

УДК 524.1-353

ЗАГАДКИ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. А. Д. Ерлыкин^{1, *}, С. К. Мачавариани¹, А. У. Вольфендейл²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Даремский университет, физический факультет, Дарем, Великобритания

*E-mail: erlykin@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Обсуждаются три известные загадки анизотропии космических лучей в области ТэВных и ПэВных энергий: 1) так называемая инверсная анизотропия; 2) нерегулярный характер энергетической зависимости амплитуды и фазы первой гармоники; 3) вклад одиночного источника.

DOI: 10.1134/S0367676519080143

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее интересных областей энергетического спектра космических лучей (КЛ) находится в области ПэВных энергий. Именно там наблюдается излом в спектре, так называемое “колесо”. Его происхождение — все еще предмет исследований и дискуссий. Подобраться к этой области можно со стороны низких, ТэВных энергий, изучая форму спектра, массовый состав и анизотропию КЛ. Однако эти эксперименты трудны из-за низкой интенсивности КЛ. В настоящей работе мы опишем три из многочисленных проблем, существующих в исследованиях анизотропии при ПэВных энергиях и ниже.

ЗАГАДКА 1: ИНВЕРСНАЯ АНИЗОТРОПИЯ

Солнечная система находится на периферии нашей галактики. Большинство источников КЛ — остатки сверхновых звезд, пульсары и прочие — находятся в так называемой Внутренней Галактике, в направлении к ее центру. Градиент плотности источников направлен от Внешней к Внутренней Галактике. То же самое можно ожидать и для плотности КЛ — она должна убывать по мере удаления от галактического центра к периферии. Так называемая крупномасштабная анизотропия КЛ должна иметь фазу первой гармоники, или максимум ожидаемой интенсивности, в направлении от Внешней Галактики к Внутренней, т.е. в области галактических долгот $l = -90^\circ \dots +90^\circ$. На рис. 1 (нижняя панель) показаны результаты измерений фазы анизотропии в экваториальных координатах. Экспериментальные данные взяты из обзора

[1]. Если эти данные пересчитать в галактическую систему координат, то они займут область между двумя пунктирными линиями. Видно, что если ожидаемые фазы были в области галактических долгот l от -90° до $+90^\circ$, т.е. во Внутренней Галактике, то наблюдаемые фазы находятся в области l от $+90^\circ$ до $+270^\circ$. Это явление мы называем инверсной анизотропией.

Это явление можно объяснить, если предположить, что инверсная анизотропия является локальным эффектом, связанным с простран-

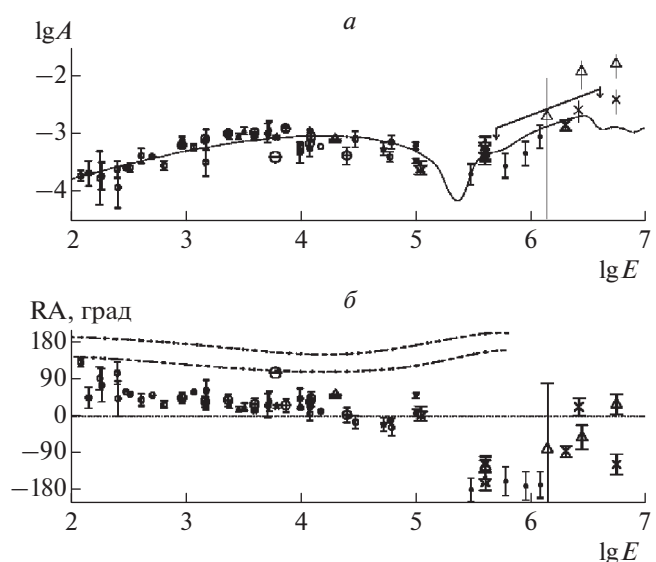


Рис. 1. Наблюдаемая амплитуда (верхняя панель) и фаза (нижняя панель) первой гармоники анизотропии КЛ, представленные в экваториальных координатах.

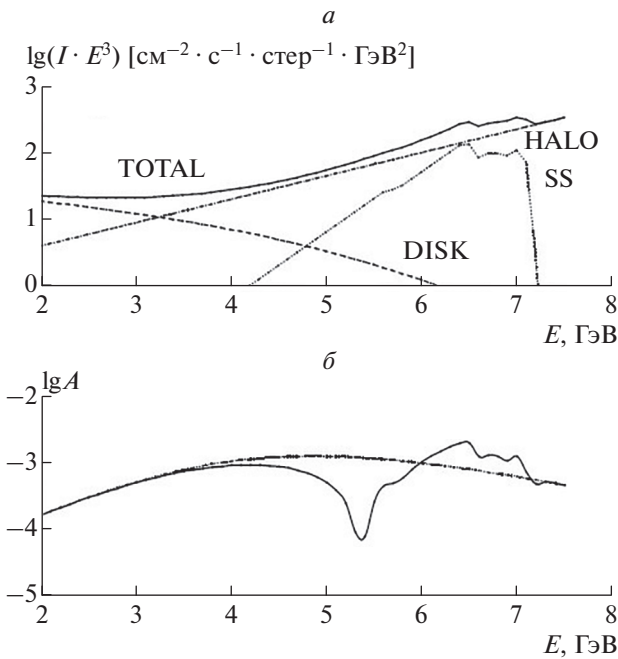


Рис. 2. *a* – Схема формирования энергетического спектра КЛ с вкладами галактического Диска, Гало и Одиночного источника; *б* – амплитуда первой гармоники анизотропии с вкладами Диска + Гало + Одиночного источника (сплошная линия) и то же самое с вкладами только Диска + Гало без Одиночного источника (пунктирная линия).

ственной ориентацией магнитного поля или флуктуацией плотности межзвездной среды в окрестностях солнечной системы. Солнце расположено в Местном Пузыре на внутренней части рукава Ориона. Плотность магнитного поля и межзвездной среды в рукаве выше, а диффузия частиц медленнее, чем между рукавами. Частицы,двигающиеся из Внутренней Галактики к рукаву наталкиваются как бы на стенку, – часть из них отражается в обратном направлении, – накапливаются и создают инверсный градиент плотности КЛ.

Другое объяснение может быть связано с очевидной неоднородностью пространственного и временного распределения источников КЛ. Один или несколько источников при этом должны быть достаточно близки в пространстве и во времени к Земле. Однако, чтобы быть ответственными за образование инверсной анизотропии, эти источники должны быть, в основном, сосредоточены во Внешней Галактике.

ЗАГАДКА 2: ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ АНИЗОТРОПИИ

На рис. 1 видно, что амплитуда и фаза первой гармоники анизотропии КЛ ведут себя весьма

причудливо с ростом энергии. Экспериментальные данные взяты из обзора [1]. Сплошная линия в верхней панели относится к расчетам по нашей модели, описанной в разделе 2. Область между пунктирными линиями в нижней панели показывает фазу анизотропии, ожидаемую, если перевести экспериментальные данные в галактические координаты, учитывая, что они получены в области склонений 30° – 60° .

Плавный и медленный рост амплитуды вплоть до энергии порядка 10 ТэВ сменяется резким падением при большей энергии, достигает минимума при 200–300 ТэВ и затем растет снова. Фаза медленно падает от $\sim 40^\circ$ до $\sim 0^\circ$ с ростом энергии от 0.1 до 100 ТэВ, затем резко меняется на противоположную при той же энергии порядка 200–300 ТэВ, где наблюдается минимум амплитуды, а потом начинает медленно восстанавливаться при ПэВ-ных энергиях. Ниже мы попытаемся построить модель, объясняющую наблюдаемое поведение анизотропии на основе всего трех компонент, составляющих общий поток КЛ: Галактического Диска, Гало и Одиночного источника.

Интенсивности потоков КЛ для этих компонент обозначим как I_d , I_h , I_{ss} соответственно. Их энергетические спектры показаны на рис. 2а.

Амплитуды первой гармоники для этих трех компонент обозначим соответственно как A_d , A_h и A_{ss} . Если бы КЛ состояли только из двух компонент – Диска и Гало, то их общая амплитуда определялась бы как

$$A = \frac{A_d I_d}{I_d + I_h}.$$

Замедление роста анизотропии связано с растущей долей Гало, амплитуда которой постулируется равной нулю: $A_h = 0$. Однако в этом варианте в поведении суммарной анизотропии не видно минимума, наблюдаемого при энергиях 200–300 ТэВ. Здесь поможет предположение о растущем вкладе Одиночного источника. Его жесткий энергетический спектр и локализация во Внешней Галактике приводят к наблюдаемому минимуму амплитуды анизотропии, которая в этом случае вычисляется как

$$A = \frac{A_d I_d - A_{ss} I_{ss}}{I_d + I_h + I_{ss}}.$$

Ее поведение показано на рис. 1а и 2б сплошной линией. Знак “–” в числителе этого выражения возникает из-за того, что Одиночный источник предполагается существующим во Внешней Галактике, что частично компенсирует поток КЛ из Внутренней Галактики.

ЗАГАДКА 3: ВКЛАД ОДИНОЧНОГО ИСТОЧНИКА

Предположение о существовании и значительной роли Одиночного источника было выдвинуто для объяснения удивительной резкости излома в спектре широких атмосферных ливней (ШАЛ) [2]. Оно основано на очевидной неоднородности распределения источников КЛ и плотности межзвездной среды в пространстве и во времени. Из-за этой неоднородности может оказаться, что один из источников вспыхнул сравнительно недавно и вблизи солнечной системы. Его вклад в полную интенсивность КЛ довольно велик и образует небольшой пик (колени) над фоном от остальных источников.

Для поиска Одиночного источника мы использовали так называемый разностный метод [3]. Он отличается от традиционного метода поиска источников по направлению максимальной интенсивности КЛ. Его идея состоит в том, что разница в характеристиках широких атмосферных ливней (ШАЛ), приходящих из направления на источник, и противоположного направления должна быть максимальной. Метод устойчив против случайных экспериментальных ошибок и позволяет исследовать всю небесную сферу, включая области вне прямой видимости экспериментальной установки.

Для поиска анизотропии мы использовали экспериментальные данные установки ГАММА, работавшей на горе Арагац в Армении [4]. В качестве параметра для сравнения характеристик ШАЛ был выбран возраст ливня, определяемый по крутизне функции пространственного распределения плотности заряженных частиц. Распределения ШАЛ по этому параметру сравнивались для прямого и обратного направлений, и их разность характеризовалась нормированной величиной χ^2 . Двумерный профиль этой величины показан на рис. 3. Максимум разницы распределений в галактических координатах был найден в направлении долготы $l = 277 \pm 3^\circ$ и широты $b = -5 \pm 3^\circ$. Наиболее близким источником в этом направлении является комплекс Вела (Вела X + Вела J), который является хорошим кандидатом на роль Одиночного источника, ответственного за обра-

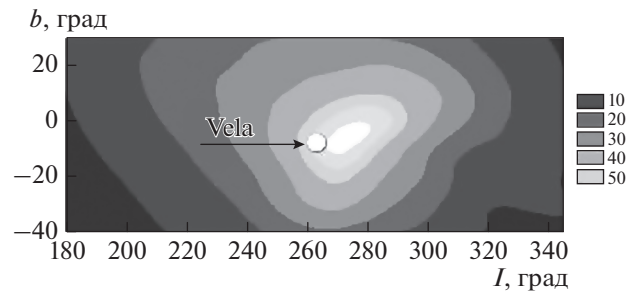


Рис. 3. Двумерный профиль нормированной величины χ^2 , показывающий галактические координаты направления, где наблюдается максимум разницы распределений ШАЛ по возрасту. Белый кружок вблизи центра – направление на источник Вела.

зование колена в энергетическом спектре КЛ при ПэВных энергиях.

Альтернативным объяснением наблюдаемого максимума может быть влияние регулярного магнитного поля вблизи солнечной системы, связанного с близостью спирального рукава Галактики. Однако нужно отметить, что это влияние должно быть мало, чтобы не разрушить диффузный характер распространения КЛ при ПэВных энергиях и ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье мы коснулись только трех загадок, существующих в анизотропии КЛ при ПэВных и ниже. Однако их количество намного больше и повторяя слова Принца Гамлета, мы можем сказать: “Есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guillian G. for the SK collaboration* // Phys. Rev. 2007. V. D75. Art. № 062003.
2. *Erlykin A.D., Wolfendale A.W.* // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 1997. V. 23. P. 979.
3. *Pavlyuchenko V.P., Martirosov R.M., Nikolskaya N.M., Erlykin A.D.* // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2018. V. 45. Art. № 015202.
4. *Garyaka A.P., Martirosov R.M., Ter-Antonyan S.V. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 28. P. 169.