

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

523.84(648)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
(28 сентября 1977 г.)**

28 сентября 1977 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны следующие доклады:

1. В. А. Удальцов, А. В. Пынзарь, А. П. Глушаков. Радиоастрономические исследования по проблеме: пульсар — остаток вспышки сверхновой.

2. Ю. П. Очелков, В. В. Усов, А. И. Цыган. Природа радиоизлучения пульсаров.

3. Л. М. Озерной, В. В. Усов. Происхождение высокочастотного (оптического, рентгеновского и гамма-) излучения пульсаров.

Ниже публикуется краткое содержание прочитанных докладов.

523.84 (048)

В. А. Удальцов, А. В. Пынзарь, А. П. Глушаков. Радиоастрономические исследования по проблеме: пульсар — остаток вспышки сверхновой. В настоящее время полагают, что пульсары и остатки вспышек сверхновых (ОВС) генетически связаны. Предполагают, что такими парами являются Крабовидная туманность с пульсаром 0532 и Vela X с пульсаром 0833. Пульсар в Крабовидной туманности отождествляется многими авторами с компактным мерцающим источником непрерывного длинноволнового радиоизлучения с крутым спектром.

Поиску таких источников в ОВС была посвящена работа Пынзаря и Удальцова, выполненная в 1975/76 гг. с помощью нового радиотелескопа БСА ФИАН<sup>1</sup>. В результате этого поиска был обнаружен мерцающий источник в остатке сверхновой HB9 (G160,4 + 2,8). По наблюдениям в июне 1976 г. плотность потока этого источника на 102 Мгц —  $0,7 \pm 0,3$  ян. Источник находится внутри оболочки туманности у восточного края ее на расстоянии 20 пс от центра. Относительное положение этого источника и туманности HB9 показано на радиоизотопах, приведенных на рис. 1. Если источник генетически связан с HB9, то при возрасте туманности  $10^5$  лет, угловом размере ее  $2^\circ$  и расстоянии до нее 1,1 кпс относительная скорость источника должна быть 200 км/с. Такое значение не противоречит наблюдаемым скоростям пульсаров. Источник, по-видимому, является молодым пульсаром, импульсное излучение которого в метровом диапазоне волн не наблюдается из-за эффекта «размытия» его в среде между источником и наблюдателем, а в сантиметровом — из-за малого потока энергии при крутом спектре его.

Блендфорд и др.<sup>2</sup> показали возможность образования радиогало вокруг старых пульсаров.

В 1976—1977 гг. с помощью радиотелескопа БСА ФИАН авторами был осуществлен выборочный поиск источников непрерывного радиоизлучения в направлении пульсаров. Предельно обнаружимая плотность потока была 1 ян. В результате этого поиска в направлении пульсара 2217 + 47 был обнаружен источник непрерывного излучения с потоком около 4 ян на 102 Мгц. Малая разрешающая способность БСА ( $48' \times 23'$  sec  $\theta$ ) не позволила однозначно связать наблюдаемый источник с пульсаром. Средняя плотность потока пульсара в период наблюдений была примерно на порядок меньше. Из измерений<sup>3</sup>, выполненных в США на РТ-92, следует, что в направлении пульсара 2217 на волне 40 см не наблюдается источника с непрерывным излучением

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1978.

и потоком более 0,7 ян. Таким образом, если наблюдаемый источник совпадает с пульсаром, то спектральный индекс его должен быть больше или равным 0,9.

Известно, что спектры несут в себе информацию о природе и структуре источников излучения. Так, тестом обнаружения в ОВС источника непрерывной эмиссии релятивистских электронов (например, пульсара) может быть перегиб в спектре туманности с изменением спектрального индекса на 0,5. Такой спектр наблюдается у Крабовидной

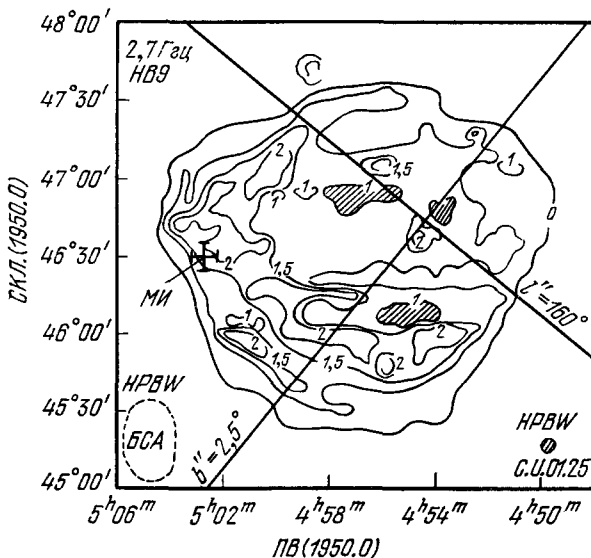


Рис. 1. Относительное положение остатка вспышки сверхновой NB9 и мерцающего источника (МИ).

Изофоты NB9 на 2,7 гГц заимствованы из работы Виллиса.

туманности. Аналогичные спектры были обнаружены в последние годы у старых ОВС Петли в Лебеде и NB9. Однако в связи с низкой частотой перегиба этих спектров ( $10^9$  гц), по сравнению с соответствующей частотой Крабовидной туманности ( $10^{14}$  гц), наблюдаемый излом спектров Петли в Лебеде и NB9 объясняется иным образом — особенностью синхротронного спектра Галактики. При этом предполагается, что излучение старых ОВС является следствием расширения ударной волны от взрыва сверхновой и обуславливается нагретым магнитным полем и релятивистскими электронами межзвездной среды.

В 1974—1976 гг. Удальцовым были проведены исследования низкочастотных спектров некоторых ОВС. Измерения потоков проводились на частотах 60, 83, 102, 111 Мгц с помощью радиотелескопа ВЗ ДКР 1000. В результате этих измерений были обнаружены изломы спектров еще у двух ОВС ( $G 11,2 - 0,4$ ,  $G 31,9 + 0,0$ ) и подтверждены у W49B, 3C 397, NB9 и двух компонент Петли в Лебеде. Компилационные спектры этих ОВС приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что изменение спектрального индекса в точке излома у всех ОВС близко к 0,5 и что частоты излома всех ОВС, кроме Крабовидной туманности, лежат в области частот 0,1 — 1 Гц. Остатки сверхновых  $G 11,2 - 0,4$ ,  $G 31,9 + 0,0$ ,  $G 43,3 - 0,3$  существенно моложе NB9, так как их линейные размеры (12 нс) — в четыре раза меньше<sup>4</sup>. Поэтому вклад излучения нагретой оболочки у них должен быть малым и, соответственно, перегиб спектра не может объясняться спектром галактического излучения. Вопрос о природе излома спектров ОВС остается открытым.

В 1971—1976 гг. в Пущино были проведены исследования распределения радиояркости области центра Галактики в метровом диапазоне волн. Исследовалась область радиусом  $2''$  от центра. Измерения проводились на пяти частотах с помощью радиотелескопа ВЗ ДКР 1000, имеющего ножевую диаграмму направленности  $8',7 \times 3',5$  на 120 Мгц. В результате первого цикла исследований, выполненного Брезгуновым, Дагкесаманским и Удальцовым<sup>5</sup>, были обнаружены близко от центра Галактики три нетепловых источника радиоизлучения. На эти источники независимо обратил внимание Даунс и классифицировал их как ОВС.

В результате второго цикла исследований, выполненного Удальцовым, было обнаружено еще шесть нетепловых радиоисточников. Измеренные параметры этих

источников — прямые восхождения, плотности потоков на пяти частотах, выраженные в янских, и спектральные индексы в диапазоне 83—120 Мгц приведены в таблице.

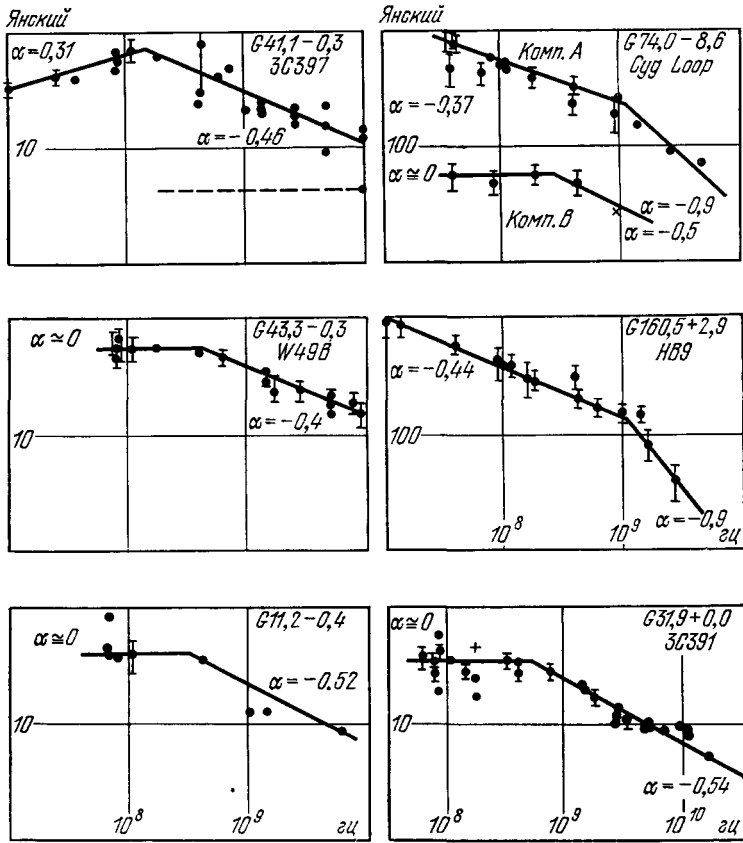


Рис. 2. Спектры остатков вспышек сверхновых, имеющих излом в радиодиапазоне.

Из таблицы видно, что все источники, расположенные ближе к центру, имеют инверсионные спектры, а периферийные — крутые (со спектральным индексом

ПВ (1950,0)	S (83)	S (95)	S (100)	S (110)	S (120)	$\alpha$ (83—120)	Литера- тура
1) 17.37.10	31±6	38±8	34±7	21±4	10±2	-2,5	
2) 17.38.45	20±4	14±3	13±3	9±2	8±2	-2,5	
3) 17.40.36	16	20±4	14±3	12±2	12±2	-1,3	
4) 17.41.49	3	4±3	4±3	5±3,5	8±5	+2	
17.42.29	ЦГ						
5) 17.43.01	21±4	43±8	46±9	39±8	44±9	+1,5	4, 5
6) 17.44.10	13	14±3	28±6	21±4	28±6	+2,7	4, 5
7) 17.45.22	6	14±3	21±4	22±4	23±5	+2,6	4, 5
8) 17.46.34	15	13±3	16±3	10±2		-2,1	
9) 17.48.28	9±2	14±3	11±2	8±2	9±2	-1,1	

Точность определения прямых восхождений —  $\pm 5''$ . Все источники имеют склонение в пределах области  $\delta = 28^{\circ}30' \pm 2''$ .

больше 1). Инверсионные спектры обусловлены поглощением радиоизлучения в среде окружающей ядро Галактики. Истинные спектры всех наблюдаемых источников, по-видимому, — крутые.

Есть основания полагать, что все девять наблюдаемых источников являются ОВС, а специфические особенности их обуславливаются влиянием ядра Галактики. Крутые спектры источников указывают также на возможность классифицировать их как молодые пульсары, импульсное излучение которых преобразовалось под влиянием окружающей среды в непрерывное.

Из того факта, что поглощение излучения радиоисточников зависит от углового расстояния их от центра Галактики, делается вывод о том, что источники действительно находятся в области центра и расстояние до них соответственно равно 10 кс.

В заключение следует обратить внимание на то, что все девять откликов этих источников непрерывно следуют друг за другом. Это дает основания полагать, что в исследуемой области источников, по-видимому, больше, чем наблюдается, так как часть из них не разрешается диаграммой направленности радиотелескопа.

Высокая концентрация нетепловых радиоисточников в области центра Галактики, по-видимому, свидетельствует о повышенной вспышечной активности этого района Галактики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Виткевич и др., Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 19, 1594 (1976).
2. R. D. Blandford et al., Astron. and Astrophys. 23, 145 (1973).
3. T. Velusamy, M. R. Kundu, Astrophys. Lett. 17, 177 (1976).
4. D. Downes, Astron. J. 76, 305 (1971).
5. В. И. Арискин и др., Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 16, 1334 (1973).

523.84 (048)

**Ю. П. Очелков, В. В. Усов, А. И. Цыган** Природа радиоизлучения пульсаров. За десять лет, прошедших с момента открытия пульсаров, было установлено, что:

- 1) пульсары являются вращающимися нейтронными звездами;
- 2) период следования импульсов радиоизлучения пульсара (P) совпадает с периодом вращения нейтронной звезды;
- 3) источником нетеплового излучения пульсаров является энергия, выделяющаяся при замедлении вращения нейтронной звезды  $\dot{E}_{\text{кин}} = I\omega\dot{\omega}$ , где  $I$  — момент инерции нейтронной звезды,  $\omega = 2\pi/P$ ;
- 4) торможение нейтронной звезды происходит за счет «натяжения» магнитных силовых линий;

5) радиоизлучение пульсаров генерируется в их магнитосферах за счет пока неизвестного когерентного механизма (см. подробнее <sup>1</sup>).

Для построения теории радиоизлучения пульсаров необходимо знать структуру и параметры их магнитосфер. Хотя самосогласованного решения для конфигурации электромагнитного поля и распределения плазмы в магнитосферах пульсаров пока нет, но уже сейчас с достаточно большой степенью надежности можно утверждать следующее:

- 1) напряженность магнитного поля  $H$  на поверхности пульсара составляет  $\sim 10^{12} - 10^{13}$  эс;
- 2) поверхность большинства пульсаров (кроме, возможно, «молодых» объектов типа NP 0532 и PSR 0833) твердая;
- 3) напряженность электрического поля вблизи поверхности пульсара достигает  $\sim (0,1 - 1) \times (\omega R/c) H$ , где  $R \approx 10^6$  см — радиус нейтронной звезды;
- 4) плазма магнитосферы состоит из ультрарелятивистских электронов и ядер, вызываемых электрическим полем с поверхности нейтронной звезды, и вторичных релятивистских электронно-позитронных пар, рождающихся из жестких гамма-квантов;

5) в ближней зоне магнитосферы плазма движется вдоль искривленных силовых линий магнитного поля.

В литературе обсуждается около двадцати конкретных мазерных и антенных механизмов, которые могут быть ответственными за генерацию радиоизлучения пульсаров. В последнее время все чаще радиоизлучение пульсаров пытаются объяснить когерентным излучением заряженных сгустков плазмы, движущихся вдоль искривленных магнитных силовых линий. Это связано всего лишь с тем, что в данной модели проще, чем в других, рассчитать параметры радиоизлучения пульсаров (никаких же глубоких физических причин, выделяющих этот механизм радиоизлучения пульсаров, пока нет). Зная характер излучения одиночного сгустка <sup>2</sup>, можно для различной геометрии магнитного поля вне пульсара рассчитать радиоизлучение системы движущихся

сгустков. В докладе показано, что при соответствующем выборе параметров сгустков можно объяснить интенсивность и спектр радиоизлучения пульсаров. Однако остается неясным вопрос, как такие сгустки образуются в магнитосфере пульсаров. Так, например, в работе<sup>3</sup> отмечается, что хотя электронно-позитронная плазма в магнитосфере пульсаров и неустойчива, но эта неустойчивость не успевает существенно развиться за время выхода плазмы за пределы светового цилиндра.

Неопределенность в теории радиоизлучения пульсаров отражает тот факт, что до сих пор продолжают предлагать новые модели радиоизлучения пульсаров. Одна из таких моделей<sup>4</sup>, радикально отличающаяся от уже существующих, обсуждалась в докладе. Согласно этой модели, остывшая нейтронная звезда проявляет себя как радиопульсар только в том случае, когда она окружена достаточно плотным нейтральным газом. Этот газ, аккрецируемый на нейтронную звезду, ионизируется на расстоянии  $\sim 10^2$  радиусов звезды, образуя слой плазмы. В электрическом поле звезды может происходить разделение зарядов этой плазмы и образование сгустков заряженных частиц. Двигаясь к поверхности звезды по искривленным магнитным силовым линиям, сгустки излучают вдоль направления своего движения электромагнитные волны в радиодиапазоне. Затем радиоизлучение отражается от поверхности нейтронной звезды и уходит в космическое пространство в относительно узком телесном угле. Данная модель непринужденно объясняет отсутствие зависимости расстояния от пульсаров до плоскости Галактики от их возраста.

#### ЛИТЕРАТУРА

- V. L. Ginzburg, V. V. Zheleznyakov, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 13, 511 (1975).  
 A. Siggion; Astron. and Astrophys. 44, 285 (1975).  
 G. Benford, R. Buschauer, Mon. Not. RAS 179, 189 (1977).  
 А. И. Цыган, Препринт ФТИ АН СССР № 547, Ленинград, 1977.

523.84 (048)

Л. М. Озерной, В. В. Усов. Происхождение высокочастотного (оптического, рентгеновского и гамма-) излучения пульсаров. Длительное время пульсар NP 0532 в Крабовидной туманности был единственным, от которого, кроме радиоизлучения, регистрировалось пульсирующее высокочастотное излучение (инфракрасное, оптическое, рентгеновское и гамма). Впоследствии гамма-излучение было найдено и у пульсара PSR 0833-45 в Парусах; упорные поиски от него оптического излучения в последнее время также увенчались успехом<sup>1</sup>. Возможность генерации высокочастотного излучения связывалась с молодостью пульсара, и отсутствие оптического и рентгеновского, не говоря уже о  $\gamma$ -излучении, от пульсаров среднего и «пожилого» возраста казалось вполне естественным. Тем более неожиданным явилось открытие<sup>2</sup> в 1976 г. с помощью спутника SAS-2 пульсирующего  $\gamma$ -излучения от двух ничем не выделяющихся радиопульсаров PSR 1747-46 и 1818-04 \*). Мощность их  $\gamma$ -излучения с энергией в десятки Мэв, пульсирующего с тем же периодом ( $\sim 0,5$  сек), что и в радиодиапазоне, оказалось в  $10^5$  —  $10^6$  раз большей, чем мощность радиоизлучения. Поэтому мы вправе говорить не столько о феномене радиопульсара, сколько о  $\gamma$ -пульсаре, и значение этого факта для теории пульсаров трудно переоценить.

До открытия  $\gamma$ -излучения от старых пульсаров теория не встретила особых затруднений в объяснении высокочастотного излучения пульсара в Крабе посредством некогерентных механизмов\*\*). Конкретно, если его радиоизлучение образуется вблизи светового цилиндра (модель Смита — Железнякова), то инфракрасное, оптическое, рентгеновское и гамма-излучение с энергией в сотни Мэв могут быть объяснены синхротронным излучением источника, пространственно близкого к источнику радиоизлучения<sup>5-9</sup>. Происхождение наиболее энергичной (и при этом переменной) части  $\gamma$ -спектра с энергией  $10^{12}$  —  $10^{13}$  эв связывается с обратным комптон-эффектом<sup>10</sup>.

Синхротронным механизмом, видимо, может быть объяснено и оптическое излучение пульсара в Парусах, так как его мощность согласуется с ожидаемой при этом механизме излучения зависимостью<sup>11</sup>  $L \propto P^{-10}$ . Имеется попытка интерпретировать и  $\gamma$ -излучение этого пульсара синхротронным механизмом<sup>12</sup>.

В то же время синхротронный механизм излучения источником, локализованным вблизи светового цилиндра, в применении к старым пульсарам приводит к возможной

\* На симпозиуме по гамма-астрономии (Фраскати, май 1977 г.) сообщено об обнаружении еще трех пульсирующих гамма-источников, из которых два отождествлены с радиопульсарами PSR 1822-09 и 1742-30<sup>3</sup>.

\*\* Хотя в оптическом диапазоне эффективная температура излучения не превышает  $10^{11}$  °К, некоторые авторы привлекают для его объяснения когерентные механизмы излучения сгустками частиц<sup>4</sup>.

мощности их  $\gamma$ -излучения, которая на много порядков ниже значений, вытекающих из данных SAS-2. Недееспособными оказываются и другие некогерентные механизмы, за исключением излучения релятивистских электронов, обусловленного кривизной магнитных силовых линий (curvature radiation<sup>13</sup>). В сильном искривленном магнитном поле, когда энергия трансверсального поля движения релятивистских электронов быстро высвечивается, дальнейшие потери электронов на излучение обусловлены изгибом магнитных силовых линий; это излучение для краткости мы будем далее называть «изгибным».

В отличие от синхротронного излучения, мощность которого пропорциональна  $E_e^2$  ( $E_e$  — энергия релятивистских электронов), мощность изгибного излучения пропорциональна  $E_e^4$ , и оно становится преобладающим при больших  $E_e$ . При этом его частота  $\propto E_e^3$ , тогда как при синхротронном излучении  $\nu \propto E_e^2$ . Можно ожидать, что при сравнительно малых энергиях релятивистских электронов их излучение синхротронное и приходится на оптику и мягкий рентген, тогда как фотоны гамма-диапазона естественно связать с изгибным излучением.

Детальный анализ<sup>14</sup> показал, что  $\gamma$ -излучение старых пульсаров, а также пульсара 0833-45 можно объяснить данным механизмом. При этом изгибное излучение частиц, вырываемых с поверхности пульсара электрическим полем и ускоряемых последним<sup>13, 15</sup>, необходимо рассматривать с учетом рождения  $\gamma$ -квантом в сильном магнитном поле пульсара электрон-позитронных пар, которые в свою очередь генерируют изгибное  $\gamma$ -излучение. Согласно расчетам<sup>14</sup>, выходящее  $\gamma$ -излучение формируется в основном на расстоянии порядка нескольких радиусов пульсара над районом его полярной шапки (а в области вблизи магнитного полюса — у самой поверхности); при этом характерная энергия  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma \sim 50\text{--}500\text{ Мэв}$  и мощность  $L_\gamma \sim 10^{32}\text{--}10^{35}\text{ эрг/сек}$ , что находится в соответствии с наблюдаемыми параметрами  $\gamma$ -пульсаров. Диаграмма  $\gamma$ -излучения пульсара «карандашная» с телесным углом  $\sim 10^{-1}\text{--}10^{-2}\text{ стер}$ . Если радиоизлучение возникает вблизи светового цилиндра, то доля радиопульсаров, обладающих  $\gamma$ -излучением, должна быть порядка нескольких процентов, причем радио- и  $\gamma$ -импульсы, вообще говоря, ожидаются неодновременными. Возможны  $\gamma$ -пульсары без заметного радиоизлучения, и значительная часть их может входить в двойные звездные системы.

Конкретные наблюдательные тесты, указанные в работе<sup>14</sup>, призваны проверить правильность развитой теории  $\gamma$ -излучения пульсаров.

В последнее время сходные соображения о природе  $\gamma$ -пульсаров высказаны в работе<sup>16</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. P. T. Wallace et al., Nature 266, 692 (1977).
2. H. B. Ögelman, C. E. Fichtel, D. A. Kniffen, D. J. Thompson, Astrophys. J. 209, 584 (1976).
3. G. Kanbach et al., in: Recent Advances in Gamma-Ray Astronomy. Proc. of 12th ESLAB Symposium, Frascati, May 1977, p. 21.
4. P. Sturrock, V. Petrosian, J. Turk, Astrophys. J. 196, 73 (1975).
5. B. Bertotti, A. Cavaliere, F. Pacini, Nature 223, 1351 (1969).
6. В. Л. Гинзбург, В. В. Железняков, УФН 99, 514 (1969).
7. I. S. Shklovskii, Astrophys. J. 159, L77 (1970).
8. R. I. Epstein, ibid. 183, 593, 611. (1973).
9. V. L. Ginzburg, V. V. Zheleznyakov, Ann. Rev. Astron. and Astrophys. 13, 511 (1975).
10. J. E. Grindlay, Preprint of Center for Astrophys. No. 579 (1976).
11. F. Pacini, Astrophys. J. 163, L17 (1971).
12. D. J. Thompson, ibid. 201, L117 (1975).
13. P. A. Sturrock, ibid. 164, 529 (1971).
14. Л. М. Озерной, В. В. Усов, Астрон. ж. 54, 753 (1977); Origin of Gamma-Ray Emission from Pulsars. Paper presented at 12th ESLAB Symposium at Frascati, (May 1977), ESTEC Reproduct. Services 771765.
15. M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, Astrophys. J. 196, 51 (1975).
16. E. Massaro, M. Salvati, цит. в<sup>3</sup> сборник, p. 75.  
P. E. Hardee, Astrophys. J. 216, 876 (1977).