

## Оценка магнитного поля источника G106.6+2.9

У. М. Стародубцева<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики космоса  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, НИИЯФ МГУ, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Поступила в редакцию 09.06.2025; подписана в печать 03.03.2026)

Туманность Бумеранг G106.6+2.9 является одним из кандидатов в источники космических лучей сверхвысоких энергий. Рассматриваемый источник излучения представляет собой пространственно протяженную систему из пульсара PSR J2229+6114 и окружающей его пульсарной туманности, характерной кометоподобной формы. В настоящий момент существует множество работ, посвященных спектру хвостовой области данной туманности. Однако интерес представляет также и головная область. Данная тема освещена не столь широко. В статье представлены энергетические спектры хвостовой и головной областей, рассматривается особенность в спектре головной области, зафиксированная экспериментами Comptel, EGRET и COS-B.

PACS: 98.70.Sa, 98.38.Mz, 97.60.Gb                      УДК: 524.1.

Ключевые слова: космические лучи, остатки сверхновых, туманности пульсарного ветра.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены теоретический и экспериментальный спектры пульсарной туманности Бумеранг G106.6+2.9 и ассоциированного с ней остатка сверхновой G106.3+2.7. Рассматриваются лептонный и гибридный лептонно-адронный сценарии формирования гамма-излучения. Проводится сравнение спектра модели источника [1] с экспериментальными данными, полученными во время экспериментов Comptel и EGRET [2], LHAASO [3], FermiLAT [4], VERITAS [5].

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТУМАННОСТИ БУМЕРАНГ

#### 1.1. Космические лучи

Космические лучи (КЛ) состоят в основном из протонов и атомных ядер и, как известно, движутся со скоростью, приближающейся к скорости света. Установить точное происхождение космических лучей, регистрируемых на Земле, не представляется возможным. Это связано с тем, что, будучи заряженными частицами, они отклоняются от своей первоначальной траектории под воздействием сложных конфигураций межзвездных магнитных полей по мере того, как они движутся от своих источников к Земле. Предполагается, что преобладающим механизмом передачи энергии (ускорения) КЛ является их взаимодействие с ударными волнами в расширяющихся оболочках сверхновых.

В энергетическом спектре КЛ примерно при энергиях в несколько ПэВ проявляется излом (так называе-

мое «колени»). Считается, что КЛ с энергией ниже этого порога рождаются и ускоряются в Млечном Пути. Следовательно, протоны КЛ могут ускоряться до ПэВ-ных энергий в галактических источниках, и такие источники КЛ с энергиями порядка  $10^{15}$  эВ называются ПэВатронами. В последние десятилетия различными космическими аппаратами было собрано значительное количество данных, так что сейчас стали возможными обсуждение и поиск кандидатов в ПэВатроны.

Туманность Бумеранг — яркая радио- и рентгеновская туманность пульсарного ветра (Pulsar Wind Nebula) — является одним из таких кандидатов в источники-ПэВатроны [1]. Источником ее энергии является пульсар PSR J2229+6114. Она пространственно совпадает с одним из самых ярких источников гамма-квантов сверхвысоких энергий (более 100 ТэВ), LHAASO J2226+6057 [3]. Рассматриваемый источник излучения представляет собой пространственно протяженную систему из пульсара PSR J2229+6114 и окружающей его туманности пульсарного ветра, отстоящих от Земли приблизительно на 800 парсек [6]. Источник располагается на границе газового облака Н1 (стыке двух областей разной плотности), что объясняет кометоподобную форму туманности: компактную головную область и протяженную хвостовую. Причиной этого является неоднородность окружающего межзвездного вещества: хвост расширился в область более низкой плотности, а голова оказалась со стороны области более высокой плотности. Стоит отметить, что подобная форма не является редкостью для пульсарных туманностей, и зачастую обусловлена высокоскоростным движением пульсара в межзвездном веществе [7], однако, туманность Бумеранг является достаточно молодым остатком взрыва сверхновой (с характерным возрастом пульсара примерно  $10^4$  лет [8]), что не позволяет считать образовавшуюся структуру результатом движения пульсара.

\* starodubtceva.um21@physics.msu.ru

## 1.2. Ускорение космических лучей и рождение гамма-квантов

Вследствие различных процессов, происходящих при взаимодействии расширяющейся области туманности с окружающим межзвездным веществом, таких как обратное комптоновское излучение, синхротронное излучение электронов, распад  $\pi^0$ , в пределах остатка сверхновой рождаются гамма-кванты различных энергий, которые затем регистрируются наземными телескопами или космическими миссиями. По виду энергетического спектра можно предполагать характер процессов, приводящих к их генерации. На сегодняшний момент в теории спектров туманностей пульсарного ветра преобладают два сценария: двухкомпонентный лептонный и лептонно-адронный. На более низких энергиях (менее 100 МэВ) предсказания обеих моделей совпадают, однако, выше энергий в 100 ТэВ они предсказывают совершенно разные спектры. Оба этих сценария будут подробнее рассмотрены далее.

### *Лептонный сценарий*

Для лептонного сценария спектральное распределение энергии в туманности пульсарного ветра полностью нетепловое, причем первичным механизмом излучения, ответственным за излучение от радио до нескольких сотен МэВ, является синхротронное излучение (стоит заметить, что для лептонно-адронного сценария это тоже верно). Более высокие энергии производятся вторым процессом излучения, характерным для этих систем: обратное комптоновское рассеяние между локальными фотонами и лептонами, ответственным за синхротронное излучение [8].

Ге и др. [9] получили радиальные профили рентгеновской поверхностной яркости и фотонного индекса в зависимости от расстояния от PSR J2229+6114. Радиальный профиль остатка сверхновой G106.3+2.7 можно разделить на три участка: граница между первым и вторым участками находится примерно в 100 угловых секундах от пульсара, что соответствует радиусу туманности пульсарного ветра Бумеранг, а граница между вторым и третьим участками находится примерно в 840 угловых секундах от пульсара. Этот профиль показывает, как рентгеновское излучение пространственно изменяется с расстоянием от пульсара, и его характеристики предполагают два различных источника электронов, а именно сама туманность пульсарного ветра и остаток сверхновой. Следовательно, можно предположить двухкомпонентную лептонную модель, в которой первая компонента описывается степенным законом с экспоненциальным изломом, а вторая — распределением Максвелла [1].

Первая электронная компонента, отвечающая за рентгеновское излучение, имеет степенное распределе-

ние с экспоненциальным срезом:

$$\frac{dN_e}{dE_e} = N_{0,e} \left( \frac{E_e}{1 \text{ ТэВ}} \right)^{-\alpha_e} e^{-\frac{E_e}{E_{e, \text{cut}}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_e = 2.5$ ,  $E_{e, \text{cut}} = 14 \times 10^{14}$  эВ [1].  $N_0$  находится из условия нормировки:

$$\int_{5 \text{ МэВ}}^{5 \text{ ПэВ}} E_e \frac{dN_e}{dE_e} dE_e = W_e, \quad (2)$$

где  $W_e = 1.3 \times 10^{43}$  эрг =  $8.06 \times 10^{54}$  эВ — полная энергия в пределах от 5 МэВ до 5 ПэВ [9].

$$N_{0,e} = \frac{W_e}{\int_{5 \text{ МэВ}}^{5 \text{ ПэВ}} E_e \cdot \left( \frac{E_e}{1 \text{ ТэВ}} \right)^{-\alpha_e} e^{-\frac{E_e}{E_{e, \text{cut}}}} dE_e}. \quad (3)$$

Откуда  $N_0 = 1.276 \times 10^{16}$  эВ<sup>-1</sup> · см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>.

### *Лептонно-адронный сценарий*

Первая лептонная компонента, а именно синхротронное излучение электронов, описываемое степенным законом с экспоненциальным изломом, предполагается такой же, как и в исключительно лептонном сценарии. Адронная гамма-компонента, возникает из-за взаимодействий между ускоренными протонами КЛ и межзвездным газом, и позволяет объяснить спектр хвостовой области в районе сверхвысоких энергий (более 10 ТэВ). В этом сценарии протоны должны быть ускорены до 1 ПэВ или выше, чтобы объяснить наблюдаемые фотоны сверхвысоких энергий. Область хвоста пространственно совпадает с молекулярным облаком со средней плотностью атомов  $n = 50 \text{ см}^{-3}$  [10], которые могут служить мишенью для адронно-ядерных взаимодействий протонов КЛ, покидающих остаток сверхновой. Спектр гамма-излучения можно хорошо интерпретировать с помощью спектра протонов со степенным законом с экспоненциальным обрезанием на высоких энергиях. Спектральное обрезание может быть вызвано «запиранием» (конфайнментом) КЛ, то есть невозможностью КЛ покинуть остаток сверхновой, поскольку КЛ с более низкой энергией сложнее покинуть сильное магнитное поле, по сравнению с КЛ более высоких энергий. В итоге, в результате ядерных взаимодействий протон-протон ( $p, p$ ), возникают нестабильные заряженные  $\pi^-$  и нейтральные  $\pi^0$ - мезоны. Распад  $\pi^0$  по основному каналу приводит к рождению двух гамма-квантов:  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  (98%), и преимущественно отвечает за наблюдаемый спектр.

Адронный сценарий предполагает выброс протонов в однородную зону эмиссии. Инжектированные протоны имеют степенное распределение энергии с экспоненциальным обрезанием:

$$\frac{dN_p}{dE_p} = N_{0,p} \cdot \left( \frac{E_p}{E_{\text{cut}}} \right)^{-\alpha_p} \cdot \exp\left(-\frac{E_p}{E_{\text{cut}}}\right), \quad (4)$$

где степенной индекс  $\alpha_p = 2$ , а энергия обрезания  $E_{cut} = 10$  ПэВ. Данная модель предполагает сферическую симметрию, однако стоит иметь в виду, что на самом деле источник сильно асимметричен [11].

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ТУМАННОСТИ БУМЕРАНГ

Стоит отметить, что в подавляющем большинстве существующих на сегодня исследований не рассматривалась разница между спектрами головной и хвостовой области, несмотря на то что области измерений различных экспериментов не охватывают остаток сверхновой целиком. Таким образом, область измерений EGRET [2] охватывает в основном головную часть, а области измерений FermiLAT [4], VERITAS [5], HAWC [10] сосредоточены в хвостовой. Причем на вид спектра в головной области может влиять энергичный пульсар, усиливая потоки заряженных частиц или обратная ударная волна, от столкновения прямой ударной волны с межзвездным газом, распространяющаяся внутрь остатка сверхновой.

### 2.1. Спектр головной области

В головной области (рис. 1) излучение, согласно данным Comptel и EGRET [2], показывает значительное усиление потока в диапазоне порядка десятков — сотен МэВ, достигая пика около 100 МэВ. Это излучение имеет гораздо более высокий поток по сравнению как с измерениями FermiLAT [4], NuSTAR [13], так и с теоретическими кривыми для синхротронного излучения электронов и распада нейтральных пионов. Это указывает на возможное наличие дополнительного компонента излучения или иного механизма ускорения частиц, не учитываемого в текущих моделях. Например, это может быть связано с влиянием магнитного поля или плотности среды, наличием анизотропии или неоднородностей в распределении частиц. Решением может стать ввод второй электронной компоненты, хотя ее конкретный вид требует уточнения.

### 2.2. Спектр хвостовой области

На рис. 2 изображен спектр хвостовой области. Поток излучения от первой электронной компоненты растет до энергии порядка 1 МэВ, и затем резко убывает. Вторая компонента — адронная — генерирует излучение от распада  $\pi^0$ -мезонов. Обусловленный ей поток резко возрастает на отметке в 1 ГэВ, затем становится более пологим и затем начинает убывать на 10 ТэВ. Излучение от распада достаточно хорошо описывает экспериментальные данные, полученные с аппаратов FermiLAT [4] и VERITAS [5]. Однако при увеличении энергии значения модели и наблюдаемых значений LHAASO [3] начинают расходиться. Довольно слабое

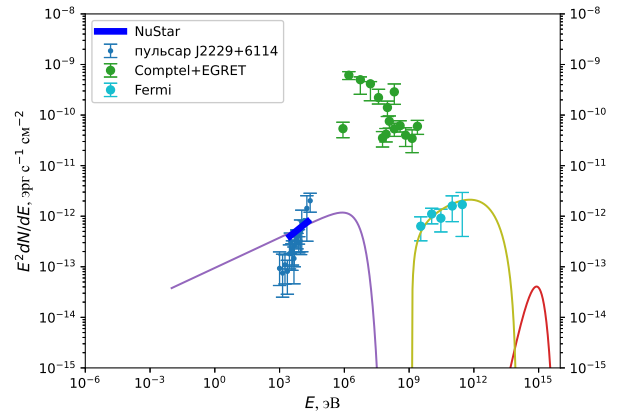


Рис. 1. Энергетический спектр головной области. Точки — экспериментальные данные: голубым показан спектр пульсара [12], зеленым — Comptel и EGRET [2], бирюзовым — FermiLAT [4], синим — NuStar [13]. Непрерывные линии — результаты моделирования: сиреневым — синхротронное излучение электронов, описываемых степенным законом с экспоненциальным обрезанием, горчичным — излучение от  $\pi^0$ -распада, красным показано излучение от обратного комптоновского рассеяния

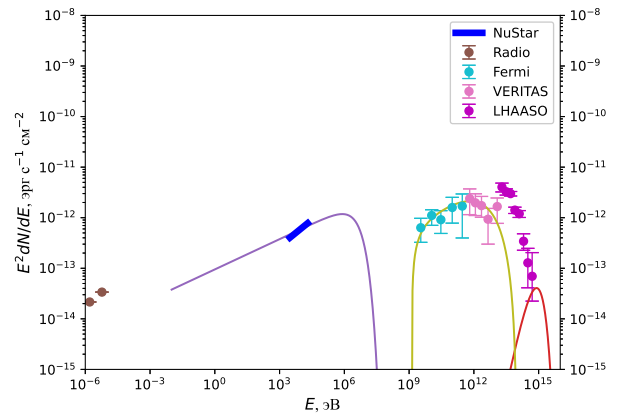


Рис. 2. Энергетический спектр хвостовой области. Точки — экспериментальные данные: коричневым показано радио [14], розовым — VERITAS [5], бирюзовым — FermiLAT [4], темно-розовым — LHAASO [3], синим — NuStar [13]. Непрерывные линии — результаты моделирования: сиреневым — синхротронное излучение электронов, описываемых степенным законом с экспоненциальным обрезанием, горчичным — излучение от  $\pi^0$ -распада, красным показано излучение от обратного комптоновского рассеяния

обратное комптоновское излучение электронов, описываемых распределением Максвелла появляется около 100 ТэВ, достигает пика около 1 ПэВ и быстро спадает. На фоне этих кривых выделяется излучение пульсара и данные Comptel и EGRET [2], которые указывают на наличие еще одной кривой, пока неясного характе-

ра. Лианг и др. [1] предлагают аппроксимацию распределением Максвелла в этой области, однако оно недостаточно хорошо описывает форму экспериментального спектра и было отвергнуто. Также на форму спектра могут влиять характеристический возраст источника, плотность межзвездного вещества, окружающего его, или напряженность магнитного поля. Данные параметры не известны достоверно и подбираются при моделировании, например, с помощью метода Монте-Карло.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что туманность Бумеранг является хорошим кандидатом в Пуэватроны, источника КЛ сверхвысоких энергий (бо-

лее  $10^{15}$  эВ). Данные, полученные с помощью современных наблюдательных инструментов, таких как FermiLAT [4], VERITAS [5] и LHAASO [3], подтвердили наличие мощного гамма-излучения как в головной, так и в хвостовой областях туманности. Анализ спектров показал значительное различие между энергетическими характеристиками в этих областях, что открывает возможности для предположения о возможных механизмах ускорения. Однако, современные модели излучения требуют доработки, для более точного описания всех особенностей спектра.

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук А. Ф. Июдину.

- 
- [1] Liang X.-H., Li C.-M., Wu Q.-Z. et al. // PoS. **ICRC2023**. 553 (2023).
  - [2] Iyudin A., Reimer O., Bennett K. et al. // Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf. **3**. 89 (1997).
  - [3] Cao Z., Aharonian F. A., An Q. et al. // Nature. **594**. 7861. 33 (2021).
  - [4] Xin Y., Zeng H., Liu S. et al. // Astrophys. J. **1**. (2019).
  - [5] Acciari V.A., Aliu E., Arlen T. et al. // Astrophys. J. Lett. **703**. 1. L6 (2009).
  - [6] Kothes R., Uyaniker B., Pineault S. // Astrophys. J. **560**. 236 (2001).
  - [7] Olmi B., Bucciantini N. // Publ. Astron. Soc. Aust. **40**. e007 (2023).
  - [8] Halpern J.P., Gotthelf E.V., Leighly K.M., Helfand D.J. // Astrophys. J. **547**. 1. 323 (2001).
  - [9] Ge C., Liu R.-Y., Niu S. et al. // Innovation. **2**. 100118 (2021).
  - [10] Albert A., Alfaro R., Alvarez C. et al. // Astrophys. J. Lett. **896**. L29 (2020).
  - [11] Liu S., Zeng H., Xin Y., Zhu H. // Astrophys. J. Lett. **897**. L34 (2020).
  - [12] Kuiper L., Hermsen W. // Mon. Not. R. Astron. Soc. **449**. 4. 3827 (2015).
  - [13] Mori K., An H., Burgess D. et al. // PoS. 37th **ICRC2021**. 963. (2021)
  - [14] Pineault S., Joncas G. // Astron. J. **120**. 6. 3218 (2000).

## G106.6+2.9 Spectrum

U. M. Starodubtceva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Space Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>kobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia

E-mail: starodubtceva.um21@physics.msu.ru

The Boomerang Nebula G106.6+2.9 is one of the candidates for the sources of ultrahigh energy cosmic rays. The source under consideration is a spatially extended system of the pulsar PSR J2229+6114 and the surrounding pulsar wind nebula, which has a characteristic comet-like shape. At present, there are many papers devoted to the spectrum of the tail region of this nebula. However, the head region is also interesting. This topic is not so widely covered. This paper presents the energy spectra of the tail and head regions, discusses a feature in the spectrum of the head region, recorded by the Comptel, EGRET and COS-B experiments.

PACS: 98.70.Sa, 98.38.Mz, 97.60.Gb

Keywords: cosmic rays, supernova remnants, pulsar wind nebulae.

Received 09 June 2025.

### Сведения об авторах

Стародубцева Ульяна Максимовна — студентка; e-mail: Estarodubtceva.um21@physics.msu.ru.