

УДК 524.1+524.7

Влияние магнитного поля пузырей Ферми на распространение космических лучей предельно высоких энергий

А.Б. Суцёв¹, О.А. Кобзарь¹, М.В. Сидоренко², Б.И. Гнатых³, В.В. Марченко⁴

¹ Черниговский национальный педагогический университет имени Т.Г. Шевченко, ул. Гетьмана Полуботка, 53, Чернигов, Украина, 14013

authule@yandex.ru

² Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, физический факультет, просп. Глушкова, 4, Киев, Украина, 03127

mykhailo.sydorenko@gmail.com

³ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Т. Шевченко, ул. Обсерваторная, 3, Киев-53, Украина, 04053

bohdan_hnatyk@ukr.net

⁴ Астрономическая обсерватория Ягеллонского университета, ул. Орла 171, Краков, Польша, 31501

volodymyr.marchenko@oa.uj.edu.pl

Поступила в редакцию 28 октября 2013 года

Аннотация. Данные орбитальной гамма-обсерватории Ферми свидетельствуют о наличии двух гигантских областей гамма-излучения, которые простираются примерно на 10 кпк к югу и к северу от центра Галактики. В работе исследуется магнитное поле пузырей Ферми и его влияние на распространение космических лучей различных энергий. Показано, что его вклад сравним по величине с действием регулярного компонента галактического магнитного поля. Обсуждается возможность излучения или ускорения космических лучей пузырями Ферми.

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD OF FERMI BUBBLES ON THE PROPAGATION OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS, *by A.B. Sushchov, O.A. Kobzar, M.V. Sydorenko, B.I. Hnatyk, V.V. Marchenko.* Data from the Fermi Gamma-ray Space Telescope reveal two giant gamma-ray emitting lobes which extend about 10 kpc north and south of the Galactic center. The magnetic field of Fermi Bubbles and its influence on the propagation of cosmic rays of different energy is studied in the paper. Its contribution is shown to be comparable to the influence of the regular component of galactic magnetic field in value. The possibility of origination or acceleration of cosmic rays in Fermi Bubbles is discussed.

Ключевые слова: магнитное поле, космические лучи, пузыри Ферми

1 Вступление

Одной из наиболее актуальных проблем астрофизики высоких энергий на сегодняшний день является определение природы и возможных источников космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ). Они представляют собой частицы субатомных размеров (ядра химических элементов, электроны, нейтрино), детектируемые наземными установками по широким атмосферным ливням вторичных частиц, которые образуются в результате лавинообразного взаимодействия КЛПВЭ с

молекулами атмосферных газов. Атмосферные ливни дают информацию об энергиях первичных космических лучей (КЛ), направлениях их прибытия в атмосферу, а также их химический состав. Ввиду отсутствия в нашей галактике астрофизических объектов, достаточно мощных для того, чтобы ускорить указанные частицы до столь высоких (выше $4 \cdot 10^{19}$ эВ) энергий, а также почти изотропного крупномасштабного распределения КЛ по направлениям их прибытия в земную атмосферу, происхождение КЛПВЭ принято считать внегалактическим (Абрахам и др., 2009). На пути к Солнечной системе КЛ теряют энергию в результате образования электрон-позитронных пар и пионов при взаимодействии с реликтовым излучением, а также вследствие красного смещения. Энергетические потери пропорциональны начальной энергии частицы, что приводит к наличию порогового значения энергии, обладая которым КЛ еще могут достичь Солнечной системы (так называемое обрезание энергетического спектра, или эффект Грайзена-Зацепина-Кузьмина (Грайзен, 1966; Зацепин, Кузьмин, 1967)). Потери энергии в указанных процессах также пропорциональны расстояниям, которые частицы проходят на своем пути в космическом пространстве; это накладывает ограничения на максимальное расстояние до их источников (так называемый ГЗК-горизонт, который составляет 70 Мпк для частиц с энергиями, превышающими 10^{20} эВ, и 250 Мпк для энергий ядер от $6 \cdot 10^{19}$ эВ) (Кахельрисс и др., 2009).

При анализе экспериментальных данных, доступных на сегодняшний день, существует ряд проблем и противоречий. Данные основных наземных установок (HiRes (Аббаси и др., 2008), Auger (Абреу и др., 2010), Telescope Array (Юй, 2012)) трактуются с использованием различных методик. Поэтому выводы относительно химического состава КЛПВЭ отличаются между собой. Кроме того, неразрешенной является неравномерность распределения КЛ по направлениям прихода в Солнечную систему. Есть веские основания полагать, что расширение статистики по мере регистрации новых данных прольет свет на преодоление этих и других проблем.

В качестве кандидатов на роль источников КЛПВЭ рассматриваются различные классы внегалактических объектов, среди которых наиболее перспективными считаются гамма-всплески, молодые магнетары, ударные волны в областях формирования крупномасштабной структуры Вселенной, а также активные ядра галактик. Наиболее вероятными источниками КЛПВЭ являются две ближайшие к нам радиогалактики – Centaurus A (расстояние до Солнечной системы 3.8 Мпк) и Virgo A (расстояние до Солнечной системы 17.1 Мпк). Оба этих объекта являются достаточно мощными для ускорения частиц до предельно высоких энергий и расположены на расстояниях, достаточно небольших для того, чтобы энергетическими потерями при движении частиц можно было пренебречь. Однако, если в случае Centaurus A количество зарегистрированных в окрестности этой галактики КЛПВЭ превышает статистически среднее значение, то около Virgo A, еще более мощного объекта, таковых вообще не наблюдается (Семикоз, 2010).

Важное влияние на распространение КЛ оказывают магнитные поля, как галактическое, так и межгалактическое. Детали структуры магнитного поля недостаточно изучены, однако принято полагать, что галактическое магнитное поле (ГМП) имеет как регулярную, так и случайную компоненты, а характер межгалактического поля чисто случайный. Ввиду недостаточного понимания природы магнитного поля существует ряд теоретических моделей, которые удовлетворительно описывают эффекты, связанные с его влиянием (Кахельрисс и др., 2007; Проуза, Шмида, 2003; Пширков и др., 2011; Яннсон, Фаррар, 2012). В частности, действие магнитных полей на движение КЛ сводится к искажению их траекторий.

Орбитальный телескоп Ферми обнаружил практически симметричные относительно галактической плоскости области интенсивного гамма-излучения, которые простираются примерно до 50° широты в обе стороны от галактического диска, и достигают около 40° долготы в ширину, будучи практически симметричными относительно плоскости Галактики (Доблер и др., 2010; Су и др., 2010). Эти объекты получили название “пузыри Ферми” (ПФ). Для них характерна практически однородная яркость поверхности с довольно резко очерченными границами. Структуры подобной формы наблюдаются и в других диапазонах энергии (данные рентгеновской обсерватории ROSAT (Блэнд-Хоуторн, Коэн, 2003; Сноуден и др., 1997), микроволновой туман (Доблер, 2012), области поляризованного радиоизлучения (Каретти и др., 2013)). Природа и происхождение этих объектов являются предметом дискуссий (Доблер, 2012; Каретти и др., 2013; Су и др., 2010; Янг и др., 2012).

Поскольку существуют данные о наличии магнитного поля (с неизвестной в данное время структурой (Джонс и др., 2012; Каретти и др., 2013)) в ПФ, то есть основания предполагать, что эти объекты являются источниками КЛ (или, по крайней мере, оказывают влияние на их распространение). Исходя из этого, основными целями данной работы являются оценка влияния магнитного поля ПФ на движение КЛ различных энергий и сравнение их вклада в результирующее искажение траекторий КЛ с действием других компонент ГМП.

2 Моделирование

2.1 Модель галактического магнитного поля

Структура магнитного поля Галактики на сегодняшний день известна лишь в общих чертах. Его детали до сих пор являются недостаточно изученными. Известно, что ГМП имеет два компонента – регулярный и случайный. Структура регулярного ГМП в общих чертах повторяет распределение материи в Галактике, а величина имеет порядок нескольких единиц мкГс. Для его описания как правило применяют различные эмпирические формулы, которые в той или иной степени базируются на наблюдательных данных, а также содержат ряд допущений и приближений. Случайное ГМП менее изучено. По крайней мере известно, что оно характеризуется различными масштабами пространственной переменности, а по величине может достигать значений, сравнимых с регулярным полем. Тем не менее, доминирующее влияние на распространение КЛПВЭ в Галактике оказывает именно регулярное поле, поскольку отклонения в случайном поле на различных участках траектории имеют различные направления и суммируются как случайные величины.

Исходя из вышесказанного в первом приближении мы рассмотрели движение КЛ с учетом только регулярного ГМП. Для описания его структуры было предложено значительное количество различных эмпирических моделей (всего около 10). В наиболее полной степени структура регулярного ГМП описана в работах (Кахельрисс и др., 2007; Проуза, Шмида, 2003; Пширков и др., 2011; Яннсон, Фаррар, 2012). В нашей работе мы использовали наиболее современную модель, основанную на самом большом объеме наблюдательных данных (Яннсон, Фаррар, 2012).

Общей чертой всех предложенных моделей ГМП является недостаток данных для центральных областей Галактики вследствие сложности их наблюдения. Поэтому для описания поля на расстояниях менее 4 кпк от центра Галактики, как правило, применяется экстраполяция и значительное количество приближений. С другой стороны, исследования ПФ показали наличие у них магнитного поля, структура которого в значительной степени упорядочена, а величина может достигать 10 мкГс (Джонс и др., 2012; Каретти и др., 2013). Это почти на порядок превышает типичные значения для регулярного ГМП. Следовательно, мы предполагаем, что стоит ожидать заметного вклада ПФ в отклонение КЛ.

Для определения этого вклада мы смоделировали движение КЛПВЭ (протонов с энергией 100 ЭэВ) в Галактике и определили их отклонение в магнитном поле для следующих случаев: 1) учитывая только регулярное ГМП, описанное в модели (Яннсон, Фаррар, 2012), без учета поля ПФ; 2) учитывая кроме ГМП также поле ПФ в предположении оболочечной топологии – поле сконцентрировано в оболочке толщиной порядка 0.1 радиуса пузыря (характерно для ударной волны), индукция поля в оболочке 10 мкГс; 3) учитывая поле ПФ в предположении объемной топологии – поле распределено по всему объему пузыря, индукция поля 3.5 мкГс. Далее проводилось сравнение полученных результатов.

Оценка индукции поля ПФ для случаев 2 и 3 взята из работы (Каретти и др., 2013).

Кроме того, как было сказано выше, есть основания предполагать, что сами ПФ являются источниками (ускорителем) КЛ. В таком случае необходимо определить области пространства, из которых на Землю могли бы приходить КЛ различных энергий при условии их ускорения в ПФ. Эта задача решалась нами в предположении, что каждый элемент поверхности ПФ излучает частицы КЛ во все стороны, и дальнейшее их распространение происходит уже в ГМП. Далее фиксировались направления для тех частиц, которые после отклонения в ГМП достигали Солнечной системы.

2.2 Алгоритм

Магнитное поле искривляет траекторию движения заряженных частиц вследствие действия силы Лоренца. Магнитное поле, напряженность которого не изменяется со временем, не влияет на энергию частицы. Учитывая тот факт, что типичные значения энергий КЛ значительно превышают энергию покоя соответствующих частиц, примем, что они распространяются со скоростью, близкой к скорости света. Тогда уравнения движения ультрарелятивистских частиц в магнитном поле $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ имеют вид:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{qc^2}{E}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Аналитическое решение таких уравнений по причине сложности магнитного поля представляет значительные трудности. Поэтому для их решения обычно применяют численное моделирование. В нашей работе был использован метод Рунге-Кутты четвертого порядка, реализованный в математической библиотеке GSL (GNU Scientific Library).

Моделирование движения КЛ мы проводили по принципу “back tracking”. В соответствии с данным методом, рассматривается движение “античастицы” КЛ (с противоположным знаком заряда) в направлении, противоположном направлению прилета реальной частицы. В этом случае движение будет происходить по той же траектории, что позволяет определить местоположение возможного источника КЛ.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Влияние пузырей Ферми на направления прихода внегалактических космических лучей

Первая наша задача состояла в оценке влияния магнитного поля ПФ на распространение КЛПВЭ и сравнении его с влиянием регулярной составляющей ГМП. Для этого мы смоделировали равномерное распределение направлений прибытия КЛПВЭ в точку наблюдения. В качестве частиц КЛ предполагались протоны с энергией 10^{20} эВ. Далее методом “back tracking” определялось положение возможных внегалактических источников этих частиц. Результаты моделирования представлены на рис. 1–4 в галактической системе координат.

На рис. 1 приведены результаты, полученные с учетом только регулярного ГМП, описанного в модели (Яннсон, Фаррар, 2012), без учета магнитного поля ПФ. Черные точки соответствуют направлениям прибытия КЛ к наблюдателю; светлые точки соответствуют рассчитанным положениям возможных источников этих КЛ; контурное изображение повторяет “видимые” геометрические очертания ПФ.

На рис. 2 и 3 приведены аналогичные результаты, полученные с учетом одновременно и регулярного ГМП, и поля ФБ. Но поскольку распределение напряженности магнитного поля по толщине пузырей остается неизвестным, мы смоделировали два крайних случая: концентрации поля в тонкой оболочке (рис. 2) и равномерного распределения поля по всему объему ПФ (рис. 3). Значения напряженности поля для этих случаев принимались 10 и 3.5 мкГс соответственно (Каретти и др., 2013).

Чтобы упростить визуальное сравнение полученных результатов, на рис. 4 приведено объединение данных рис. 1–3. Из рис. 4 видно, что для частиц, направления прибытия которых проектируются на ПФ (или в непосредственной близости), наблюдаются значительные расхождения как по величине, так и по направлениям отклонения КЛ. Для случаев с двумя разными моделями магнитного поля ПФ также наблюдаются некоторые отличия, но они менее значительны. В то же время для частиц, направления прибытия которых находятся на некотором удалении от ПФ, отклонения во всех трех случаях идентичны.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что магнитное поле внутри ПФ оказывает значительное воздействие на движение КЛ. Это воздействие сравнимо по величине и даже может превосходить воздействие регулярного компонента ГМП.

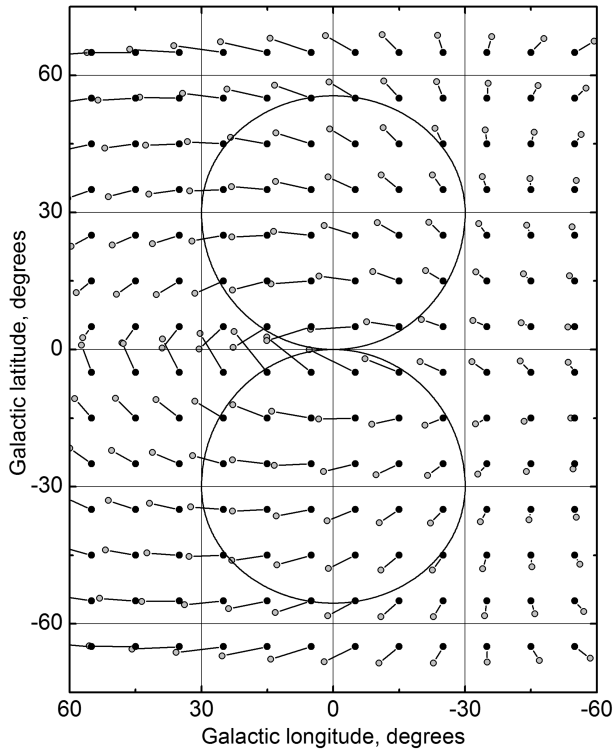


Рис. 1. Отклонения КЛ в регулярном ГМП согласно модели (Яннсон, Фаррар, 2012) без учета влияния ПФ

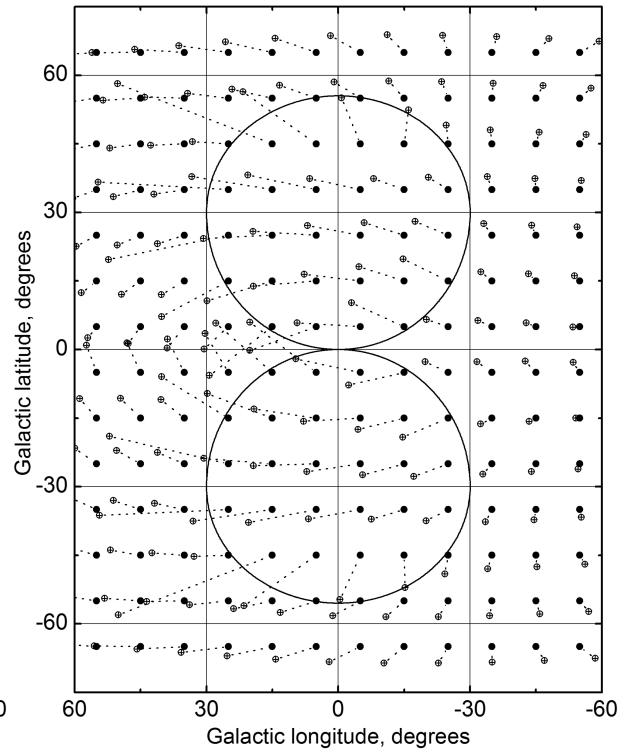


Рис. 2. Отклонения КЛ в регулярном ГМП согласно модели (Яннсон, Фаррар, 2012) с учетом влияния ПФ (оболочечная топология)

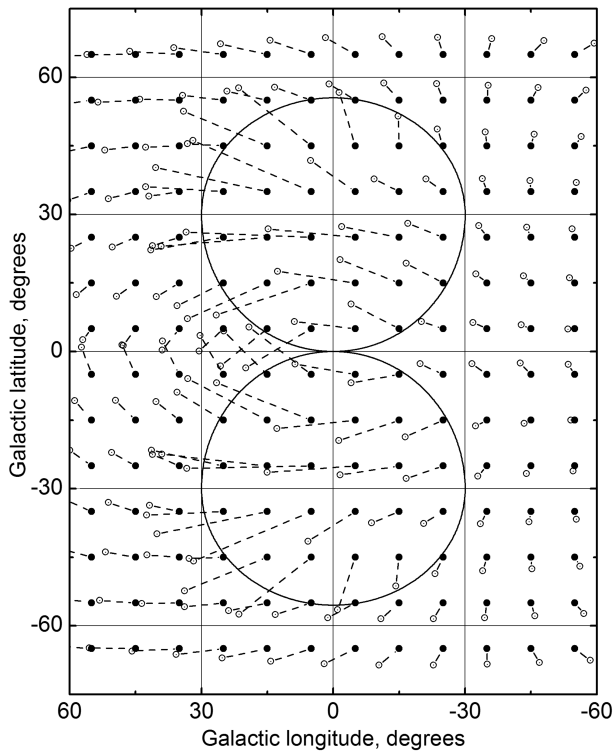


Рис. 3. Отклонения КЛ в регулярном ГМП согласно модели (Яннсон, Фаррар, 2012) с учетом влияния ПФ (объемная топология)

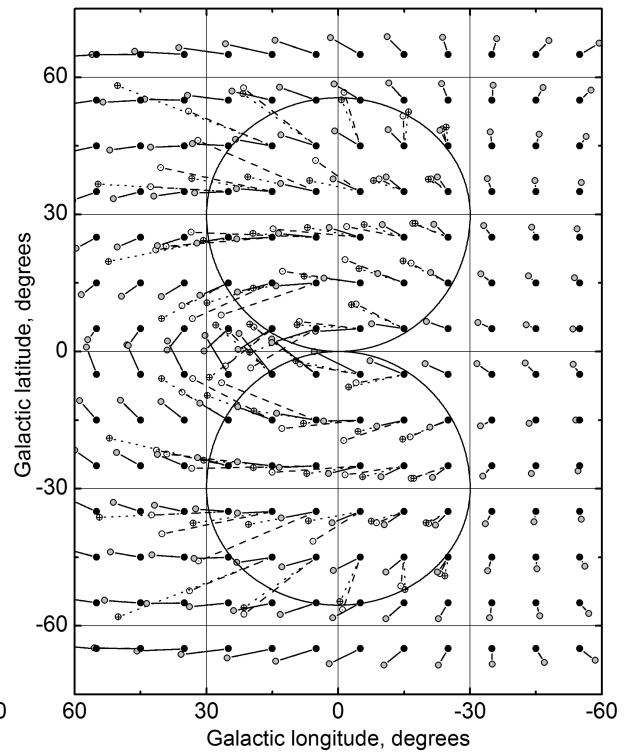


Рис. 4. Отклонения КЛ в регулярном ГМП согласно модели (Яннсон, Фаррар, 2012) с учетом влияния ПФ (сравнение топологий поля)

3.2 Пузыри Ферми как потенциальный источник космических лучей

Вторая задача данной работы состояла в определении областей пространства, из которых на Землю могли бы прибывать КЛ в предположении, что их источниками являются ПФ. Ее решение также было получено с применением метода “back tracking”. Для этого моделировалось движение в ГМП античастиц КЛ различных энергий (от 10^{18} до 10^{20} эВ) с Земли во всех направлениях с шагом 1 градус. Далее фиксировались направления только для тех частиц, которые до выхода из Галактики попадали в область ПФ. Совокупность таких направлений и определяла искомую область.

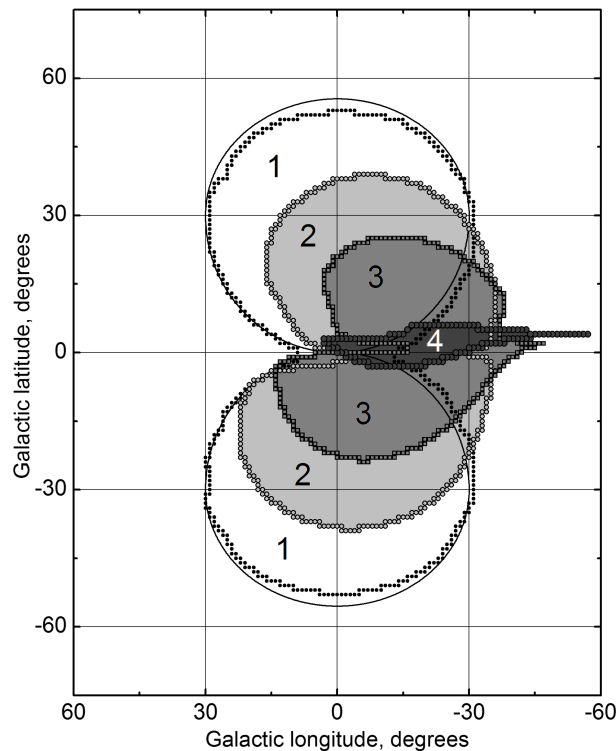


Рис. 5. Изображение ПФ в КЛ различных энергий. Область 1 отвечает КЛ с энергией 10^{20} эВ, область 2 – 10^{19} эВ, область 3 – $5 \cdot 10^{18}$ эВ, область 4 – $3 \cdot 10^{18}$ эВ. Тонкий контур соответствует геометрическим очертаниям ПФ

На рис. 5 представлены результаты моделирования для протонов с энергиями от $3 \cdot 10^{18}$ до 10^{20} эВ. Точками обозначены границы областей, из которых на Землю должны были бы прибывать КЛ из ПФ. Таким образом, для каждого значения энергии получены изображения ПФ в КЛ. Из рис. 5 видно, что для максимальной энергии (область 1, 10^{20} эВ) изображение ПФ практически соответствует их геометрической форме (тонкий контур). По мере уменьшения энергии изображение деформируется, сжимаясь при этом в вертикальном направлении (области 2–4). При энергии ниже $2 \cdot 10^{18}$ эВ изображение ПФ не формируется.

Полученные результаты позволили установить минимальное значение энергии КЛ, выше которого еще можно ожидать наблюдение изображения ПФ в КЛ. С другой стороны, отсутствие такого изображения в наблюдательных данных будет свидетельством того, что энергии КЛ, ускоренных в ПФ, имеют значения ниже, чем $2 \cdot 10^{18}$ эВ. В любом случае существующая статистика наблюдения КЛ пока еще недостаточна для более определенных выводов, и этот вопрос требует дальнейших исследований.

4 Выводы

Магнитное поле пузырей Ферми оказывает существенное влияние на отклонения космических лучей, сравнимое с влиянием галактического магнитного поля.

Для различных топологий магнитного поля ПФ результаты имеют качественное сходство, однако проявляются некоторые отличия. Так, для оболочечной топологии более сильное отклонение КЛ наблюдается при их прохождении через периферийную область ПФ, а для объемной топологии – через центральную.

Получены очертания области, в которой должны наблюдаться КЛ при условии их происхождения или ускорения в ПФ. Результаты, полученные для КЛ различной энергии, позволяют сделать вывод о существовании минимального ее значения, которое оценивается примерно в $2 \cdot 10^{18}$ эВ, ниже которого о наличии такой области не приходится говорить. В совокупности с наблюдательными данными по КЛПВЭ это может указывать на существование верхнего порога энергий КЛ, ускоряемых ПФ.

Для более детальных ответов на эти вопросы нужен детальный анализ поведения КЛПВЭ различных энергий вблизи центра галактики.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность Лукашу Ставаржу (ISAS JAXA, Japa & OA UJ, Poland) за помощь в постановке задачи и обсуждение полученных результатов.

Литература

- Аббаси и др. (Abbasi R. et al. (HiRes Collaboration)) // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. id. 101101.
 Абрахам и др. (Abraham J. et al. (The Pierre Auger Collaboration)) // arXiv:0906.2347 [astro-ph.HE]. 2009.
 Абреу и др. (Abreu P. et al. (The Pierre Auger Collaboration)) // Astroparticle Phys. 2010. V. 34. P. 314.
 Блэнд-Хоуторн, Коэн (Bland-Hawthorn J., Cohen M.) // Astrophys. J. 2003. V. 582. P. 246.
 Грайзен (Greisen K.) // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 16. P. 748.
 Доблер (Dobler G.) // Astrophys. J. 2012. V. 750. id. 17.
 Доблер и др. (Dobler G., Finkbeiner D.P., Cholis I., Slatyer T., Weiner N.) // Astrophys. J. 2010. V. 717. P. 825.
 Джонс и др. (Jones D., Crocker R.M., Reich W., Aharonian F.A.) // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 747. id. L12.
 Зацепин, Кузьмин (Zatsepin G., Kuzmin V.) // Can. J. Phys. 1967. V. 46. P. 617.
 Каретти и др. (Caretti E., Crocker R.M., Staveley-Smith L., Haverkorn M., Purcell C., Gaensler B.M., Bernardi G., Kesteven M.J., Poppi S.) // Nature. 2013. V. 493. P. 66.
 Кахельрисс и др. (Kachelriess M., Parizot E., Semikoz D.V.) // JETP Lett. 2009. V. 88. P. 553.
 Кахельрисс и др. (Kachelriess M., Serpico P.D., Teshima M.) // Astroparticle Phys. 2007. V. 26. P. 378.
 Проуза, Шмида (Prouza M., Smida R.) // Astron. Astrophys. 2003. V. 410. P. 1.
 Пширков и др. (Pshirkov M.S., Tinyakov P.G., Kronberg P.P., Newton-McGee K.J.) // Astrophys. J. 2011. V. 738. id. 192.
 Семикоз (Semikoz D.) // arXiv:1009.3879 [astro-ph.HE]. 2010.
 Сноуден и др. (Snowden S.L., Egger R., Freyberg M.J., McCammon D., Plucinsky P.P., Sanders W.T., Schmitt J.H.M.M., Truemper J., Voges W.) // Astrophys. J. 1997. V. 485. P. 125.
 Су и др. (Su M., Slatyer T.R., Finkbeiner D.P.) // Astrophys. J. 2010. V. 724. P. 1044.
 Юй (Jui C.C.H. (The Telescope Array Collaboration)) // J. Ph. C. S. 2012. V. 404. id. 012037.
 Янг и др. (Yang H. – Y.K., Ruszkowski M., Ricker P.M., Zweibel E., Lee D.) // Astrophys. J. 2012. V. 761. id. 185.
 Яннсон, Фаррап (Jannson R., Farrar G.) // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 761. id. L11.