

Магнитные поля радиопульсаров

В.М. Конторович

Радиоастрономический институт НАН Украины

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

Важнейшей характеристикой пульсаров является значение напряженности магнитного поля на поверхности звезды. В отличие от рентгеновских пульсаров, где наблюдение циклотронной линии в спектре позволяет определить значение магнитного поля, в радиопульсарах поле оценивается косвенно по произведению периода на его затухание в предположении магнитодипольных потерь. Эти значения поля фигурируют во всех каталогах пульсаров. Между тем, в литературе уже давно высказывались опасения, что эти значения поля не соответствуют действительности, т.к. существует целый ряд диссипативных механизмов, которые приводят к потерям, в определенных ситуациях превышающим магнитодипольные. Об этом свидетельствует также индекс торможения, существенно отличающийся от магнитодипольного значения у многих пульсаров.

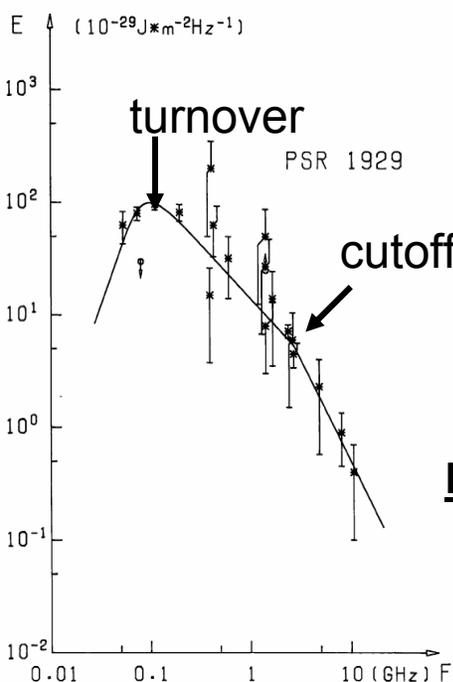
Предлагается использовать для определения магнитного поля в подходящих условиях такие особенности спектра радиоизлучения пульсаров, как высокочастотный обрыв спектра и (или) низкочастотный завал (положение максимума спектра).

Физический механизм

- Физический механизм, лежащий в основе такого определения поля, связан с тем, что ускоряющее электрическое поле в зазоре своим происхождением обязано магнитному полю и вращению. Механизм излучения во внутреннем зазоре за счет продольного ускорения в нарастающем от нуля электрическом поле, по-видимому, является преобладающим для Пуцзинской выборки пульсаров (V.M. Malofeev, Pulsar Radio Spectra, 1996;
- И Ф. Малов, Радиопульсары, 2004), что позволяет связать эти особенности спектра с магнитным полем. Обрыв спектра связан с выключением процесса излучения за счет продольного ускорения по достижении электроном релятивистских скоростей (Конторович и Фланчик, Astrophys&SpaceSci, 2013, astro-ph/1201.0261). Критерием применимости может служить существование корреляции высокочастотного обрыва и низкочастотного завала (Малофеев, Малов, 2004), по-видимому связанной с особенностями ускорения частиц в зазоре (Конторович и Фланчик, astro-ph/1210.2858, ЖЭТФ, 2013, №1) при свободном выходе электронов с поверхности звезды.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВНУТРЕННЕМ ЗАЗОРЕ И КОРРЕЛЯЦИЯ С ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПУЛЬСАРАХ

Радиоизлучения пульсаров в зазоре объясняет положение вч излома, частоты максимума и их зависимости от параметров пульсара для Пущинской выборки.



$$\nu_{cf} = 1.4 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{1 \text{ s}}{P} \right)^{0.46 \pm 0.18}$$

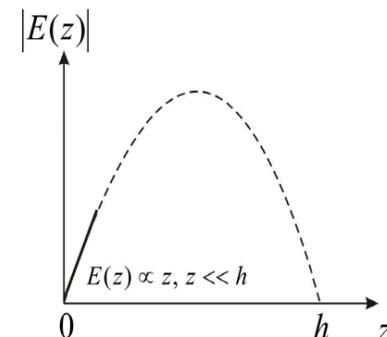
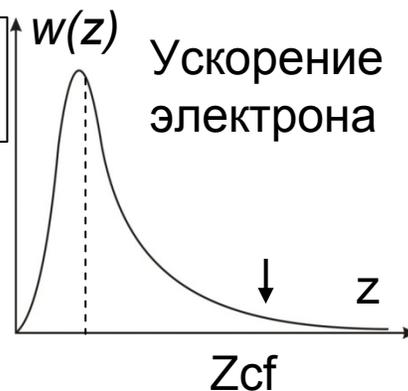
Малов, Малофеев

$$\nu_{tr} = 0.1 \nu_{cf}$$

$$\nu_{cf} = \sqrt{2} \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\left(\frac{B}{2 \cdot 10^{12} \text{ G}} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ s}}{P} \right)}$$

Конторович и Фланчик

$$\nu_{tr} = \frac{\nu_{cf}}{\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \ln \frac{4c^2}{V_T^2}} \approx 0.1 \cdot \nu_{cf}$$



Аналитическое выражение для частоты Максимума радиоизлучения в пульсарах со свободным выходом электронов с поверхности.

Объяснение известной из наблюдений (Малофеев, Малов) связи между частотами высокочастотного и низкочастотного завала

В основе теории лежит механизм продольного излучения в полярном зазоре при ускорении электронов в электрическом поле, нарастающем от нуля на поверхности звезды. При этом вся мощность попадает в радиодиапазон, гигантские радиоимпульсы и гамма излучение (за счет ОКР) высвечиваются через просветы в магнитосфере (волновод вблизи от магнитной оси), приводя к корреляции R и G.

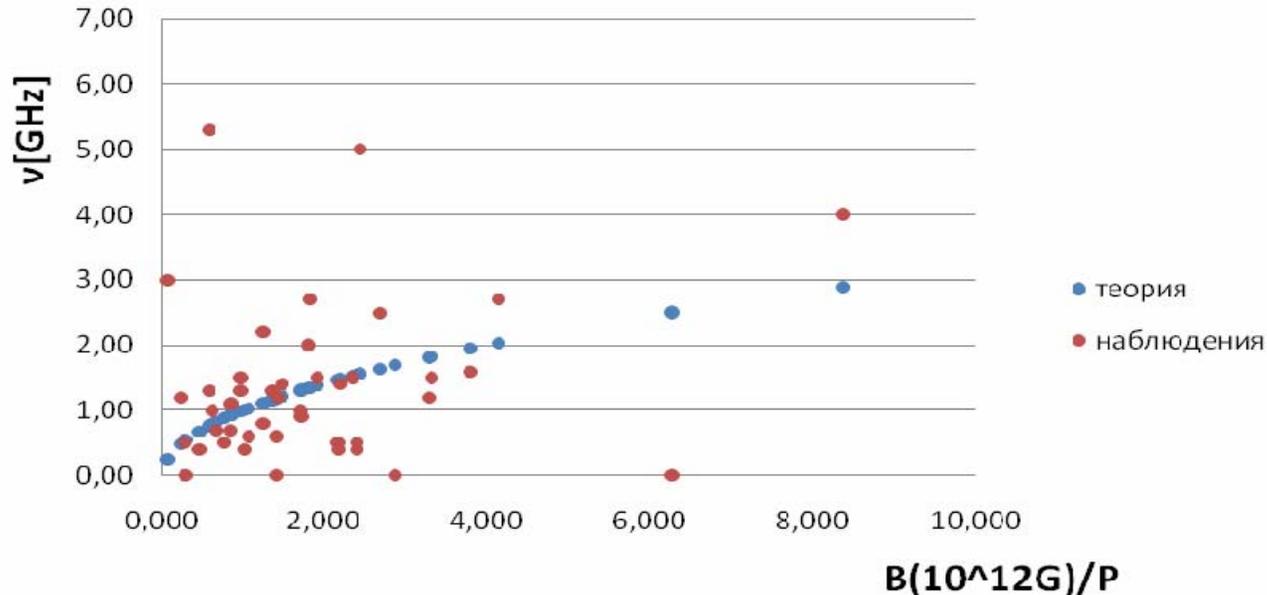
Высокочастотный излом спектра

Чрезвычайно важной особенностью предложенного механизма излучения в зазоре является ограничение возникающего радиоизлучения по частоте. Для Пуццинской выборки сильных пульсаров это проявляется в виде высокочастотного излома спектра на частоте

$$\nu_{cf} = 1.4 \cdot 10^9 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{1 \text{ s}}{P} \right)^{0.46 \pm 0.18}$$

Малов,
Малофеев

Данный механизм **подтверждает** эту зависимость частоты излома от периода пульсара и **предсказывает** зависимость частоты излома от **магнитного поля** (Конторович, Фланчик)



Зависимость частоты излома от отношения магнитного поля к периоду по данным Пуццинского каталога (С.А.Волокитин. Дипломная работа. ХНУ. 2012)

KINEMATICS OF ELECTRON ACCELERATION

IN THE LONGITUDINAL ELECTRIC FIELD OF THE VACUUM GAP

Gamma factor of the electron at acceleration in the gap defined by the equation

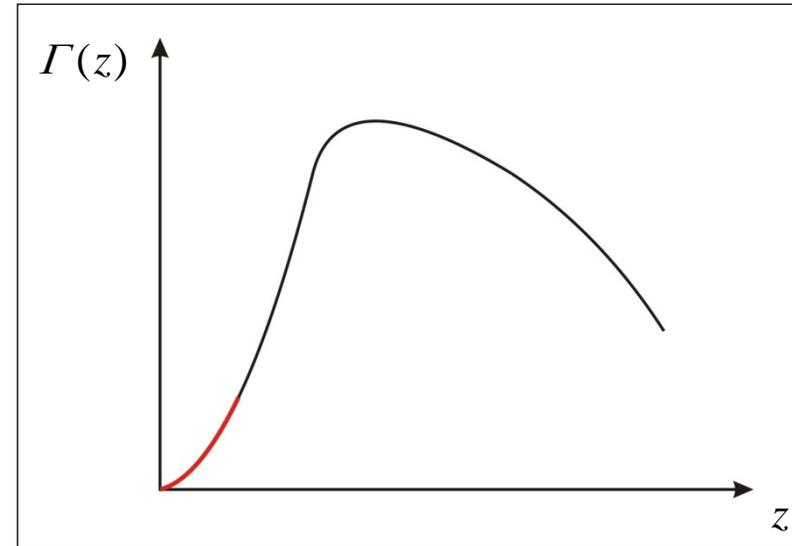
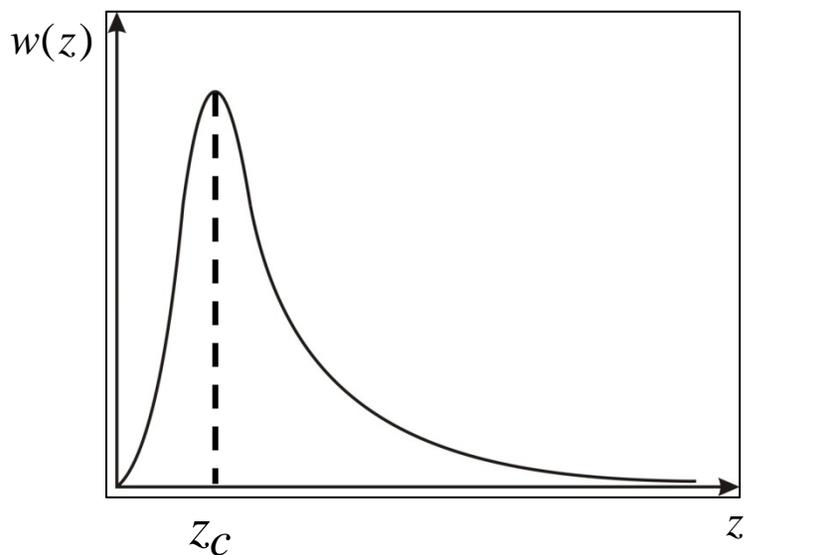
$$\frac{d\Gamma(z)}{dz} = \frac{e}{mc^2} E(z) - \frac{\mu(\Gamma)}{mc^3}$$

$E(z)$ - the longitudinal electric field, $\mu(\Gamma)$ - the losses of energy due to curvature radiation and Compton scattering

In the region of interest values of Γ energy losses can be neglected

- The velocity of the electron is

$$v(z) = c \frac{\sqrt{\Gamma^2(z) - 1}}{\Gamma(z)}$$



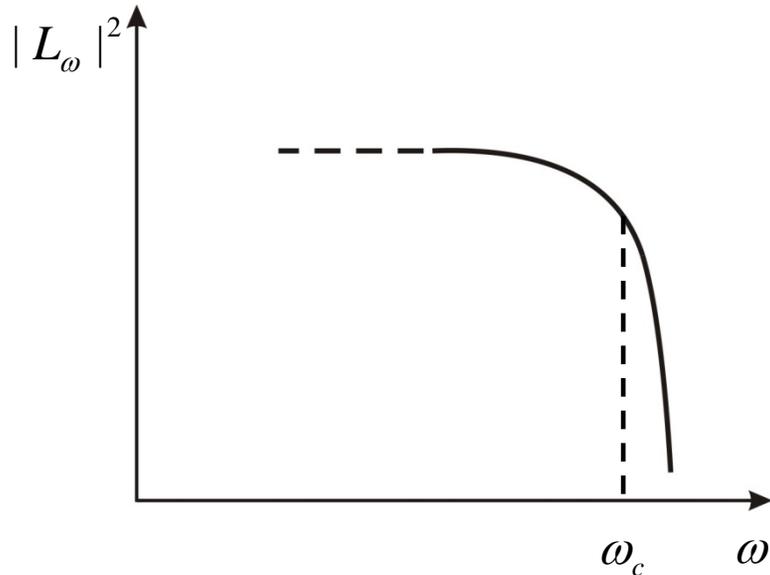
- The acceleration in the longitudinal field is

$$w(z) = \frac{eE(z)}{m\Gamma^3(z)}$$

- The acceleration has a maximum at $z \sim z_c$, this region of heights gives the main contribution to the formation of LF radiation

Radiation spectrum at the longitudinal acceleration in the high frequency region

The spectral distribution of radiation is determined by the integral L_ω



Electron achieves the relativistic velocities at $z \approx z_{cf}$ defined by

$$e \int_0^{z_{cf}} E(z) dz \approx mc^2$$

$$z_{cf} = \sqrt{5} z_* = \sqrt{\frac{2mc^2 h}{eE_0}}$$

The **maximal frequency**, above which the spectrum has the **exponential cutoff**, is determined by the condition $\omega_{cf} = 2\pi c / z_{cf}$

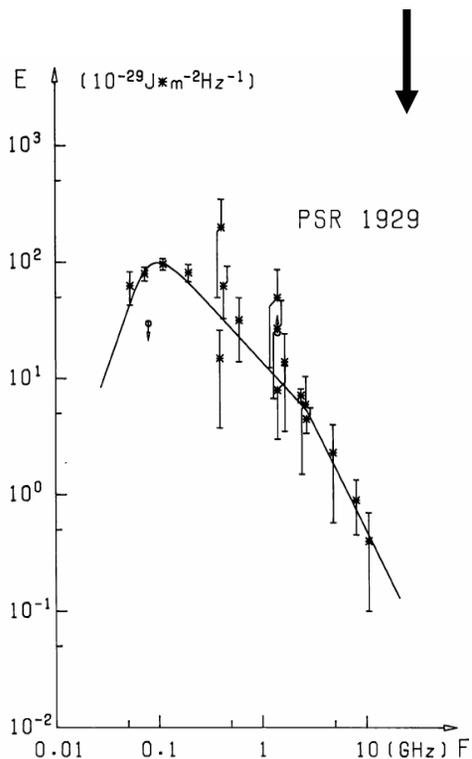
whence

$$\omega_{cf} = \pi \sqrt{\frac{2eE_0}{mh}}$$

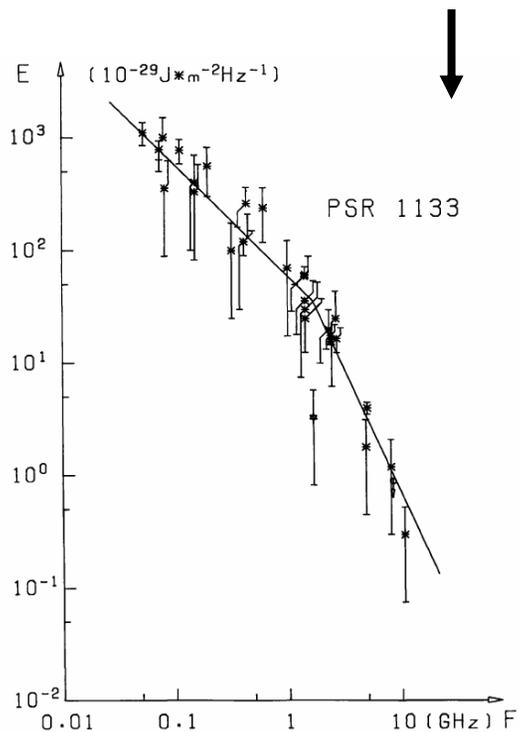
$$\Gamma_{cf} = 2, \quad v_{cf} = \sqrt{3}c / 2$$

В исследованном интервале частот у данных пульсаров :

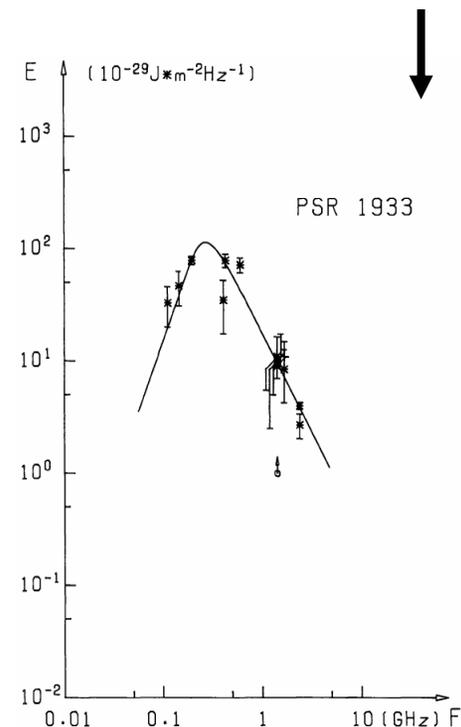
Есть и нч завал и вч излом



Нет нч завала



Нет вч излома



$$\omega_{tr} = 0.1 \omega_{cf}$$

Для 32 пульсаров, у которых наблюдается и вч излом и нч завал спектра, из наблюдений (Малофеев, Малов, 1980) следует связь между этими частотами

Выражение для магнитного поля

- Выражение для напряженности магнитного поля B в терагауссах через период P в секундах и частоту обрыва спектра в гигагерцах, ν_{cf} (Конторович, EMES'2012) при условии преобладания обсуждаемого механизма радио излучения, имеет вид

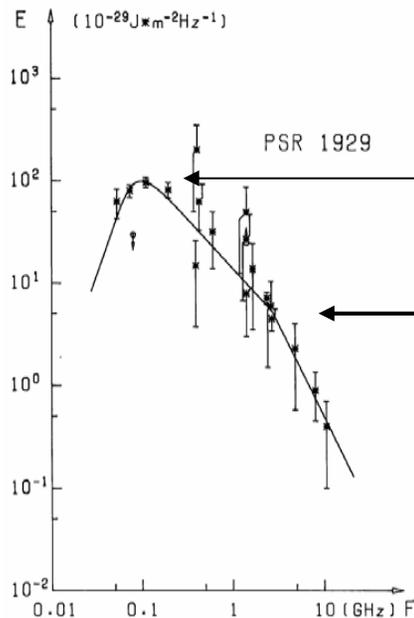
$$B = P \cdot \nu_{cf}^2$$

- Безразмерный численный коэффициент порядка единицы зависит от геометрии и допускает уточнения. Сравнение с данными для Пущинской выборки показывает, что значения поля имеют нужный порядок величины (несколько терагаусс), но значительно отличаются от каталожных значений. Это может означать, что механизм потерь, по крайней мере, для Пущинской выборки, отличается от магнитодипольного.

Связь высокочастотного излома и низкочастотного завала спектра

Связь частот вч излома и нч завала (максимума спектра) для Пущинской выборки играет принципиальную роль в рассматриваемом нами механизме и объясняется особенностями ускорения частиц в зазоре (Конторович и Фланчик, 2012):

Она может использоваться как метод контроля и применимости

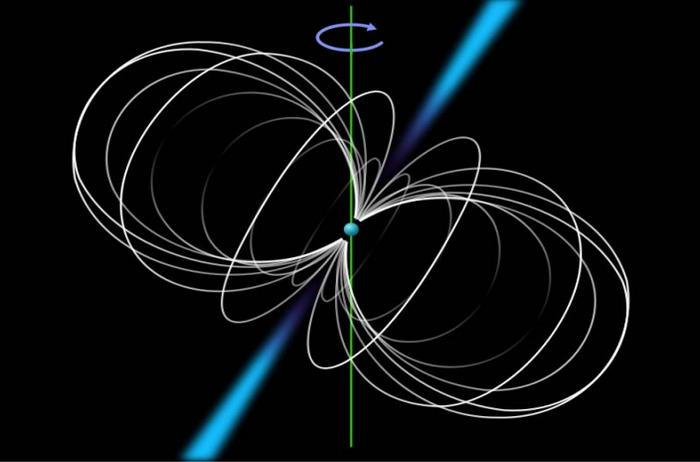


в соответствии с результатом Малофеева и Малова

$$\omega_{tr} = \frac{\omega_{cf}}{\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \ln \frac{4c^2}{V_T^2}}$$

$$\frac{4c^2}{V_T^2} \approx 10^4 \quad \ln \frac{4c^2}{V_T^2} \approx 9.2$$

$$\omega_{tr} \approx 0.1 \omega_{cf}$$



Механизмы потерь

$$\frac{R_*^6 \Omega^4}{6c^3} B^2 \sin^2 \beta = I \Omega \dot{\Omega}$$

магнито-дипольный

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{f_*^2}{4} \frac{R_*^6 \Omega^4}{c^3} i_s B^2 \cos \beta \propto B^2 \cos^2 \beta$$

ТОКОВЫЙ

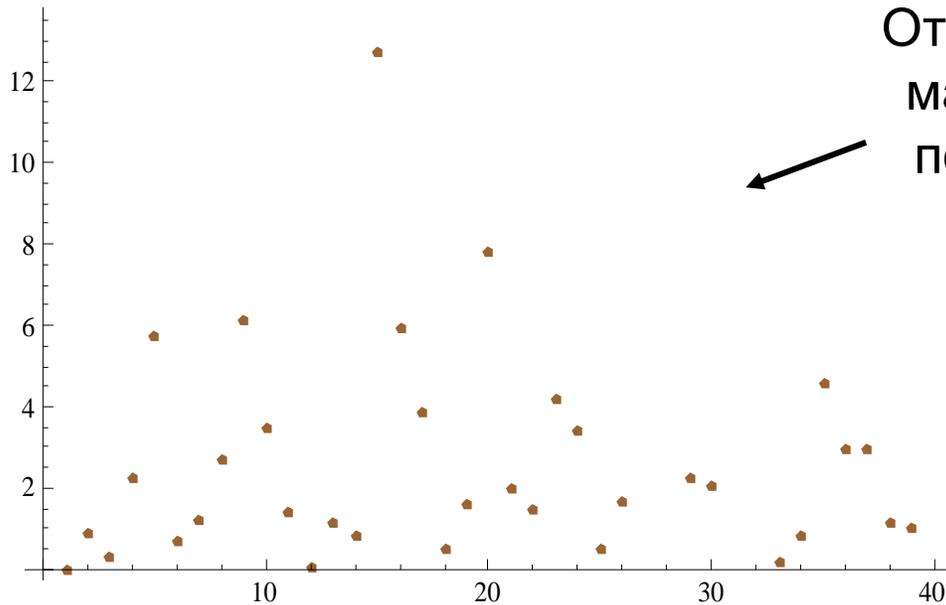
Схема одиночного радиопульсара

β -- угол между осями

- Полученные данные можно использовать для определения некоторых важных физических параметров. В предположении, что потери магнитодипольные, каталожное значение поля содержит множителем синус угла между осью вращения и магнитным полем на полюсе. Определенное по ВЧ завалу значение поля содержит косинус этого угла, возникающий из продольного электрического поля. Их частное даст нам значение тангенса угла – важный параметр пульсара.
- Если потери токовые, то оба значения могут содержать косинус угла. Их частное равно отношению продольного тока к току ГДж. Это важный параметр, существенный для построения адекватной теории магнитосферы.
- Интересно выяснить, какой тип спектров реализуется в перемежающихся пульсарах, т.к. там происходит смена механизма излучения в различных состояниях магнитосферы.

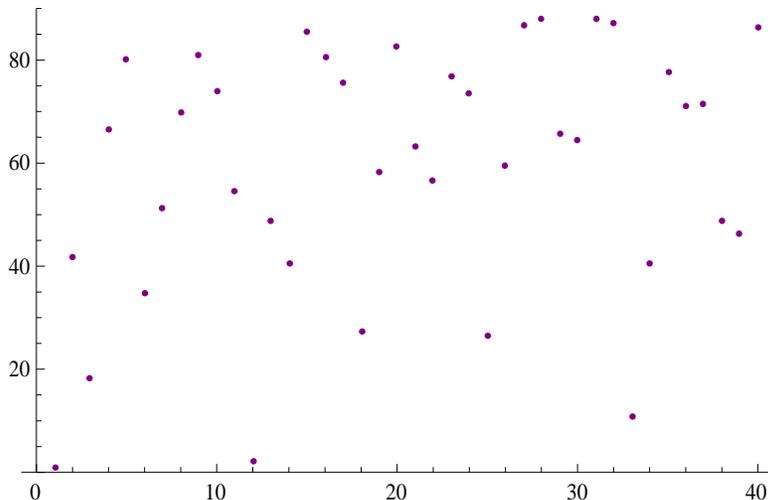
В одном состоянии предполагается, что потери магнито-дипольные, в другом, что они токовые.

Определение углов и токов



Отношение удвоенной напряженности магнитного поля из каталога АТНФ к полю, определенному по ВЧ завалу

В модели магнитодипольных потерь - это тангенс угла между осью вращения и магнитным моментом. В модели токовых потерь эта величина должна быть пропорциональна продольному току в магнитосфере пульсара



Угол между осью вращения и магнитным моментом для пущинской выборки

Угол в градусах, модель магнитодипольных потерь. В поперечных случаях должны быть интеримпульсы. Их отсутствие свидетельствует против модели магнитодипольных потерь.

Литература

- [1] V.M. Malofeev, Pulsar Radio Spectra. ASP Confer. Series, Vol. 105, p. 271, 1996.
- [2] И Ф. Малов, Радиопульсары, Наука, Москва, 2004, 192 с.
- [3] V.M. Kontorovich, On high brightness temperature of pulsar giant pulses,
astro-ph/0911.3272
- [4] В.М. Конторович, Гигантские импульсы пульсаров. ВАНТ, №4 (68), с.143, 2010.
- [5] V.M. Kontorovich, A.B. Flanchik, High-frequency cut-off of spectrum and change in the mechanism of radio emission in pulsars. astro-ph/1201.0261
- [6] В.М. Конторович, А.Б. Фланчик, О связи частоты максимума в спектре излучения пульсара с частотой в / ч излома спектра. ЖЭТФ, №1, 2013,
astro-ph/1210.2958.
- [7] В.М. Конторович, А.Б. Фланчик, Теория радиоизлучения во внутреннем зазоре и корреляция с гамма-излучением в пульсарах.
<http://hea.iki.rssi.ru/d/conf/2011/hea/talk/77/>
- [8] В.М. Конторович, Электромагнитный смерч в вакуумном зазоре пульсара.
ЖЭТФ, Т. 137, №6, с. 1107, 2010.
- [9] V.M. Kontorovich, Disappearance of main pulse of Crab pulsar as a result of change mechanisms of radio emission, JENAM 2011, Book of abstracts, p. 70, 2011.
- [10] V.M. Kontorovich, A.B. Flanchik, Low-frequency radio emission with acceleration of electrons in a polar gap of a pulsar, <http://www.ioffe.ru/astro/NS2011/index.html>