Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 4, с. 241 – 248

Новый метод поиска внегалактических магнитных полей[1)]

Б. Штерн[+ 2)], *И. Ткачев*[+*]

[+]*Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия*

[*]*Физический факультет и лаборатория космологии и физики элементарных частиц, Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 4 ноября 2025 г.
После переработки 18 декабря 2025 г.
Принята к публикации 19 декабря 2025 г.

Внегалактическое магнитное поле можно обнаружить, ища признаки электромагнитного каскада, инициированного высокоэнергетическими фотонами на межгалактическом излучении, и отклоненного магнитным полем. Этот процесс создает временную задержку и протяженное гамма-гало вокруг источника, которые и ищутся. Мы предлагаем новый признак такого электромагнитного эха: асимметрию распределения гамма-излучения вокруг блазаров. Эта асимметрия обусловлена наклоном струи блазара относительно линии зрения. В качестве меры асимметрии мы используем смещение распределения гамма-излучения относительно местоположения блазара. Используя подвыборку из 10 самых ярких лацертид, мы исключаем диапазон внегалактических магнитных полей от 10^{-16} до 10^{-14} Гс, предполагая, что эти объекты поддерживали постоянную среднюю светимость на протяжении сотен тысяч лет.

DOI: 10.31857/S0370274X26020139

1. Введение. До сих пор нет единого мнения о том, как возникло и какими могут быть типичные значения внегалактического магнитного поля (Extragalactic Magnetic Field, EGMF). Чтобы получить более полное представление по этим вопросам, можно обратиться к обзору, опубликованному в [1]. Тем не менее, существует четко определенный верхний предел для внегалактических магнитных полей, который составляет примерно 10^{-9} Гс, который был получен из измерений фарадеевских мер вращения далеких радиоисточников (см., например, [2]). Также существует ряд исследований, которые определяют нижние границы возможных значений EGMF.

Для поиска внегалактических магнитных полей и установления нижних пределов используются два подхода. Оба связаны со вторичным сигналом, вызванным электромагнитными каскадами, инициируемыми фотонами с энергией в несколько ТэВ на внегалактическом излучении. Будем называть этот вторичный сигнал гамма-эхо. Первый подход заключается в поиске задержанных фотонов после гамма-вспышек блазаров или гамма-всплесков. Этот подход был предложен в работе [3] и разработан в статьях [4, 5]. Нижний предел, установленный этим методом, составляет порядка 10^{-17} Гс [6–8]. Второй подход заключается в поиске протяженных ореолов вокруг гамма-изображений блазаров из-за углового разброса, вызванного тем же процессом [10, 11].

В большинстве работ, посвященных исследованию этого эффекта, сообщается об отсутствии углового разброса и устанавливается нижний предел для значения EGMF на уровне 10^{-15} Гс ([12–16]). Следует отметить, что эти оценки зависят от диапазона энергии гамма-квантов и длины корреляции межгалактического магнитного поля, см., например, [8]. Подробные обзоры с теоретическими основами можно найти в работах [17, 18].

Вместе с тем, в литературе имеется несколько сообщений о наблюдениях протяженных гамма-гало вокруг лацертид. Например, в работе [19] был обнаружен сигнал на сложенных изображениях источников в выборке из большого числа активных ядер галактик. Однако, в статье [20] показано, и подтверждено в [21], что это наблюдение было просто вызвано недооценкой ширины функции рассеяния точки (англ. *point spread function*, PSF) телескопа. Затем, в статье [22] был обнаружен интересный намек на расширение сложенных изображений в выборке из лацертид с высоким синхротронным пиком.

В предлагаемой статье представлен новый метод поиска проявлений EGMF. Метод основан на асимметрии изображения блазара, а не на его уширении относительно PSF, и достаточно чувствителен, чтобы дать значительный сигнал от отдельного объекта. Мы ограничиваем настоящее исследование данными

[1)]См. дополнительный материал к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ru

[2)]e-mail: stern@inr.ru

орбитальной обсерватории им. Ферми и одной простой характеристикой асимметрии изображения.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы формулируем проблему и описываем численную модель каскада, основанную на методе Монте-Карло. В разделе 3 мы представляем результаты численного моделирования и описываем ожидаемый сигнал для различных параметров. В разделе 4 мы описываем, как мы сформировали нашу выборку лацертид, и обсуждаем проблему точного определения их местоположения. Далее в этом разделе мы налагаем ограничения на внегалактическое магнитное поле, используя самую яркую часть выборки. В разделе 5 мы обсуждаем преимущества метода и перспективы дальнейших усилий в этом направлении. Дополнительная техническая информация представлена в дополнительных материалах к статье.

2. Метод и модель. Астрофизические фотоны высокой энергии конвертируются в пары e^+e^-, взаимодействуя с внегалактическим фоновым светом, который оптически плотен для фотонов в диапазоне ТэВ на расстояниях в сотни Мпс. При моделировании этого процесса мы используем оценку спектральной плотности инфракрасно-оптических фотонов в межгалактическом пространстве, полученную из [23]. Родившиеся пары затем комптонизуют реликтовые фотоны до ГэВ-ных энергий, регистрируемых гамма-телескопами. Длина пути электрона до того, как он комптонизует фотон реликтового излучения, составляет около 10 кпк, что ничтожно мало по сравнению с расстоянием до источника. Это расстояние ограничивает диапазон значений магнитных полей, которые могут быть обнаружены с помощью этого метода, до $10^{-16}-10^{-14}$ Гс. Более слабое поле не в состоянии отклонить электроны на угол, достаточный для искажения изображения блазара; более сильное поле отклонит их так, что комптонизованные фотоны потеряют связь с источником и внесут свой вклад в изотропный фон гамма-излучения. Процесс в диапазоне детектирования расширяет изображение блазара, создавая ореол.

Суть нового метода, который мы предлагаем, заключается в том, что гало должно быть асимметричным, поскольку джеты блазара не направлены точно на нас, см. рис. 1. Мы предполагаем, что асимметрия гало может быть более эффективным индикатором межгалактического поля, чем протяженность изображения над функцией углового разброса (Point Spread Function, PSF). В частности, новый подход не опирается на энергетически зависимую функцию углового разброса, возможно, содержащую неопределенности.

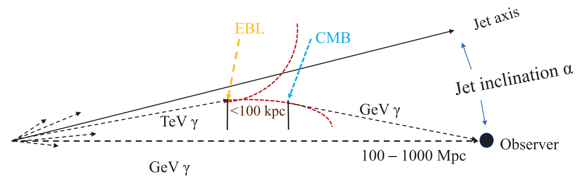

Рис. 1. (Цветной онлайн) Диаграмма, иллюстрирующая формирование “каскадного эхо”. Первичное ТэВ-излучение в джете создает пары e^+e^- на межгалактическом фоновом свете; пары e^+e^-, отклоняемые EGMF, создают вторичные ГэВ-ные фотоны при взаимодействии с космическим микроволновым фоновым излучением. Образующееся гало смещается в сторону наклона джета

Мы получаем ожидаемые свойства асимметричного гало с помощью моделирования методом Монте-Карло. Для этого нам сначала нужна модель блазара. Мы делаем следующие допущения:

i) Джет блазара имеет Лоренц-фактор 20. Это типичное значение, оцениваемое по сверхсветовому движению ([24]).

ii) Джет сильно коллимирован. Угловое распределение фотонов является результатом изотропного движения испускаемых частиц в сопутствующей системе отсчета джета.

iii) Спектральное распределение энергии является плоским, т.е. индекс числа фотонов равен $\Gamma = -2$. Это типичная особенность лацертид. Некоторые объекты (например, Mkn 421) имеют более жесткие спектры в диапазоне 1 ГэВ–1 ТэВ, в то время как другие (например, BL Lac) являются более мягкими. Плоский спектр – хороший компромисс.

iv) Максимальная энергия фотона составляет 10 ТэВ в сопутствующей системе джета.

v) Моделируем EGMF следующим образом. От рождения до потери (из-за охлаждения) способности комптонизовать фотоны до энергий, большей, чем ГэВ, каждый электрон движется в поле с изначально случайно ориентированной, но затем постоянной поперечной компонентой H с заданной амплитудой. Эта схема моделирования соответствует длине корреляции $\gtrsim$ Мпк. Меньшая длина корреляции уменьшит эффект, который мы ищем, если поле находится в диапазоне 10^{-16}–10^{-15} Гс, и усилит его в более сильном поле.

Пункты iii и iv предполагают низкую плотность внешнего излучения у источника, это условие естественно для лацертид. Эта базовая модель не охватывает всего многообразия лацертид и EGMF, но вполне достаточна для изучения предложенного метода обнаружения внегалактических магнитных полей. Поэтому мы не варьируем начальный спектр фотонов или их угловое распределение. Изменяем только расстояние до источника и ориентацию струи относительно луча зрения (угол наклона).

Мы моделируем фотонные взаимодействия и перенос частиц прямым методом Монте-Карло без статистических весов, применяя фрагменты кода, описанного в [25]. Энергия, направление и задержка каждого приходящего фотона регистрируются на виртуальном "детекторе". Угловое положение каждого входящего фотона относительно линии падения затем рандомизировали с использованием шаблона PSF. Последний был построен с использованием реальной выборки Mkn 421 с энергиями выше 1 ГэВ, состоящей из $\sim 19\,000$ фотонов. Это шаблоное распределение было обрезано по 1.5° от центра с учетом вычитания фона.

3. Результаты моделирования методом Монте-Карло. При моделировании можно различать прямые фотоны, которые приходят от источника без взаимодействия, и фотоны эха, которые приходят в результате каскадного отклонения в EGMF (см. рис. 1). Ясно, что эхо асимметрично по углу положения, смещаясь в сторону наклона джета. Фотоны эха также поступают с задержкой по времени до 10^5–10^6 лет. Для переменных источников это может быть очень важно при поиске сигнатуры EGMF.

В реальных астрофизических данных прямые и эхо-компоненты неразличимы. Однако их сумма, которая является наблюдаемой, будет статистически отличаться слева и справа от источника, см. рис. 2.

Мы обнаружили, что тесты типа Колмогорова–Смирнова для этого двумерного распределения являются очень чувствительным инструментом для оценки асимметрии. Это накладывает сильные ограничения на EGMF даже для отдельных лацертид и может служить основой для его обнаружения. Результаты нашего углубленного исследования конкретных лацертид будут представлены в нашей предстоящей статье.

В этой статье мы применяем более простую альтернативную меру значимости асимметрии, основанную на смещении гало блазаров относительно известного местоположения источника. В заданном фиксированном поле зрения вокруг источника смещение O определяется как среднее значение координат фотона,

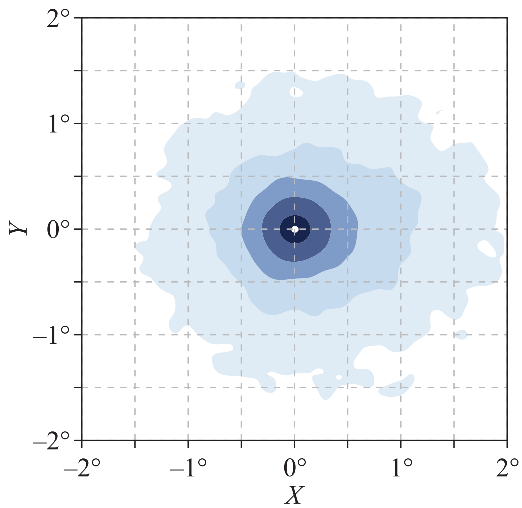

Рис. 2. (Цветной онлайн) Смоделированная цветокодированная карта отсчетов в плоскости, ортогональной лучу зрения для случая $z = 0.1$, $H = 10^{-15}$ Гс, джет наклонен на угол $\alpha = 3^\circ$ вправо

$$O^2 \equiv X^2 + Y^2, \qquad (1)$$

где $X = \Sigma_i^N x_i/N$ and $Y = \Sigma_i^N y_i/N$. Переменные X и Y обычно распределяются со стандартным отклонением $\sigma/\sqrt{N}$, если x_i и y_i распределяются с σ. Затем O^2 следует за χ^2-распределением, в то время как O распределено по Рэлею. Несмотря на более слабую статистическую мощность для отдельного источника по сравнению с тестами Колмагорова–Смирнова, статистика, основанная на переменной O^2, имеет преимущество, заключающееся в возможности анализа суммарной статистики по многим лацертидам, обеспечивая приемлемую значимость ограничений EGMF.

С другой стороны, статистика, основанная на смещениях, зависима от неоднородностей фона и от возможной систематики в данных, которые имитируют EGMF. Эти проблемы чрезвычайно важны при обнаружении признаков EGMF. Как мы увидим, мы не находим намеков на EGMF и вместо этого выводим значимые ограничения, которые сами по себе говорят нам, что эти искажающие эффекты невелики. Тем не менее, мы обсудим их более подробно позже и в дополнительных материалах.

Смещение, согласно нашим моделям, линейно увеличивается с полем зрения ниже 1° и медленнее выше 1°. С другой стороны, проблемы с фоном возрастают квадратично, включая количество мешающих источников внутри и вокруг поля зрения. Плотность источников каталога "Ферми" составляет 0.18

на квадратный градус, а среднее расстояние до ближайшего источника составляет $\sim 1.3^\circ$. В результате компромисса между величиной эффекта и уровнем фонового загрязнения было выбрано реперное поле зрения (FoV) радиусом 1°. Мы не меняли это значение, чтобы избежать эффекта “поиска сигнала”.

Согласно [18], эффективность обнаружения гало зависит от двух факторов, связанных с выбранным полем зрения. Во-первых, размер рабочего поля зрения должен быть таким, чтобы оно полностью содержалось в поле зрения детектора. Во-вторых, поле зрения должно превышать угловое разрешение детектора, $\theta_{\rm psf}$. В нашем случае $\theta_{\rm psf} \approx 0.25^\circ$, что видно из рис. 2. Внутри этой области доминируют прямые фотоны, и их распределение симметрично. Мы также видим, что эхо распространяется до двух градусов, но сокращение рабочего поля зрения до 1° существенно не уменьшает собранную статистику по асимметрии.

На рисунках 3 и 4 показано смоделированное смещение изображений лацертид для детектора “Ферми” при различных параметрах модели. Зависимость смещения от величины поперечного магнитного поля показана на рис. 3 для различных порогов по энергии и величины EGMF.

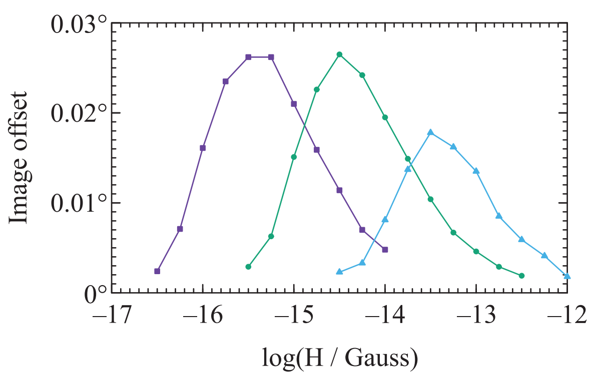

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость смещения изображения от поперечной составляющей магнитного поля для трех различных энергетических порогов (слева направо): 1, 10 и 100 ГэВ. Красное смещение источника составляет $z = 0.2$

Как можно видеть, типичное смещение ($\sim 0.02^\circ$ в областях, где влияние EGMF является существенным) значительно меньше, чем половина ширины на полувысоте PSF $\sim 0.15^\circ$. Тем не менее, эффект по-прежнему уверенно обнаруживается для ярких источников. В частности, статистическая ошибка в значении смещения составляет $\sim 0.0025^\circ$ для самых ярких источников, таких как Mkn 421, и $\sim 0.007^\circ$ для источников на порядок слабее.

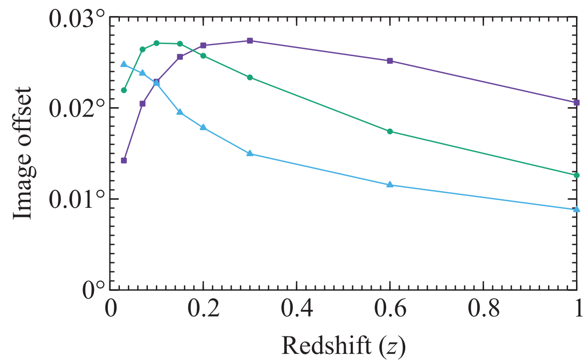

Рис. 4. (Цветной онлайн) Смещение исходного изображения в зависимости от красного смещения для различных порогов по энергии и значений магнитного поля. Пурпурный: $E > 1$ ГэВ, $H = 3 \times 10^{-16}$ Гс, зеленый $E > 10$ ГэВ, $H = 3 \times 10^{-15}$ Гс, синий: $E > 100$ ГэВ, $H = 3 \times 10^{-14}$ Гс угол наклона струи 2°

На рисунках 3 и 4 представлено смещение в предположении, что источник является постоянным в течение сотен тысяч лет. Если мы наблюдаем источник в относительно высоком состоянии, смещение будет меньше. Например, если в настоящее время он на порядок ярче, то эффект внегалактического поля будет необнаружимым для этого источника. С другой стороны, если источник находится в очень низком состоянии, его фотонное эхо может доминировать, и смещение в этом случае на порядок больше.

4. Ограничения на внегалактические магнитные поля.

Данные. Мы ограничили наш анализ лацертидами из каталога “Ферми” 4FGL (1407 объектов), которые расположены в областях с низким фоном (755 объектов). Мы используем все фотоны класса *source* выше 1 ГэВ независимо от их типа конверсии (в передней и задней части детектора). Количество таких фотонов составляет порядка 4×10^7 во всей базе данных “Ферми”. Фон был измерен в кольце $1.5^\circ < \theta < 2.5^\circ$ вокруг объекта, порог взят на уровне 4500 фотонов выше 1 ГэВ в течение 833 недель наблюдений, которые были охвачены данными, которые мы использовали. Это соответствует 7.1×10^{-6} фотонов на квадратный градус в секунду. Затем мы применяем следующий фильтр: никаких других источников каталога 4FGL в окрестности 1° вокруг источника и никаких источников в кольце $1^\circ < \theta < 1.5^\circ$ ярче, чем 0.1 яркости центрального источника. Этот фильтр сократил выборку до 310 объектов.

Важным вопросом является, что следует использовать в качестве реального местоположения источника, так как координаты каталога “Ферми” и оптические локализации несколько отличаются. Выбор неправильных исходных позиций может создать искусственную асимметрию, уменьшая или устраняя ограничения на EGMF. Это может даже привести к ложным сигналам, которые требуют более глубокого исследования. К счастью, мы знаем истинные исходные координаты с высокой точностью. Они обеспечиваются оптическими или радионаблюдениями. Однако неправильные сигналы асимметрии могут возникать, даже если используется оптическая локализация, например, если данные содержат систематику, дающую небольшие глобальные сдвиги в координатах фотонов. Такая систематика существует в данных "Ферми", подробности см. в дополнительных материалах. Данная систематика будет автоматически компенсироваться выбором локализации "Ферми". Поэтому, во-первых, мы ожидаем, что смещения относительно локализаций "Ферми" будут меньше, а выбор оптической локализации обеспечивает надежные консервативные ограничения на EGMF. Во-вторых, важно посмотреть, что происходит с обоими возможными вариантами.

Следует подчеркнуть, что смещение, ур. (1), возникающее из-за влияния EGMF, не может быть компенсировано выбором локализации источника "Ферми", но должно рассматриваться как одна из возможных мер асимметрии гало и может использоваться с любым выбором локализации.

Относительные смещения местоположений источников "Ферми" для 310 выбранных источников, как функция их яркости F (фотоны $см^{-2}\,с^{-1}$) показаны на рис. 5. Значения F взяты из каталога 4FGL [26]. Статистические ошибки, показанные на рис. 5, оцениваются путем рандомизации азимутальных углов фотонов в рабочем поле зрения. Мы измеряем стандартное отклонение σ для переменных X, Y, ур. (1) в каждом объекте, а затем отображаем их как ошибки, поскольку именно они используются в тестах χ^2.

Ограничения на EGMF. Ожидается, что для тусклого конца распределения источников статистические ошибки и вклад реальных фоновых неоднородностей превысят искомый эффект EGMF. Рисунок 5 подтверждает это. Поэтому при получении ограничений на магнитные поля мы ограничили наш анализ десятью наиболее яркими объектами. Эти источники расположены справа от пунктирной вертикальной линии, их список приведен в табл. 1.

Несмотря на то, что рис. 5 сам по себе позволяет оценить критерий выбора лацертид, именно, что фон и ограниченные эффекты статистики важны только слева от вертикальной линии на рис. 5, мы провели дополнительное исследование фона с использованием случайных имплантов, имитирующих лацертиды. Результаты представлены в дополнительном материале, где вся выборка лацертид из рис. 5 исследуется на соответствие гипотезе об отсутствии эффектов EGMF путем сравнения с имплантами.

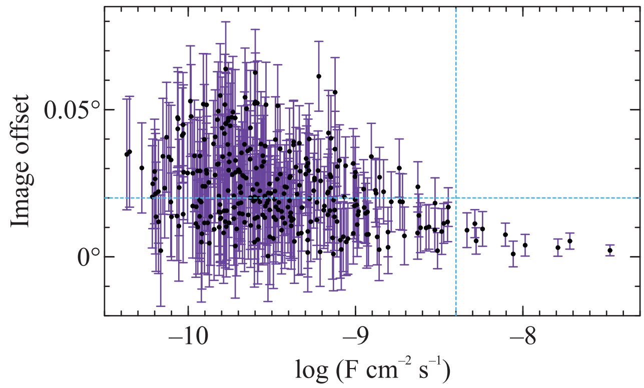

Рис. 5. (Цветной онлайн) Смещения для 310 лацертид, выбранных по критерию низкого фона в поле зрения $\theta = 1°$ в зависимости от яркости источника. Горизонтальная пунктирная линия при 0.02°указывает на уровень, типичный для EGMF-индуцированных смещений для магнитного поля в диапазоне $10^{-16} \lesssim H \lesssim 10^{-14}$, см. рис. 3 и 4

Таблица 1. Выборка самых ярких лацертид, используемых для оценки ограничений на магнитное поле. Яркость дана в единицах 10^{-8} фотоны $см^{-2}$ $с^{-1}$ в соответствии с каталогом источников "Ферми" [26]

Object	z	Flux
Mkn 421	0.03	3.31
PKS 2155 − 304	0.116	1.91
PKS 0537 − 441	0.894	1.62
PKS 1424 + 240	0.160	1.03
S2 0109 + 22	0.265	0.875
1H 1013 + 498	0.212	0.786
PKS 2233 − 148	0.33	0.574
PG 1246 + 586	0.847	0.526
GB6 J1542 + 6129	0.507	0.516
PKS 0301 − 243	0.260	0.463

Мы получаем ограничение на магнитные поля следующим образом. Сначала мы вычисляем общий χ_0^2 для этой выборки относительно нулевой гипотезы (отсутствие EGMF, т.е. отсутствие физических смещений), используя реальные данные. При вычислении χ^2 статистические ошибки оцениваются путем рандомизации азимутальных углов фотонов в рабочем поле зрения.

У нас есть два возможных варианта нулевой гипотезы, соответствующих двум возможным вариантам местоположения объекта – оптическим данным и значениям из каталога "Ферми". В результате χ^2

для выборки с координатами “Ферми” составляет $\chi_0^2 = 23.45$ для 20 степеней свободы (две координаты для каждого объекта). Если мы используем оптические местоположения, тогда χ_0^2 составляет 32.2. Это подтверждает, в частности, что фоновые неоднородности не вносят существенного вклада в смещения 10 самых ярких BL.

Во-вторых, мы рассчитываем ожидаемые смещения в присутствии EGMF для каждого из 10 блазаров нашей выборки, используя результаты нашего моделирования Монте-Карло, описанного в разделе 3. При этом мы учитываем зависимость смещения от z (используя реальное красное смещение каждого объекта) и от угла наклона струи (интегрируя по этому параметру от 0 до 2°). Затем мы вычисляем ожидаемое значение χ^2 для выборки, используя полученные в Монте-Карло смещения и среднеквадратическую ошибку для каждого объекта, найденную как описано выше.

Вероятность заданного значения EGMF, общего для 10 объектов выборки, задается вероятностью получить $\chi^2 < \chi_0^2$. Мы используем два разных порога по энергии – 1 и 10 ГэВ. Поскольку подмножество фотонов выше порога 10 ГэВ является небольшой долей выборки с порогом 1 ГэВ, мы можем рассматривать соответствующие две вероятности как независимые факторы.

Результирующая зависимость вероятности от напряженности H магнитного поля показана на рис. 6 Обратите внимание, что правый склон профилей вероятности более пологий, чем левый. Это связано с вкладом подвыборки с порогом 10 ГэВ, который является значительным для $10^{-15} \lesssim H \lesssim 10^{-14}$. Мы также оценили ограничение, используя 16 самых ярких объектов, и получили почти такой же результат.

Разница в ограничениях на EGMF при использовании оптических и “Ферми” местоположений в основном связана с одним источником, Mkn 421. Если мы исключаем его, то χ_0^2 для выборки с “Ферми” координатами составляет $\chi_0^2 = 22$ для 18 степеней свободы, тогда как если мы используем оптические координаты, то χ_0^2 составляет 24.2. Это означает, что систематика “Ферми”, обсуждаемая в Дополнительных материалах, не имеет для нас значения. Исследование распределения фотонов вокруг Mkn 421 обнаруживает значительные нарушения в его центре. Это, скорее всего, можно объяснить наличием неотождествленного источника. Однако в настоящее время мы не можем исключить указание на EGMF в направлении Mkn 421.

В принципе, на полученные ограничения может повлиять сама процедура отбора по яркости, если светимость гамма-излучения лацертид сильно изменяется на больших масштабах времени, поскольку эхо поступает с временной задержкой. Эта неоднозначность присуща любому методу ограничений EGMF, обсуждаемому во введении, и обычно не рассматривается. Отметим также, что самые яркие объекты-блазары в нашей выборке, за исключением PKS 0537-441, также являются ближайшими, поэтому влияние переменности на процедуру отбора вряд ли будет значительным.

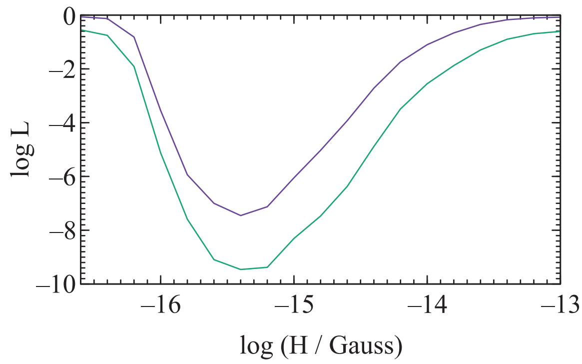

Рис. 6. (Цветной онлайн) Профиль функции правдоподобия L для внегалактического магнитного поля, основанной на смещениях изображений для 10 ярчайших лацертид. Толстая фиолетовая линия показывает ограничение для оптических координат источников, зеленая линия дает ограничения с использованием координат “Ферми”

5. Обсуждение и выводы. В этой статье мы предлагаем новый метод обнаружения или ограничения EGMF. Существующие методы ищут превышение размера гало над функцией углового разрешения телескопа. Вместо этого мы предлагаем искать асимметрию распределения гамма-квантов вокруг блазаров. Новый метод не опирается на знания энергозависимого PSF, что является явным преимуществом.

Различные статистические тесты могут быть использованы для выявления асимметрии в двумерных данных. В этой статье мы использовали простой подход, основанный на смещении изображения относительно известного положения источника. В этом подходе можно объединить несколько источников для повышения чувствительности, и мы исключаем EGMF в диапазоне от 10^{-16} до 10^{-14} Гс на уровне двух сигм, используя десять самых ярких лацертид. Этот предел сопоставим с тем, который установлен черенковскими телескопами HESS и MAGIC, см. [16, 20]. Здесь мы получаем это ограничение, используя только данные “Ферми”, и мы предполагаем, что наш подход может покрыть более широкий диапазон магнитных полей при использовании данных массивов черенковских телескопов. Согласно моделированию образования крупномасштабной структуры и связанного с ним роста затравочных магнитных полей ожидается, что EGMF в пустотах будет порядка 10^{-13} Гс [27]. Для зондирования этого диапазона требуются фотоны с $E > 100$ ГэВ, см. рис. 3, и массивы черенковских телескопов соответствуют такой задаче.

О перспективах нового метода. Наш первоначальный анализ показывает, что статистические инструменты, основанные на тесте Колмогорова–Смирнова, значительно более чувствительны. Это позволяет нам получать жесткие ограничения на межгалактическое магнитное поле даже для отдельных ярких объектов, одновременно контролируя помехи от соседних источников. Если эффект асимметрии когда-либо будет обнаружен, с помощью предлагаемого метода можно будет оценить EGMF вдоль отдельных путей и измерить углы наклона струй. Отметим также, что в действительности блазары могут меняться на больших интервалах времени. Это открывает возможность изучения и отдельных тусклых объектов, которые были яркими в прошлом, во время формирования гамма-эхо.

Финансирование работы. Работа И. Ткачева поддержана Российским научным фондом, грант # 23-42-00066. Работа Б. Штерна финансировалась за счет средств бюджета Института ядерных исследований Российской академии наук.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. R. Durrer and A. Neronov, "Cosmological magnetic fields: their generation, evolution and observation", Astron. Astrophys. Rev. **21**, 1 (2013).
2. M. S. Pshirkov, P. G. Tinyakov, and F. R. Urban, "New limits on extragalactic magnetic fields from rotation measures", Phys. Rev. Lett. **116**, 191302 (2016).
3. R. Plaga, "Detecting intergalactic magnetic fields using time delays in pulses of γ-rays", Nature **374**, 430 (1995).
4. A. Neronov and D. V. Semikoz, "Sensitivity of γ-ray telescopes for detection of magnetic fields in the intergalactic medium", Phys. Rev. D **80**, 123012 (2009).
5. C. D. Dermer, M. Cavadini, S. Razzaque, J. D. Finke, J. Chiang, and B. Lott, "Time delay of cascade radiation for TeV blazars and the measurement of the intergalactic magnetic field", Astrophys. J. Lett. **733**, L21 (2011).
6. K. Ichiki, S. Inoue, and K. Takahashi, "Probing the nature of the weakest intergalactic magnetic fields with the high-energy emission of gamma-ray bursts", Astrophys. J. **682**, 127 (2008).
7. T. A. Dzhatdoev, E. I. Podlesnyi, and G. I. Rubtsov, "First constraints on the strength of the extragalactic magnetic field from γ-ray observations of GRB 221009A", Mon. Not. R. Astron. Soc. **527**, L95 (2023), arXiv:2306.05347.
8. V. A. Acciari, I. Agudo, T. Aniello et al. (Collaboration), "A lower bound on intergalactic magnetic fields from time variability of 1ES 0229+200 from MAGIC and Fermi-LAT observations", Astron. Astrophys. **670**, A145 (2023).
9. I. Vovk, A. Korochkin, A. Neronov, and D. Semikoz, "Constraints on the intergalactic magnetic field from Fermi-LAT observations of the "pair echo" of GRB 221009A", Astron. Astrophys. **683**, A25 (2024).
10. R. J. Protheroe and T. Stanev, "Electron-photon cascading of very high-energy gamma-rays in the infrared background", Mon. Not. R. Astron. Soc. **264**, 191 (1993).
11. F. A. Aharonian, P. S. Coppi, and H. J. Voelk, "Very High Energy Gamma Rays from Active Galactic Nuclei: Cascading on the Cosmic Background Radiation Fields and the Formation of Pair Halos", Astrophys. J. Lett. **423**, L5 (1994); astro-ph/9312045.
12. A. Neronov and I. Vovk, "Evidence for strong extragalactic magnetic fields from fermi observations of tev blazars", Science **328**, 73 (2010).
13. T. A. Dzhatdoev, E. I. Podlesnyi, and G. I. Rubtsov, "First constraints on the strength of the extragalactic magnetic field from γ-ray observations of GRB 221009A", Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett. **527**, L95 (2023).
14. I. Vovk, A. M. Taylor, D. Semikoz, and A. Neronov, "Fermi-LAT observations of 1ES 0229+200: Implications for extragalactic magnetic fields and background light", Astrophys. J. Lett. **747**, L14 (2012).
15. M. Ackermann, M. Ajello, L. Baldini et al. (Collaboration), "The search for spatial extension in high-latitude sources detected by the Fermi-LAT", Astrophys. J. Suppl. Ser. **237**, 32 (2018).
16. F. Aharonian, J. Aschersleben, M. Backes et al. (Collaboration), "Constraints on the Intergalactic Magnetic Field Using Fermi-LAT and H.E.S.S. Blazar Observations", Astrophys. J. Lett. **950**, L16 (2023); arXiv:2306.05132.
17. A. Neronov and D. V. Semikoz, "Sensitivity of gammaray telescopes for detection of magnetic fields in intergalactic medium", Phys. Rev. D **80**, 123012 (2009); arXiv:0910.1920.
18. R. Alves Batista and A. Saveliev, "The gamma-ray window to intergalactic magnetism", Universe **7**, 223 (2021).
19. S. Ando and A. Kusenko, "Evidence for gammaray halos around active galactic nuclei and the first measurement of intergalactic magnetic fields", Astrophys. J. Lett. **722**, L39 (2010).
20. A. Neronov, D. V. Semikoz, P. G. Tinyakov, and I. I. Tkachev, "No evidence for gamma-ray halos

around active galactic nuclei resulting from intergalactic magnetic fields", Astron. Astrophys. **526**, A90 (2011).
21. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort et al. (Collaboration), "Determination of the Point-Spread Function for the Fermi-LAT from On-orbit Data and Limits on Pair Halos of Active Galactic Nuclei", Astrophys. J. **765**, 54 (2013); arXiv:1309.5416.
22. W. Chen, J. H. Buckley, and F. Ferrer, "Search for GeV γ-ray pair halos around low redshift blazars", Phys. Rev. Lett. **115**, 211103 (2015).
23. A. Franceschini and G. Rodighiero, "The extragalactic background light revisited and the cosmic photonphoton opacity", Astron. Astrophys. **603**, A34 (2017).
24. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, J. R. Mattox, A. E. Wehrle, S. D. Bloom, and A. V. Yurchenko, "Multiepoch very long baseline array observations of EGRETdetected quasars and BL Lacertae objects: Superluminal motion of gamma-ray bright blazars", Astrophys. J. Suppl. Ser. **134**, 181 (2001).
25. B. E. Stern, M. C. Begelman, M. Sikora, and R. Svensson, "A large-particle Monte Carlo code for simulating non-linear high-energy processes near compact objects", Mon. Not. R. Astron. Soc. **272**, 291 (1995).
26. S. Abdollahi, F. Acero, L. Baldini et al. (Collaboration), "Incremental Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog", Astrophys. J. Suppl. Ser. **260**, 53 (2022); arXiv:2201.11184.
27. K. Dolag, D. Grasso, V. Springel, and I. Tkachev, "Constrained simulations of the magnetic field in the local Universe and the propagation of UHECRs", JCAP **01**, 009 (2005); astro-ph/0410419.