

Аннотация

1. **Авторы:** В. М. Лозников, Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская
2. **Название:** О причине переменности спектра космических лучей в области “колена”
3. **Ссылки на публикацию:** ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2017, том 43, № 9, с. 765–775
4. **Общая формулировка научной проблемы и её актуальность.**

Почти 60 лет прошло после открытия [Kulikov G.V., Khristiansen G.B., 1958 г.] особенности, в области энергий $\sim 3 \times 10^6$ ГэВ в спектре суммы всех ядер космических лучей (КЛ), названной ‘коленом’. Однако, одним из главных неясных принципиальных вопросов в области астрофизики КЛ, до сих пор, остается вопрос о происхождении “колена” в спектре КЛ [Гинзбург В.Л., 1993, 1996 гг.]. Данные, полученные на новых детекторах КЛ за последние ~ 20 лет, позволили зарегистрировать переменные особенности в спектрах КЛ. Проблема в том, что, традиционный (*DSA*) механизм генерации КЛ не может объяснить ни особенности, ни переменность в спектрах КЛ.

В *DSA* механизме ускорение КЛ происходит посредством многократного отражения заряженных частиц от ударной волны в остатках вспышек сверхновых звёзд (СН). Для приобретения наибольшей возможной энергии $\sim 10^{13}$ эВ (в *DSA* механизме) требуется время ~ 1000 лет. Предлагаемые, в рамках *DSA*, гипотезы для генерации КЛ вплоть до энергии “колена” $\sim 10^{15}$ эВ требуют реализации физически невозможных условий. Циклотронный радиус для ядер КЛ с энергией $\sim 10^{15}$ эВ в области “колена” равен всего лишь ~ 1 пк. Существующие в настоящий момент СН находятся на больших расстояниях (>100 пк) от Земли. Поэтому все возможные особенности спектра КЛ при диффузионном распространении от остатков СН в Галактике к Земле должны сглаживаться. Однако, в спектрах КЛ существуют переменные особенности.

Попытки объяснить особенности спектра КЛ с помощью гипотезы о существовании (пока ненаблюдаемых) частиц тёмной материи вблизи Земли не убедительны. Очевидно, что для объяснения совокупности экспериментальных данных требуется радикальный пересмотр механизма генерации КЛ.

5. Конкретная решаемая в работе задача и её значение.

В этой работе предложено решение загадки формирования “колена” в спектре КЛ. Анализ данных экспериментов (*AMS-02*, *CREAM*, *Tibet AS γ* , *Tibet (hybrid)*, *GRAPES-3*, *KASCADE*, *KASCADE-GRANDE*) показал наличие переменных особенностей спектров КЛ. При сравнении потоков лёгких ядер *H* и *He* КЛ по данным *KASCADE* и *KASCADE-GRANDE* (для различных моделей восстановления спектров КЛ) с данными *Tibet (hybrid)*, полученными в другое время, в области энергии “колена” $E/Z \sim 3 \times 10^{15}$ ГэВ (где *Z* – зарядовое число) наблюдается переменность. Наиболее отчётливо этот “квазипик” проявляется в спектрах тяжёлых ядер (*Si* и *Fe*) по данным *GRAPES-3* и *KASCADE-GRANDE*. На примере экспериментов *Yakutsk EAS*, *CASA-BLANCA*, *Tibet-III* показано существование переменности и в ЭС суммы всех ядер КЛ в окрестности “колена”. Объяснение этих результатов с помощью предположения о существовании серфотронных ускорителей в ближайших к Солнцу межзвёздных облаках (МО), на расстоянии $\sim <1$ пк от Земли, позволяет решить проблему существования переменных особенностей в спектрах КЛ и их переменности, а также решить загадку формирования “колена” в спектре КЛ. Известные астрофизические данные (*Voyager 1-2*, *IBEX*) о

регистрации плазменных волн, об однородной структуре магнитного поля на периферии Солнечной системы, и о структуре и динамике (*Hubble*) ближайших к Солнцу межзвёздных облаков (МО) подтверждают правильность предлагаемой модели.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность.

Используя близкие по времени высокоточные данные экспериментов (*AMS-02*, *CREAM*, *Tibet ASy*, *Tibet (hybrid)*, *GRAPES-3*, *KASCADE*, *KASCADE-GRANDE*, *Yakutsk EAS*, *CASA-BLANCA*, *Tibet-III*) мы обнаружили переменность спектра КЛ в окрестности “колена” на временной шкале порядка нескольких лет. Наблюдать такую переменность можно только если источник КЛ находится на расстоянии не далее ~ 1 пк. Для поиска близких областей с однородным магнитным полем мы использовали новейшие данные, полученные на космических аппаратах *Voyager 1-2*, *Hubble*, *IBEX*. В ближайшей окрестности Солнечной системы ($\sim < 1$ пк от Солнца) мы нашли области, в которых возможно серфотронное ускорение ЗЧ до энергии “колена”.

Подходящая область с однородным магнитным полем находится в ближайших межзвёздных облаках (МО): местном МО (LIC) и G-облаке (с размерами ~ 1 пс). Солнечная система находится в LIC, вблизи границы сталкивающихся LIC- и G-облаков, примерно в середине местного межзвёздного пузыря, размером ~ 100 пс. Источником квази-продольных плазменных волн для этой области является столкновение LIC- и G-облаков. Размеры этой области и величина магнитного поля позволяют ускорять заряженные частицы до энергии $E/Z \approx 3 \times 10^{15}$ эВ. Земля фактически находится внутри этой области ускорения. Исходя из размера облака (~ 1 пс) можно ожидать переменности потока КЛ для энергий меньше энергии “колена” порядка нескольких лет.

7. Полученные результаты и их значимость.

Обнаружена переменность спектра КЛ в окрестности “колена” на временной шкале порядка нескольких лет. Наблюдать такую переменность можно только если источник КЛ находится на расстоянии не далее ~ 1 пк. Для энергий $\leq E/Z \approx 3 \times 10^{15}$ эВ известен только один механизм быстрого ускорения заряженных частиц (ЗЧ) – серфотронный механизм ускорения (СМУ). Это позволило предложить решение загадки происхождения “колена” в спектре КЛ. Данные о локальной межзвёздной среде, полученные на космических аппаратах *Voyager 1-2*, *Hubble*, *IBEX* подтверждают возможность существования серфотронных ускорителей в сталкивающихся ближайших МО (LIC- и G-облако).

На основе численных расчетов проведен анализ условий захвата сильнорелятивистских ядер железа волной, динамики компонент скорости и импульса частицы, зависимости темпа ее ускорения от исходных параметров задачи. Исследована структура фазовой плоскости ускоряемого ядра железа. Сформулированы оптимальные условия для реализации ультрарелятивистского серфотронного ускорения ядер Fe электромагнитной волной.

Наше открытие естественным образом объясняет появление особенностей в спектрах КЛ и переменность спектров. Более того, оказывается, что в этих близких серфотронных источниках генерируется значительная доля полного потока КЛ при $E/Z \geq 10^{12}$ эВ.

В результате, предложено решение одного из принципиальных вопросов в области астрофизики КЛ – объяснение существования “колена” в спектре КЛ.