# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523.165

# ВСПЛЕСКИ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

# И. Л. Розенталь, В. В. Усов, И. В. Эстулин

### СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение	97
2.	Наблюдательные данные о у-всплесках	- 99
	а) Временная структура (99). б) Энергетический спектр (102). в) Распреде-	
	ление источников у-всплесков на небе (103). г) Рекуррентность у-всплесков	
	(104). д) Распределение у-всплесков по потокам энергии (104). е) Точное поло-	
	жение источников у-всплесков на небе и попытки отождествления источни-	
	ков (105).	
3.	Теоретическая интерпретация наблюдательных данных о у-всплесках	106
	а) Расстояние до источников у-всплесков (106). б) Природа источников у-	
	всплесков (108). в) Основные свойства области генерании излучения	
	у-всплесков (109). г) Природа вспышек (110).	
4.	Итоги и перспективы	113
Цı	атированная литература	113
- 7-		110

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В околоземном космическом пространстве в течение многих лет функционировала американская система спутников «Вела». Основное назначение этой системы — контроль за ядерными взрывами в космосе. Начиная с 1965 г., на спутниках «Вела» регистрировались кратковременные повышения скорости счета детекторов γ-лучей <sup>1</sup>. Однако причина этих явлений в то время оставалась невыясненной. Повышения скорости счета могли быть связаны с жестким излучением Солнца во время вспышек, с действием захваченной радиации или с аппаратурными эффектами.

В начале 70-х годов эта довольно рутинная деятельность приобрела крайне интересное, можно сказать, интригующее звучание. Связано это с запуском в 1969—1970 гг. спутников «Вела-5А», «Вела-6А» и «Вела-6В», оборудованных более совершенными детекторами γ-лучей с высоким временным разрешением. Наблюдения на этих спутниках показали, что, по крайней мере, часть регистрируемых детекторами увеличений скорости счета безусловно связаны с резким возрастанием потока γ-квантов с энергиями ~0,1—1 МэВ. Были определены направления прихода излучения. Эти данные полностью исключали объекты солнечной системы (Солнце, Луну, Землю и другие планеты) из числа кандидатов в источники всплесков γ-излучения. Так были открыты всплески космического γ-излучения<sup>2</sup>.

Уже при первых наблюдениях были зарегистрированы  $\gamma$ -всплески с потоками энергии S в околоземном пространстве, доходящими до  $\sim 10^{-3}$  эрг $\cdot$  см<sup>-2</sup><sup>2</sup>. Легко оценить, что если источники таких всплесков находятся на расстоянии  $R \simeq 10$  парсек, лишь в несколько раз превышающем расстояние до ближайших звезд, то полное энерговыделение Q за всплеск должно быть порядка  $10^{37}$  эрг. Причем эта огромная энергия выделялась в основном в виде  $\gamma$ -лучей за очень короткие времена ( $\sim 0, 1-10$  с). Доля энергии,

7 УФН, т. 140, вып. 1

выделившейся в источниках у-всплесков в оптическом диапазоне, не превышала  $10^{-2}$  от энергии, уносимой у-лучами<sup>3</sup>. Доля же радиоизлучения в общей энергетике всплесков была еще меньше и не превосходила  $10^{-64}$ . Для сравнения напомним, что в спектре излучения Солнца, находящегося в спокойном состоянии, у-кванты практически отсутствуют, и лишь во время самых мощных солнечных вспышек его светимость в у-лучах достигает  $10^{27}$  эрг/с. Основная же энергия таких вспышек (~ $10^{33}$  эрг) излучается в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах.

Необычность обнаруженных всплесков у-излучения, а также отсутствие отождествления источников у-всплесков с какими-либо астрономическими объектами, наблюдаемыми в других (кроме гамма) диапазонах электромагнитных волн, привело к появлению множества гипотез о природе данного явления \*). Природу у-всплесков связывали с чрезвычайно мощными звездными вспышками <sup>6,7</sup>, взрывами сверхновых <sup>8</sup>, активными процессами внутри <sup>9-11</sup> или в магнитосфере <sup>12</sup> нейтронных звезд, падением комет на нейтронные звезды или белые карлики 13,14, коллапсом сверхмассивных магнитных звезд в ядрах активных галактик и квазаров 15, падением «глыб» антивещества на обычные звезды <sup>16</sup> или падением комет из нормального вещества на звезды из антивещества 17. Однако уже на первоначальном этапе исследований предпочтение отдавалось нейтронным звездам. Связано это с тем, что от нейтронных звезд, входящих в двойные системы, уже тогда наблюдалось рентгеновское излучение со светимостями, достигающими 10<sup>37</sup>—10<sup>38</sup> эрг/с. Кроме того, от некоторых из рентгеновских источников (Cyg X - 1 и Cyg X - 3) наблюдалось достаточно сильное у-излучение  $i^{8,19}$ . От двух нейтронных звезд — пульсаров PSR 0531 + 21 и PSR 0833 — 45 были зарегистрированы у-кванты с энергией ~10-10<sup>3</sup> МэВ 20. Светимости этих пульсаров в у-диапазоне (10<sup>35</sup>-10<sup>36</sup> эрг/с) также не сильно отличались от ожидаемых значений светимостей источников увсплесков в случае их галактической природы. Однако только последующие наблюдения могли решить вопрос о природе источников у-всплесков.

Как уже отмечалось, приборы спутников «Вела» не были предназначены для изучения космических всплесков ү-излучения. Они имели нелинейную временную шкалу, низкую чувствительность и невысокое временное разрешение, а также не позволяли исследовать спектральные характеристики ү-всплесков. Для существенного продвижения в исследовании всплесков ү-лучей было необходимо создать и установить на космических аппаратах специальные «всплесковые» приборы.

Отметим, что существуют многочисленные иммитации  $\gamma$ -всплесков. Поэтому надежно установленными космическими всплесками  $\gamma$ -излучения можно считать лишь те, которые зарегистрированы по крайней мере на двух удаленных друг от друга космических аппаратах. Кроме того, наблюдения  $\gamma$ -всплесков на нескольких аппаратах необходимы для определения направления на источник  $\gamma$ -излучения. Действительно, используемый в настоящее время метод нахождения положения источника  $\gamma$ -всплеска на небесной сфере основан на простой связи между временной задержкой  $\Delta t$  регистрации  $\gamma$ -всплеска двумя детекторами, разнесенными на расстояние l, и углом  $\vartheta$  между линией, соединяющей оба детектора и направлением на источник:  $c \Delta t = l \cos \vartheta$ . Измерение  $\Delta t$  позволяет найти угол  $\vartheta$ , а следовательно, определить на небесной сфере окружность, на которой находится источник  $\gamma$ -всплеска. При регистрации  $\gamma$ -всплеска тремя детекторами возможная область локализации сокращается до двух точек (точки пересечения двух окружностей). Устранение оставшейся неопределенности

<sup>\*)</sup> Ситуация с исследованием у-всплесков на первоначальном этапе исследований изложена в обзоре <sup>5</sup>.

может быть достигнуто при использовании четвертого детектора, установленного на космическом аппарате, находящемся вне плоскости, проходящей через космические аппараты, на которых установлены первые три детектора. Поскольку величины  $\Delta t$  и *l* определяются с некоторыми ошибками, то реально определяется некоторая область на небесной сфере, в которой должен быть источник у-всплеска (подробнее см. <sup>5</sup>).

Первый специализированный всплесковый прибор начал функционировать в 1976 г. на зонде «Гелиос-2» (ФРГ)<sup>21</sup>. Зонд двигался по эллиптической орбите вокруг Солнца от орбиты Земли до орбиты Меркурия. Вторым всплесковым прибором был СНЕГ-2М, разработанный советскими и французскими специалистами и установленный на советском спутнике «Прогноз-6», запущенном в 1977 г.<sup>22</sup>. Расстояние между аппаратами «Гелиос» и «Прогноз» составляло ~10<sup>8</sup> км. Однако в 1977 г. и в первой половине 1978 г. только один космический аппарат («Гелиос-2») находился далеко от Земли, а остальные были ее спутниками. Поэтому области локализации источников γ-всплесков получались в виде полос на небе<sup>23</sup>. Кроме того, детектор γ-излучения, установленный на зонде «Гелиос-2», имел небольшую площадь (21,2 см<sup>2</sup>) и, следовательно, не мог регистрировать слабые γ-всплески.

Ситуция резко изменилась во второй половине 1978 г., когда одновременно в космическом пространстве оказались советские автоматические межпланетные станции «Венера-11», «Венера-12» и спутник «Прогноз-7», а также американские космические аппараты «Пионер» (PVO) и ISEE-3 с приборами Лос-Аламоской лаборатории и Годардского пентра полетов. На аппаратах «Прогноз-7», и «Венера-11,12» функционировали приборы СНЕГ-2М, имевшие по два детектора у-излучения с плошалью 63 см<sup>2</sup> каждый. Кроме того, на аппаратах «Венера-11,12» были установлены 6 детекторов прибора Конус с площадью 50 см<sup>2</sup> каждый. В результате чувствительность всплесковых приборов увеличилась более чем на порядок. Уверенно регистрировались у-всплески с потоками энергии выше ~10<sup>-6</sup> эрг/см<sup>2</sup>. Были даже зарегистрированы события с потоками в интервале 10<sup>-6</sup>-10<sup>-7</sup> эрг/см<sup>2</sup>. К концу 1979 г. число наблюдавшихся у-всплесков превысило 150, причем в эксперименте СНЕГ-2М было зарегистрировано более 50, а прибором Конус - более 100 всплесков. Средняя частота регистрации у-всплесков в эксперименте СНЕГ-2М составляла ~0.4 событие за сутки, а в случае наблюдений прибором Конус достигала ~0,4 события за сутки.

При использовании специализированных всплесковых приборов было получено большое количество наблюдательных данных, позволяющих сейчас с уверенностью утверждать, что источниками у-всплесков являются относительно старые нейтронные звезды, которые подобно радиопульсарам и рентгеновским источникам типа Her X-1 имеют магнитные поля на поверхности порядка  $10^{12}$ — $10^{13}$  Гаусс. В настоящем обзоре представлены основные наблюдательные характеристики у-всплесков, а также современное состояние теории этого интересного астрофизического явления.

#### 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О у-ВСПЛЕСКАХ

## а) Временна́я структура

Длительность всплесков космического у-излучения меняется в широких пределах: от 0,05 с до ~10<sup>2</sup> с <sup>24,25</sup>. Самый короткий у-всплеск был зарегистрирован 13 июня 1979 г. тремя аппаратами («Венера-11», «Венера-12» и PVO). Длительность всплеска не превышала 47 мс (рис. 1). На времен-7\* ной шкале с масштабом 1/512 с видна тонкая структура интенсивности у-излучения всплеска с длительностью t отдельных микровсплесков короче 2 мс. Отсюда следует важное заключение: размер области генерации излучения всплесков не превышает  $tc \leq 600$  км.

Особое место среди всех наблюдавшихся у-всплесков занимает увсплеск, зарегистрированный 5 марта 1979 г. Это событие отличалось от



Рис. 1. Временной профиль всплеска ү-излучения 13 июня 1979 г. на секундной и миллисекундной шкалах.

других всплесков очень резким фронтом  $\gamma$ -излучения (~0,2 мс), большим потоком энергии S и максимальной пиковой интенсивностью <sup>26,36</sup>. Однако самым интересным является обнаружение у этого события после короткого (0,25 с) всплеска  $\gamma$ -излучения пульсаций рентгеновского излучения с периодом 8,00  $\pm$  0,05 с и с убывающей со временем амплитудой (рис. 2).



Рис. 2. Временной профиль всплеска 5 марта 1979 г.

Было зарегистрировано 22 пульсации рентгеновского излучения за 144 с работы прибора <sup>26</sup>.

Пульсации потока излучения всплеска после главного импульса наблюдались также у события 29 октября 1977 г. Период повторения импульсов в этом случае составлял 4,2 ± 0,2 с<sup>27</sup>.

Среди всплесков у-излучения с длительностью более 2 с имеются события с повторяющимися структурными особенностями во временном профиле. Примером такого события является у-всплеск 13 января 1979 г., у которого имеется повторение с периодом  $\sim 5,5$  с структуры пиков A, B, C (рис. 3), причем энергетические спектры повторяющихся структурных особенностей подобны (рис. 4) <sup>28</sup>. Вопрос о наличии периодов во



Рис. 3. Временной профиль всплеска 13 января 1979 г.



Рис. 4. Энергетические спектры отдельных участков пиков всплеска 13 января 1979 г.

временной структуре у-всплесков был подробно рассмотрен в работе<sup>29</sup>. Было показано, что значения периодов во временной структуре всплесков сосредоточены главным образом в интервале 2—4,5 с; однако встречаются и всплески с периодами, достигающими 8—9 с.

# б) Энергетический спектр

Типичную форму спектра имеет  $\gamma$ -всплеск, наблюдавшийся 27 апреля 1972 г. на космическом аппарате «Апполон» (рис. 5)<sup>30</sup>. Спектр этого всплеска в интервале энергий от 2 КэВ до  $\sim$ 1,5 МэВ соответствует спектру излучения оптически тонкой плазмы с kT = 500 кэВ.

Спектры болыйинства у-всплесков до энергий  $\sim 1$  МэВ хорошо аппроксимируются спектрами оптически тонкой плазмы с kT в интервале



жой плазмы с к1 в интервале ~50—500 кэВ <sup>24</sup>. Однако при энергиях выше ~1—2 МэВ у некоторых γ-всплесков наблюдается сильное отклонение от спектра излучения тонкой плазмы, а именно: спектр излучения всплесков в ряде случаев простирается до энергий ~9 МэВ<sup>31</sup>, в то время как поток теплового излучения плазмы при



Рис. 5. Средний энергетический спектр всплеска 27 апреля 1972 г., полученный на космической станции «Apollo».

Сплошной линией показан спектр теплового излучения оптически тонкой плазмы с температурой kT = 500 кэВ. Рис. 6. Энергетический спектр всплеска 5 марта 1979 г.

Состоит из трех компонент: жесткое рентгеновское излучение с  $hT = 35 \pm 5$  кэВ (1), у-излучение с  $hT = 520 \pm 100$  кэВ(2), аннигиляционная у-линия.

kT < 1 МэВ экспоненциально спадает на больших энергиях ( $E_{\gamma} \gg 1$  МэВ) и практически равен нулю при  $E_{\gamma} \approx 10$  МэВ.

Важную роль в выяснении природы источников у-всплесков (см. ниже) сыграло обнаружение прибором Конус эмиссионных и абсорбционных деталей в энергетических спектрах всплесков <sup>32</sup>. На рис. 6 представлен энергетический спектр у-всплеска 5 марта 1979 г., состоящий из двух компонент с четко выраженной широкой эмиссионной линией с энергией ~430 кэВ <sup>33</sup>. Подобные эмиссионные у-линии были обнаружены в спектре еще шести у-всплесков <sup>32</sup>. У всплеска 19 ноября 1978 г., кроме широкой эмиссионной линии 420 кэВ, с помощью германиевого спектрометра наблюдалась узкая у-линия с энергией 740 кэВ<sup>34</sup>.

С помощью прибора Конус в спектре ~20 у-всплесков были зарегистрированы линии поглощения в интервале энергий 40-60 кэВ <sup>32</sup>.

#### в) Распределение источников у-всплесков на небе

На рис. 7 в галактических координатах — долгота *l*<sup>11</sup> и широта *b*<sup>11</sup> — показано положение 63 источников γ-всплесков. Примерно для 50 источников угловые координаты были определены с помощью прибора Конус <sup>35</sup>.



Рис. 7. Положение источников у-всплесков на небесной сфере.

Из этого рисунка видно, что источники γ-всплесков распределены по небесной сфере более или менее однородно и не концентрируются ни к центру Галактики, ни к галактическому диску. Распределение источников тех же γ-всплесков по галактической широте показано на рис. 8. Изотропному распределению источников по небу соответствует пунктирная линия. Гистограмма представляет наблюдаемое распределение по широте b<sup>11</sup>



Рис. 8. Распределение источников по галактической широте b11. Штриховая линия соответствует изотропному распределению источников на небе.

63 источников. В области  $b^{11} = -15 \pm 5^{\circ}$  наблюдается пик, в котором сосредоточено 24% всех источников. Превышение пика над изотропным распределением составляет 2,5 стандартных отклонения. Остальные отступления от изотропного распределения имеют случайный характер. Таким образом, в настоящее время не наблюдается отклонения углового распределения источников у-всплесков от изотропного, исключая небольного избытка числа источников в области  $b^{11} \approx -15^{\circ}$ .

Отметим, что в самое последнее время появилась работа <sup>52</sup>, в которой обнаружена корреляция между направлениями движения космических кораблей, на которых были установлены приборы «Конус», и направлениями на источники слабых у-всплесков. Локация источников всплесков прибором Конус чувствительна к толщине вещества, расположенными над различными элементами прибора, и поэтому весьма вероятно, что обнаруженная корреляция объясняется этим эффектом. Эффекты, приводящие к отмеченной в работе <sup>52</sup> корреляции, не сказываются, по-видимому, качественно на результатах эксперимента Конус, а следовательно, и на те выводы нашей статьи, которые основываются на данных этого эксперимента.

Корреляция должна была сказаться в первую очередь на угловом распределении источников у-всплесков, обусловив анизотропию распределения. Однако как по суммарным данным всех аппаратов, так и по данным Конуса угловые распределения приблизительно совпадают.

# г) Рекуррентность у-всплесков

Впервые она наблюдалась у источника всплеска 5 марта 1979 г., названного авторами FXP 0520-66 <sup>36</sup>. Всплески от него были зарегистрированы 5 и 6 марта, а также 4 и 24 апреля 1979 г. Эти же авторы нашли повторные всплески от источника В 1900 + 14 (24, 25 и 27 апреля 1979 г.). В работе <sup>37</sup> для объяснения пика в уловом распределении источников увсплесков при  $b^{11} \approx -15^{\circ}$  выдвигается гипотеза о существовании еще двух рекуррентных источников с галактическими координатами  $l^{11} = 270^{\circ}$ ,  $b^{11} = -15^{\circ}$  и  $l^{11} = 32^{\circ}$  и  $b^{11} = -15^{\circ}$ . Первому источнику приписываются вспышки 2 апреля, 29 августа и 25 сентября 1979 г., а второму — 28 декабря 1978 г. и 5 февраля 1979г. Таким образом, из 63 источников увсплесков, угловые координаты которые известны, по-видимому, четыре являются рекуррентными. Однако поскольку локализация источников, как правило, недостаточно точна, то вопрос о рекуррентности у-всплесков нельзя считать окончательно решенным.

#### д) Распределение у-всплесков по потокам энергии

Как уже отмечалось, в настоящее время зарегистрировано более 150 γ-всплесков. Поэтому возможен статистический подход к обширному наблюдательному материалу. Представительными являются результаты, полученные на космических аппаратах IMP-7 <sup>38</sup> «Венера-11» и «Венера-12» с приборами Конус <sup>35</sup> и СНЕГ-2М <sup>39</sup>. Данные о распределении зарегистрированных γ-всплесков по потокам энергии за событие, полученные на перечисленных аппаратах, после приведения к единому энергетическому



Рис. 9. Зависимость частоты всплесков N с потоком энергии за всплеск больше, чем S, от S.

Данные IMP-7: прибора «Конус» на «Венерах-11, 12», прибора СНЕГ-2М на «Венере-12»: показаны и прибора СНЕГ-2М на «Венере-12»: показаны штриховой линией, толстой сплошной линией, тонкой сплошной линией и точками, соответственно. Прямая соответствует зависимости  $N \sim S^{-3/2}$ .

порогу регистрации  $\gamma$ -всплесков показаны на рис. 9. Из этого рисунка видно, что число всплесков N(S) с потоком энергии за событие больше, чем S, регистрируемое за год различными космическими аппаратами, практически совпадает. В области малых потоков частота регистрации всплесков N(S) имеет насыщение с  $N \approx 200$  событий в год. Отметим, что приборы, установленные на космических аппаратах, имеют пороговое устройство для выделения всплесков на уровне  $10^{-5}-10^{-6}$  эрг/см<sup>2</sup>. Поэтому насыщение N(S) в области малых потоков является, по-видимому, приборным эффектом.

Кроме исследования  $\gamma$ -всплесков с помощью спутников проводились также баллонные наблюдения (результаты отмечены точками на рис. 9). Во время этих наблюдений использовались детекторы  $\gamma$ -излучения без порогового устройства с площадью более 1 м<sup>2</sup>. Длительность баллонных наблюдений обычно не превышала одни сутки. В результате было обнаружено несколько событий на уровне  $\sim 10^{-8}$  эрг/см<sup>2</sup>, <sup>38</sup> не подтвержденных, однако, наблюдениями на других приборах. Большой интерес представляет эксперимент, выполненный с помощью двух баллонов, разнесенных более чем на 1000 км. В этом эксперименте не было обнаружено ни одного события, наблюдавшегося одновременно на обоих баллонах <sup>39</sup>. Поэтому весьма вероятно, что всплесковые события, зарегистрированные в предыдущих баллонных экспериментах, обусловлены потоками заряженных частиц в околоземном пространстве. Таким образом, результаты баллонных экспериментов следует рассматривать пока лишь как верхние пределы на чатоту  $\gamma$ -всплесков малой интенсивности.

Известно, что при изотронном и однородном распределении источников всплесков в пространстве должна наблюдаться зависимость  $N(S) \propto S^{-3/2}$ <sup>5</sup>. Именно такая зависимость и реализуется для мощных  $\gamma$ -всплесков ( $S \approx 10^{-3} - 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup>). В области малых потоков  $S < 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup> имеется явное отступление от зависимости  $N(S) \propto S^{-3/2}$ . Наблюдаемую зависимость N(S) можно объяснить влиянием порога чувствительности, а также существованием разброса светимостей источников  $\gamma$ -всплесков в  $\sim 10^3$  раз<sup>40</sup>.

- e) Точное положение источников γ-всплесков на небе
  - и попытки отождествления источников

Точность локализации источников γ-всплесков, положение которых на небесной сфере показано на рис. 7, в большинстве случаев не превышает нескольких угловых градусов. В квадратном градусе на небе содержится до нескольких тысяч звезд со зведной величиной менее  $21^m$ . Поэтому для отождествления источника γ-всилеска с объектом, известным, например, из оптических наблюдений, необходимо было достичь углового разрешения, по крайней мере, порядка одной угловой минуты.

В настоящее время собрана информация о всплесках, зарегистрированных советскими и американскими космическими аппаратами. Это позволило для 11 всплесков определить положение их источников на небесной сфере с точностью 0,05—20 кв. угл. минут.

Области локализации источников у-всплесков исследовались современными оптическими, рентгеновскими и радиотелескопами. Ниже представлены результаты наблюдений наиболее изученных областей локализации трех у-всплесков.

Область неба, в которой локализован источник  $\gamma$ -всплеска 6 апреля 1979 г., расположена на высоких галактических широтах ( $b^{11} = -61^{\circ}$ ). При сравнении этой области со звездными картами в ней не было обнаружено ни одного звездного объекта со звездной величиной менее  $22^{m}$ . При фотографировании области локализации  $\gamma$ -всплеска на 3,6-метровом телескопе ESO (Европейская южная обсерватория) были обнаружены три слабых объекта со звездной величиной ~24<sup>m</sup>. Заметим, что при фотографировании на высоких галактических широтах в одной квадратной угловой минуте, в среднем, ожидается 2 звезды и 4 Галактики, так что число оптических объектов, обнаруженных в квадрате ошибок положения источника γ-всплеска 6 апреля 1979 г., соответствует ожидаемому. Таким образом, если источник находится в нашей Галактике, то он должен быть компактным объектом со слабым оптическим свечением.

Район локализации данного у-всплеска наблюдался космической рентгеновской обсерваторией НЕАО-В, и никаких рентгеновских источников в данном районе не было обнаружено.

Положение на небе источника всплеска 19 ноября 1978 г. определено с точностью 8 квадратных угловых минут. Он также находится в высоких галактических широтах ( $b^{11} = -84^\circ$ ). На спутнике НЕАО-В в квадрате ошибок положения  $\gamma$ -источника обнаружен слабый рентгеновский источник с потоком излучения у Земли ( $1.4 \pm 0.5$ )  $\cdot 10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup> с в области энергий 0,2—3,7 кэВ. При наблюдениях на телескопе ESO внутри области локализации рентгеновского источника были найдены две звезды со звездной величиной  $20^{m}$ <sup>41</sup>, относящиеся к классу М. Кроме того, в этой области были обнаружены два радиоисточника. Один из них расположен в центре области локализации рентгеновского источника, а второй — вблизи ее границы. Излучение второго радиоисточника частично поляризовано. Координаты звезд не совпадают с координатами радиоисточников. Связь между источником  $\gamma$ -всплеска и рентгеновскими источниками, звездами или радиоисточниками пока не доказана.

Пожалуй, самый интересный всплеск у-излучения, наблюдавшийся 5 марта 1979 г., и при локализации его источника приподнес сюрприз, а именно: на первой же стадии локализации, выполненной с точностью 1' imes 1,5', внутри квадрата ошибок положения источника оказалась туманность N 49, являющаяся остатком взрыва сверхновой, произошедшего ~10<sup>4</sup> лет назад в Большом Магеллановом Облаке. Дальнейшее уменьшение района локализации источника у-всплеска 5 марта 1979 г. до размеров 5" × 30" показало, что данный источник расположен в северной области туманности. Если действительно источник у-всплеска находится в N 49, т. е. на расстоянии 55 кпс, то энерговыделение в виде у-лучей во время вспышки, ответственной за у-всплеск 5 марта 1979 г., должно составлять  $\sim 10^{44}$  эрг. Наблюдения N 49 на спутнике НЕАО-В до всплеска 5 марта и через две недели после него показали, что с точностью 0,8% никаких изменений в потоке рентгеновского излучения N 49 нет, т. е. последствий у-вспышки, которые бы свидетельствовали о связи источника у-всплеска с N 49, не наблюдалось.

# 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ О у-ВСПЛЕСКАХ

После открытия у-всплесков перед теорией были поставлены следующие вопросы: где расположены источники у-всплесков, с каким классом астрономических объектов эти источники отождествляются и каков механизм генерации у-излучения всплесков. Попытаемся последовательно ответить на эти вопросы.

а) Расстояние до источников у-всплесков

Из изотропии распределения источников зарегистрированных увсплесков по небесной сфере следует, что эти источники должны находиться либо на расстояниях, меньших толщины галактического диска (менее нескольких сот парсек), либо на больших метагалактических расстояниях (более десяти мегапарсек). Свидетельством в пользу метагалактического происхождения у-всплесков является совпадение направлений на источник мощного всплеска 5 марта 1979 г. и на туманность, связанную со взрывом сверхновой N 49, расположенной в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом Облаке. Однако это пока единственный аргумент в пользу гипотезы о метагалактической природе источников увсплесков.

Серьезных же трудностей у такой гипотезы немало. Действительно, если вспышка, ответственная за всплеск 5 марта 1979 г., произошла в Большом Магеллановом Облаке, то светимость ее источника в максимуме должна составлять  $10^{44}$  эрг/с. Верхний предел на размер области генерации ү-излучения можно получить из наблюдаемого значения времени нарастания импульса:  $l < 10^9$  см. В таком компактном мощном источнике жесткого рентгеновского и ү-излучения плотность фотонов столь высока, что в процессе выхода из источника ү-кванты с энергией  $E_{\gamma} > mc^2$  будут поглощаться с образованием электронно-позитронных пар 15,42-44.

Оптическая толща для фотона с энергией  $E_{\gamma} \ge mc^2$  в случае изотропно излучающего источника по порядку величины равна 44

$$\tau = \frac{\sigma_0 m c^2 F(m c^2) D^2}{lc}, \qquad (1)$$

где  $\sigma_0$  — томсоновское сечение,  $F(E_{\gamma})$  — наблюдаемый дифференциальный спектр излучения всплеска при энергии  $E_{\gamma}$ , D — расстояние до источ ника, m — масса электрона, l — размер излучающей области.

Используя (1), получим, что оптическая толща для фотонов с энергией  $E_{\gamma} \ge mc^2$  в случае, если источник всплеска 5 марта 1979 г. расположен в Большом Магеллановом Облаке, значительно больше единицы ( $\tau \ge 10^5$ ), т. е.  $\gamma$ -кванты с  $E_{\gamma} > mc^2$  не должны были наблюдаться. Однако спектр излучения этого всплеска измерен, по крайней мере, до энергий 2,5 МэВ. Следовательно, для таких  $\gamma$ -квантов источник должен быть оптически тонким ( $\tau < 1$ ). Отсюда следует, что расстояние до источника всплеска 5 марта 1979 года при условии изотропии его излучения не превышает 200 пс <sup>44</sup>. Как будет показано ниже, вся совокупность наблюдательных данных указывает на то, что источниками  $\gamma$ -всплесков являются нейтронные звезды. В этом случае размер излучающей области l не превосходит 10<sup>6</sup>—10<sup>7</sup> см <sup>45</sup>. С учетом этого обстоятельства из (1) при  $\tau < 1$  имеем ограничение на расстояние до источника всплеск <sup>44</sup>.

Как указывалось ранее, во время некоторых всплесков были зарегистрированы ү-кванты с энергией до 9 МэВ. Анализ спектров этих всплесков в рентгеновском и ү-диапазонах показал отсутствие каких-либо «завалов» в высокочастотной области. Следовательно, источники этих всплесков оптически тонкие при  $E_{\gamma} > mc^2$  ( $\tau < 1$ ) и расположены на расстояниях, не превышающих нескольких десятков парсек.

Аналогичные оценки расстояния до источников  $\gamma$ -всплесков могут быть получены также исходя из того факта, что спектры излучения значительного числа всплесков хорошо описываются спектром тормозного излучения оптически тонкой плазмы с температурой  $kT \approx 50-500$  крB<sup>24</sup>. Для этого воспользуемся выражением для светимости единицы объема за счет тормозного механизма:

$$\Phi_{\rm T} = 2 \cdot 10^{-27} T^{1/2} n_{\rm e}^2 \, {\rm spr/c}, \tag{2}$$

где T — температура электронов, измеряемая в градусах, а  $n_e$  — число электронов с 1 см<sup>3</sup>.

Величина  $\Phi_T$  для наблюдаемых всплесков с потоком энергии I на Земле равна

$$\Phi_T = \frac{4\pi D^2 I}{V} ; \qquad (3)$$

здесь V — это объем излучающей области.

Рассмотрим в качестве примера  $\gamma$ -всплеск, зарегистрированный 27 апреля 1972 г. на космическом аппарате «Апполон» <sup>30</sup>. Этот всплеск характеризуется резким (за время  $t \simeq 110$  мс) подъемом интенсивности и спектром излучения, усредненным за полное время всплеска (~15 с), с экспоненциальным «завалом» в области высоких энергий, соответствующим температуре  $kT \approx 500$  кэВ. Исходя из наблюдаемой ширины переднего фронта всилеска, получим ограничение на размер области генерации  $\gamma$ -излучения:  $l \leq ct \approx 10^9$  см. Из условия малости оптической толщи источника ( $n_e \sigma_0 l \leq 1$ ) имеем ограничение на концентрацию электронов в источнике  $n_e < 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Используя эти ограничения, а также выражения (2), (3) и значение потока энергии  $I \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$  эрг/см<sup>2</sup> с, получим, что расстояние до источника  $\gamma$ -всплеска 27 апреля 1972 г., не превосходит 50 парсек <sup>30</sup>. Оценки, аналогичные приведенной выше, позволяют сделать вывод о том, что типичные расстояния до источников наблюдавшихся  $\gamma$ -всплесков порядка 10-100 парсек.

### б) Природа источников у-всплесков

Верхние пределы на размер областей генерации излучения всплесков  $(l \leqslant 10^8 - 10^9 \text{ см})$ , полученные из переменности потока излучения, уже указывали на то, что источниками всплесков являются компактные астрономические объекты. Однако окончательное доказательство этого факта было получено лишь недавно благодаря точной локализации источников у-всплесков на небесной сфере. Как уже отмечалось, в квадрате ошибок положения источников некоторых всплесков были обнаружены лишь несколько чрезвычайно слабых оптических объектов, которые ничем не примечательны и, по-видимому, не имеют отношения к наблюдавшимся всплескам. Полученные верхние пределы на светимости источников у-всплесков в спокойном состоянии показали, что эти источники представляют собой либо карликовые, либо нейтронные звезды.

Определяющую роль в выборе между этими возможностями сыграли следующие наблюдательные данные:

1. Существование в спектрах излучения всплесков эмиссионных улиний с энергией  $\sim 0.4$  МэВ и  $\sim 0.7$  МэВ, а также абсорбционных рентгеновских линий на энергиях  $\sim 40-60$  кэВ <sup>32-34</sup>.

2. Изменения потока излучения некоторых у-всплесков с периодами порядка нескольких секунд <sup>26-29</sup>.

Все эти данные находят естественное объяснение лишь в модели источника  $\gamma$ -всплесков, как вращающейся нейтронной звезды с магнитным полем на поверхности  $\sim 10^{12} - 10^{13}$  Гаусс. В этой модели эмиссионные линии с энергиями  $\sim 0.4$  МэВ и  $\sim 0.7$  Мэв отождествляются со смещенными в красную сторону  $\gamma$ -линиями 0,511 и 0,847 МэВ соответственно  $^{32-34}$ . Первая из этих линий возникает при двухфотонной аннигиляции электронов и позитронов, а вторая излучается возбужденными ядрами железа, которые в изобилии имеются в верхних слоях нейтронной звезды. Красное смещение наблюдаемых  $\gamma$ -линий, составляющее  $\sim 20\%$ , естественно отождествить с гравитационным смещением, которое испытывают фотоны при выходе из чрезвычайно сильного гравитационного поля нейтронных звезд. Абсорбционные детали в спектре рентгеновского излучения всплесков вызваны, по-видимому, поглощением излучения вблизи циклотронной частоты  $\omega_B = eB/mc \approx 10^{19} \ (B/10^{12} \ \Gamma c) \ c^{-1}$  в магнитном поле с напряженностью  $B \approx 10^{12} - 10^{13} \ \Gamma c^{32}$ . Периодические изменения потока излучения всплесков, так же как в случае радиопульсаров и рентгеновских источников типа Her X — 1 в двойных системах, естественно связать с вращением анизотропно излучающей нейтронной звезды. Значения периодов вращения нейтронных звезд — источников γ-всплесков (~4-8 с) показывают, что эти звезды являются более старыми, чем радиопульсары. Средний возраст нейтронных звезд — источников γ-всплесков — значительно превосходит 10<sup>6</sup> лет.

### в) Основные свойства области генерации излучения; γ-всплесков

Излучение газа вблизи поверхности нейтронной звезды определяется, в основном, его температурой, концентрацией частиц, а также напряженностью магнитного поля. Как уже отмечалось, температура газа в источнике всплеска kT порядка 50—500 кэВ. Найдем интервал допустимых значений концентрации частиц в источнике. Оценим сначала максимальную концентрацию частиц n<sub>max</sub>. Для этого будем предполагать, что подкачка энергии частицам во время вспышки отсутствует. В этом случае полное число частиц в источнике порядка

$$N = \frac{Q}{(3/2) \ kT} \approx 10^{44} \left(\frac{Q}{10^{37} \ \text{opr}}\right) \left(\frac{T}{10^9 \ \text{K}}\right)^{-1},\tag{4}$$

где Q — полное энерговыделение при вспышке.

Объем источника равен

$$V = 4\pi R^2 \alpha l \approx 10^{19} \left(\frac{\alpha l}{10^8 \text{ cm}}\right) \text{ cm}^3; \tag{5}$$

здесь  $R \simeq 10^6$  см — радиус нейтронной звезды, а  $\alpha$  — доля поверхности нейтронной звезды, занимаемая источником всплеска.

Из (4) и (5) получим

$$n_{\max} = \frac{N}{V} \approx 10^{25} \left(\frac{Q}{10^{37} \text{ spr}}\right) \left(\frac{T}{10^9 \text{ K}}\right)^{-1} \left(\frac{\alpha l}{10^8 \text{ cm}}\right)^{-1} \text{ cm}^{-3}.$$
 (6)

Основными механизмами генерации излучения горячей плазмой на поверхности магнитной нейтронной звезды являются тормозное и циклотронное излучение, а также аннигиляция электронов и позитронов. Чтобы оценить минимально возможную концентрацию частиц в источнике  $n_{\min}$ , необходимо определить какой из перечисленных механизмов наиболее эффективен.

Характерные времена охлаждения плазмы за счет тормозного, циклотронного и аннигиляционного излучений определяются соответственно выражениями <sup>46</sup>

$$\begin{split} t_T &\approx 4,4 \cdot 10^{-11} Z^{-2} \left(\frac{n}{10^{26} \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1} \left(\frac{T}{10^9 \text{ K}}\right)^{1/2} \text{ c,} \\ t_{\pi} &\approx 3,9 \cdot 10^{-16} \left(\frac{B}{10^{12} \text{ Fc}}\right)^{-2} \text{ c,} \\ t_a &\approx 1,3 \cdot 10^{-12} \left(\frac{n}{10^{26} \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1} \text{ c,} \end{split}$$

где Z — заряд ядер излучающей плазмы.

При  $n < n_{max}$ ,  $T \approx 10^9 - 10^{10}$  К и  $B \approx 10^{12} - 10^{13}$  Гс имеем  $t_T$ ,  $t_a \gg t_q$ . Следовательно, наиболее эффективно охлаждение плазмы может происходить за счет циклотронного излучения.

Минимальная концентрация частиц в источнике определяется из условия

$$V\Phi_{\rm u}t = Q; \tag{7}$$

здесь t - длительность вспышки,

$$\Phi_{\rm H} = n\sigma_0 c \, \frac{B^2}{2\pi} \, \frac{kT}{mc^2} \approx 5 \cdot 10^{34} \left(\frac{n}{10^{26} \, {\rm cm}^{-3}}\right) \left(\frac{B}{10^{12} \, {\rm \Gamma c}}\right)^2 \left(\frac{T}{10^9 \, {\rm K}}\right) \, {\rm ppr/cm}^3 \, {\rm cm}^3 \, {\rm$$

— излучательная способность единицы объема газа за счет циклотронного механизма. Подставляя (5) и (8) в (7), получим минимальную концентрацию частиц в источнике:

$$n_{\min} \approx 10^9 \left(\frac{Q}{10^{37} \, \text{spr}}\right) \left(\frac{B}{10^{12} \, \Gamma c}\right)^{-2} \left(\frac{T}{10^9 \, \text{K}}\right)^{-1} \left(\frac{t}{1 \, c}\right)^{-1} \left(\frac{\alpha l}{10^6 \, \text{cm}}\right)^{-1} \, \text{cm}^{-3}.$$
 (9)

Легко видеть, что при  $n = n_{\max}$  источник оптически толстый  $(n_{\max}\sigma_0 l \gg 1)$ . В случае же  $n = n_{\min}$  оптическая толща газа мала  $(n_{\min}\sigma_0 l \ll 1)$ ; в этом случае осуществляется подкачка энергии излучающим частицам во время вспышки.

## r) Природа вспышек,

обуславливающих генерацию всплесков жесткого излучения, изучена пока слабо. Связано это с тем, что за происхождение всиышек на магнитных нейтронных звездах ответственны нестационарные процессы, происходящие при экстремальных физических условиях, качественно отличающихся от условий, реализуемых в земных лабораториях. Рассмотрим сначала возможные источники энергии нейтронных звезд, способные объяснить энергетику у-всплесков.

Как уже отмечалось, с нейтронными звездами связаны два класса хорошо изученных астрономических объектов — радиопульсары и рентгеновские источники в тесных двойных системах. Источником излучения пульсаров является кинетическая энергия вращения нейтронных звезд. Источником же энергии рентгеновских источников в тесных двойных системах является гравитационная энергия, выделяющаяся при аккреции на нейтронную звезду газа, истекающего из нормальной звезды, образующей с нейтронной звездой двойную систему. Аналогичные источники энергии возможны, в принципе, и у нейтронных звезд — источников γ-всплесков. Действительно, кинетическая энергия нейтронной звезды  $I\Omega^{2/2}$  при типичной для источников γ-всплесков угловой скорости вращения  $\Omega \approx 1 \text{ с}^{-1}$  составляет ~  $10^{44} - 10^{45}$  эрг, что существенно превышает энерговыделение в источниках γ-всплесков  $Q \approx 10^{37} - 10^{38}$  эрг (здесь  $I \approx 10^{44} - 10^{45}$  г × × см<sup>2</sup> — момент инерции нейтронной звезды).

Для объяснения всплесков в модели аккрецирующей нейтронной звезды масса аккрецируемого газа должна быть порядка  $\Delta M \approx Q/0.1$  с<sup>2</sup>  $\approx 10^{17} - 10^{18}$  г. Это типичная масса комет, наблюдаемых в Солнечной системе. Поэтому γ-всплески могут быть, в принципе, результатом падения комет на нейтронные звезды <sup>13,14</sup>. Однако против этой модели имеется серьезное возражение, а именно: для объяснения рекуррентности всплесков с интервалом в несколько суток или месяцев требуется концентрация комет вокруг нейтронной звезды, на много порядков превосходящая соответствующую концентрацию в Солнечной системе.

В процессе аккреции на поверхности нейтронной звезды могут накапливаться легкие элементы, синтез которых при достаточно большой концентрации приведет к термоядерному взрыву<sup>47</sup>.

Согласно современным представлениям у нейтронных звезд имеется твердая кора <sup>48</sup>. Кроме того, у достаточно массивных нейтронных звезд может быть твердое ядро <sup>49</sup>. В процессе замедления вращения нейтронной звезды ее сплюснутость уменьшается. При этом в коре и ядре нейтронной звезды будут накапливаться сдвиговые упругие напряжения. Энергия, связанная с этими напряжениями, может достигать ~  $10^{47}-10^{48}$  эрг<sup>11</sup>. Время от времени в напряженных областях твердого вещества нейтронной звезды могут образовываться трещины. При этом энергия, связанная со сдвиговыми упругими напряжениями, будет выделяться. В рамках данной гипотезы привычные понятия и законы экстраполируются в область экстремального состояния вещества, при котором основная характеристика твердого тела — его плотность  $\rho$  — возрастает на много порядков (напомним, что в ядре нейтронной звезды  $\rho \approx 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>). Вопрос о справедливости такой экстраполяции остается пока открытым.

На возможность еще одного источника энергии в нейтронных звездах обращалось внимание в работах 9,50. Этот источник энергии связан с неравновесным слоем, состоящим из переобогащенных нейтронами ядер и свободных нейтронов. Такой слой может существовать при плотностях в интервале от 10<sup>10</sup> г/см<sup>3</sup> до 10<sup>12</sup> г/см<sup>3 50</sup>. Полная энергия в неравновесном слое может достигать ~ 10<sup>48</sup> эрг. Перемещение нейтронно-избыточного вещества в область меньших плотностей (например, в результате «растрескивания» ядра или коры нейтронной звезды) приведет к ядерному взрыву. Эта гипотеза связывает природу всплесков с весьма актуальной проблемой ядерной физики — существованием сверхтяжелых ядер. Согласно модели  $^{9,50}$  в неравновесном слое имеются ядра с атомными весами  $A \geqslant 300$ . При выбросе с поверхности нейтронной звезды эти ядра распадаются, давая заметный вклад в химсостав вещества во Вселенной. Такой процесс должен привести к образованию дважды «магических», а потому, по-видимому, устойчивых ядер 114 А<sup>298</sup>. Однако экспериментальные поиски таких сверхтяжелых ядер показали, что их количество относительно ядер урана сос-тавляет менее чем 10<sup>-7 51</sup>. Здесь намечается определенная трудность данной молели.

Таким образом, у нейтронных звезд имеются следующие источники энергии, которыми, в принципе, можно объяснить полную энергетику у-всплесков:

1. Вращение нейтронной звезды.

2. Аккреция вещества на нейтронную звезду.

3. Термоядерный взрыв обогащенного легкими элементами вещества на поверхности нейтронной звезды.

4. Сдвиговые упругие напряжения в твердой коре и ядре нейтронной звезды.

5. Ядерный взрыв неравновесного вещества нейтронной звезды, обогащенного свободными нейтронами и тяжелыми ядрами с избытком нейтронов.

Для объяснения свойств у-всплесков в той или иной модели источника необходимо, чтобы энергия  $Q \approx 10^{38}$  эрг выделялась за времена короче ~ 0,1 — 10 с. Рассмотрим скорость трансформации энергии вращения нейтронной звезды в наблюдаемое излучение.

Из теории пульсаров известно, что наиболее эффективным механизмом трансформации кинетической энергии вращения нейтронной звезды в наблюдаемое излучение — это торможение ее магнитным полем. При этом мощность энерговыделения не может значительно превосходить мощность магнито-дипольных потерь

$$L_{\rm md} \simeq \frac{B_{\rm p}^2 R^6 \Omega^4}{c^3} \approx 10^{28} \left(\frac{B}{10^{12} \, \Gamma c}\right)^2 \left(\frac{\Omega}{1c^{-1}}\right)^4 \, {\rm spr/c};$$
 (10)

здесь  $B_p$  — напряженность магнитного поля на поверхности звезды.

В случае нейтронных звезд — источников  $\gamma$ -всплесков ( $B_{\rm p} \approx 10^{12}$  —  $-10^{13}$  Гс,  $\Omega \approx 1$  с<sup>-1</sup>) — величина  $L_{\rm md}$  слишком мала для объяснения светимости звезды в момент вспышки ( $L \simeq 10^{38} - 10^{39}$  эрг/с). Таким образом, хотя кинетической энергии вращения нейтронной звезды достаточно для объснения полного энерговыделения вспышек, однако обеспечить быструю трансформацию ее в излучение не представляется возможным.

При всех остальных процессах необходимая для объяснения всплесков энергия может выделяться на поверхности или внутри нейтронной звезды за очень короткие времена ( $\sim R/c \approx 10^{-4}$ с). В этом случае независимо от источника энергии образуется мощная ударная волна, значительтельная доля энергии которой термализуется в поверхностных слоях нейтронной звезды. В результате на нейтронной звезде образуется горячее иятно. Рассмотрим излучение горячего оптически толстого пятна на поверхности нейтронной звезды. Эффекты, связанные с наличием в источнике магнитного поля, пока не будем учитывать.

Температура поверхности звезды, находящейся в гидростатическом равновесии, должна быть ниже эддингтоновской <sup>49</sup>

$$T_{\rm E} \approx 2 \cdot 10^7 \ \mu^{1/4} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{1/4} \left(\frac{R}{10^6 \ {\rm cm}}\right)^{-1/2} {\rm K},$$
 (11)

при которой сила, действующая на газ и стремящаяся сбросить его с поверхности звезды, равна силе тяжести (здесь µ — средний молекулярный вес частиц газа, а *M* — масса звезды).

Характерная температура газа в области генерации излучения всплесков  $T \approx 2 \cdot 10^9$  К. В этом случае отношение сил радиационного давления и гравитации порядка  $(T/T_{\rm E})^4 \sim 10^8$ . Следовательно, гравитационные силы не в состоянии предотвратить истечение вещества из горячего пятна на поверхности нейтронной звезды. Истечение вещества приведет к тому, что подавляющая доля энергии, выделяющейся в пятне, перейдет в кинетическую энергию истекающей плазмы. При этом у-кванты будут испускаться горячим пятном в течение времени  $\Delta t \simeq 10^{-12}$  с. Полное энерговыделение в у-диапазоне <sup>49</sup>

$$Q \approx 10^{33} \left(\frac{R}{10^6 \text{ cm}}\right)^2 \left(\frac{T}{10^9 \text{ K}}\right)^4 \operatorname{spr}$$
 (12)

сравнительно невелико и недостаточно для объяснения энергетики всплесков.

Наличие магнитного поля *В* у нейтронной звезды, удовлетворяющего условию

$$nkT + \frac{1}{3}\sigma T^4 < \frac{B^2}{8\pi} \tag{13}$$

(с — постоянная Стефана — Больцмана), в состоянии предотвратить истечение плазмы из звезды, в результате чего основная доля тепловой энергии газа будут излучаться в рентгеновском и у-диапазоне. При значениях концентрации части  $n \leq n_{\max}$  и температурах  $T \simeq 10^9 - 10^{10}$  К отношение газового давления (nkT) к давлению излучения ( $\sigma T^4/3$ ) значи-

тельно меньше единицы. Благодаря этому условие (13) можно перенисать в виде

$$kT \leqslant 170 \sqrt{\frac{B}{10^{12} \, \Gamma c}} \, \kappa \partial B. \tag{14}$$

Из неравенства (14) следует, что при магнитных полях  $B \approx 10^{12} - 10^{13}$  Гс верхний предел на температуру горячего иятна на поверхности нейтронной звезды совпадает с наблюдаемыми температурами излучения всплесков.

Кроме образования горячего пятна, может происходить возмущение магнитосферы нейтронной звезды и ускорение частиц до релятивистских энергий <sup>11</sup>,<sup>12</sup>. Эти частицы, по-видимому, ответственны за генерацию нетеплового у-излучения всплесков с энергией фотонов  $E_v \ge 1$  МэВ. Однако эти процессы пока мало изучены.

### 4. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Всплески космического у-излучения были открыты примерно 10 лет назад с помощью аппаратуры, предназначенной для совершенно иных целей. В 1977 — 78 годах начали функционировать космические станции с установленными на них специализированными приборами первого поколения для изучения у-всплесков. Главный итог этого этапа исследований состоит в том, что сейчас можно с большой степенью уверенности утверждать, что источниками всплесков являются старые нейтронные звезды, расположенные на расстояниях ~ 10 - 100 пс от Солнечной системы.

Почему же именно старые нейтронные звезды проявляют такую сильную активность? То, что мы знаем о звездной эволюции свидетельствует об обратной тенденции — уменьшении активности нейтронных звезд при «старении». Это противоречие можно объяснить тем, что зарегистрированные всплески у-излучения порождаются на малых расстояниях ( ~ 10-100 пс), в то время как расстояние до молодых пульсаров порядка  $10^3$  пс, и генерируемые ими всплески мы пока не наблюдаем. В этой связи большую актуальность приобретает повышение чувствительности приборов, регистрирующих излучение всплесков, по крайней мере, на два порядка. Кроме того, проведение достаточно длительных (порядка года) наблюдений такими приборами позволит, по-видимому, обнаружить концентрацию источников у-всплесков к плоскости Галактики, что окончательно докажет галактическую природу этих источников.

В более отдаленной перспективе представляет большой интерес точное (~1") измерение угловых координат источников всплесков. Тогда, используя стандартный астрономический метод параллакса, можно будет найти расстояние до ближайших (  $\leq 10$  пс) источников, что позволит существенно продвинуться в выяснении природы всплесков космического у-излучения.

Институт космических исследований AH CCCP

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- K lebesadel R. W.— In: Proc. of Conference on Transient Cosmic Gamma and X-ray Sources: Los Alamos Report LA 5505-C.—1974.— P. 1.
   K lebesadel R. W., Strong I. B., Olson R. A.— Astrophys. J. Lett.
- 1973, v. 182, p. 85. 3. Grindlay J. E., Wright E. L., McCrosky R. E.— Ibid., 1974, v. 192,
- p. L113.
- 8 УФН, т. **1**40, вып. **1**

- 4. Троицкий В. С., Бондарь Л. Н., Стародубцев А. М.— УФН, 1974, т. 113, с. 719.
- 5. Прилуцкий О. Ф., Розенталь И. Л., Усов В. В. УФН, 1975.

- 10. Брук Ю. М. Астрофизика, 1975, т. 11, с. 58. 11. Туудап А. J. Астрофизика, 1975, т. 11, с. 58. 12. Расіпі F., Ruderman M. Nature, 1974, v. 251, р. 399. 13. Нагwit M., Salpeter E. E. Astrophys. J. Lett., 1973, v. 186, p. L37. 14. Шкловский И. С. Астрон. ж., 1974, т. 51, с. 665. 15. Prilutski O. F., Usov V. V. Astrophys. and Space Sci., 1975, v. 33, р. 452 p. 453.
- 16. Sofia S., Van Horn H. M. Astrophys. J., 1974, v. 194, p. 593. 17. Фомин П. И. Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 1976, т. 54, с. 340.
- 18. Baker R. E., Lovett R. R., Örford K. J., Ramsden D.- Nature Phys. Sci., 1973, v. 245, р. 18. 19. Владимирский Б. М., Степанян А. А., Фомин В. П.— Астрон.
- ж., 1973, т. 50, с. 449.
- 20. Lichti G. F., Buccheri J. L., Mayer-Hasselwander H. A., Paul J. A., Swanenburg B. N., Wills R. D.— Preprint COS-B N 761 296, 7 p.— 1979.
  21. Cline T. L., Desadol P. Pizzichini G., Spizichino A., Trai-Kather M. Holmkon H. Astrophys.
- nor J., Klebesadel R., Ricketts M., Helmken H. Astrophys. J. Lett., 1979, v. 229, p. L47. 22. Niel M., Hurley K., Vedremne G., Estulin I. V., Meliorun.
- s k y A. C., Astrophys. and Space Sci., 1976, v. 42, p. 99.
- Эстулин И. В., Клайн Т. Л., Ведрен Ж., Кузнецов А. В., Мерсов Г. А., Ниель М., Новак Б. Л., Харли К.— Письма Астрон. ж., 1979, т. 5, с. 585.
- 24. Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Ильинский В. Н., Панов В. Н., Аптекарь Р. Л., Гурьян Ю. А., Соколов И. А., Соколова З. Я., Харитонова Т. В. Каталог космических гамма-всплесков (по данным экс-

- Харитонова Т. Б. каталог космических гамма-всплесков (по данным эксперимента «Конус»).— Ленинград, 1979.
  25. Зенченко В. М., Кувнецов А. В., Мерсов Г. А., Эстулин И. В., Ведрен Ж., Ниель М., Харли К. Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 208.
  26. Сline Т. L. et al.— Astrophys. J. Lett., 1980, v. 237, p. L1.
  27. Wood K. S., Byram E. T., Chubb T. A., Friedman H., Meekins J. F., Share G. H., Yentis D. J.— Astrophys. J., 1981, v. 247, p. 632.
  28. Barat C., Chambon G., Hurley K., Niel M., Vedrenne G., Estulin I. B., Kuznetsov A. V., Zenchenko V. M.— In: XXIII COSPAB.— Budapest. 1980. COSPAR.- Budapest, 1980.

- 32. Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Аптекарь Р. Л., Гурьян Ю. А., Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Аптекарь Р. Л., Гурьян Ю. А., Ильинский В. Н.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 706.
   Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Гурьян Ю. А., Ильинский В. Н. Препринт ФТИ АН СССР № 738.— Ленинград, 1981.
   Тееgarden В. J., Сline Т. L.— Astrophys. J. Lett., 1980, v. 236, p. L 67.
   Мазец Е. П., Голенецкий С. В., Аптекарь Р. Л., Гурьян Ю. А., Ильинский В. Н.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 609.
   Голенецкий С. В., Мазец Е. П., Ильинский В. Н., Гурьян Ю. А., Ильинский В. Н.— Письма Астрон. ж., 1980, т. 6, с. 609.
   Голенецкий С. В., Мазец Е. П., Ильинский В. Н., Гурьян Ю. А., Ян Ю. А.— Ibid., 1979, т. 5, с. 641.
   Эстулин И. В.— Косм. исслед., 1982.
   Cline T. L., Desai U. D., Schidt W. K. H., Teegarden B. J.— Nature, 1977, v. 266, p. 494.

- Cline T. L., Desai U. D., Schidt W. K. H., Teegarden B. J.— Nature, 1977, v. 266, p. 494.
   B'eurle K., Bewick A., Mills Y., Quenby J.— Astrophys. and Space Sci., 1981, v. 77, p. 201.
   Зенченко В. М., Кузнецов А. В., Эстулин И. В., Ведрен Ж., Ниель М., Харли К.— Косм. исслед. 1979, т. 17, с. 820.
   Ріzzichini G. et al.— In: XV ESLAB Symposium 1981.
   Cavallo G., Rees M. J.— Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1978, v. 183, p. 359.
   Schmidt W. K. H.— Nature, 1978, v. 271, p. 525.

- 44. Агаронян Ф. А., Озерной Л. М.— Астрон. цирк., 1979, № 1072.
  45. Shapiro S. L., Salpeter E. E.— Astrophys. J., 1975, v. 198, p. 671.
  46. Lamb D. Q. Preprint No. 1547 of Center for Astrophysics.— Cambridge, 1981.
  47. Van Horn H. M., Hansen C. J.— Astrophys. J., 1974, v. 191, p. 479.
  48. Гинзбург В. Л.— УФН, 1971, т. 103, с. 393.
  49. Ріпев D., Shaham J., Ruderman M.— Nature Phys. Sci., 1972, v. 237, p. 32 р. 83. 50. Бисноватый - Коган Г. С., Чечеткин В. М.— УФН, 1979, т. 127,
- c. 263.
- 51. Флеров Г. Н., Кузнецов В. Н.— Химия и жизнь, 1981, № 8, с. 30. 52. Laros J. G., Evans W. D., Fenimore E. E., Klebesadel R. W.— Preprint Los Alamos Laboratory LA-UR-82-936.—1982.