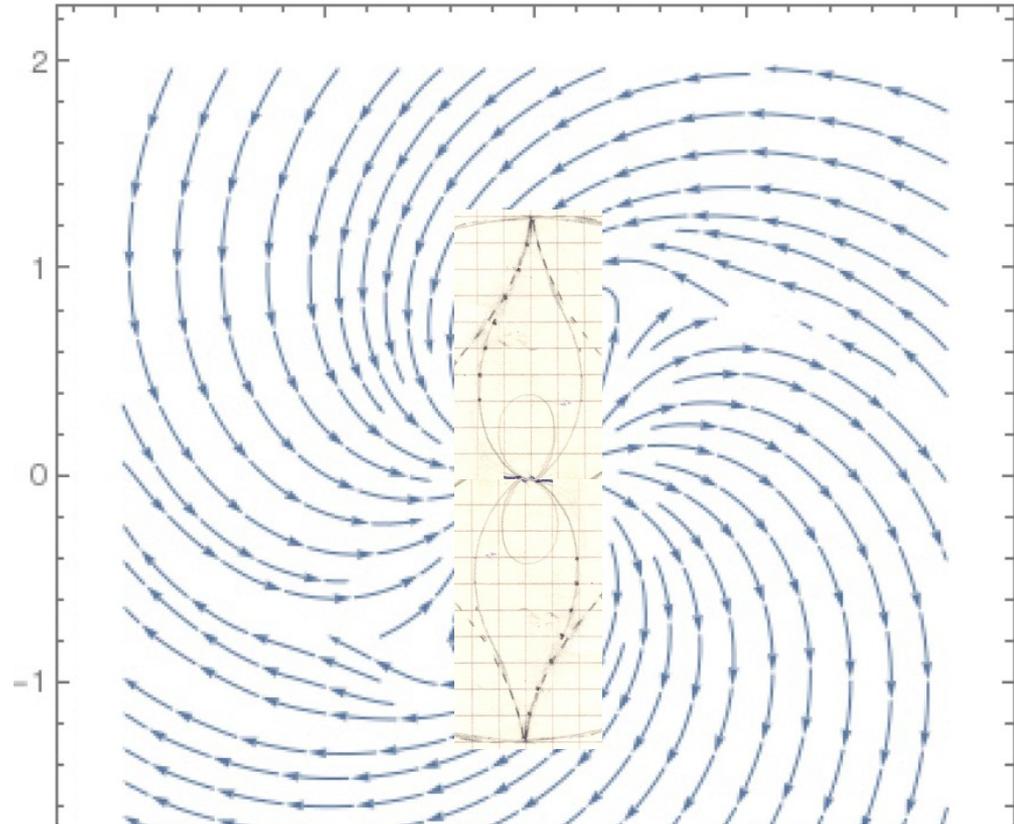
2. Рассогласование
(‘второе слагаемое’)

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\omega = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\omega$$

3. Дополнительный
сепаратрисный ток

Вариант 2 - рассогласование

Должно работать
второе слагаемое



$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\sigma = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\sigma$$

Вариант 3 –дополнительные токи

VB, E.E.Nokhrina. *Astron. Letters*, **30**, 685 (2004)

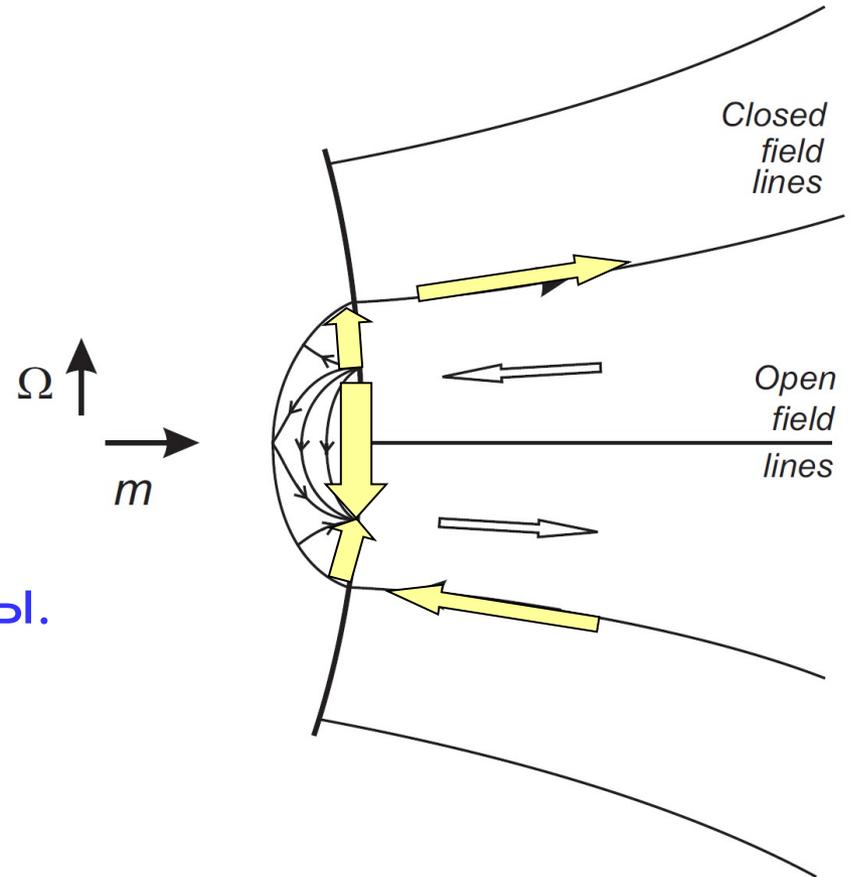
$$W_{\text{tot}} = \frac{\Omega R^3}{c} \int J_{\theta} B_n d\omega$$

БГИ – выражение для потерь однозначно, если

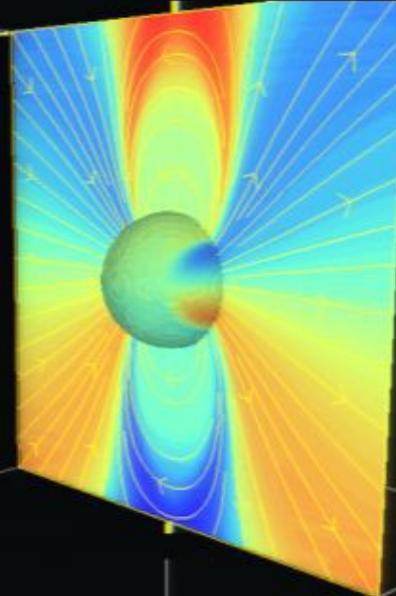
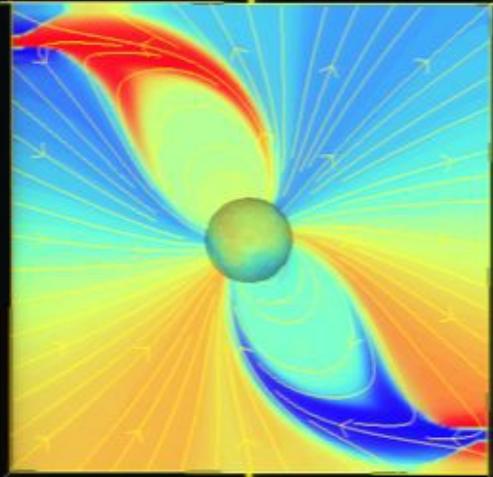
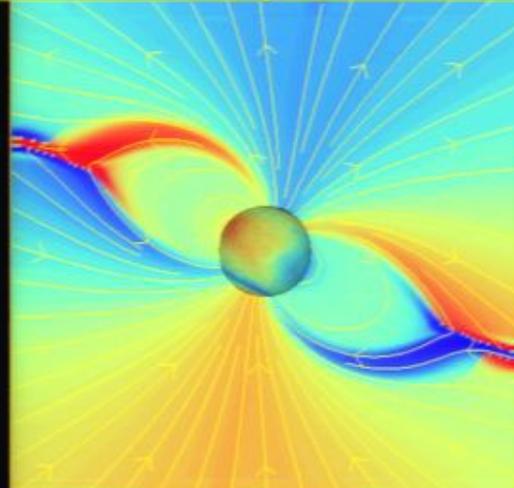
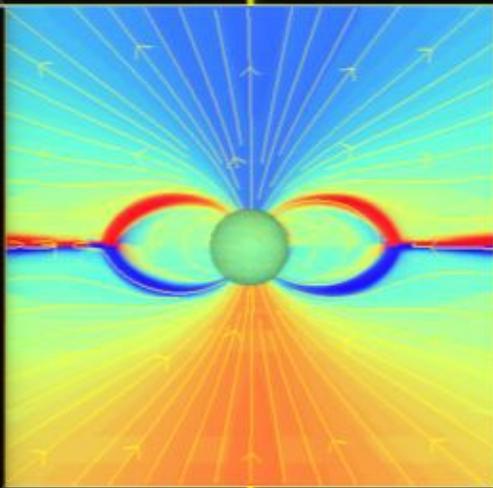
- нет токов в замкнутой магнитосфере,
- нет тока вдоль сепаратрисы.

$$I_{\text{sep}} = 3/4 I_{\text{vol}}$$

$$\langle J_{\theta} \rangle = 0$$



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.

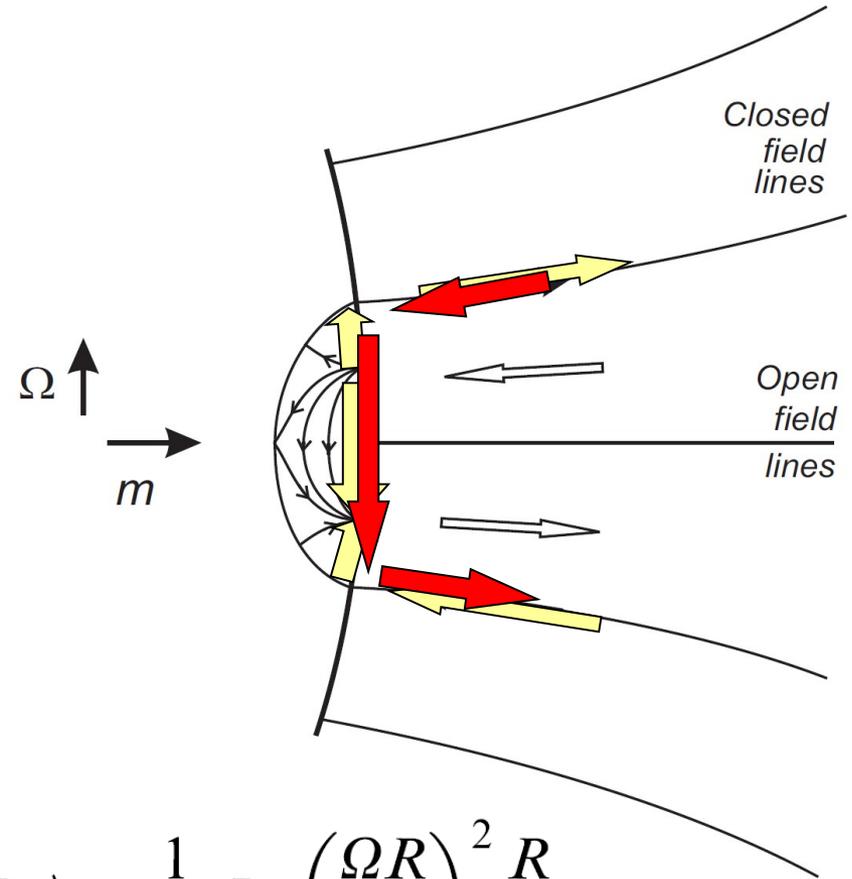


Вариант 3 – дополнительные токи

VB, E.E.Nokhrina. *Astron. Letters*, **30**, 685 (2004)

$$W_{\text{tot}} = \frac{\Omega R^3}{c} \int J_{\theta} B_n d\omega$$

Дополнительный ток вдоль сепаратрисы.



$$I_{\text{sep}} < 3/4 I_{\text{vol}}$$

$$\langle J_{\theta} \rangle \neq 0$$

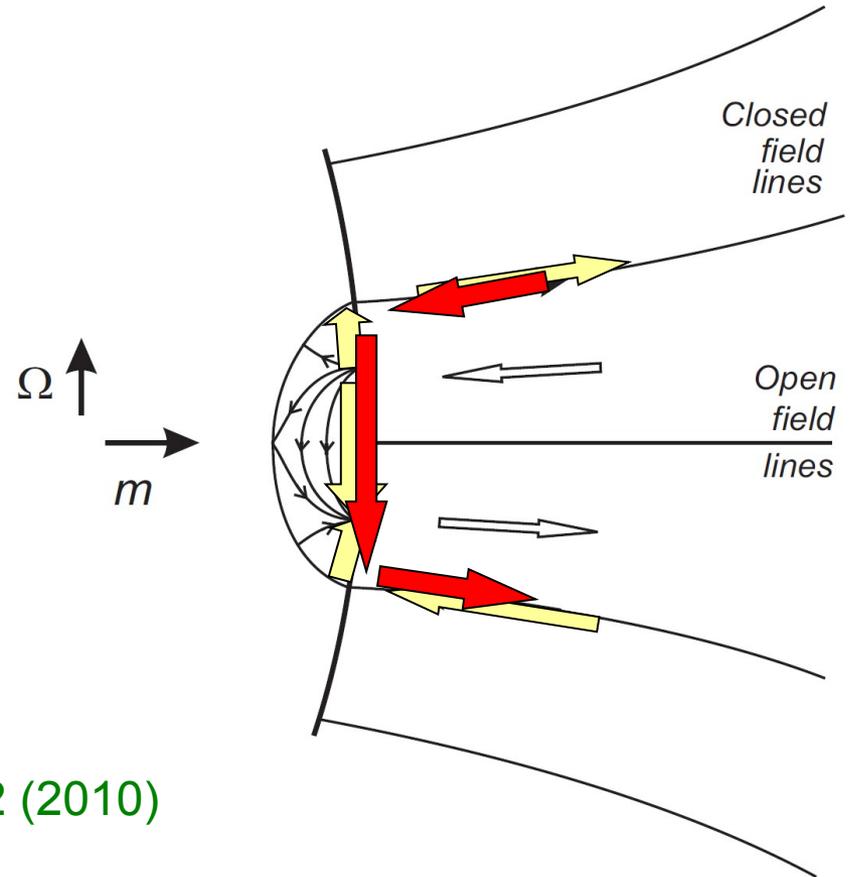
$$\langle B_{\varphi} \rangle = \frac{1}{f_*} B_0 \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^2 \frac{R}{r}$$

Сепаратрисный ток?

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin JETP **58**, 235 (1983)

$$W_{\text{tot}} = \frac{\Omega R^3}{c} \int J_{\theta} B_n d\theta$$

$$I_{\text{sep}} = 3/4 I_{\text{vol}}$$



X.-N. Bai, A.Spitkovsky ApJ **715**, 1282 (2010)

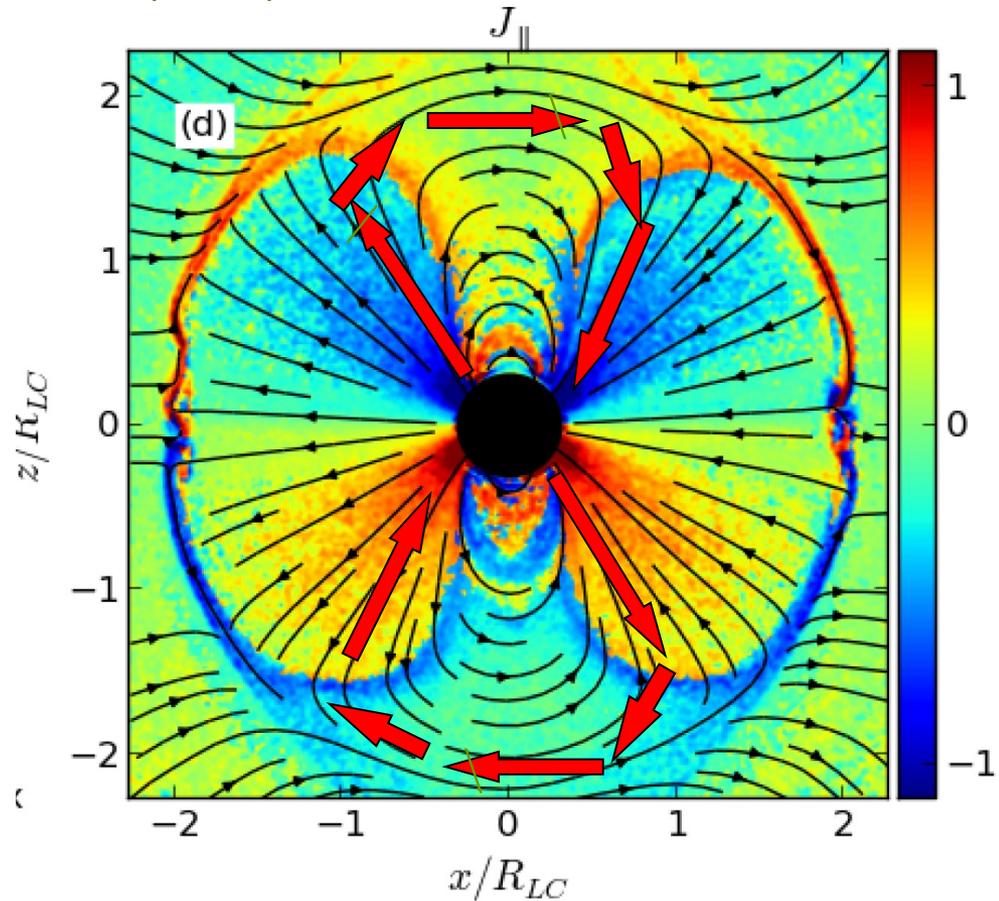
$$I_{\text{sep}} = 20\% I_{\text{vol}}$$

Сепаратрисный ток?

VB, E.E.Nokhrina. *Astron. Letters*, **30**, 685 (2004)

$$W_{\text{tot}} = \frac{\Omega R^3}{c} \int J_{\theta} B_n d\sigma$$

Направление тока
соответствует
потерям энергии



Как проверить

Токовые потери

Прямые токовые потери

$$K_{\parallel} = -c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} i_s,$$
$$K_{\perp} = -c_{\perp} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) i_a.$$

2. Рассогласование (‘второе слагаемое’)

$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\omega = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\omega$$

3. Дополнительный сепаратрисный ток

Как проверить

Токовые потери

Прямые токовые потери

$$K_{\parallel} = -c_{\parallel} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} i_s,$$
$$K_{\perp} = -c_{\perp} \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} \left(\frac{\Omega R}{c} \right) i_a.$$

2. Рассогласование

(‘второе слагаемое’) РАБОТАЕТ ВСЯ ПОВЕРХНОСТЬ

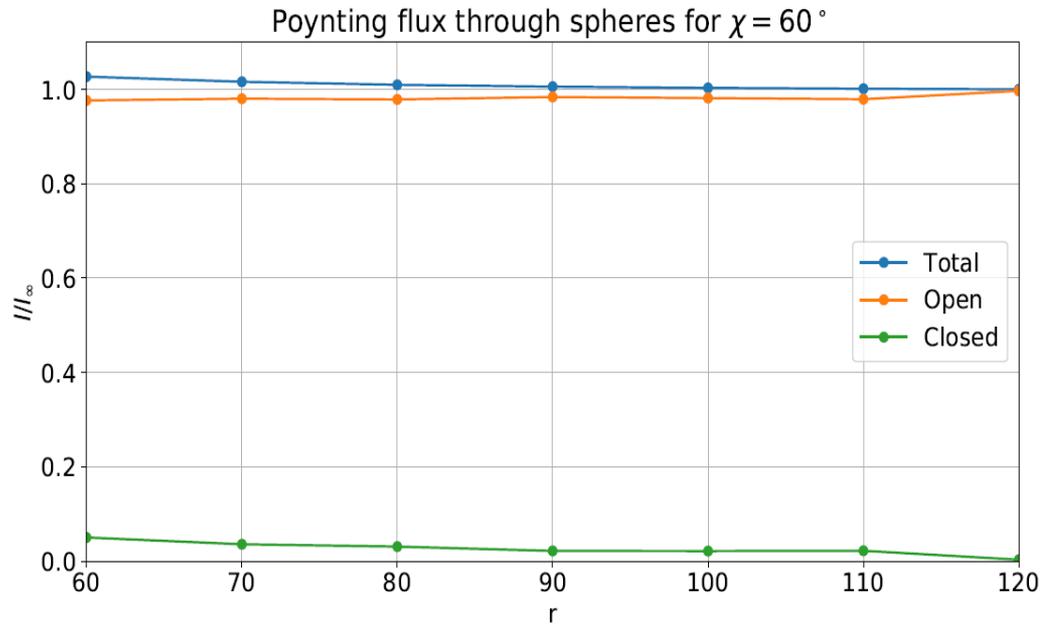
$$\mathbf{K} = \frac{R^3}{c} \int \mathbf{J}_s(\mathbf{B}\mathbf{n}) d\sigma = \frac{R^3}{4\pi} \int \{[\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(3)}](\mathbf{B}^{(0)}\mathbf{n}) + [\mathbf{n} \times \mathbf{B}^{(0)}](\mathbf{B}^{(3)}\mathbf{n})\} d\sigma$$

3. Дополнительный сепаратрисный ток

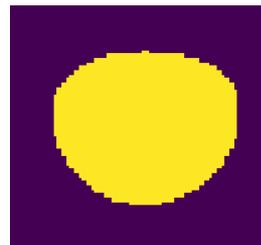
ТОЛЬКО ПОЛЯРНАЯ ШАПКА

Прямая проверка

VB, A.K.Galishnikova, E.M.Novoselov, A.A.Philippov, M.M.Rashkovetskiy JPhys: Conf. Series, **932**, 012012 (2017)

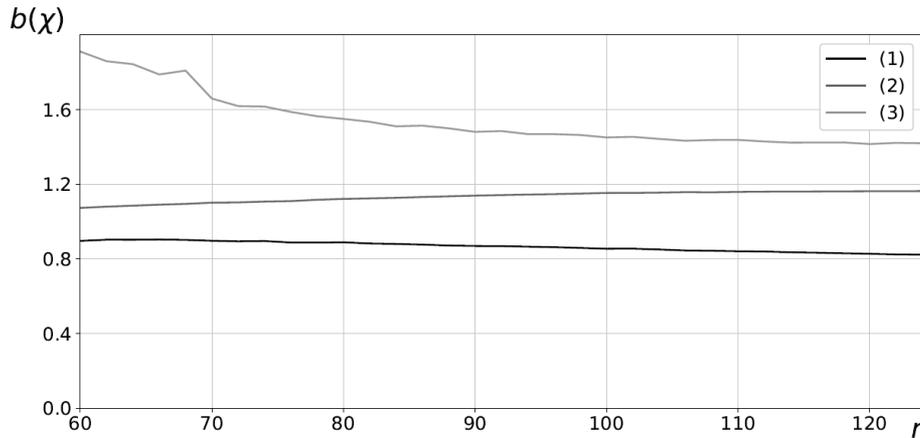


$$R = 50$$
$$R_L = 500$$



Прямая проверка

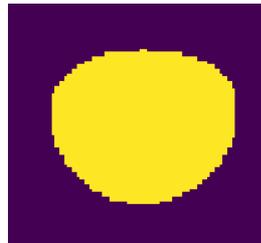
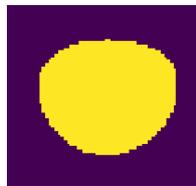
VB, A.K.Galishnikova, E.M.Novoselov, A.A.Philippov, M.M.Rashkovetskiy (2018)



$$\langle B_\varphi \rangle = b(\chi) \frac{1}{f_*} B_0 \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^2 \frac{R}{r}$$

$$b(\chi) = \left[\frac{k_1 + k_2}{2} - \frac{f_*^{5/2}}{32} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{1/2} \right] \sin \chi$$

χ	30°	60°	90°
$b(\chi)$ (num)	0.8	1.2	1.4
$b(\chi)$ (anal)	0.6 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.2 ± 0.1



Прямая проверка

M.M.Rashkovetskyi, VB, A.K.Galishnikova, E.M.Novoselov, A.A.Philippov (2018)

$$\frac{I_{\text{sep}}}{I_{\text{vol}}} = \frac{3}{4} - \frac{2}{f_*^{3/2}} \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^{1/2}$$

$$I_{\text{sep}} \sim 0.3 I_{\text{vol}}$$

X.-N. Bai, A.Spitkovsky ApJ **715**, 1282 (2010)

$$I_{\text{sep}} = 20\% I_{\text{vol}}$$

Magnetic field sweepback

Вакуум (магнито-дипольные)

$$W_{\text{tot}}^{(V)} = -I_r \Omega \dot{\Omega} = \frac{1}{6} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2 \chi$$

Yu.P.Shitov. *Sov. Astron.* **27**, 314 (1983)

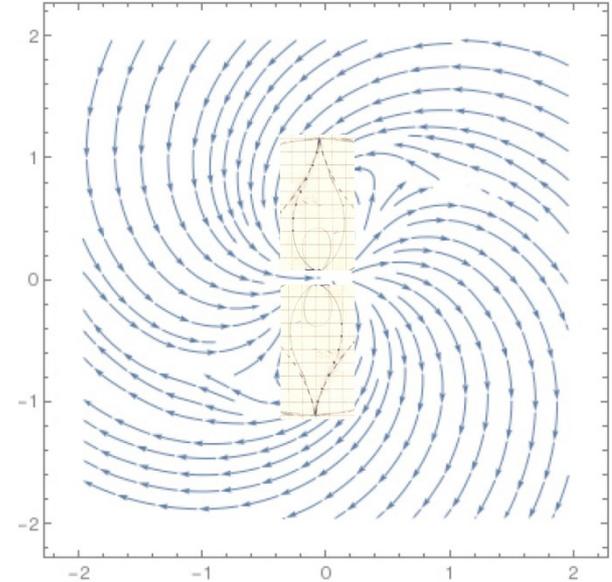
$$M(r) = B(r) B_t(r) Q r,$$

where $Q \propto r^2$ is the surface area

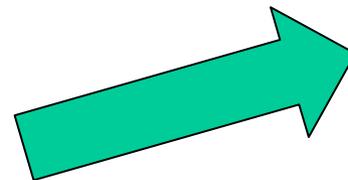
$$B_t(r) = B_t = \text{const}$$

bending angle

$$\varphi_{\text{rot}} = \frac{B_t}{B(r)} \doteq 1.2 \left(\frac{r}{R_L} \right)^3 \sin^2 \delta$$



Много
статей



Magnetic field sweepback

Вакуум (магнито-дипольные)

$$W_{\text{tot}}^{(V)} = -I_r \Omega \dot{\Omega} = \frac{1}{6} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2 \chi$$

Yu.P.Shitov. *Sov. Astron.* **27**, 314 (1983)

$$M(r) = B(r) B_t(r) Qr,$$

where $Q \propto r^2$ is the surface area

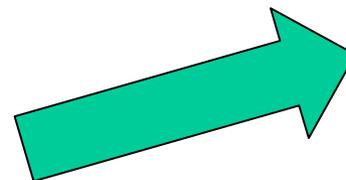
$$B_t(r) = B_t = \text{const}$$

bending angle

$$\varphi_{\text{rot}} = \frac{B_t}{B(r)} \doteq 1.2 \left(\frac{r}{R_L} \right)^3 \sin^2 \delta$$



Много
статей



Magnetic field sweepback

Вакуум (магнито-дипольные)

$$W_{\text{tot}}^{(V)} = -I_r \Omega \dot{\Omega} = \frac{1}{6} \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \sin^2 \chi$$

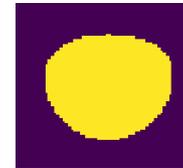
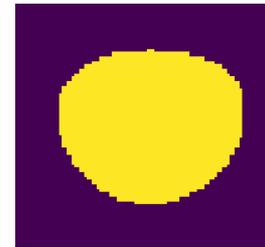
$$M(r) = B(r) B_t(r) Q r,$$

where $Q \propto r^2$ is the surface area

$$\langle B_\varphi \rangle = \frac{1}{f_*} B_0 \left(\frac{\Omega R}{c} \right)^2 \frac{R}{r}$$

bending angle is much larger

$$\delta\varphi_{\text{rot}} \approx \left(\frac{r}{R_L} \right)^2$$



Бальзам на наши души

$$\begin{aligned} I_r \dot{\Omega} &= K_{\parallel}^A + [K_{\perp}^A - K_{\parallel}^A] \sin^2 \chi, \\ I_r \Omega \dot{\chi} &= [K_{\perp}^A - K_{\parallel}^A] \sin \chi \cos \chi. \end{aligned}$$

$$K_{\perp}^{\text{mag}} = -A \frac{B_0^2 \Omega^3 R^6}{c^3} \dot{i}_a$$

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

В модели БГИ дополнительные потери можно не учитывать

ЧАСТЬ 4.

Теория БГИ 30 лет спустя



Восьмидесятые

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin

(1983, 1984, 1988, 1993)

Магнитосфера

Экранировка магниодипольного излучения

Токовые потери – точно

Построение токовой системы

Радиоизлучение

Диэлектрический тензор в неоднородном поле

Неустойчивость изгибно-плазменных волн

Насыщение за счет нелинейного взаимодействия

БГИ – магнитосфера

- 'RS' – зазор, 'закон Ома' связывающий I и U_{RS}

$$W_{\text{tot}} \approx i_s \frac{B_0^2 \Omega^4 R^6}{c^3} \cos \chi$$

- Хорошо работает лишь при $Q < 1$

$$Q = 2 P^{11/10} P_{-15}^{-4/10}$$

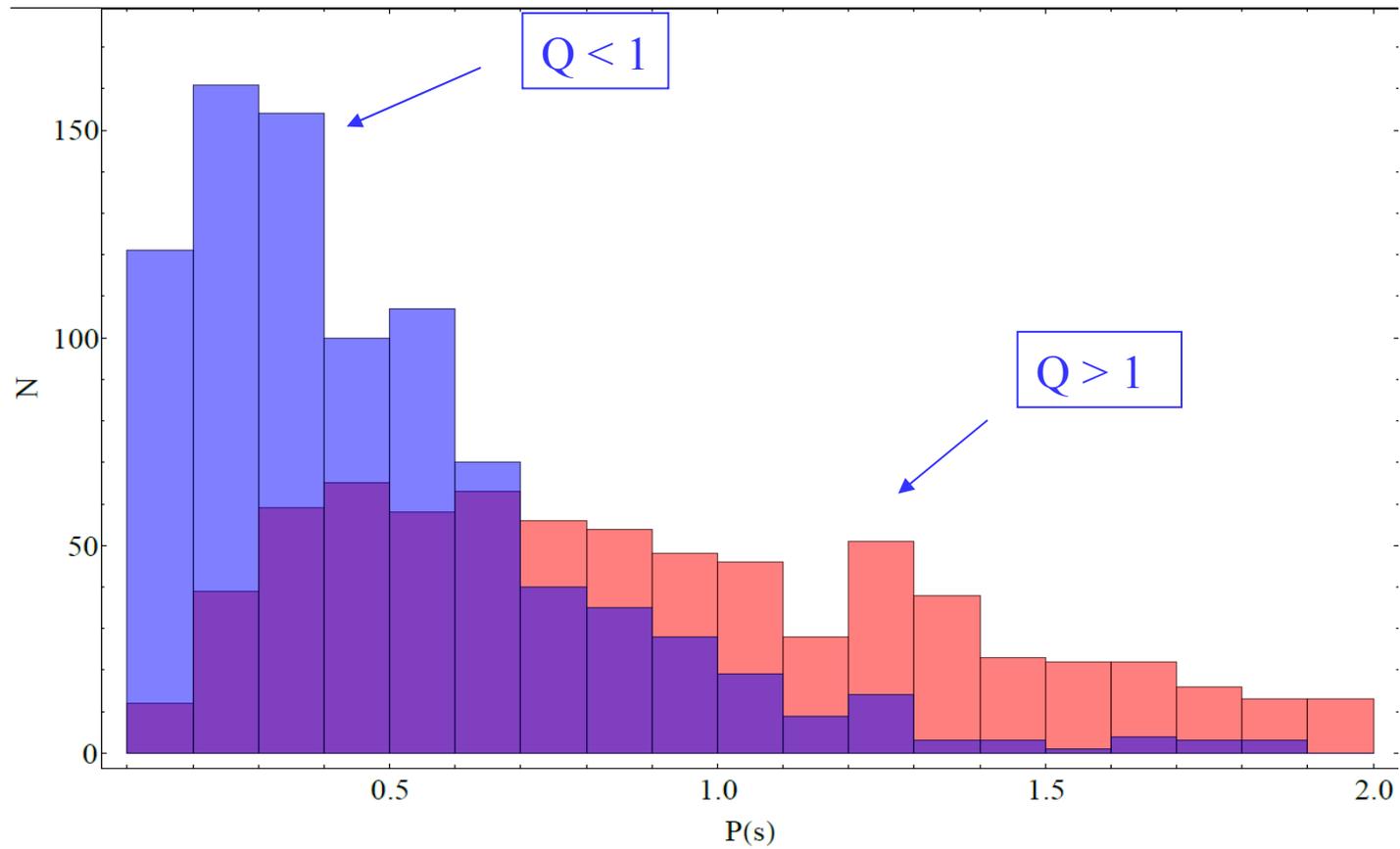
- Для $Q < 1$ электрический ток меньше GJ: $i_s = I/I_{\text{GJ}} \sim Q$

- $H/R_0 \sim Q$, $r_{\text{in}}/R_0 \sim Q^{7/9}$ для $Q < 1$

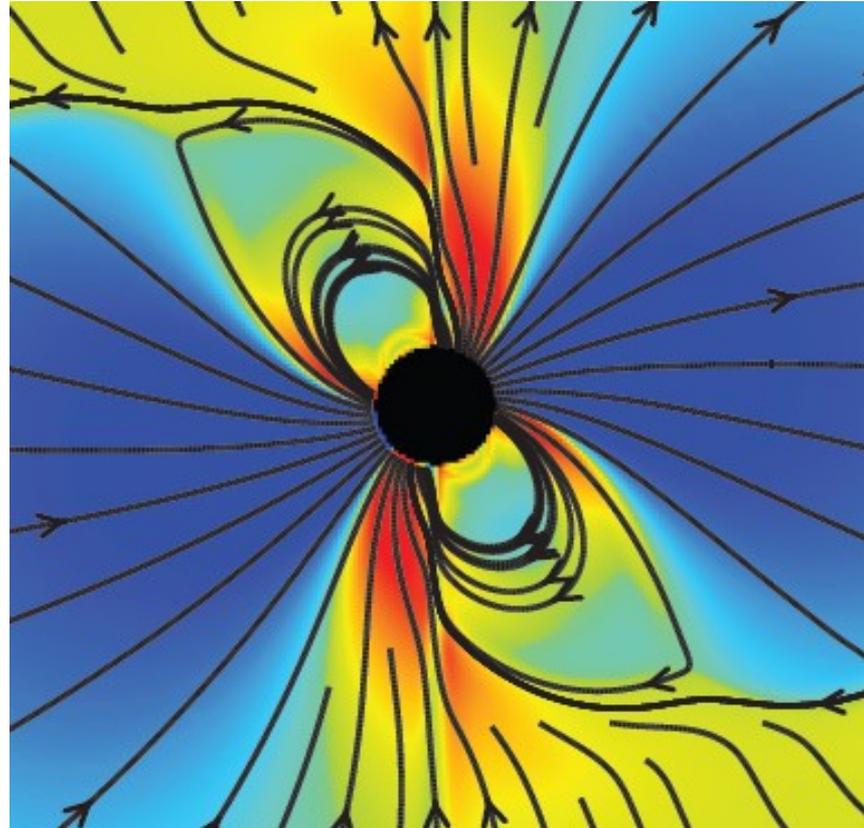
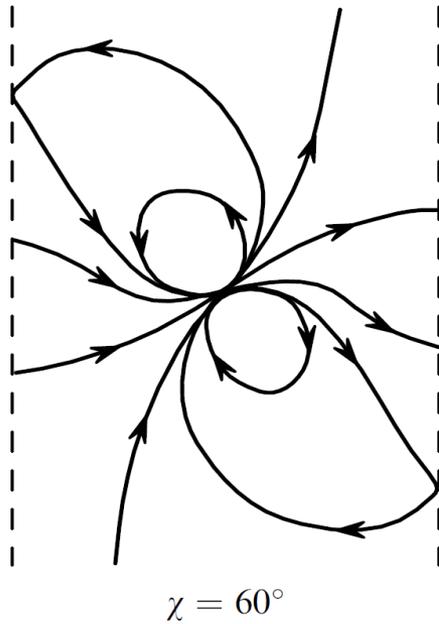
- Поток частиц (слабый нагрев !)

$$W_{\text{part}}/W_{\text{tot}} \sim Q^2$$

БГИ – магнитосфера

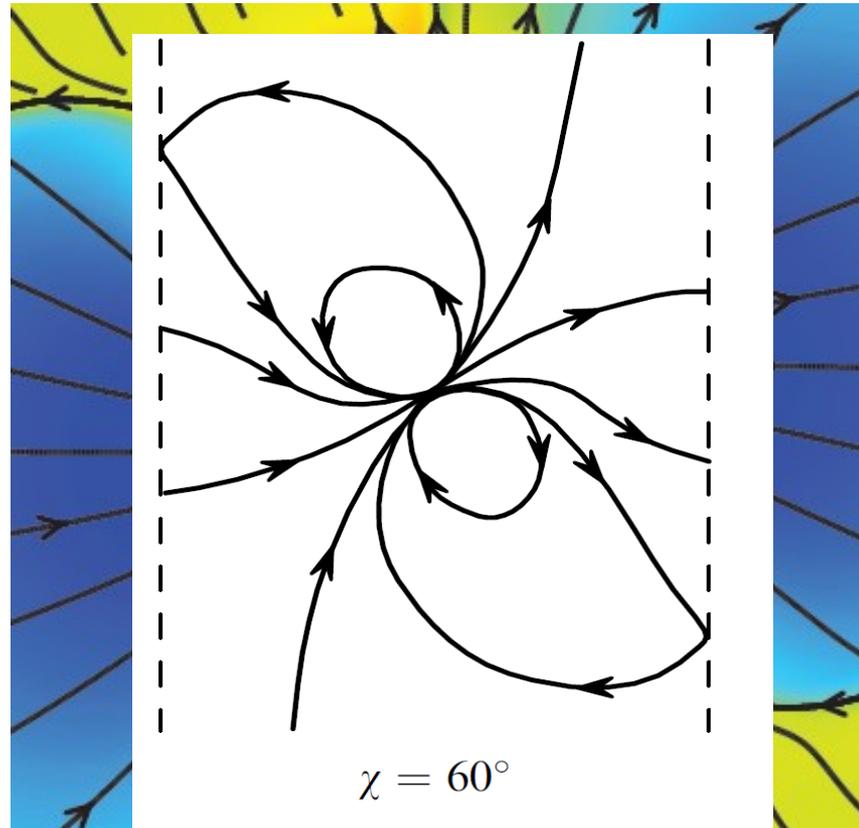


Наклонный ротатор



A.Tchekhovskoy,
A.Spitkovsky, J.Li,
MNRAS, **431**, 1 (2013)

Наклонный ротатор



A.Tchekhovskoy,
A.Spitkovsky, J.Li,
MNRAS, **431**, 1 (2013)

Наклонный ротатор

A.Tchekhovskoy, A.Philippov, A.Spitkovsky,
MNRAS, **457**, 3384 (2016)

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin,
Sov. Phys. JETP, **58**, 235 (1983)

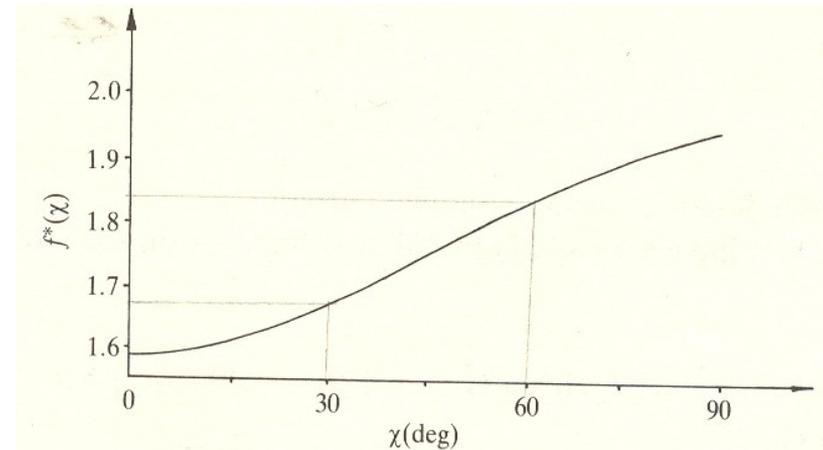
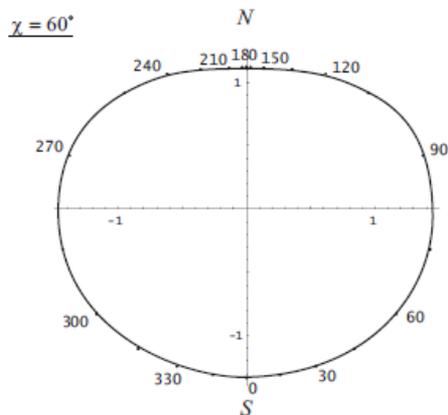


Fig. 4.12. Dependence of the parameter $f^*(\chi)$ on the angle χ .

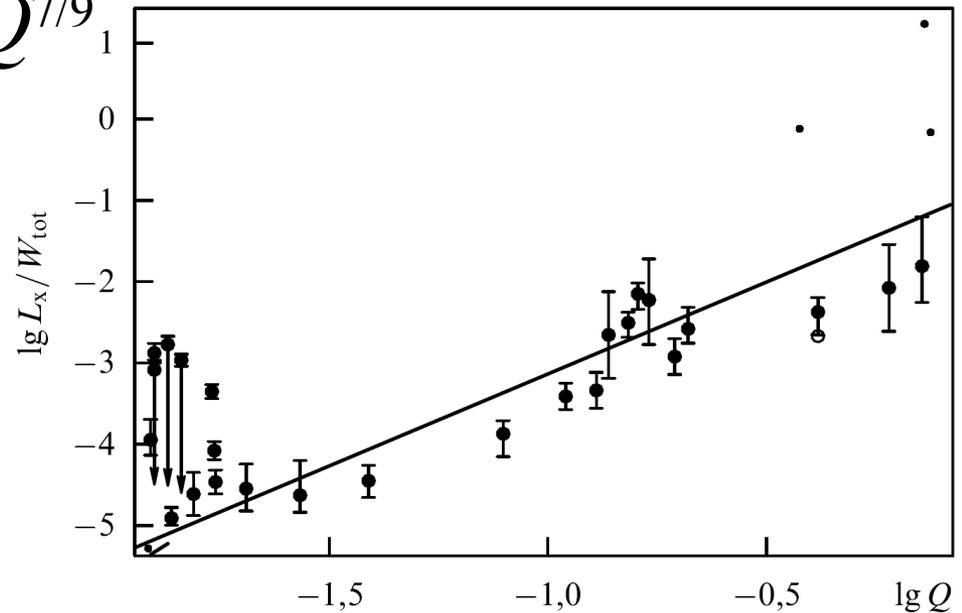
$$\Phi_{\text{open}} \propto (1 + 0.2 \sin^2 \chi)$$

10% accuracy!

Проблема нагрева

- $Q = 2 P^{11/10} \dot{P}_{-15}^{-4/10}$

- $H/R_0 \sim Q$, $r_{\text{in}}/R_0 \sim Q^{7/9}$



Теория радиоизлучения

- Свойства истекающей плазмы

(consensus)

- Когерентный механизм

Базовая неустойчивость

насыщение (*нелинейные эффекты*)

(нет общей точки зрения; вообще никакой!)

- Эффекты распространения

(тоже очень важно!)

Теория радиоизлучения

- Свойства истекающей плазмы

(*consensus*)

Плотность

$$n = \lambda n_{\text{GJ}}$$

(первичный пучок $n \sim n_{\text{GJ}}$)

Множественность

$$\lambda \sim 10^4$$

Энергия частиц: пучок – $\gamma \sim 10^7$, вторичная плазма

$$\gamma \sim 100$$

Темп эжекции 10^{32} pairs/s (Crab – 10^{40} pairs/s)

БГИ - радиоизлучение

Диэлектрический тензор
в искривленном
магнитном поле

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \delta_{ij} - 2\pi i \frac{R_c^{2/3}}{k_{\parallel}^{1/3}} \int dp_{\varphi} \frac{\omega_p^2}{\omega} \frac{\partial f^{(0)}}{\partial p_{\varphi}} \begin{pmatrix} \frac{\mathcal{F}''(\zeta)}{(k_{\parallel} R_c)^{2/3}} & -i \frac{\mathcal{F}'(\zeta)}{(k_{\parallel} R_c)^{1/3}} \\ i \frac{\mathcal{F}'(\zeta)}{(k_{\parallel} R_c)^{1/3}} & \mathcal{F}(\zeta) \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{F}(\zeta) = \text{Ai}(\zeta) + i\text{Gi}(\zeta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} d\tau \exp\left(i\tau\zeta + i\frac{\tau^3}{3}\right)$$

$$\zeta = 2(\omega - k_{\parallel} v_{\varphi}) \frac{R_c^{2/3}}{k_{\parallel}^{1/3} v_{\varphi}}$$

БГИ - радиоизлучение

$$Q = 2 P^{11/10} \dot{P}_{-15}^{-4/10} \quad (\text{RS} - \text{зазор})$$

- $H/R_0 \sim Q$, $r_{\text{in}}/R_0 \sim Q^{7/9}$ для $Q < 1$

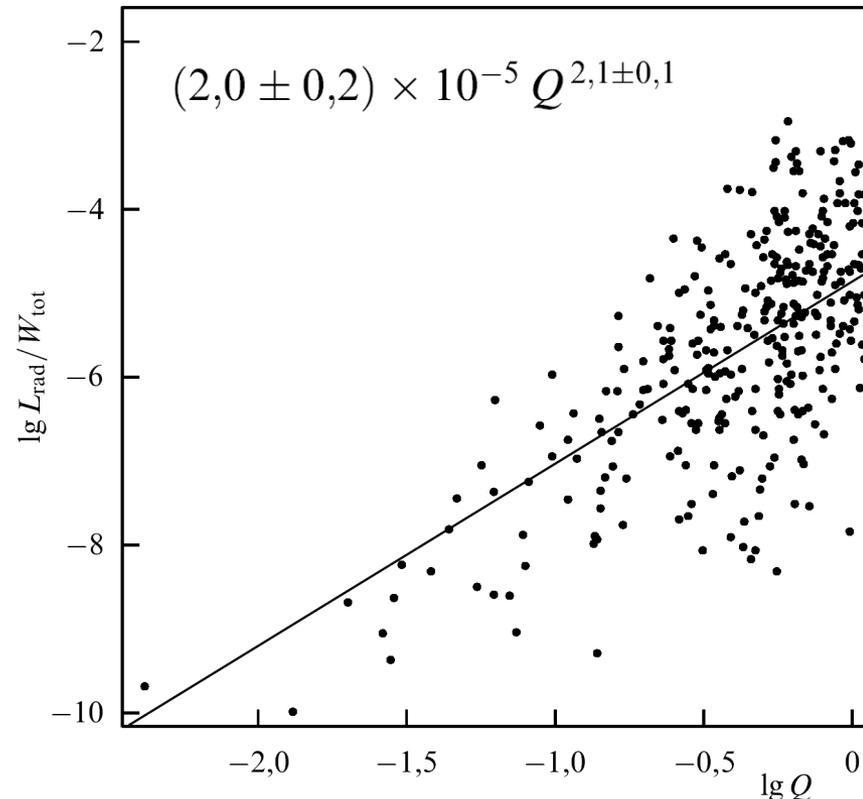
- $W_{\text{part}}/W_{\text{tot}} \sim Q^2$

$$L_r \sim P^{-0.8 \pm 0.1} \quad \alpha = L_{\text{rad}}/W_{\text{tot}}$$

И.Ф.Малов, О.И.Малов, АЖ,
50, 483 (2006)

$$L_r \sim P^{-1.3}$$

М.Gullon, J.A.Miralles,
D.Vigano, J.Pons, MNRAS (2014)



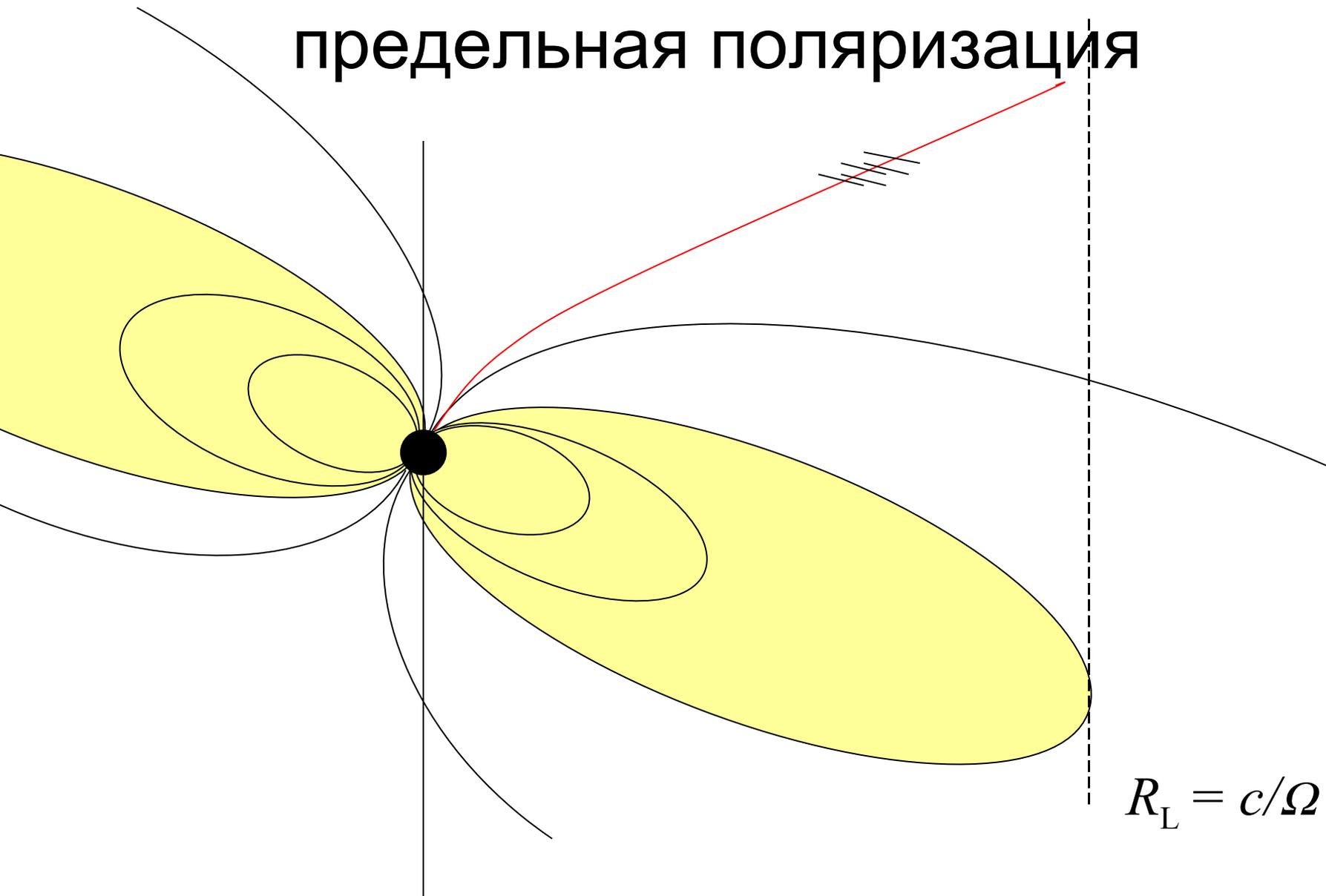
‘Полый конус’ – неявно

- Распространение по прямой
- Циклотронное поглощение несущественно
- Поляризация формируется в области генерации

‘Полый конус’ – неявно

- Распространение по прямой
- Циклотронное поглощение несущественно
- Поляризация формируется в области генерации

Рефракция, циклотронное поглощение, предельная поляризация



Основные параметры

$$\Delta n = -\frac{1}{2} < \frac{\omega_p^2 \omega_B^2}{\gamma^3 \varpi^2 (\omega_B^2 - \gamma^2 \varpi^2)} > \frac{\sqrt{q^2 + 1}}{q} \sin^2 \theta$$

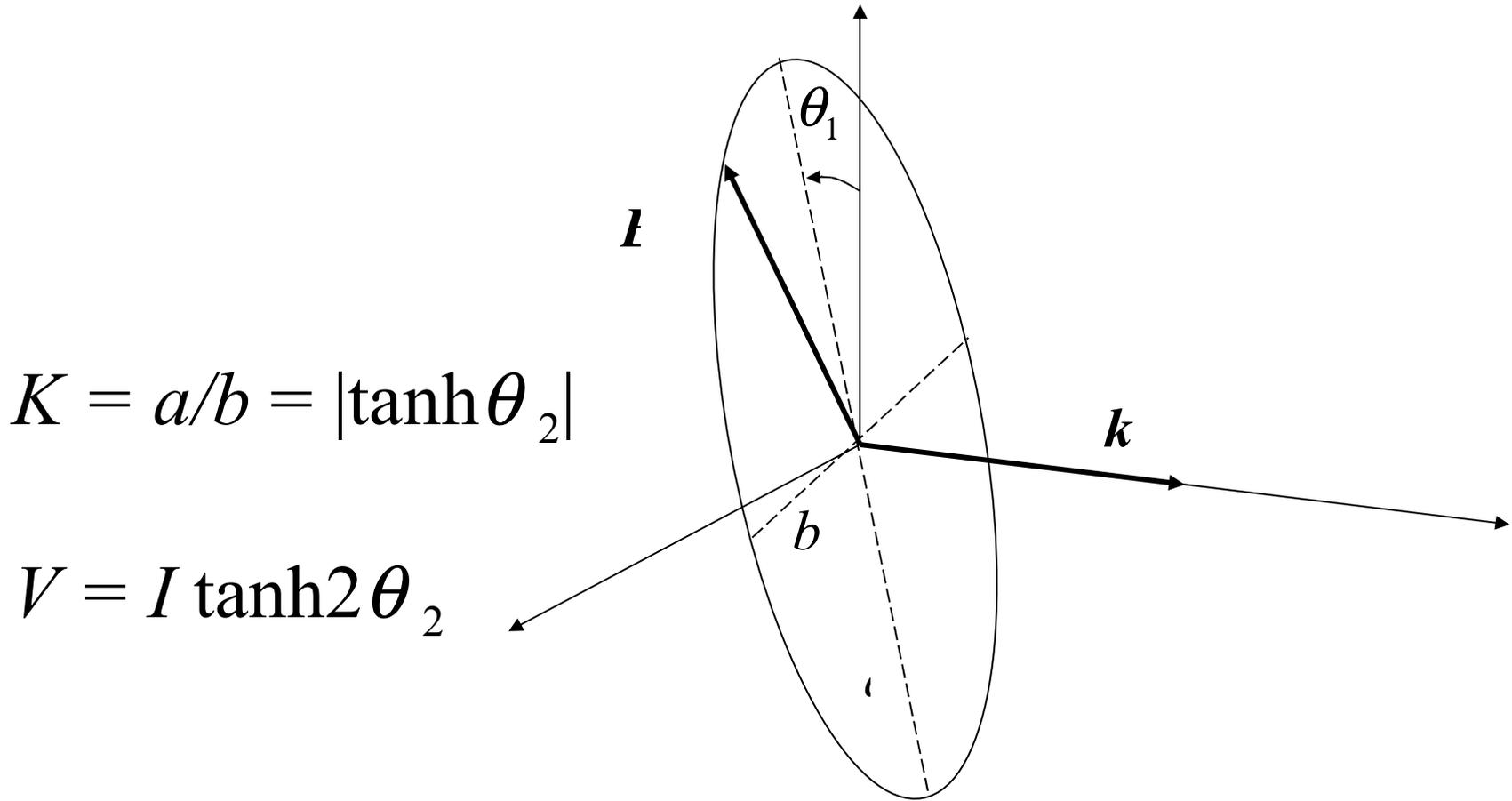
$$q = \frac{\omega_B \lambda \sin^2 \theta}{2\omega \gamma^3 (1 - \cos \theta v_{\parallel}/c)^2 (\cos \theta - v_{\parallel}/c)}$$

$$K_i^{-1} = i \frac{E_x}{E_y} = q \pm \sqrt{1 + q^2}$$

$q \gg 1$ ($K = 2q, 1/2q$) – линейная поляризация

$q \ll 1$ ($K = +1, -1$) – круговая поляризация

Поляризация – два угла



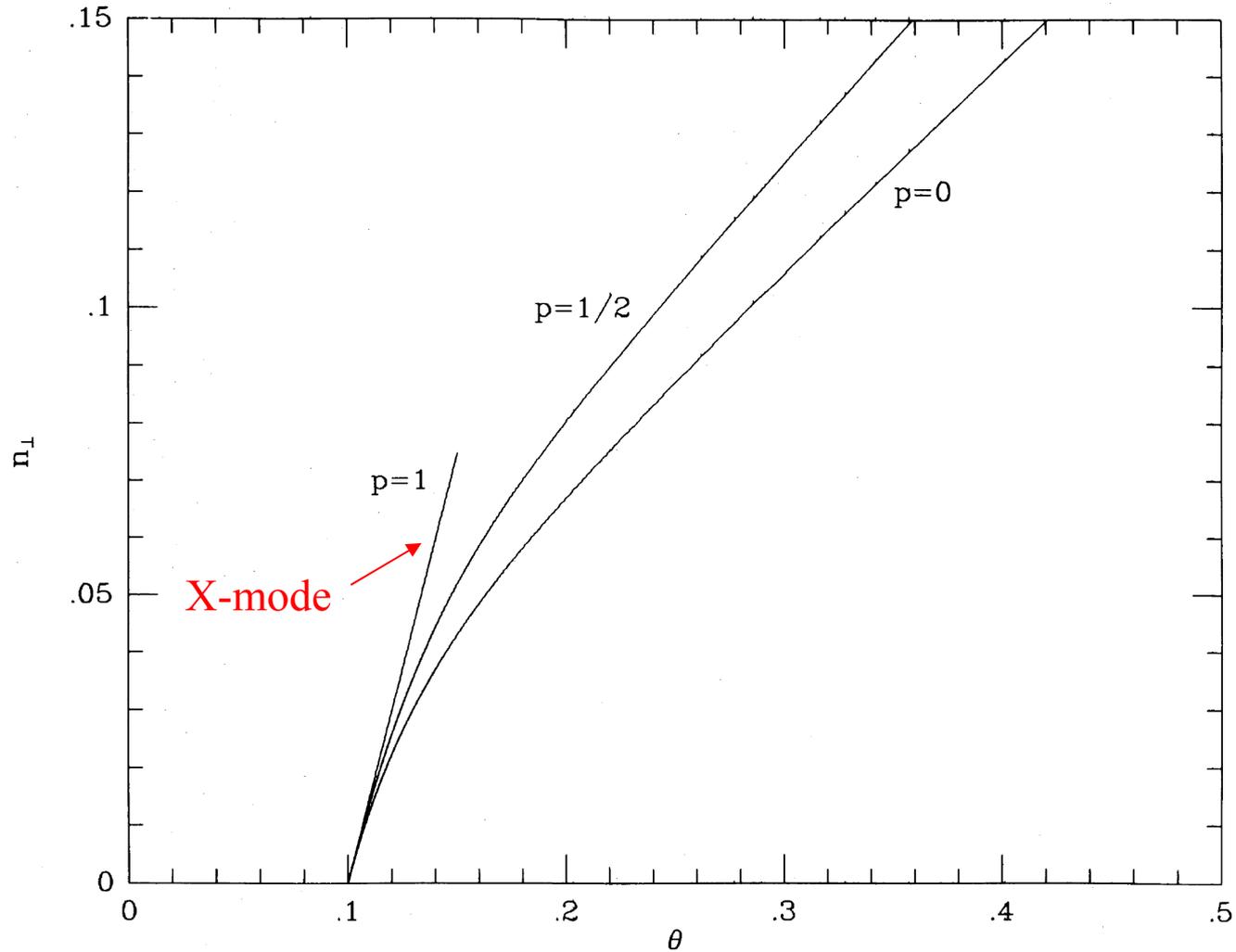
$$K = a/b = |\tanh \theta_2|$$

$$V = I \tanh 2\theta_2$$

Рефракция

J.Arons, J.Barnard. ApJ, 302, 120 (1986)

WAVE PROPAGATION IN PULSAR MAGNETOSPHERES

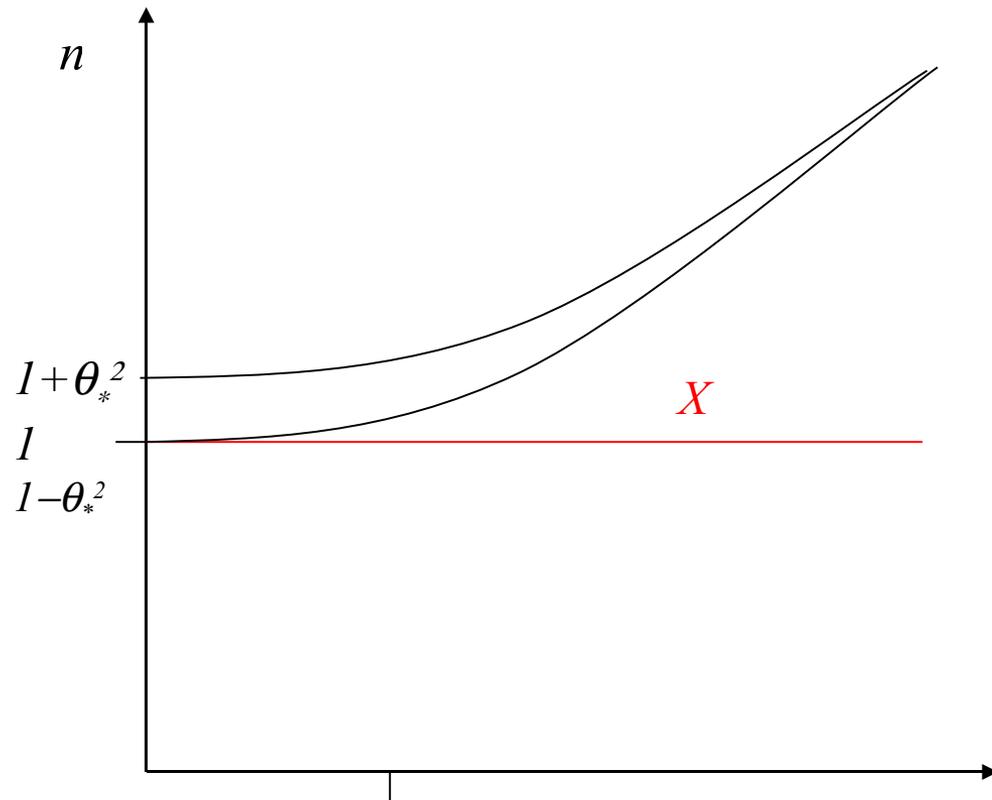


Четыре, не три волны!

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

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

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



$$\theta_* = \left\langle \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 \gamma^3} \right)^{1/4} \right\rangle$$

Четыре, не три волны!

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

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

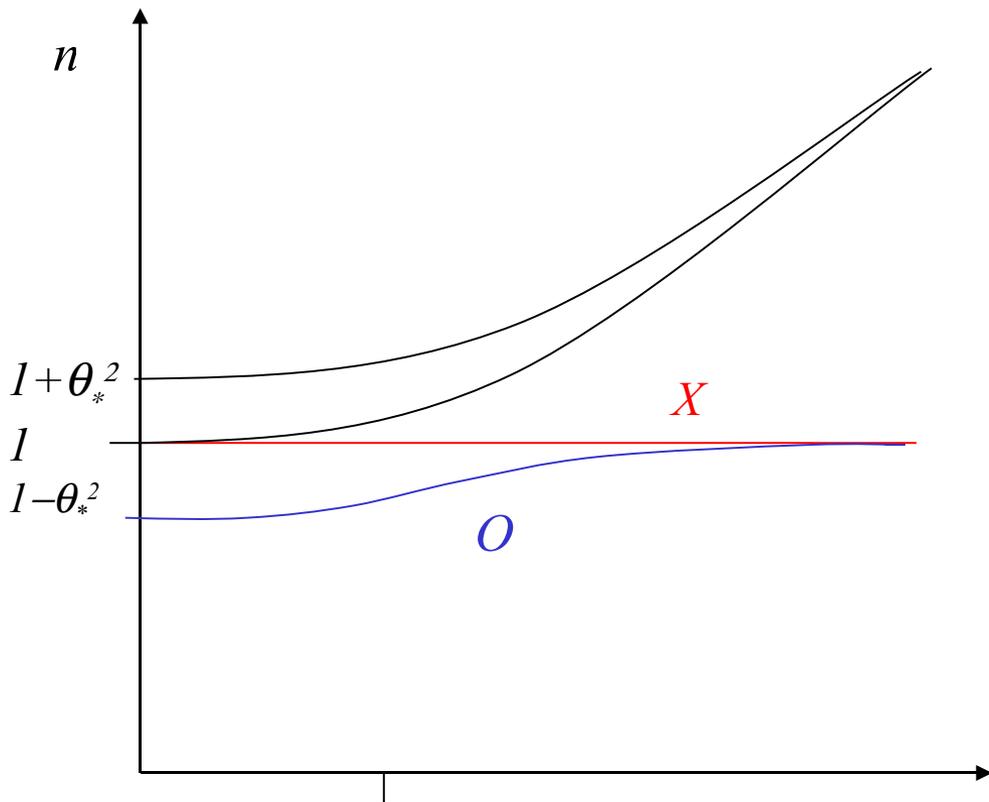
If $A_p = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \gamma \rangle \gg 1$

$$n_1 = 1,$$

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

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

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



$$\theta_* = \left\langle \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 \gamma^3} \right)^{1/4} \right\rangle$$

Четыре, не три волны!

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

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

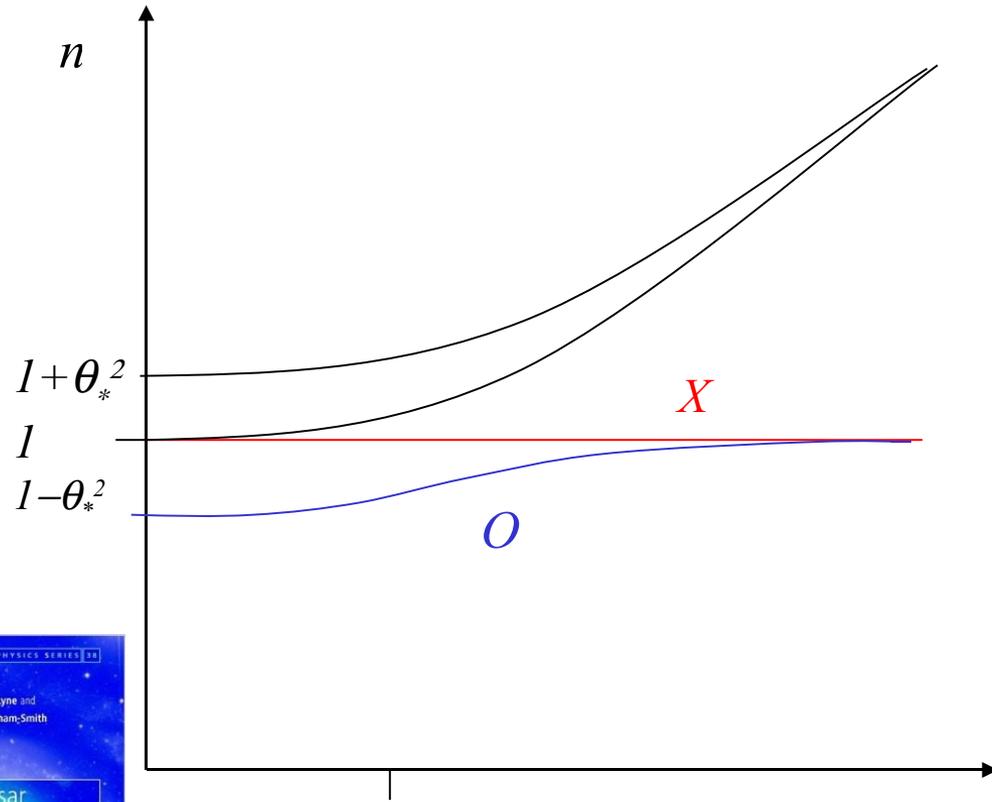
If $A_p = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \gamma \rangle \gg 1$

$$n_1 = 1,$$

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

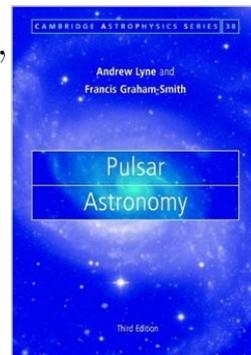
$$n_3 = 1 + \frac{\theta^2}{4} + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} \langle \frac{1}{\gamma^3} \rangle + \frac{\theta^4}{16} \right)^{1/2},$$

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



$$\theta_* = \left\langle \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 \gamma^3} \right)^{1/4} \right\rangle$$

A.Lyne, F.Graham-Smith.
Pulsar Astronomy, 3rd edition



Распространение

$$\begin{cases} \frac{dr_{\perp}}{dl} = \frac{\partial}{\partial k_{\perp}} \left(\frac{k}{n_j} \right), \\ \frac{dk_{\perp}}{dl} = - \frac{\partial}{\partial r_{\perp}} \left(\frac{k}{n_j} \right) \end{cases},$$

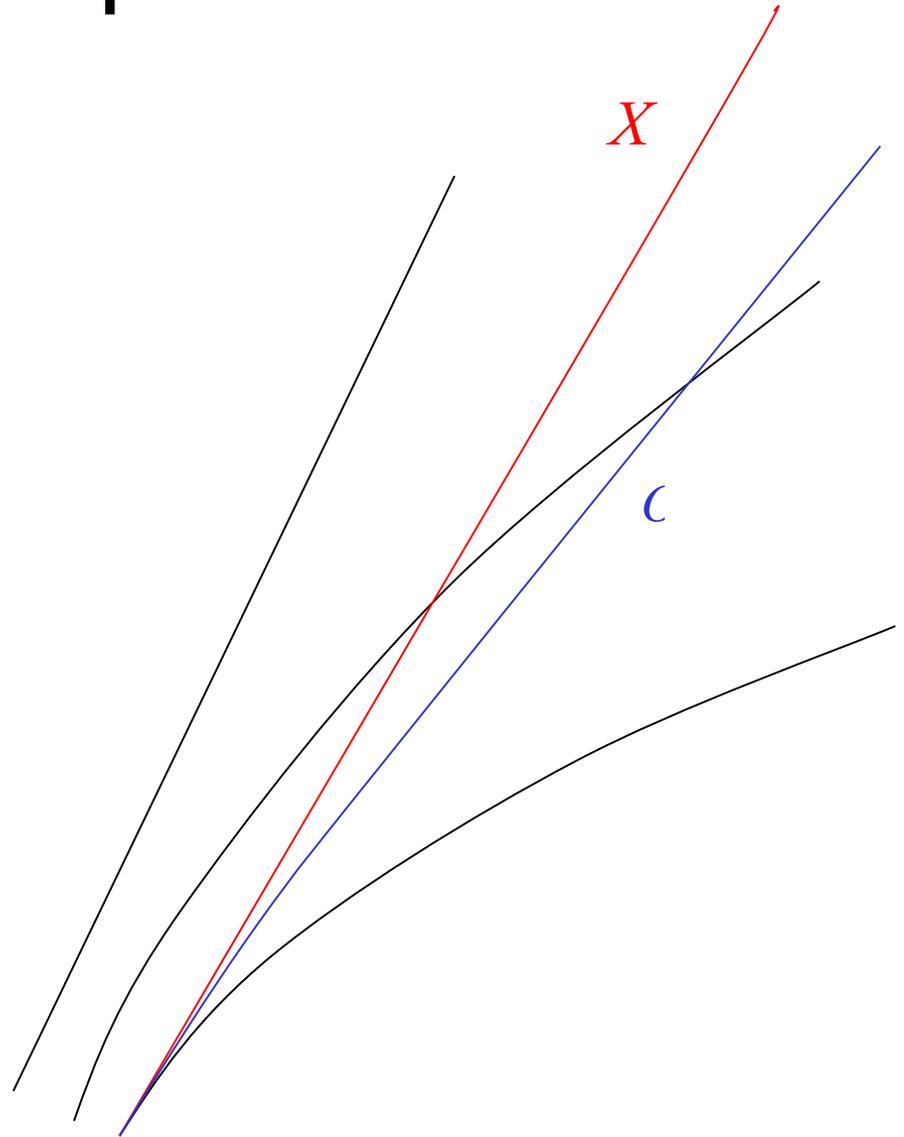
Необходимо знать $n_j(\mathbf{k}, \mathbf{r})$

BGI (1988, 1993)

Yu. Lyubarsky, S.Petrova

A&A, **333**, 181 (1998)

A&A, **355**, 1167 (2000)



БГИ - радиоизлучение

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

Основные результаты

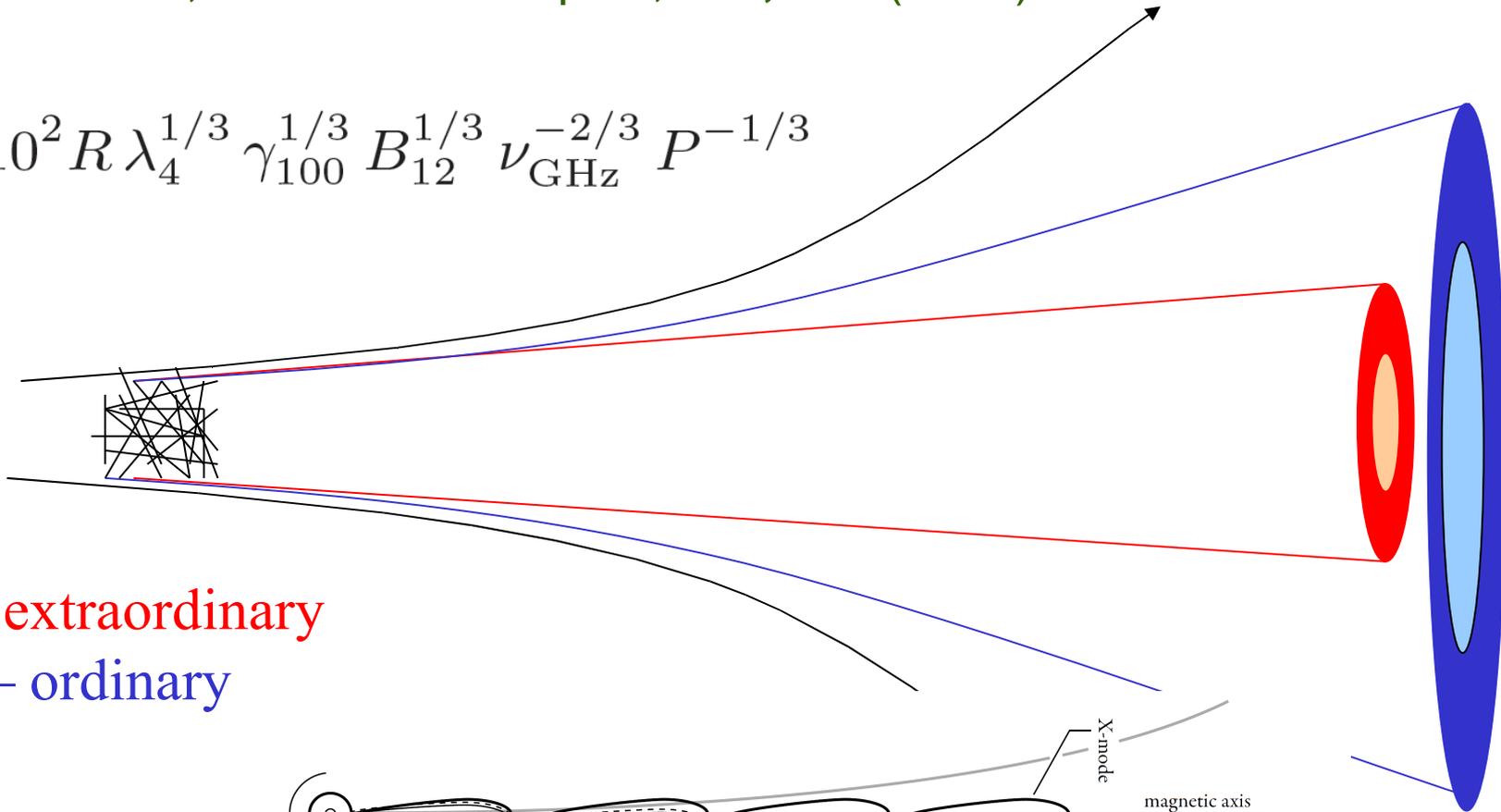
- Широкая область излучения $r < r_0(\nu)$

$$r_0(\nu) = 3.5 R \frac{\lambda_4^{1/4} B_{12}^{1/4} \gamma_{100}^{7/4}}{R_6^{1/4}} P^{-1/2} \nu_{\text{GHz}}^{-1}$$

Core & Conal

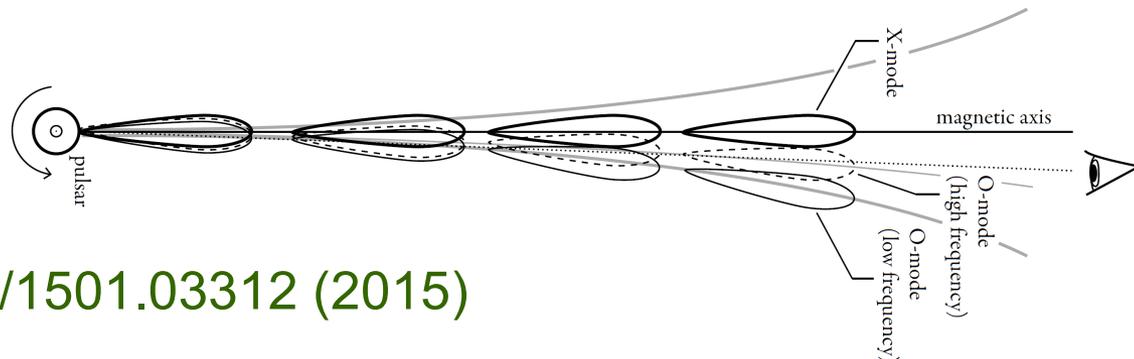
VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

$$r_A \approx 10^2 R \lambda_4^{1/3} \gamma_{100}^{1/3} B_{12}^{1/3} \nu_{\text{GHz}}^{-2/3} P^{-1/3}$$

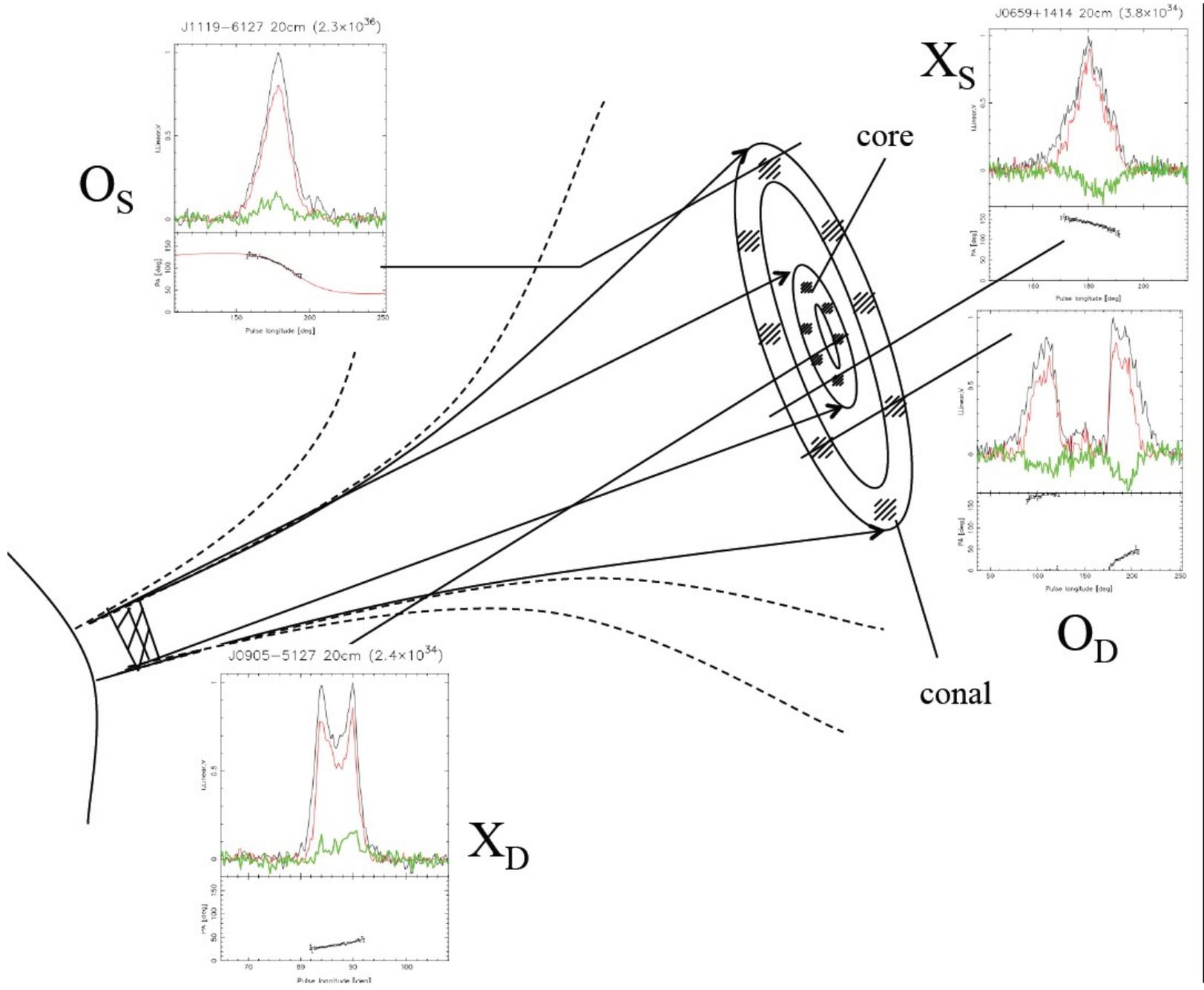


Core – extraordinary

Conal – ordinary

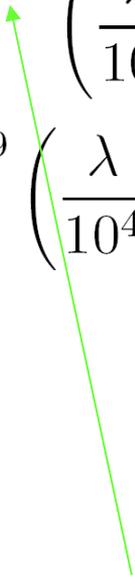


A.Noutsos et al. ArXiv/1501.03312 (2015)

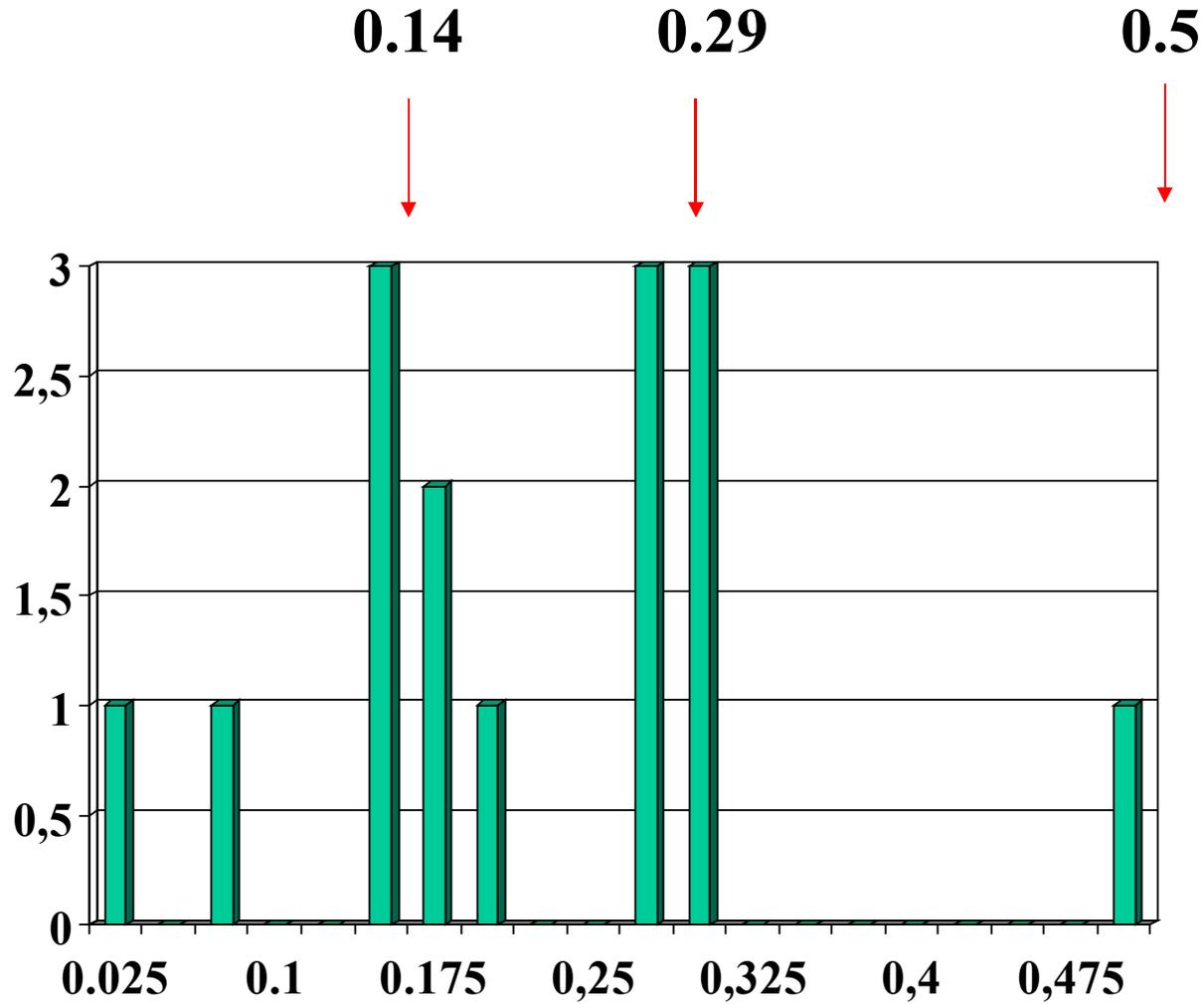


Core & Conal

VB, A.V.Gurevich, Ya.N.Istomin. ApSS, **146**, 205 (1988)

$$\begin{aligned} W_{\mathbf{X}}^{(1)} &\approx 3.6^\circ \left(\frac{P}{1\text{ s}}\right)^{-3/4} \left(\frac{\nu}{1\text{GHz}}\right)^{-1/2} \left(\frac{\lambda}{10^4}\right)^{1/8} \left(\frac{B}{10^{12}\text{G}}\right)^{1/8} \left(\frac{\gamma}{100}\right)^{7/8}, \\ W_{\mathbf{O}}^{(2)} &\approx 7.8^\circ \left(\frac{P}{1\text{ s}}\right)^{-0.43} \left(\frac{\nu}{1\text{GHz}}\right)^{-0.14} \left(\frac{\lambda}{10^4}\right)^{0.07} \left(\frac{B}{10^{12}\text{G}}\right)^{0.07} \left(\frac{\gamma}{100}\right)^{-0.11}, \\ W^{(2)} &\approx 10^\circ \left(\frac{P}{1\text{ s}}\right)^{-0.5} \left(\frac{\nu}{1\text{GHz}}\right)^{-0.29} \left(\frac{\lambda}{10^4}\right)^{0.1} \left(\frac{B}{10^{12}\text{G}}\right)^{0.1} \left(\frac{\gamma}{100}\right)^{-0.05}. \end{aligned}$$


$$W \sim v^{-a} \quad (1988)$$



$$W \sim v^{-a} \quad (2002)$$

D.Mitra, J.Rankin. ApJ. **577**, 322 (2002)

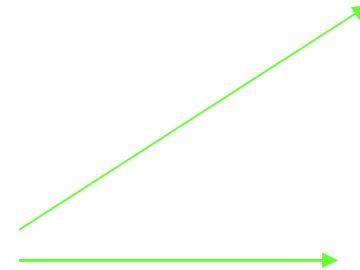
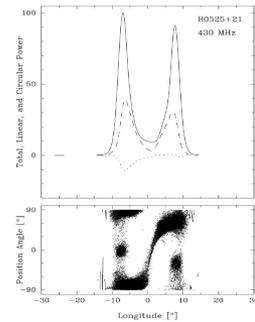
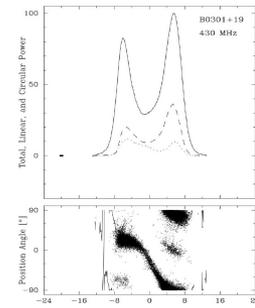
Half-power Widths — Group A (O-

mode!)

0301+19	1.040	$1.8 \pm 0.5 \times 10^3$	-0.185 ± 0.03
0525+21	0.633	262 ± 100	-0.15 ± 0.01
1237+25	1.042	$9.6 \pm 5.0 \times 10^3$	-0.15 ± 0.02
2045-16	0.875	$5.0 \pm 3.0 \times 10^3$	-0.14 ± 0.02

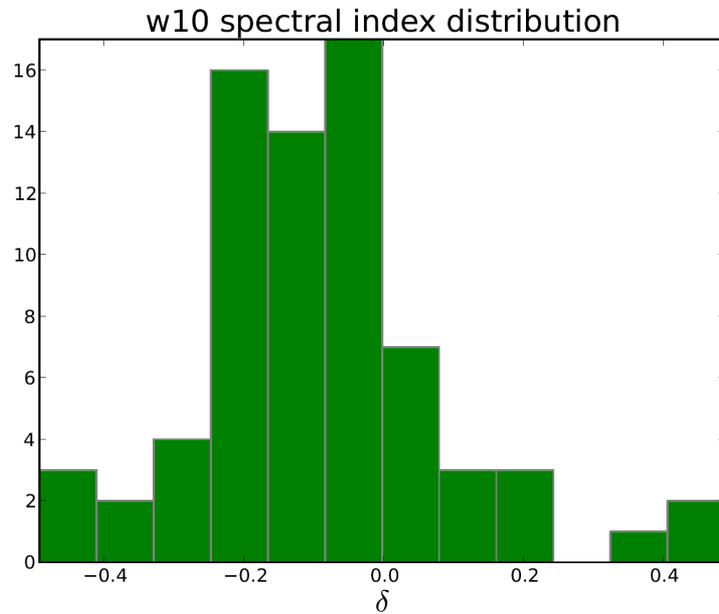
10% Widths — Group A

0301+19	1.040	$2.6 \pm 0.4 \times 10^5$	-0.13 ± 0.02
0525+21	0.633	$2.9 \pm 1.2 \times 10^3$	-0.13 ± 0.02
1237+25	1.042	$1.6 \pm 1.5 \times 10^3$	-0.13 ± 0.02
2045-16	0.875	$1.0 \pm 1.0 \times 10^5$	-0.12 ± 0.03



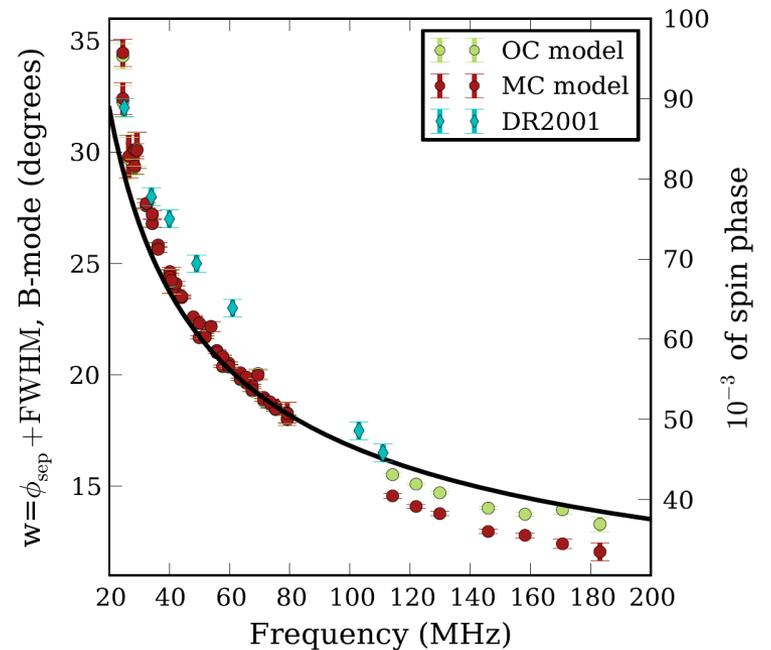
LOFAR $W \sim \nu^{-\delta}$ (2015)

M.Pilia et al, A&A, **586**, 34 (2016)



B0943+10, X-mode!

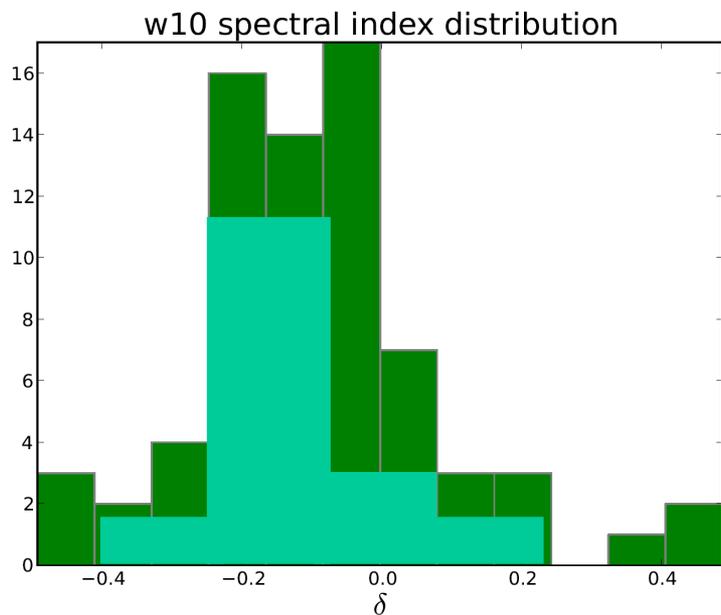
A.Bilous et al, A&A, **572**, 52 (2014)



$$w_{\text{extrap}}(\nu) = 0.384\nu^{-0.567}$$

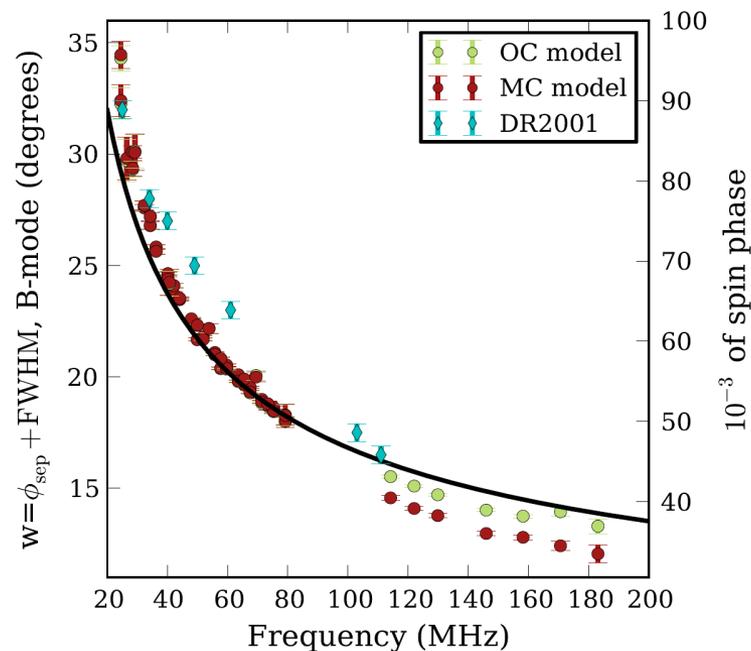
LOFAR $W \sim \nu^{-\delta}$ (2015)

M.Pilia et al, A&A, **586**, 34 (2016)



B0943+10, X-mode!

A.Bilous et al, A&A, **572**, 52 (2014)



$$w_{\text{extrap}}(\nu) = 0.384\nu^{-0.567}$$

Core & Conal

Profile	O _S	O _D	X _S	X _D
Number	6	23	45	6
\sqrt{PW}_{50}	6.8 ± 3.1	10.7 ± 4.5	6.5 ± 2.9	5.3 ± 3.0

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

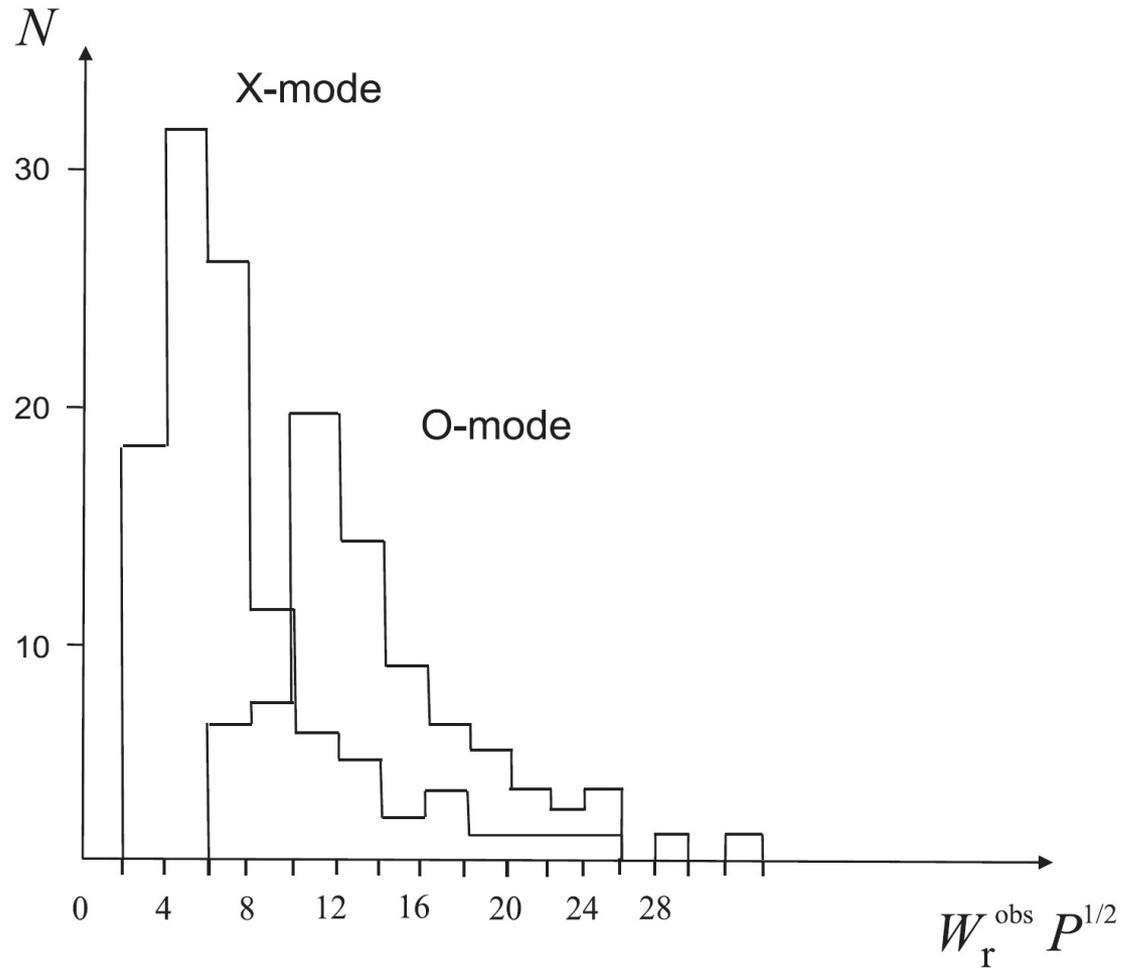
T.Hankins, J.Rankin, Astron. J., **139**, 168 (2010)

Core & Conal

Profile	O _s	O _d	X _s	X _d
Number	22	48	86	14
$P^{1/2}W_{50}$	11.7	17.2	7.4	10.6

S.Johnston, M.Kerr, MNRAS, **474**, 4629 (2018)

O- и X-моды

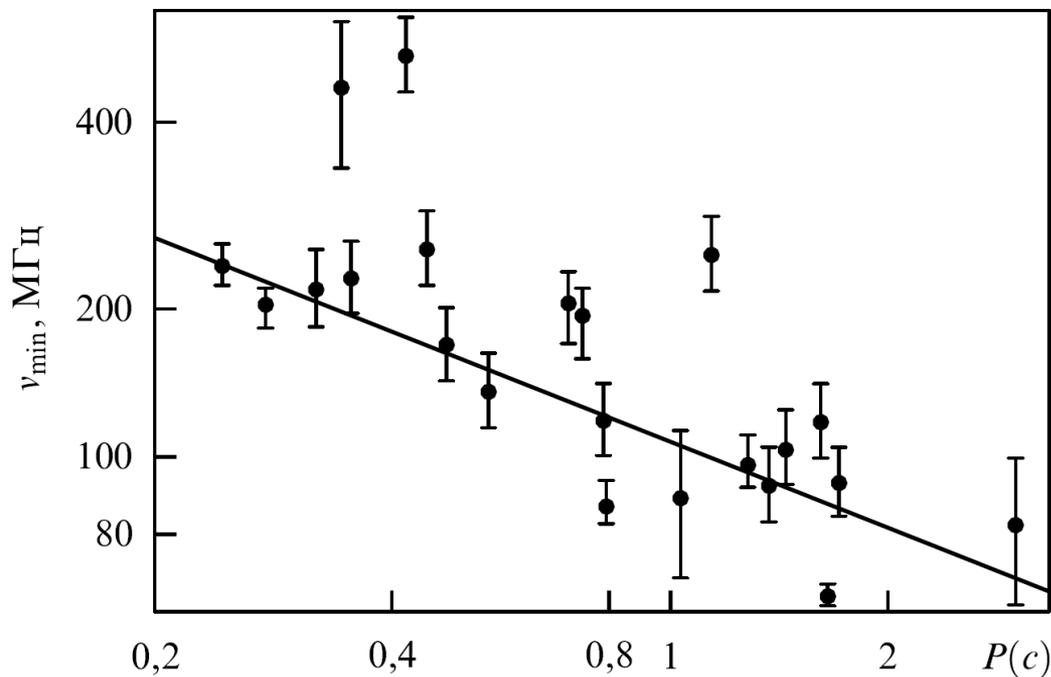


S.Johnston, M.Kerr, MNRAS, **474**, 4629 (2018)

БГИ - радиоизлучение

Низкочастотный завал

$$\nu_{\min} \approx 120 P^{-1/2} \Gamma_{100}^{-3/4} B_{12}^{1/2} \text{ МГц}$$



Заключение

Wait a minute...

