

Игра в кости в применении к пульсарам

В. М. Конторович

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: vkont@ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 30 июня 2006 г.

Последовательность импульсов пульсаров интерпретируется как реализация стационарного случайного процесса ускорения потока электронов на поверхности полярной шапки нейтронной звезды, что демонстрируется на примере предлагаемой игровой модели.

1. Введение

Известные трудности объяснения радиоизлучения пульсаров (см. обзор [1], аннотированную библиографию [2], монографии [1, 3, 4]) заставляют вновь и вновь обращаться к процессам, заканчивающимся регистрацией импульса радиотелескопом.

Хотя и модель “маяка”, и выход излучения из области открытых силовых линий магнитосферы над полярной шапкой вращающейся нейтронной звезды не вызывают сомнений [4], приходится признать, что развитые в последние четверть века теории сложных процессов в истекающей вдоль силовых линий замагниченной плазме (см. ссылки в [1]) не отвечают ни на сложный вопрос о группировке электрон-позитронных пучков, приводящей к когерентному механизму радиоизлучения пульсаров с высокой яркостной температурой, ни на “простой” вопрос о том, почему любая серия существенно разнящихся импульсов складывается в воспроизводимый с высокой точностью средний профиль, служащий “отпечатками пальцев” каждого пульсара.

Мы хотим коснуться и частично обсудить, не претендуя на законченные ответы, оба эти вопроса, начав со второго.

2. Мощные импульсы и пропуски импульсов

Механизм излучения кривизны предлагает весьма жесткую связь между областью ускорения первичного электрона на полярной шапке (силовой линией магнитного поля) и областью, в которой сосредоточено испускаемое им и его “потомками” излучение [4]. Это следствие релятивистской абберрации сопоставляет каждой области на полярной шапке область на раскрыве – поперечном сечении луча маяка в виде ряда “пятен” с характерными угловыми масштабами $\approx 1/\gamma$, где $\gamma \gg 1$ – характерный Лоренц-фактор ускоренных в вакуумном зазоре над полярной шапкой либо рождающихся в каскаде релятивистских электронов. Поэтому, не интересуясь деталями сложного углового распределения излучения, мы можем “спуститься” на поверхность полярной шапки и рассматривать расположенные на ней области ускорения, отвечающие тому или иному наблюдаемому импульсу.

Сделаем простейшее предположение о том, что области на поверхности шапки, с которой вырываются (или стекают, что более подходит к механизму, который мы упомянем ниже) электроны, – активные “зоны”, имеют приблизительно одни и те

же площади для каждого импульса.* При этом положения локальных областей ускорения на полярной шапке (областей индивидуальных разрядов), из которых состоят эти зоны, считаем равновероятными.

Тогда каждому импульсу пульсара соответствует своя зона на поверхности шапки. (При этом генерация наблюдаемого излучения может возникать в более высоких слоях упомянутой выше жестко связанной структуры.) Стационарный профиль устанавливается суммированием $N \gg 1$ импульсов. Это означает, что в среднем импульсе излучение уже “собрано” (в указанном выше смысле) со всей полярной шапки. Стационарность ее свойств и определяет строгое постоянство формы среднего импульса данного пульсара, а индивидуальность полярной шапки и свойств магнитосферы (играющей в том числе и роль передаточной функции к наблюдаемому импульсу) в области открытых силовых линий для каждого пульсара обеспечивает индивидуальность среднего импульса. В момент, соответствующий наблюдению импульса, “освещена” не вся поверхность раскрыва луча, а только ее $1/N$ доля. Так как обычно требуется просуммировать около тысячи импульсов, чтобы сформировался средний импульс, то освещенной будет $1/N \sim 10^{-3}$ доля раскрыва (или β/N , если при формировании среднего импульса каждый элемент зоны входит β раз). При этом излучающие участки должны представлять собой случайную картину пятен в зависимости от того, вдоль каких силовых линий ускоряются первичные пучки. В земные телескопы видна только часть раскрыва, которой соответствует “светлая” часть поверхности полярной шапки.

*Точнее – для промежутка времени, соответствующего процессу ускорения и излучения, формирующего импульс. Для типичных пульсаров время формирования и сплывания плазмы к световому цилиндру, так же как и период обращения, порядка секунды. Поэтому каждый последующий импульс создается совсем другими частицами, ускоренными в другом процессе ускорения (другом разряде) и в другом месте полярной шапки и связанной с ним областью магнитосферы.

Таким образом, принимается сигнал только от той части зоны ускорения, которая лежит на светлой части шапки. Если зона целиком лежит на “темной” части шапки, сигнал не будет получен телескопом и импульс выпадает. Активной зоне, полностью расположенной на светлой части поверхности, соответствуют наиболее мощные импульсы. Наряду с ними в ряде пульсаров изредка возникают так называемые “гигантские” импульсы (см. работы [5, 6] и ссылки в них), которым может отвечать более специальная часть полярной шапки, например, кольцо, соответствующее максимальной кривизне силовых линий при максимальной величине продольного поля в зазоре. В пользу этого говорит фиксированная фаза появления гигантских импульсов [7]. Кроме того, для них могут быть существенны нелинейные процессы в магнитосферной плазме [8].

3. Пример, основанный на игре в кости

Проиллюстрируем сказанное, используя в качестве генератора случайных чисел игровой кубик с цифрами от 1 до 6 и монетку, две стороны которой соответствуют орлу (аверсу) и решке (реверсу). Будем считать, что активной зоне (ускорения или излучения) в одном импульсе отвечают две клетки, определяемые двумя бросаниями кубика и монетки. При этом решка соответствует светлой, а орел – темной части раскрыва, который мы изобразим в виде состоящего из 12 клеток прямоугольника (рис. 1), растянутого на 3 клетки вдоль “долготы” и на 4 клетки в направлении “луча зрения”. Условимся считать, что видимый “сигнал” вдоль “луча зрения” суммируется. Каждый “сигнал” будет складываться из двух бросаний, формируя “импульс”, растянутый “во времени” вдоль “долготы” (рис. 1), средняя форма которого соответствует светлой части раскрыва на том же рисунке. Мы провели небольшую серию бросаний кубика и монетки, соответствующую 8 импульсам (16 бросаний кубика и столько же – монетки), которые изображены на рис. 2. Разумеется, это чис-



Рис. 1. Темная и светлая части полярной шапки 1-го пульсара. Показана символическая “долгота” и направление “луча зрения”, вдоль которого суммируется сигнал, формируя наблюдаемый импульс в рассматриваемой модели

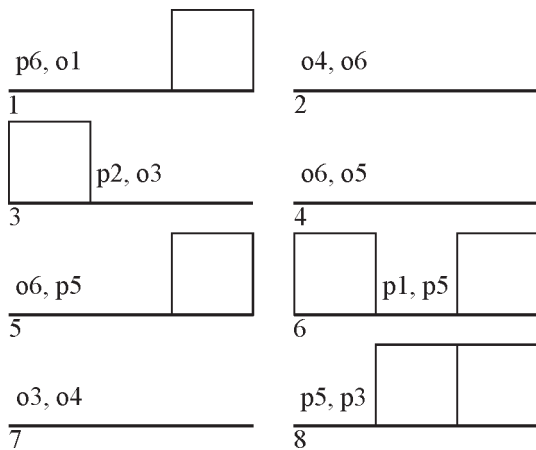


Рис. 2. Последовательность 8-ми импульсов для 1-го пульсара. Показаны результаты бросаний кубика и монетки. 6-й и 8-й импульсы – “мощные”

ло импульсов недостаточно, для представительной статистики, но в силу удачного расклада в серии испытаний достаточно для иллюстрации. Выпавшие номера обозначены на рис. 2 цифрой возле каждого импульса, выпавшей на кубике, и указанием стороны монетки (р – решка, о – орел). Изображенные на рис. 2 импульсы соответствуют сложению сигналов от светлой стороны полярной шапки вдоль луча зрения. Видно, что 2-й, 4-й и 7-й импульсы соответствуют пропускам импульсов, 6-й и 8-й – “мощным” импульсам, которые в этой модели лишь вдвое “превышают” обычные. Число пропусков (3) и мощных импульсов (2) с принятой точностью совпадает. Так и должно быть, ибо “темные” и “светлые” площади полярной шапки в данной модели равны, а активная зона содержит лишь два квадратика. Результатом восьми бросаний стал суммарный импульс, практически совпавший со средним (отличие в лишнем квадратике на правой стороне). Но это, конечно, случайность. Для формирования среднего импульса нужно значительно большее число бросаний. В этом легко убедиться, если поменять местами темную и светлую части (рис. 3), рассмат-

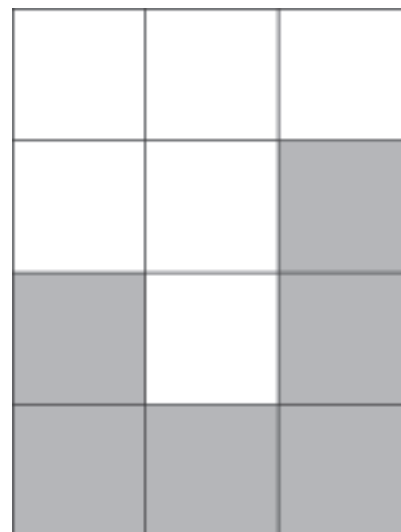


Рис. 3. Темная и светлая части полярной шапки 2-го пульсара

ривая вместо первого второй пульсар. Тогда импульсы, соответствующие тем же бросаниям кубика и монетки, имеют вид, изображенный на рис. 4. При этом 2-й, 4-й и 7-й – “мощные” импульсы, 6-й и 8-й – пропуски импульсов. Суммарный импульс в этой версии после суммирования восьми импульсов еще существенно отличается от среднего (рис. 5). В импульсе можно выделить вклад “конуса кривизны” (крайние столбики) и “центра”. В первом пульсаре (рис. 2) центральное излучение слабое и наблюдалось только в 8-м импульсе. Во втором пульсаре (рис. 4) ослаблен “конус”, а “центр” наблюдался в 3-м, 4-м и 7-м импульсах (последнему, возможно, соответствует “гигантский” центр). Подобное отделение компонентов импульса представляет интерес, так как механизм формирования излучения принципиально отличается для пучка силовых линий вблизи магнитного полюса, где кривизна мала и излучение, скорее всего, обусловлено обратным комптон-эффектом либо какими-либо пучковыми механизмами, в то время как на “конусе” – это излучение кривизны, запускающее дальнейший каскад.

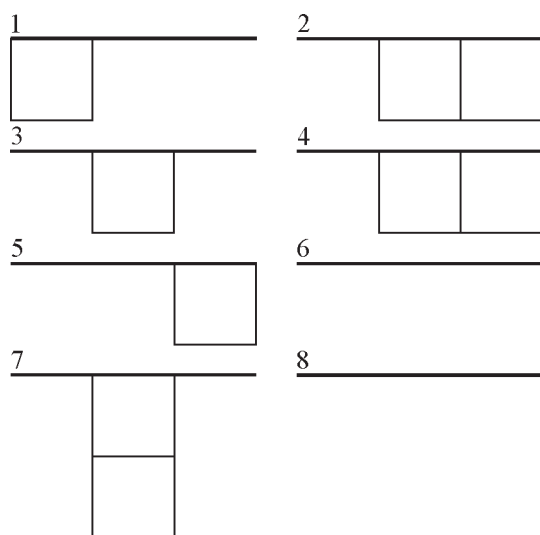


Рис. 4. Последовательность тех же 8-ми импульсов для 2-го пульсара

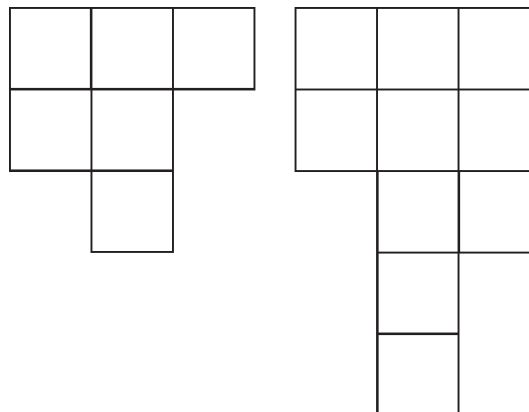


Рис. 5. Средний (слева) и суммарный (для рассмотренной последовательности) импульсы для 2-го пульсара. В излучении преобладает не “конус”, как в 1-м пульсаре, а “центр”. 7-й импульс, возможно, “гигантский”. Последовательность еще недостаточна для формирования среднего импульса

Рассмотренный случай активной зоны, состоящей из двух слагаемых (разрядов), и равные по величине светлая и темная части полярной шапки не очень представительны. Большое число возможностей дает игра двумя кубиками, а тем более компьютер.

4. Количественные соотношения

Обозначим число мощных импульсов за время формирования среднего профиля через N_p , а число пропусков импульсов за то же время через N_A . Поскольку каждый импульс формируется z независимыми разрядами, то из простых вероятностных соображений имеем:

$$\frac{N_A}{N} = \left(\frac{D}{L+D} \right)^z, \quad \frac{N_p}{N} = \left(\frac{L}{L+D} \right)^z, \tag{1}$$

$$\frac{N_A}{N_p} = \left(\frac{D}{L} \right)^z,$$

где N – число импульсов, формирующее средний импульс, D – площадь темной части полярной шапки, L – площадь ее светлой

части. Стоящие в левой части равенств (1) величины N_A , N_p , N являются измеряемыми. Выражая D/L через N_A/N_p : $D/L = (N_A/N_p)^{1/z}$, и подставляя его в выражение для N_p/N , получим уравнение для параметра z :

$$1 + \left(\frac{N_A}{N_p}\right)^{1/z} = \left(\frac{N}{N_p}\right)^{1/z}, \quad (2)$$

которое в силу $N > N_A + N_p$ всегда имеет формальное решение. Заметим, что в частном случае $D = L$ уравнение (2) имеет явное решение $z = (\log N_p/N)/\log 2$. Используя полную площадь полярной шапки Σ , оцениваемую из геометрических соображений, можно найти площадь σ , соответствующую элементарному разряду: $\sigma = \Sigma/(zN/\beta)$.

Таким образом, в рамках рассмотренной схемы, зная наблюдаемые величины N , N_p , N_A и достаточно надежно оцениваемую площадь полярной шапки Σ , находим L , D , z , а при известной величине β – и весьма важную для физической теории площадь σ . Сама величина $\beta \sim 1$ и для достаточно грубых оценок ее точное значение не существенно. (Оно может быть найдено из ширины распределения для среднего импульса.) Полезным для восстановления параметров полярной шапки может оказаться распределение по величинам импульсов (возможно, негауссово).

Если рассматривать в этой схеме и гигантские импульсы как предельно локализованные, то соответствующая вероятность попадания всех z разрядов в площадку σz на светлой стороне $N_G/N = [(\sigma z/L)(L/\Sigma)]^z = (\sigma z/\Sigma)^z$. Здесь N_G/N – доля гигантских импульсов в среднем импульсе. Попадание же в одну и ту же площадку σ (если оно разрешено) даст нам $N_G/N = (\sigma/\Sigma)^z$.

5. Возможная физическая природа процессов ускорения частиц на поверхности полярной шапки

Фундаментальным является наличие продольного (по отношению к магнитному) электрического поля, обсуждению которого

посвящено большое количество работ (см. ссылки в [1-4]). Однако равномерное вырывание зарядов с поверхности привело бы к возникновению довольно высокой плотности заряда, экранированию поля и исчезновению вакуумного зазора, что отмечалось в литературе [1]. Кроме того, дальнейшие трудности с группировкой излучающих частиц [1], необходимой для объяснения высоких яркостных температур в радиодиапазоне, делают привлекательным предположение о том, что электроны могут стекать в виде нитевидных токов большой плотности с заострений поверхности пульсара. Эти заострения могут являться частью структуры коры нейтронной звезды, но, скорее всего, появляются на вершинах капиллярных (гравитационных) волн в сильном магнитном [9] или электрическом поле [10] при жидкой расплавленной поверхности полярной шапки [1], а возникающие токи носят характер разрядов, напоминающих разряды молний.

Локальность этих “гроз” и быстрое сплывание плазмы, порожденной каскадом, вдоль магнитных силовых линий за пределы светового цилиндра (время сплывания ~ 1 с сравнимо с периодом вращения пульсара) приводят к ажурной картине плазмы. В ней зияют просветы, позволяющие проходить узконаправленному игольчатому излучению релятивистских частиц и порождаемому ими низкочастотному излучению, минуя плотную плазму.

Сам “свод” вакуумного зазора, по-видимому, также не является сплошным, а представляет собой меняющиеся от импульса к импульсу узоры из плазмы на некоторой виртуальной поверхности. Такой зазор отчасти подобен “дырявому” цилиндрическому волноводу (имеющему центральную цилиндрическую щель и коническую щель на границе области замкнутых силовых линий), а отчасти – также “дырявому” резонатору. “Виртуальные” поверхности, ограничивающие их, могут быть вычислены в рамках тех или иных моделей, но в актах излучения и формирования частотного спектра играет роль “мгновенная” реальная поверхность, что делает задачу очень сложной. Резонатор и волновод возбужда-

ются разрядами, о которых говорилось выше, и способны быть источниками когерентного излучения высокой яркостной температуры в радиодиапазоне. В то же время это низкочастотное излучение составляет кванты для обратного комптон-эффекта. Последний может служить как дополнительным источником жесткого излучения по отношению к излучению кривизны, так и, возможно, основным механизмом излучения в области малой кривизны силовых линий вблизи от магнитной оси пульсара, а также в узкой щели на границе области замкнутых силовых линий, куда не проникают кванты излучения кривизны. Кроме того, комптоновские потери должны сказываться на процессах набора энергии первичными электронами [11]. Обсуждению некоторых из этих вариантов мы надеемся посвятить отдельное сообщение.

6. Заключение

Возможность свести сложные процессы в магнитосфере пульсара к процессам на поверхности полярной шапки, как мы уверены, может оказаться полезной в разгадке замысловатого излучения пульсаров, но рассмотренная выше простейшая модель, разумеется, нуждается в усовершенствовании. В частности, однородность поверхности полярной шапки, конечно, не имеет места. Скорее, она должна напоминать мишень для стрельбы (в первом приближении с осевой симметрией вокруг магнитной оси) с той разницей, что круговые пояски вокруг центра обладают весом, отражающим угловое распределение ускоряющего электрического поля (с максимумом в центре полярной шапки) и кривизну магнитных силовых линий (максимальную на краю полярной шапки). Оба эти фактора определяют интенсивность излучения. С этой точки зрения мощные и тем более гигантские импульсы могут отвечать попаданию активной зоны в поясок, соответствующий такому максимальному весу. Тогда простые соотношения, приведенные выше, не будут иметь места. Но появляется возможность использовать для анализа более тонкие методы

теории вероятности. Заметим, что нуллины – частые пропуски импульсов, с изложенной здесь простейшей точки зрения могут быть результатом малой вероятности попасть активной зоне в светлую область на полярной шапке. Это соответствует ее малой площади и в значительной мере определяется геометрией. Необходимо отличать эту возможность от близости к “линии смерти”, где физические параметры пульсаров таковы, что не может генерироваться магнитосферная плазма и, как следствие, возникает излучение [12].

Заметим, что выбранная нами модель с самого начала предполагала возможность введения координат на полярной шапке вдоль “долготы” и “луча зрения”. Тем самым полярная шапка (рис. 1) изображена как бы в проекции на координаты наблюдаемых импульсов. Для реальных пульсаров связи между физическими координатами области на полярной шапке и фазой импульса определяются передаточными функциями магнитосферы и могут быть найдены в конкретных моделях.

Автор благодарен участникам обсуждения работы на семинаре и ученом совете РИ НАНУ, а также О. В. Ульянову за полезные замечания.

Литература

1. Бескин В. С. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике. – М.: Физматлит, 2006. – 384 с.; Радиопульсары // Усп. Физ. Наук. – 1999. – Т. 169, №11. – С. 1169-1198.
2. Попов С. Б., Прохоров М. Е. Астрофизика одиночных нейтронных звезд: радиотихие нейтронные звезды и магнитары. – М.: ГАИШ МГУ, 2003. – 82 с.
3. Малов И. Ф. Радиопульсары. – М.: Наука, 2004. – 192 с.
4. Смит Ф. Г. Пульсары. – М.: Мир, 1979. – 270 с.; Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. – М.: Мир, 1980. – 294 с.
5. Ершов А. А., Кузьмин А. Д. Обнаружение гигантских импульсов пульсара PSR 1112+50 // Письма Астрон. Ж. – 2003. – Т. 29, №2. – С. 111-115.
6. Попов М. В., Кузьмин А. Д., Ульянов О. М. и др. Мгновенные спектры гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманно-

сти от дециметрового до декаметрового диапазона радиоволн // *Астрон. Ж.* – 2006, Т. 83, №7. – С. 630-637.

7. Ульянов О. М., Захаренко В. В., Коноваленко А. А. и др. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров В0809+74; В0834+06; В0950+08; В0943+10; В1133+16 в декаметровом диапазоне волн // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – Т. 11, №2. – С. 113-133.
8. Petrova S. A. On the origin of giant pulses in radio pulsars // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 424. – P. 227-236.
9. Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // *Усп. Физ. Наук.* – 1974. – Т. 112, №3. – С. 427-458.
10. Зубарев Н. М. Точные решения уравнений движения жидкого гелия со свободной заряженной поверхностью // *ЖЭТФ.* – 2002. – Т. 121, №3. – С. 624-636.
11. Кардашев Н. С., Митрофанов И. Г., Новиков И. Д. Взаимодействие e^{\pm} с фотонами в магнитосферах нейтронных звезд // *Астрон. Ж.* – 1984. – Т. 61, №6. – С. 1113-1124.
12. Кантор Е. М., Цыган А. И. Линии выключения радиопульсаров в случаях дипольного и асимметричного магнитных полей // *Астрон. Ж.* – 2004. – Т. 81, №6. – С. 1130-1137.

Гра в кості стосовно пульсарів

В. М. Конторович

Послідовність імпульсів пульсарів інтерпретується як реалізація стаціонарного випадкового процесу прискорення потоку електронів на поверхні полярної шапки нейтронної зірки, що демонструється на прикладі запропонованої ігрової моделі.

The Dice as Applied to Pulsars

V. M. Kontorovich

Observed pulsar impulse sequence is interpreted as a realization of a stationary random electron stream acceleration process on the polar cap surface of the neutron star, that is shown by the example of the proposed dice-based game model.