

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА РОССИЙСКИХ УСТАНОВКАХ

*Л. А. Кузьмичев **

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Работа посвящена гамма-астрономии сверхвысоких энергий, разделу гамма-астрономии, исследующей гамма-кванты суб-ПэВных энергий (> 100 ТэВ). Гамма-кванты таких энергий могут рождаться в источниках, ускоряющих протоны и электроны до энергий выше 1 ПэВ. Такие источники принято называть ПэВатронами, исследование которых важно для понимания происхождения космических лучей. Кратко обсуждаются возможные галактические ПэВатроны, методы исследования, установки и результаты в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Половина обзора посвящена истории, результатам и перспективам российских установок в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

The review is devoted to ultrahigh-energy gamma-ray astronomy, a branch of gamma-ray astronomy that studies photons with energies more than 100 TeV. Photons of such energies can be generated in sources that accelerate protons and electrons to energies above 1 PeV. Such sources are commonly called PeVatrons, the study of which is important for understanding the origin of cosmic rays. Possible galactic PeVatrons, research methods, installations and results in the field of ultrahigh-energy gamma-ray astronomy are briefly discussed. Half of the review is devoted to the history, results and prospects of Russian installations in the field of ultrahigh-energy gamma-ray astronomy.

PACS: 29.40.Ka; 07.85.Nc; 07.85.Fv; 95.85.Pw; 98.70.Rz; 95.55.Vj; 96.50.sd

ВВЕДЕНИЕ

Галактики и межгалактическое пространство заполнены космическими лучами — релятивистскими протонами, ядрами и электронами. Эти частицы ускоряются в космических ускорителях, блуждают в галактическом магнитном десятки миллионов лет и выходят в межгалактическое пространство. Дифференциальный энергетический спектр космических лучей, зарегистрированных у Земли, простирается от 10^9 до 10^{20} эВ (рис. 1).

* E-mail: kuz@dec1.sinp.msu.ru

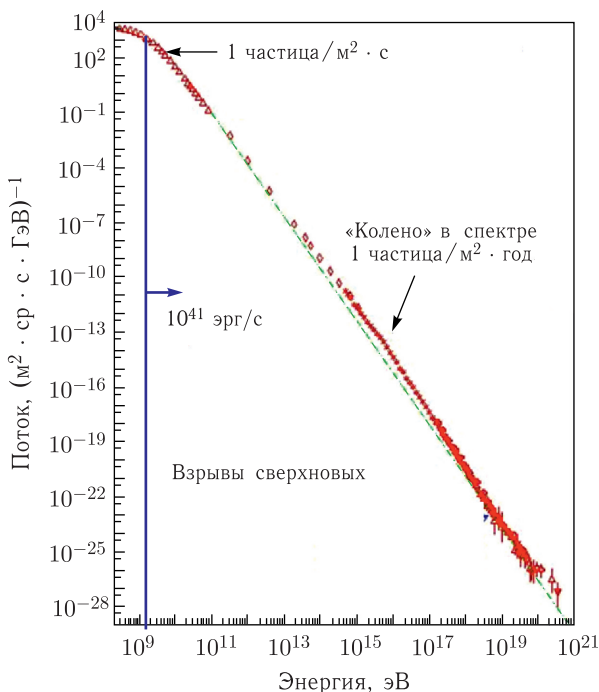


Рис. 1. Энергетический спектр космических лучей

Дифференциальный спектр космических лучей описывается степенным законом с показателем $\gamma = -2,7$ при энергии ниже энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ (область «колена» в спектре [1]) и с показателем -3 при более высоких энергиях. Изучение космических лучей до энергии 300 ТэВ в настоящее время возможно «прямыми» методами с помощью детекторов на спутниках, при более высоких энергиях пока только регистрацией широких атмосферных ливней (ШАЛ) от этих частиц. По современным представлениям космические лучи с энергией ниже 10^{17} эВ ускоряются галактическими источниками, а с энергией выше 10^{18} эВ — внегалактическими. Плотность энергии космических лучей в Галактике ~ 1 эВ/см³, и для компенсации потери энергии космических лучей, связанной с выходом из Галактики, требуется, чтобы мощность инжекции галактическими источниками была $\sim 10^{41}$ эрг/с. Такую мощность инжекции могут обеспечить взрывы сверхновых звезд при достаточно обоснованном предположении, что в космические лучи переходит около 10% кинетической энергии, сброшенной при взрыве оболочки звезды [2, 3]. В то же время существуют сомнения, что во всех взрывах сверхновых протоны космических лучей будут ускоряться до энергии выше 10^{15} эВ [4, 5], на роль источников космических лучей

с энергией выше 10^{15} эВ, так называемых ПэВатронов, рассматриваются и другие источники: пульсарные туманности [6], пульсары в двойных системах [7], звездные кластеры [8], черная дыра в центре Галактики [9], гамма-всплески [10].

Изучение возможных источников космических лучей сложно проводить, регистрируя только космические лучи, так как космические лучи (протоны и ядра) отклоняются магнитным полем Галактики и это не позволяет восстановить направления на источник частицы. Для изучения источников космических лучей нужны нейтральные частицы — гамма-кванты и нейтрино. Гамма-астрономия и нейтринная астрофизика взаимно дополняют друг друга в исследовании источников космических лучей высоких энергий. Нейтринная астрофизика имеет неоспоримое преимущество при исследовании далеких внегалактических источников космических лучей, так как нейтрино высоких энергий практически не поглощаются в отличие от гамма-квантов высоких энергий. Гамма-кванты высоких энергий конвертируются в электрон-позитронные пары при взаимодействии с фоновыми фотонами с энергией от $\sim 10^{-4}$ до 1 эВ. Для гамма-квантов с энергией 1 ПэВ длина поглощения минимальна и равна ~ 10 пк, т.е. расстоянию от Солнечной системы до центра Галактики. Даже от ближайшей галактики Андромеда, находящейся на расстоянии 700 пк, фотоны с такой энергией будут полностью поглощаться.

В 2017 г. нейтринным телескопом Ice-Cube было зарегистрировано мюонное нейтрино с энергией 300 ТэВ от блазара TXS 0506+056 с красным смещением $z = 0,33$ [11]. Регистрация нейтрино такой энергии свидетельствует об ускорении космических лучей в этом блазаре до энергии 10^{16} эВ. Это первое прямое доказательство ускорения космических лучей до таких энергий в астрофизическом источнике. При исследовании галактических источников преимущество имеет гамма-астрономия из-за существенно большей эффективной площади установок для регистрации гамма-квантов по сравнению с нейтринными телескопами. Так, для изучения гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ эффективные площади современных установок достигают 1 км^2 , а эффективные площади нейтринных телескопов (Ice-Cube, Baikal-GVD) всего 100 м^2 , из-за малого сечения взаимодействия нейтрино с веществом [12].

Гамма-астрономия высоких энергий имеет значение также для изучения фундаментальной физики за пределами возможностей современных земных ускорителей. Косвенный метод поиска темной материи в форме как тяжелых слабо взаимодействующих частиц (WIMP — Weekly Interaction Massive Particle) [13], так и сверхлегких частиц — аксионов [14] и поиска нарушения лоренц-инвариантности, предсказанной квантовой гравитацией [15], входит в число приоритетных задач гамма-астрономии. Статья посвящена гамма-астрономии сверхвысоких энергий, разделу гамма-астрономии, исследующей гамма-кванты субПэВных энергий (> 100 ТэВ). План статьи следующий. Разд. 1 посвящен методике регистраций гамма-квантов наземными установками. В разд. 2 крат-

ко рассмотрены механизмы рождения гамма-квантов высоких энергий. В разд. 3–5 рассмотрены отдельные источники гамма-квантов, перечисленные выше. Разд. 6 посвящен краткому обзору современных гамма-установок, не включая российские, разд. 7 — обзору результатов в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий, исследующей гамма-кванты с энергией выше 100 ТэВ. Эта область энергии связана с перспективой для российских установок, которые рассмотрены в разд. 9. Разд. 8 посвящен истории развития гамма-астрономии в СССР и России. В заключении статьи приведено краткое описание, полученные результаты и перспективы российских установок в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий.

1. МЕТОДИКА НАЗЕМНОЙ ГАММА-АСТРОНОМИИ

Фотоны с энергией выше 0,01 ТэВ создают в атмосфере широкий атмосферный ливень (ШАЛ). При этом возникает задача, как отделить ШАЛ от гамма-кванта, от существенно более многочисленных ШАЛ, от космических лучей (протонов и ядер). С такой задачей успешно справляются атмосферные черенковские телескопы с анализом изображения (английский аналог — Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope (IACT)) [16]. Еще в середине 1980-х гг. А. Хиллас предложил систему параметров (параметры Хилласа), характеризующих изображение ШАЛ [17], позволяющих количественно описать форму изображения и отобрать события от гамма-квантов. Первая успешная регистрация гамма-квантов ТэВного диапазона от Крабовидной туманности была проведена в 1989 г. [18].

Второй подход к выделению событий от гамма-квантов основан на использовании разнесенных в пространстве детекторов заряженных частиц ШАЛ (сцинтилляционные детекторы или водные баки) или черенковского света. Метод выделения событий основан на различии в топологии сработавших детекторов и в числе мюонов в ШАЛ от гамма-квантов и космических лучей. Этот метод для ТэВного диапазона реализован для высокогорных установок и впервые позволил зарегистрировать гамма-кванты с энергией выше 0,1 ПэВ [19], т. е. начать исследование субПэВного диапазона.

Атмосферные черенковские телескопы (АЧТ) (или IACTs) используют фокусирующее зеркало и регистрирующую камеру с фотоумножителями (вакуумными или кремниевыми), что позволяет, используя угловое распределение черенковских фотонов, сформировать изображение ШАЛ на регистрирующей камере (рис. 2). В качестве оптической системы в черенковских телескопах применяется, как правило, система Дэвиса–Коттона [20]. В этой системе полусферические зеркала с радиусом кривизны R (фокусное расстояние $f = R/2$) размещают на сферической поверхности с радиусом $R/2$. Отношение фокусного расстояния f к полному диаметру системы зеркал D находится в диапазоне 1–2.

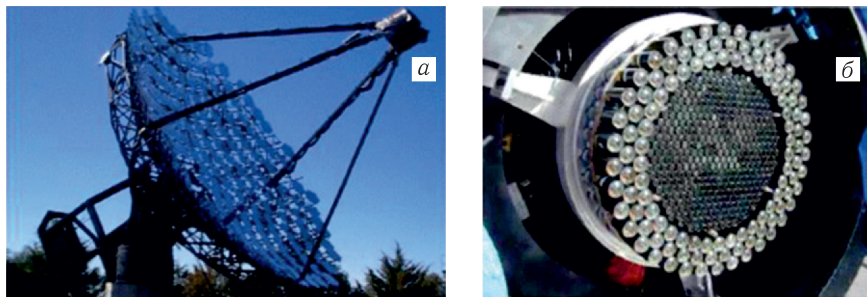


Рис. 2. а) 10-м Whipple. б) Регистрирующая камера [16]

Такая оптическая система позволяет создавать телескопы с апертурой до 10° , с функцией рассеяния точки (ФРТ, или английский аналог PSF) меньшей $0,1^\circ$ [21]. Полная площадь зеркал изменяется от 10 до 600 м^2 [22], при этом минимальная регистрируемая энергия изменяется, соответственно, от 1 ТэВ до 20 ГэВ. Число фотоумножителей в камерах современных телескопов изменяется от 300 до 2000. Каждый ФЭУ (пиксель) камеры имеет угол обзора от $0,1$ до $0,5^\circ$. Диаметр полного угла обзора камеры изменяется от 3 до 10° . При увеличении расстояния между телескопом и осью ШАЛ (под осью ШАЛ понимается точка пересечения первичной частицы плоскости, на которой установлен телескоп) изображение ШАЛ смещается к краю камеры. Камеры с углом обзора 10° позволяют регистрировать ШАЛ с расстояний до 500 м. Для получения хорошего изображения ШАЛ важно, чтобы ФРТ была не хуже $0,1^\circ$, а точность наведения телескопа была не хуже $0,05^\circ$. Для выделения сигнала от гамма-квантов надо подавить фоновые события от космических лучей. Для атмосферного черенковского телескопа с энергетическим порогом около 1 ТэВ и диаметром угловой апертуры $\sim 10^\circ$ темп регистрации событий от космических лучей около 10 Гц, а темп регистрации гамма-квантов, например, от Крабовидной туманности — 3–4 события в 1 ч, т.е. в 10^4 раз ниже, чем темп счета фоновых событий. Возможность выделения гамма-квантов от локальных источников связана, во-первых, с хорошей точностью восстановления направления прихода ШАЛ, а во-вторых, с возможностью подавления фоновых событий по форме изображения в камере телескопа. Причина различия в изображении ШАЛ в камере телескопа связана с различием в продольном и поперечном развитии адронного каскада от протонов и ядер космических лучей и чисто электромагнитного каскада от гамма-кванта.

Для количественной характеристики изображения используется аппроксимация изображения эллипсом Хилласа [17]. Параметры изображения (параметры Хилласа) — центр эллипса, длина полуосей (length, width), расстояние от центра эллипса до положения источника (dist) и ориентация эллипса в камере (угол Alfa) вычисляются по амплитудам

сигналов в пикселях камеры. Используя ориентацию эллипса Хилласа и параметр disp ([23]), можно восстановить угол θ между направлением прихода ШАЛ и направлением на локальный источник гамма-квантов с точностью $0,2-0,3^\circ$. Параметры Хилласа, включая и угол θ , восстанавливаются как для истинного положения источника в камере (ON-события), так и для точки в камере, смещенной на определенный угол относительно положения источника (OFF-события). Устанавливая определенные ограничения на параметры Хилласа, можно выделить гамма-подобные события как для ON-событий, так и для OFF-событий. На разности распределений по θ^2 для ON-событий и OFF-событий (рис. 3) [24] однозначно виден избыток частиц в области $\theta^2 < (0,05^\circ)^2$. Лучшей точности восстановления угла θ можно достичь при регистрации ШАЛ двумя и более телескопами (стереометод) (рис. 4) [25]. Для определения угла эллипсы Хилласа, аппроксимирующие изображение на камере каждого телескопа, переносятся на одну камеру, и находится точка пересечения больших осей эллипсов. Расстояние (в градусах) от этой точки до положения источника на камере дает угол θ . Точность восстановления угла θ может достигать при стереометоде $0,06^\circ$ [26], а точность восстановления энергии — 20%.

Традиционные установки ШАЛ — это разнесенные в пространстве детекторы, регистрирующие заряженные частицы (электроны и мюоны). В качестве детекторов в большинстве установок применяются обычные сцинтилляционные детекторы с площадью $1-2 \text{ м}^2$, черенковские водные баки с площадью 10 м^2 в обсерватории P. Auger [27] и более сложные детекторы, например, стримерные камеры в установке Argo-YBJ [28]. Энергетический порог установок зависит от площади детекторов, расстояний между ними и, главное, на какой высоте находится установка.

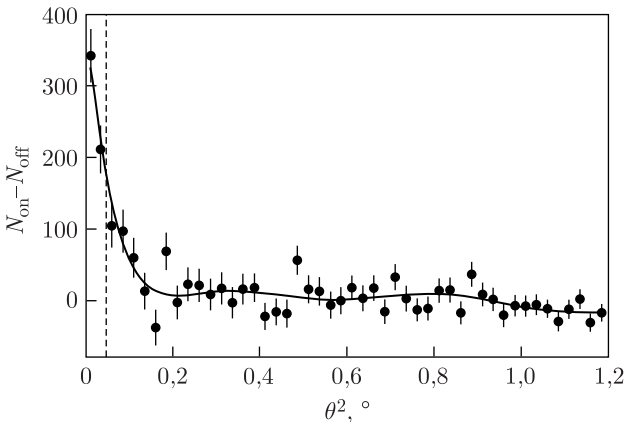


Рис. 3. Распределение разности $(N_{\text{он}}(\theta^2) - N_{\text{офф}}(\theta^2))$ после подавления фона в режиме наблюдения гамма-источника в Крабовидной туманности одним черенковским телескопом. Избыток 560 событий, уровень значимости 12σ [24]

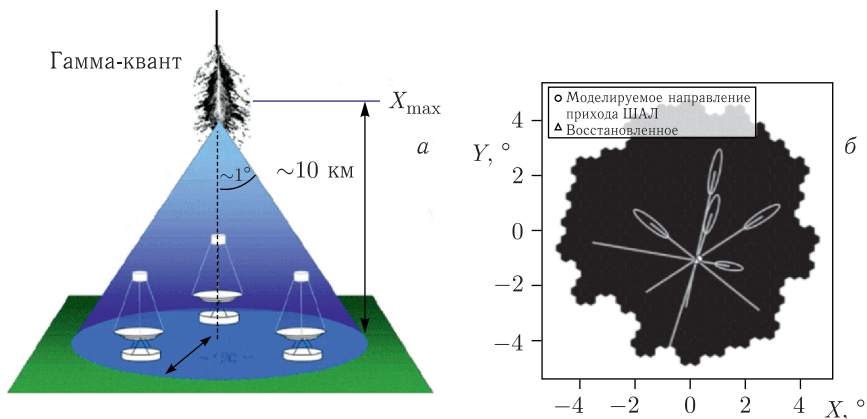


Рис. 4. а) Регистрация ШАЛ несколькими черенковскими телескопами. б) Эллипсы Хилласа в каждом телескопе, перенесенные в одну камеру. Точка пересечения главных осей эллипсов — восстановленное положение источника

Минимальный порог достигается, если установка расположена вблизи максимума развития каскадной кривой. Так, для одной из первых высокогорной установки Tibet AS γ [29], расположенной на высоте 4300 м., при расстоянии между детекторами 100 м энергетический порог ~ 10 ТэВ. Как отмечалось выше, одним из способов выделения гамма-квантов является разная топология сработавших детекторов при регистрации ШАЛ от гамма-квантов и от космических лучей.

Такой метод выделения используется в высокогорной установке HAWC [30], состоящей из 300 водных черенковских детекторов, установленных практически вплотную друг к другу на площади 22 000 м² (рис. 5). Установка расположена на высоте 4100 м в Мексике. Водный детектор имеет высоту 4,5 м и диаметр 7,3 м. Черенковский свет от заряженных частиц регистрируется четырьмя фотоумножителями, установленными на дне детектора.



Рис. 5. а) Установка HAWC. б) Водный черенковский детектор [30]

Одним из параметров, используемых для разделения событий от гамма-квантов, и является параметр compactness:

$$\text{compactness} = N_{\text{hit}}/CxPE40, \quad (1)$$

где N_{hit} — число сработавших детекторов в событии; $CxPE40$ — число фотоэлектронов в фотоумножителях в детекторах, расположенных вне круга с центром в оси ШАЛ и радиусом 40 м. Использование этого параметра позволяет сравнить ШАЛ с близким числом заряженных частиц на уровне наблюдения (мера числа частиц — N_{hit}) и определить их гамма-или адронно-подобную природу путем использования флуктуаций далеко за пределами области оси ШАЛ. Адронные ливни, которые, как правило, демонстрируют более высокие значения $CxPE40$, чем гамма-ливни, будут обладать более низкими значениями параметра compactness. Это параметр в совокупности с другими параметрами, используемыми для гамма-адронного разделения, позволяет подавить фон от адронных событий в 10^3 раз для ШАЛ с энергиями выше 10 ТэВ.

Второе важное отличие ШАЛ от гамма-квантов и адронных ШАЛ — полное число мюонов. В протонных ШАЛ в 10 раз больше мюонов, чем в ШАЛ от гамма-квантов при одинаковой энергии. Число мюонов в ШАЛ с энергией 100 ТэВ $\sim 10^3$, и для регистрации примерно 10 мюонов на площади 1 км^2 требуется полная площадь мюонных детекторов 10^4 м^2 . Для создания мюонного детектора надо детектор частиц поместить под слой грунта 1,5–2,5, экранировав детектор от электронов ШАЛ. В высокогорных детекторах Tibet-AS γ [29] и LHAASO [31] для регистрации мюонов используют водные черенковские детекторы. Мюонный детектор [31] LHAASO представляет собой водный бак глубиной 1,2 м и площадью 36 м^2 , заполненный водой с длиной поглощения больше 30 м. Внутренние стенки бассейна обклеены белым диффузным материалом с коэффициентом отражения $\sim 95\%$. Бак находится под слоем грунта 2,5 м. Черенковский свет от заряженной частицы, проходящей через бак, регистрируется одним ФЭУ с диаметром фотокатода 20 см.

2. МЕХАНИЗМЫ РОЖДЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Прежде чем переходить к рассмотрению источников гамма-излучения, рассмотрим механизмы рождения гамма-квантов высоких энергий. Таких механизмов два — адронный и лептонный. В адронном механизме гамма-кванты образуются от распада π^0 -мезона, рожденного при pp - или $p\gamma$ -реакции. Энергия гамма-кванта примерно в 10 раз меньше энергии ускоренного протона, и регистрация гамма-кванта с энергией выше 100 ТэВ будет свидетельствовать о том, что в источнике протоны ускоряются до энергии выше 1 ПэВ. Такой источник принято называть адронным ПэВатроном. В лептонном механизме гамма-квант получает энергию при обратном комптоновском (IC) рассеянии электрона высокой

энергии на фотонах низких энергий, в галактических источниках доминируют фотоны реликтового излучения. Энергия гамма-кванта и электрона связаны следующим соотношением [32]:

$$E\gamma = 0,4(E_e/1 \text{ ПэВ})^{1,3}. \quad (2)$$

Выражение (2) — приближенное, оно неплохо работает при рассеянии электронов высоких энергий на реликтовых фотонах в приближении Клейна–Нишины ($2E_e\varepsilon\gamma > (m_e c^2)^2$).

3. ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД

Как уже отмечалось во введении, остатки сверхновых уже давно рассматриваются как основной ускоритель космических лучей в Галактике. В середине 1970-х гг. было понято, что весьма эффективным механизмом ускорения частиц является диффузионный механизм ускорения на фронте ударной волны [33, 34]. Частица набирает энергию, диффундируя туда и обратно через фронт ударной волны, и скорость набора энергии зависит от скорости ударной волны и величины магнитного поля на фронте ударной волны. При взрыве сверхновой ускорение происходит на ударной волне, образующейся перед сброшенной оболочкой. При этом оказалось, что за период свободного разлета оболочки, до начала ее торможения, в предположении, что величина магнитного поля в районе фронта ударной волны равна галактическому полю ($\sim 5\text{--}10 \text{ Гс}$), максимальная энергия частицы достигает $\sim 0,1 \text{ ПэВ}$ [35] и, таким образом, протоны не могут ускоряться до области «колена» в спектре космических лучей (см. рис. 1). В начале 2000-х гг. Белл показал, что ток космических лучей может, в результате потоковой неустойчивости, усилить турбулентное магнитное поле на фронте ударной волны в 10–20 раз [36]. Этот результат был воспринят с большим энтузиазмом, так как казалось, что максимальная энергия тоже увеличится в 10–20 раз и достигнет 1 ПэВ. Однако детальные расчеты показали, что ситуация не столь оптимистична. Особенность проблемы — роль нелинейных эффектов, которые существенны, так как требуется достаточно высокая эффективность ускорения частиц [4]. Выражение (3) для зависимости максимальной энергии от времени приведено в работе [37] на основании результатов работы [4] (ζ_{CR} — коэффициент эффективности ускорения):

$$E_{\text{max}}(t) \approx 1 \left(\frac{\zeta_{\text{CR}}}{0,1} \right) \left(\frac{v_{\text{sh}}(t)}{5000 \text{ км/с}} \right)^3 \left(\frac{t}{100 \text{ год}} \right) \left(\frac{n}{10 \text{ см}^{-3}} \right)^{1/2} \text{ ПэВ}. \quad (3)$$

Максимальное время, до которого работает эта формула, не очень хорошо определено, можно считать, что $t_{\text{max}} \sim 100$ лет и для больших времен выражение (3) не работает, и E_{max} начинает уменьшаться. Выражение (3) показывает, что для достижения энергии $\sim 1 \text{ ПэВ}$ за время ~ 100 лет требуются относительно высокая скорость ударной волны,

скорость и концентрация атомов. Такие параметры (скорость и концентрация) при взрыве сверхновых возможны, но реализуются крайне редко [4]. Учитывая также, что такие ПэВатроны находятся в активном состоянии около 100 лет, вероятность зарегистрировать от него гамма-квант с энергией выше 100 ТэВ крайне мала. Для самых молодых из известных остатков сверхновых Кассиопея А (330 лет) и Тихо Браге (440 лет) предсказываемые максимальные энергии — 240 и 110 ТэВ соответственно [38]. Экспериментальное подтверждение или опровержение этих предсказаний пока отсутствует, и очень важно его получить.

4. ПЛЕРИОНЫ КАК ПЭВАТРОНЫ

При гравитационном коллапсе массивной звезды образуется нейтронная звезда (или черная дыра) с радиусом ~ 10 км. В силу сохранения момента количества движения и потока магнитного поля у вновь рожденной нейтронной звезды период вращения ~ 1 мс, а величина магнитного поля на поверхности звезды $\sim 10^{12}$ Гс. Такие звезды были открыты в середине 1960-х гг. по периодическим радиочастотным импульсам и были названы пульсарами. Эволюция нейтронной звезды приводит к образованию электронно-позитронной магнитосферы и релятивистского ветра из электронно-позитронной и ионной плазмы [39]. Энергия ветра черпается из кинетической энергии вращения пульсара. Для большинства пульсаров скорость уменьшения энергии вращения, переходящей в энергию ветра, лежит в диапазоне 10^{35} – 10^{39} эрг/с. В области, где давление пульсарного ветра сравнивается с давлением вещества в области ограниченной сброшенной при взрыве сверхновой оболочкой, образуется стоячая ударная волна (Termination Shock или TS) [40]. Расстояние от пульсара до ударной волны $\sim 0,1$ пк. Ускорение частиц, по современным представлениям, происходит на стоячей ударной волне и может продолжаться в течение 10^3 – 10^4 лет. Этот класс источников, прототипом которого является известная Крабовидная туманность, принято называть плерионом, или пульсарной туманностью (английский термин — Pulsar Wind Nebular, PWN). Современный обзор, в котором обсуждается физика пульсаров и плерионов и механизмы ускорения частиц в этих объектах, приведен в статье [41]. Плерионы имеют широкий нетепловой спектр, простирающийся от низких радиочастот (десятки МГц) до гамма-лучей очень высокой энергии (фотоны с энергией $E > 100$ ТэВ). Фактически, на их долю приходится большинство галактических источников гамма-излучения ТэВного диапазона. Кроме того, ряд неопознанных источников гамма-излучения, вероятно, связан с ненаблюдаемыми пульсарами [42]. Наконец, совсем недавние измерения, проведенные LHAASO [43], указывают на то, что плерионы также являются самым многочисленным классом источников гамма-излучения и области экстремально высокой энергии. Достаточно общие соображения привели авторов работы [44] к следующей оценке максимальной энергии E_{\max} , которую могут по-

лучить частицы (электроны или протоны), ускоренные изолированным вращающимся пульсаром со скоростью уменьшения энергии вращения пульсара dE_n/dt :

$$E_{\max} = 2 \text{ ПэВ } Z\eta(dE_n/dt/10^{36} \text{ эрг/с})^{1/2}. \quad (4)$$

Коэффициент Z в этом выражении — заряд ускоряемого ядра, а η — коэффициент эффективности ускорения, величина $\eta < 1$.

Для Крабовидной туманности при $dE/dt = 5 \cdot 10^{38}$ эрг/с максимальная энергия протона ~ 50 ПэВ, и следовательно, максимальная энергия гамма-кванта при адронном механизме ~ 5 ПэВ. Максимальная энергия электрона меньше из-за потерь энергии на синхротронное излучение и равна ~ 5 ПэВ [45], и максимальная энергия гамма-кванта, согласно (2), будет ~ 3 ПэВ. Таким образом, исследование спектра гамма-квантов в ПэВной области позволит понять, есть ли ускоренные ядра в плерионах и являются ли плерионы адронными ПэВатронами.

5. ДВОЙНЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ КАК ПЭВАТРОНЫ

Одним из типов возможных ПэВатронов могут быть двойные гамма-источники. В этих системах релятивистский протон от компактного объекта (нейтронной звезды или черной дыры) сталкивается со звездным ветром от массивной молодой звезды-компаньона. В области столкновения, где величина магнитного поля ~ 1 Гс, протон ускоряется до ПэВных энергий за несколько часов [46]. Очень интересным источником такого типа является двойной гамма-источник PSR J2032 + 4127/MT91213, расположенный в ассоциации OB созвездия Лебедь. Орбитальный период обращения нейтронной звезды ~ 50 лет. От источника LHAASO J2032 + 4102, который находится вблизи пульсара, был зарегистрирован гамма-квант с энергией 1,4 ПэВ. Темп передачи вращательной энергии от этого пульсара $\sim 2 \cdot 10^{35}$ эрг/с, и, следуя выражению (4), частицы (протоны и электроны) в таком объекте не могут ускоряться до 1 ПэВ. Возможным объяснением наличия гамма-квантов ПэВных энергий является механизм ускорения протонов, описанный выше. Моделирование показывает [48], что энергия протонов достигает 10 ТэВ. Такой энергии вполне достаточно для рождения гамма-квантов ПэВных энергий в pp -реакциях.

При прохождении пульсаром PSR J2032 + 4127 экваториальной области звездного ветра возможно сильное повышение потока нейтрино и гамма-квантов при взаимодействии протонов с мощным оптическим излучением ($p\gamma$ -реакции) массивной звезды [47]. Длительность такой вспышки ~ 2 – 3 мес. В октябре–ноябре 2020 г. нейтринным телескопом было зарегистрировано нейтрино с энергией 150 ТэВ [48], совпадающее в пределах угловой точности телескопа с направлением на источник. Также на установке «Ковер-2» в течение 80 дней наблюдался повышенный темп счета ШАЛ с энергией выше 300 ТэВ из этого

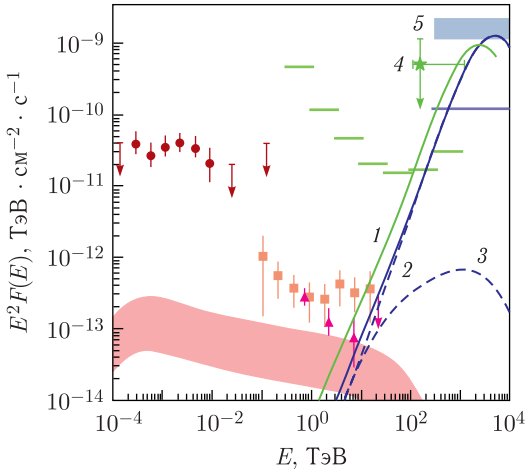


Рис. 6. Спектр гамма-квантов и нейтрино при пересечении нейтронной звездой экваториальной области звездного ветра [50]. Показаны спектр нейтрино (1) и гамма-квантов (2) от $p\gamma$ -реакции, спектр гамма-квантов от pp -реакции (3), поток нейтрино при вспышке по данным Ice-Cube (4), поток гамма-квантов при вспышке по данным установки «Ковер-2». Кружки — данные телескопа Ферми, квадраты и треугольники — данные атмосферных черенковских телескопов (Veritas, MAGIC)

направления [49]. Вполне возможно, что эти экспериментальные данные подтверждают описанную выше теорию и важность изучения двойных гамма-источников.

6. СОВРЕМЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ГАММА-АСТРОНОМИИ

Современные установки для наземной гамма-астрономии представлены на рис.7 из обзора [51]. В этом разделе будут кратко описаны зарубежные установки, российские установки будут рассмотрены в другом разделе. Наиболее крупные современные гамма-обсерватории — это Veritas [52], MAGIC [53], H.E.S.S [54]. Эти гамма-обсерватории состоят из 2–5 моделей абсолютно черных тел (АЧТ) и исследуют энергетический диапазон 25 ГэВ–100 ТэВ. За последние 30 лет были зарегистрированы и изучены энергетические спектры ряда остатков сверхновых, пульсарных туманностей, активных галактических ядер, были обнаружены ТэВные гамма-кванты от пульсаров и от гамма-всплесков. Существенное продвижение в исследовании энергетического диапазона 25 ГэВ–300 ТэВ начнется с введением в строй обсерватории СТА [55], расположенной в южном (СТА-S) и северном (СТА-N) полушариях. В состав СТА-S обсерватории войдут 70 малых черенковских телескопов (SST) с диаметром зеркала 4 м, 25 средних (MST) с диаметром зеркала

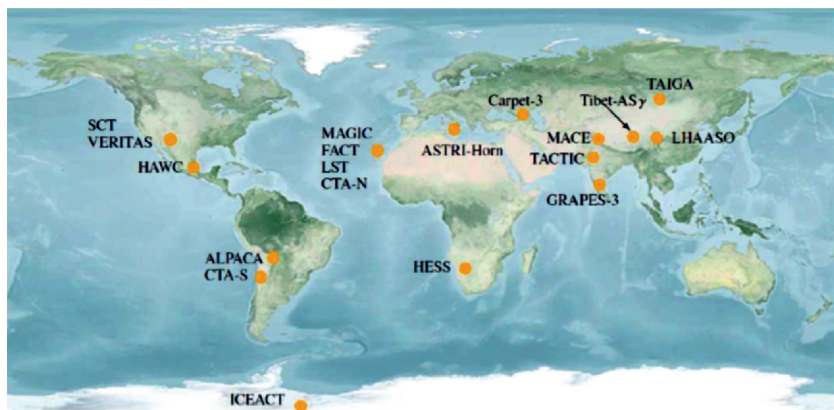


Рис. 7. Современные установки для наземной гамма-астрономии [51]

ла 12 м и 4 больших (LST) с диаметром зеркала 23 м. Все телескопы будут замещены на площади 4,5 км². В составе CTA-N будут 4 больших и 15 средних на площади 0,5 км². В 2025 г. на Канарских островах начнет работу прототип CTA установка ASRI-Mini агау из 9 малых телескопов (SST) [56].

Прорыв в области энергии гамма-квантов сверхвысоких энергий произошел с началом работы высокогорных установок ШАЛ HAWC [30], Tibet-AS γ [29], LHAASO [31]. Самая крупная из этих установок — установка LHAASO, расположена в Тибете на высоте 4410 м и состоит из 5200 сцинтилляционных детекторов площадью 1 м² и 1200 водных мюонных детекторов площадью 40 м, расположенных на площади 1,3 км². В южном полушарии планируется высокогорная установка SWGO [57], в методическом плане аналогичная установке HAWC, но с площадью, в 4 раза большей — 80 000 м².

7. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ В ОБЛАСТИ ГАММА-АСТРОНОМИИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Хотя первые гамма-кванты с энергией выше 100 ТэВ были зарегистрированы черенковским телескопом MAGIC [58] и высокогорными установками HAWC [59] и Tibet-AS γ [19], настоящий прорыв в этой области произошел с началом работы высокогорной установки LHAASO. В 2021 г. была опубликована статья о наблюдении 12 источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ [43]. Поток гамма-квантов от этих источников в области 100 ТэВ сравним с потоком гамма-квантов от Крабовидной туманности.

За исключением Крабовидной туманности, ни один из них не имеет четкой связи с известными астрофизическими объектами, хотя были высказаны предположения о связи этих отдельных источников с извест-

ными пульсарными туманностями и остатками сверхновых. Наиболее энергичный гамма-квант с энергией 1,4 ПэВ был обнаружен от источника с координатами J2032 + 4102, находящегося вблизи OB-2 ассоциации молодых массивных звезд созвездия Cygnus. В непосредственной близости от 11 обнаруженных LHAASO источников (за исключением источника с координатами J2108 + 5157) существует, по крайней мере, один пульсар с темпом передачи вращательной энергии пульсара в пульсарный ветер (dE_p/dt) более 10^{35} эрг/с. Как показано ранее (4), по темпу передачи вращательной энергии можно получить значение максимальной энергии электрона в плерионе с точностью до неизвестного коэффициента эффективности η . На рис.8 12 источников размещены как точки на координатной плоскости, по горизонтальной оси — dE_p/dt , а по вертикальной — максимальная энергия гамма-квантов в источнике. Красная линия — зависимость максимальной энергии электронов от dE_p/dt при $\eta = 1$. Из рисунка видно, что 10 из 11 экспериментальных точек лежат ниже красной линии и, таким образом, гамма-кванты могут, в принципе, быть объяснены ускорением электронов в пульсарных туманностях. Исключение составляет источник J2032 + 4102, положение которого на рис.8 уже сейчас существенно выше красной линии. Совпадение положения этого источника с пульсаром PSR J2032 + 4127 в двойной системе подтверждает, что такие двойные системы могут быть адронными ПэВатронами [46]. Следует отметить, что максимальная

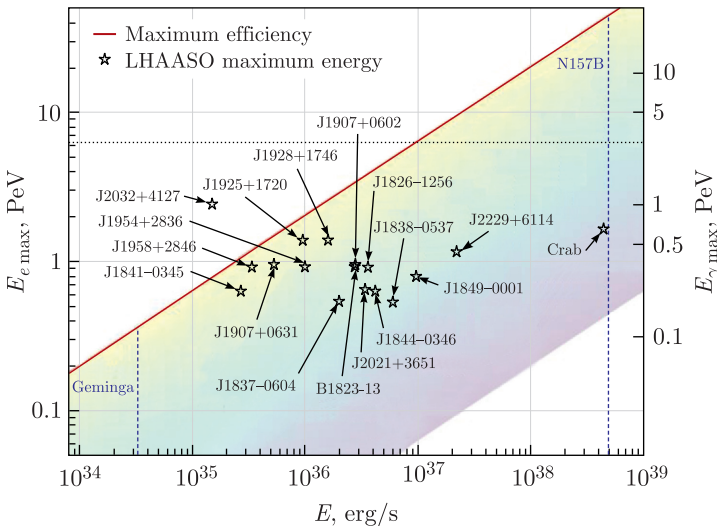


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Связь между максимальной энергией гамма-квантов для 12 источников LHAASO и максимальная энергия электронов, полученная в зависимости от энергетических потерь (dE_p/dt) для ближайших пульсаров [46]

энергия гамма-квантов от этих источников может возрастать по мере набора статистики и объяснить энергетические спектры уже будет нельзя ускорением частиц в плерионах. Так, максимальная энергия гамма-кванта от Крабовидной туманности уже не 0,9 ПэВ, а 1,1 ПэВ [32]. Среди 12 источников 6 источников находятся вблизи остатков сверхновых, однако и этом случае более предпочтительным объектом для объяснения спектра гамма-квантов являются плерионы. Наиболее подходящий кандидат на роль адронного ПэВатрона — источник J2226 + 6057, который, вероятно, связан с остатком сверхновой G106.3 + 2.7 [60], но пока неясно, регистрируются ли гамма-кванты от остатка сверхновой или от плериона PSR J2229 + 6114. В 2024 г. вышел первый каталог источников LHAASO, содержащий уже около 40 источников с энергией гамма-квантов выше 100 ТэВ [61].

8. ИСТОРИЯ ГАММА-АСТРОНОМИИ В СССР И В РОССИИ

Первый черенковский гамма-телескоп в СССР (и в мире) был создан группой под руководством А. Е. Чудакова [62, 63]. Телескоп проводил наблюдения в Крыму в течение 4 летних сезонов с 1960 по 1963 г. Телескоп состоял из 12 параболических зеркал с диаметром 1,5 м и установленным в фокусе ФЭУ с диаметром фотокатода 4,5 см. Методика эксперимента была основана на регистрации черенковского света ШАЛ от космических лучей и гамма-квантов в небольшом телесном угле ($\sim 2 \cdot 10^{-3}$ ср) и поиске изменения темпа счета детектора при вхождении источника в поле зрения телескопа. Энергетический порог телескопа $\sim 2 \cdot 10^{12}$ эВ. К сожалению, выделить гамма-кванты от локальных астрофизических источников не удалось — были поставлены пределы на потоки.

Интересы А. Е. Чудакова переключились от гамма-астрономии к нейтринной физике, и, начиная с 1964 г., он сконцентрировался на создании Баксанского сцинтилляционного телескопа. Первой установкой, созданной под его руководством в БНО, была установка «Ковер», которая после ряда модернизаций продолжает исследования в области гамма-астрономии.

В конце 1980-х гг. группа под руководством А. А. Степаняна создала в Крыму систему из двух телескопов под названием ГТ-48 [64]. Монтировки телескопов были установлены на расстоянии 20 м между собой. На каждой монтировке было установлено по шесть субтелескопов, три из которых были с камерами по 37 пикселей на основе обычных ФЭУ, а еще три работали с одним ФЭУ, чувствительным к ультрафиолетовому излучению. Каждый субтелескоп имел 4 зеркала диаметром 1,2 м и фокусом 5 м. Энергетический порог ГТ-48 ~ 1 ТэВ. В 1989 г. эта установка была введена в эксплуатацию, а в 1994 г. представила результаты по наблюдению сигнала от Крабовидной туманности [65]. В последующие годы с ее помощью проводились наблюдения целого ряда

источников (Cyg X-3, Cas-A, 1ES 1426+428, Geminga). К сожалению, в ряде случаев результаты ГТ-48 оказались в противоречии с результатами других телескопов. Важным методическим результатом этой группы стало введение в практику наблюдения метода «гуляющий режим» (wobble mode) [66]. Этот метод не требует дополнительного времени для наблюдения фоновых областей, так как фон регистрируется во время наблюдения источника и используется повсеместно.

В начале 1990-х гг. в составе Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) ФИАН на высоте 3400 м начал работать телескоп ШАЛОН [67] с энергетическим порогом 0,8 ТэВ. Оптическая часть телескопа состоит из 38 зеркал общей площадью 11,2 м². В фокусе системы зеркал расположена регистрирующая камера на основе 144 ФЭУ, угловой размер камеры 7,2 × 7,2°. В свое время это была самая широкоугольная регистрирующая камера. Телескоп проводил наблюдения с 1993 по 2018 гг. Были представлены результаты наблюдения целого ряда источников — это Крабовидная туманность и блазар Мрк-421 [69], пульсар Геминга и остаток сверхновой Тихо Браге [68] и ряд других источников. Как и в случае с телескопом ГТ-48, результаты, полученные на телескопе ШАЛОН, оказывались в противоречии с результатами других телескопов.

9. РОССИЙСКИЕ УСТАНОВКИ, РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ШАЛ

В настоящее время в России и в Казахстане работают 5 установок, регистрирующих ШАЛ (рис. 9). После определенной модернизации они могут проводить исследования в области гамма-астрономии. Две из этих

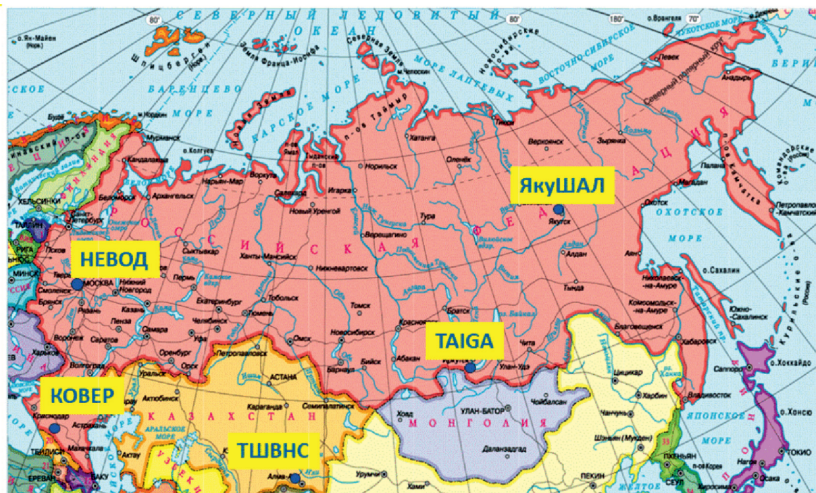


Рис. 9. Российские установки, регистрирующие ШАЛ

пяти установок — TAIGA и «Ковер» — уже проводят такие исследования. Далее будет дано краткое описание этих установок, полученные результаты и необходимая модернизация. Всего в работах по этому направлению работают группы из 12 организаций: АлГУ (Барнаул), ИГУ (Иркутск), ИЗМИРАН, ИКФИА (Якутск), ИЯИ РАН, ИЯФ (Новосибирск), КБГУ (Нальчик), НИИЯФ МГУ, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, ФИАН им. П. Н. Лебедева, Физтех им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург).

Астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy) включает ряд установок для проведения исследований в области физики космических лучей и гамма-астрономии [69, 70]. Исследование локальных источников гамма-квантов проводится на установках TAIGA-HiSCORE и TAIGA-IACT. TAIGA-HiSCORE — это система из 120 широкоугольных детекторов на площади $1,1 \text{ км}^2$. Установка позволяет восстанавливать направления прихода ШАЛ с точностью $\sim 0,2^\circ$ и энергию с точностью 20%. Энергетический порог для ШАЛ от гамма-кванта $\sim 50 \text{ ТэВ}$. Установка TAIGA-IACT в настоящее время включает три АЧТ с угловым обзором $9,6^\circ$ и энергетическим порогом $\sim 2\text{--}3 \text{ ТэВ}$. В ближайшие 2 года число телескопов будет увеличено до 5. В процессе развертывания детекторов комплекса были созданы программы для выделения гамма-квантов при работе одного телескопа [71], нескольких телескопов (стереометод) [72] и при совместной работе телескопов и установки TAIGA-HiSCORE (гибридный метод) [73]. В настоящее время, за 150 ч наблюдения, сигнал от Краба выделен на уровне 12σ и восстановлен энергетический спектр по данным первого телескопа [24], и стереометодом по совместной работе телескопов 1 и 2 до энергии 100 ТэВ [74], на уровне 5σ наблюдался блазар Mrk-421. Эффективная площадь Астрофизического комплекса при 5 телескопах $\sim 1 \text{ км}^2$ для гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ [75], что позволит за 300 ч наблюдения зарегистрировать около 50 гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ от Крабовидной туманности, т. е. начать исследовать область субПэВного диапазона.

Установка «Ковер» начала регистрировать ШАЛ 1974 г. В 1986 г. к центральной части установки, состоящей из 400 сцинтилляционных детекторов на площади 200 м^2 были добавлены 6 внешних станций. Энергетический порог установки $\sim 300 \text{ ТэВ}$, угловое разрешение $\sim 5^\circ$. Эффективная площадь установки 200 м^2 , так как отбирались только ШАЛ с положением осей внутри центральной части. В период работы установки в такой конфигурации была зарегистрирована «вспышка» событий от Крабовидной туманности, скоррелированная по времени с аналогичным повышением темпа счета ШАЛ на установках EAS-TOР, TШВНС и KGF [76]. С 2012 г. в состав установки вошел мюонный детектор с площадью 175 м^2 . Такая конфигурация установки названа «Ковер-2». Осенью 2021 г. на этой установке наблюдалось сильное повышение темпа счета в течение 80 сут в направлении на гамма-источник Cygnus Sosoop [49]. При этом поток этих событий превышал ожидаемый

поток гамма-квантов с энергией большей 100 ТэВ в 10^4 раз. В середине этого интервала (20 ноября) от того же направления в пределах угловой точности нейтринным телескопом Ice-Cube было зарегистрировано нейтрино с энергией 150 ТэВ. Возможное объяснение этому событию приведено в разд. 5. В 2022 г. площадь мюонных детекторов была увеличена до 410 м^2 , но эффективная площадь регистрации ШАЛ, по-прежнему, оставалась равной 200 м^2 . Новая конфигурация стала называться «Ковер-3». В октябре 2022 г. произошел уникальный по мощности гамма-всплеск GRB 221009A. Гамма-кванты ТэВного диапазона от этого всплеска с максимальной энергией 18 ТэВ были зарегистрированы установкой LHAASO [77]. На установке «Ковер-3», примерно через 1 ч после начала гамма-всплеска, было зарегистрировано «фотоноподобное» событие с энергией 251 ТэВ [78], в пределах угловой точности совпадающей с GRB 221009A. Источник этого гамма-всплеска находился на расстоянии 750 Мпк от Земли ($Z = 0,151$), и гамма-кванты с такими энергиями должны полностью поглощаться на межгалактическом электромагнитном фоне (см. введение). Наблюдаемое событие на установке «Ковер», если это не случайное совпадение с гамма-квантом от галактического источника, нельзя объяснить без выхода за границы Стандартной модели. Возможное объяснение этому событию с привлечением гипотезы об аксиоподобных частицах приведено в [79].

К 2024 г. на установке «Ковер-3» проведена существенная модернизация — были добавлены 15 внешних станций. Угловое разрешение было улучшено до $\sim 1^\circ$, эффективная площадь — до 10^4 м^2 [80].

Основой экспериментального комплекса НЕВОД (нейтринный водный детектор) является водный черенковский детектор, окруженный трековыми детекторами для исследования горизонтальных мюонных групп [81]. На этой установке была впервые осуществлена регистрация атмосферного нейтрино на поверхности Земли. Исследования, проведенные на детекторе НЕВОД, привели к открытию «мюонной загадки» — избытка мюонов от ШАЛ с энергией выше 10^{17} эВ, необъяснимого современными моделями адронных взаимодействий [82, 83]. Результат подтвержден гигантской установкой ШАЛ P. Auger и нейтринным телескопом Ice-Cube. Дальнейшее развитие эксперимента привело к созданию сцинтилляционной установки НЕВОД-ШАЛ [84] и системы нейтронных детекторов — установки «Уран» [85]. Существующая конфигурация мюонных и нейтронных детекторов позволяет отделять ШАЛ от гамма-квантов и адронов с фактором режекции адронов на уровне 10^4 . Для обеспечения надежного поиска источников гамма-квантов сверхвысоких энергий необходимо существенное улучшение точности угловых измерений, которое может быть достигнуто путем расширения имеющихся установок для регистрации электронно-фотонной и нейтронной компонент за счет создания удаленных кластеров.

Тянь-Шаньская высокогорная научная станция ФИАН (ТШВНС) [86–88] расположена на высоте 3300 м над уровнем моря, примерно

в 40 км от Алма-Аты. В настоящее время на ТШВНС работает комплекс регистрации космических лучей, в котором одновременно используются многие типы детекторов: установка ШАЛ («ковёр» с плотным расположением сцинтилляторов для регистрации оси ШАЛ с энергией, превышающей 0,3–1 ПэВ); периферийные сцинтилляционные детекторы, которые располагаются на различных расстояниях от «ковра» (для измерения плотности потока частиц ШАЛ на периферии ливня). Полная площадь установки ШАЛ вместе с периферийными детекторами $\sim 5000 \text{ м}^2$. В состав станции входит нейтронный монитор и распределенная система детекторов тепловых нейтронов и мягких гамма-квантов, и подземные детекторы для регистрации мюонной компоненты ШАЛ [89]. Все наземные и подземные установки синхронизируются общим триггером. Используя информацию с нейтронных детекторов, можно выделять события с малым или отсутствующим нейтронным сопровождением, т.е. отбирать ливни, образованные гамма-квантами ПэВных энергий. Проводя отбор «безмюонных» событий, можно выделять ШАЛ, образованные первичными гамма-квантами высокой энергии. Для улучшения эффективности исследований в области субПэВной гамма-астрономии представляется важным понизить энергетический порог установки ШАЛ, улучшить точность восстановления направления прихода ШАЛ и увеличить площадь мюонных детекторов.

Якутская комплексная установка ШАЛ (ЯКУШАЛ) [90] — это стационарный исследовательский полигон, расположенный в долине реки Лены в 55 км к югу от г. Якутска. Это самая северная установка ШАЛ в мире, координаты установки — $61,7^\circ$ с. ш., $129,4^\circ$ в. д. Якутская установка непрерывно ведет наблюдения уже более 50 лет и является самым продолжительным наблюдательным экспериментом по регистрации потока космических лучей сверхвысоких энергий в мире. В настоящее время установка состоит из 49 сцинтилляционных детекторов площадью 2 м^2 , трех мюонных детекторов площадью 20 м^2 и 19 детекторов черенковского света ШАЛ. Энергетический порог установки $\sim 5 \cdot 10^{16}$ эВ. В последние годы на установке проведена существенная модернизация системы сбора данных и временная синхронизация. Точность временной синхронизации детекторов улучшилась почти в 10 раз — от 100 до 10 нс. При такой точности синхронизации точность восстановления направления ШАЛ улучшится до $0,2^\circ$. Установка создавалась, главным образом, для изучения космических лучей предельно высоких энергий, выше 10^{19} эВ, для поиска излома в спектре космических лучей, связанном или с ГЗК-эффектом или пределом ускорения протонов и ядер в источниках. Для решения этого вопроса важно зарегистрировать гамма-кванты с энергией выше 10^{17} эВ, которые рождаются при ГЗК-эффекте. Такие гамма-кванты пока не зарегистрированы, установлены только пределы на поток [91]. Для улучшения гамма/адронного разделения в составе установки планируется развернуть еще 16 мюонных детекторов с площадью 20 м^2 каждый. Участники эксперимента проводят серьезную методическую работу

по увеличению точности определения энергии в крупнейших установках ШАЛ (Auger [92], TA [93] с целью подойти к решению «мюонной загадки» [94].

Проект ALLEGRO (Atmospheric Low Energy Gamma-Ray Observatory), разработанный в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе, направлен на изучение важного и недостаточно изученного гамма-диапазона 5–30 ГэВ [95]. Энергетический порог этого прибора (~ 5 ГэВ) будет значительно ниже, чем у существующих атмосферных черенковских телескопов. Это должно помочь выявить несколько существенных спектральных особенностей стационарных источников гамма-излучения (в частности, экспоненциальное падение спектров пульсаров в диапазоне 1–10 ГэВ) и исследовать быстро меняющееся гамма-излучение гамма-всплесков и активных источников гамма-излучения ядра галактик с чувствительностью и временным разрешением, значительно превышающим параметры существующих гамма-обсерваторий, размещаемых на космических аппаратах [96].

Гамма-всплески — это вспышки гамма-излучения, в основном в МэВ-ном диапазоне, которые, по-видимому, связаны с гравитационным коллапсом массивных звезд или слияниями нейтронных звезд. Энергия всплеска в гамма-диапазоне достигает 10^{52} – 10^{53} эрг — это наиболее яркий всплеск по Вселенной. Продолжительность гамма-всплесков — от 10 мс до нескольких часов, при этом различается центральный всплеск и послесвечение (afterglow) [50]. Зарегистрированные в ТэВном диапазоне (0,1–10 ТэВ) гамма-кванты [77, 97], скорее всего, родились в области послесвечения, и изучение спектра этих гамма-квантов даст очень много для понимания механизма ускорения частиц в этой области, но не даст ответа на вопрос, как работает центральная машина всплеска (central engine). Для этого нужны установки с площадью $\sim 10^4$ м² и энергетическим порогом ~ 5 ГэВ.

Для достижения этих целей проект будет состоять из четырех черенковских телескопов с диаметром зеркала 30 м, расположенных в вершинах квадратов со стороной 70 м. Камеры телескопов будут состоять из $\sim 10\,000$ пс на основе кремниевых ФЭУ (SiPM) со средней квантовой чувствительностью в диапазоне черенковского излучения 0,35 [98]. Для достижения порога в 5 ГэВ установку надо разместить на высоте 4–5 км.

В качестве первого шага к реализации проекта представляется важным создание прототипов телескопов ALLEGRO для размещения на Кавказе (БНО) или в Сибири в составе установки TAIGA.

Существующие экспериментальные данные показывают, что для серьезного продвижения в область ПэВной гамма-астрономии площади существующих установок должны быть увеличены на один-два порядка. Как один из вариантов такой установки можно рассмотреть установку площадью 100 км², под условным названием TAIGA-100. Базовыми элементами новой установки будут широкоугольные черенковские станции с углом обзора ~ 1 ср. Станции будут установлены на расстоя-

нии ~ 200 м с одним фотоумножителем с диаметром фотокатода 20 см в отличие от четырех ФЭУ в станциях установки TAIGA-HiSCORE. Энергетический порог такой конфигурации станций ~ 300 ТэВ. Вторым базовым элементом новой установки будут мюонные детекторы с площадью ~ 40 м², аналогичные мюонным детекторам установки LHAASO. В установке будет ~ 3000 черенковских станций и такое же количество мюонных детекторов. На установке TAIGA-100 за 500 ч наблюдения будут зарегистрированы 350 гамма-квантов с энергией больше 500 ТэВ на уровне значимости 10σ от Крабовидной туманности, при этом ожидается ~ 50 гамма-квантов с энергией выше 1 ПэВ. В центральной части установки будут 6–7 АЧТ для исследования энергетического диапазона 50–500 ТэВ и 1–2 телескопа с диаметром зеркала 10 м для поиска гамма-квантов от гамма-всплесков. Для изучения области высоких энергий, выше 10^{16} эВ, в состав установки может быть включена система сцинтилляционных детекторов и 1–2 телескопа для флюоресцентного излучения ШАЛ. Такая конфигурация детекторов не только позволит детально изучить массовый состав космических лучей вплоть до энергии 10^{19} эВ, но и будет иметь наилучшую чувствительность для поиска космологических гамма-квантов (гамма-квантов от ГЗК-процесса) в диапазоне 10^{17} – 10^{18} эВ — важнейшей задачи для физики космических лучей предельно высоких энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гамма-астрономия субПэВных энергий после начала работы высокогорных установок HAWC, Tibet-AS γ , LHAASO стремительно развивается: зарегистрированы гамма-кванты с энергией, большей 100 ТэВ, от более чем десяти галактических источников, от двух источников (Крабовидная туманность, J2032 + 4102) зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 1 ПэВ. Поскольку до настоящего времени энергетические спектры гамма-квантов в области субПэВных получены по заряженным частицам ШАЛ, важно восстановить эти спектры другой методикой, например, по черенковскому свету ШАЛ.

На российских установках TAIGA, «Ковер-3» уже получены интересные результаты в области гамма-астрономии высоких энергий, и возможно существенное улучшение параметров установок в ближайшие 1–2 года после запланированной модернизации.

Установки НЕВОД, ТШВНС, ЯКУШАЛ имеют хороший потенциал для проведения исследования в области ПэВных энергий, но для этого требуется достаточно серьезная и вполне осуществимая модернизация.

Для прорыва в ПэВный диапазон энергии необходимы установки с площадью на один-два порядка больше существующих. Такой установкой может быть TAIGA-100, кратко описанная выше. Представляется важным скоординировать работу заинтересованных научных групп для подготовки детального проекта этой установки.

Финансирование. Работа поддержана грантом РФФ № 23-72-00019.

Автор выражает благодарность Н. М. Будневу, А. М. Быкову, П. А. Волчугову, Л. Т. Ксенофонову, В. А. Петкову, А. А. Петрухину, В. А. Рябову, Л. Г. Свешниковой за полезные обсуждения.

Конфликт интересов. Автор декларирует об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulikov V., Khristiansen G. B.* // J. Exp. Theor. Phys. 1958. V. 35. P. 441–444.
2. *Baade W., Zwicky F.* // Proc. Nat. Acad. Sci. 1934. V. 20, No. 5. P. 259.
3. *Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.* Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
4. *Bell A. R., Schure K. M., Reville B., Giacinti G.* // MNRAS. 2013. V. 431. P. 415.
5. *Cristofari P., Blasi P., Amato E.* // Astropart. Phys. 2020. V. 123. P. 102492.
6. *Olm B.* // Universe. 2023. V. 9. P. 402.
7. *Dubus G.* // Astron. Astrophys. Rev. 2013. V. 21. P. 64.
8. *Bykov A. M. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. P. 2439–2444.
9. *Abramowski A. et al. (HESS Collab.)* // Nature. 2016. V. 531(7595). P. 476–479.
10. *Быков А. М.* Гамма-всплески // УФН. 2024. Т. 194. С. 384.
11. *Aartsen M., Ackermann M. et al. (Ice-Cube Collab.)* // Science. 2018. V. 361. P. 6398.
12. *Chiarusi T., Spurio M.* // Eur. Phys. J. C. 2010. V. 65. P. 649.
13. *Doro M. et al.* arXiv:2111.01198.
14. *Hooper D., Serpico P.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 231102.
15. *Abdalla H. et al.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2021. V. 02. P. 048; arXiv: 2010.01349.
16. *Kildea J. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 28. P. 182–195.
17. *Hillas A. M.* // Proc. of the 19th ICRC. V. 3. La Jolla, 1985.
18. *Weeks T. et al.* // Astrophys. J. 1989. V. 342. P. 379.
19. *Amenomori M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 123. P. 051101.
20. *Davies J. M., Cotton E. S.* // Solar Energy. 1957. V. 1, No. 2–3. P. 16–22.
21. *Schliesser A., Mirzoyan R.* // Astropart. Phys. 2005. V. 24. P. 382.
22. *de Naurois M. et al.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2017. V. 136. P. 03001.
23. *Lessard R. W. et al.* // Astropart. Phys. 2001. V. 15, No. 1. P. 1.
24. *Свешникова Л. Г. и др. (колл. ТАIGA)* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. С. 966.
25. *Hofmann W. et al.* // Astropart. Phys. 1999. V. 122. P. 135.
26. *Vercellone S. et al.* // J. High Energy Astrophys. 2022. V. 35. P. 1–42.
27. *Abraham J. (Auger Collab.)* // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 523. P. 50.
28. *Cao Z. et al.* // Braz. J. Phys. 2014. V. 44. P. 494–503.
29. *Amenomori M. et al. (Tibet Collab.)* // Astrophys. Space Sci. 2007. V. 309. P. 435–439.
30. *Abeysekara U. et al. (HAWC Collab.)* // Astrophys. J. 2017. V. 843.
31. *Ma Xin-Hua et al.* // Chin. Phys. C. 2022. V. 46, No. 3. P. 030001.

32. *Cao Z. et al. (LHAASO Collab.) // Science. 2021. V. 373. P. 425–430.*
33. *Крымский Г. Ф. // ДАН СССР. 1977. Т. 234. С. 1306.*
34. *Bell A. R. // MNRAS. 1978. V. 182. P. 147–156.*
35. *Drury L. // Rep. Prog. Phys. 1983. V. 46. P. 973–1027.*
36. *Bell A. R. // MNRAS. 2004. V. 353. P. 550–558.*
37. *Cristofari P. // Universe. 2021. V. 7. P. 324.*
38. *Schure K. M., Bell A. R. // MNRAS. 2013. V. 435. P. 1174–1185.*
39. *Goldreich P., Julian W. // Astrophys. J. 1969. V. 157. P. 809.*
40. *Rees M. J., Gunn J. E. // MNRAS. 1974. V. 167. P. 1–12.*
41. *Amato E. arXiv:2402.10912.*
42. *Abdalla H. et al. (HESS Collab.) // Astron. Astrophys. 2018. V. 612. P. A1.*
43. *Cao Z. et al. (LHAASO Collab.) // Nature. 2021. V. 594(7861). P. 33–36.*
44. *de Ona Wilhelmi E. et al. // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 930, No. 1. P. L2.*
45. *Amato E., Olmi B. // Universe. 2021. V. 7. P. 448.*
46. *Вуков А. М. et al. arXiv:2101.06271; Adv. Space Res. (submitted).*
47. *Вуков А. М., Петров А. Е., Калышова М. Е., Троицкий С. В. // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 921.*
48. *IceCube Collab. // GRB Coordinates Network. 2020. V. 28927. P. 1.*
49. *Dzhappuev D. D. et al. // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 916. P. L22.*
50. *Быков А. М. // УФН. 2024. Т. 194. С. 384.*
51. *Michel A. M. arXiv:2109.13753.*
52. *Weekes T. C. et al. // Astropart. Phys. 2002. V. 17. P. 221.*
53. *Baixeras C. et al. (MAGIC Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 518. P. 188–192.*
54. *Aharonian F. et al. (HESS Collab.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 457. P. 899–915.*
55. *Acero F. et al. // Astropart. Phys. 2023. V. 150. P. 102850.*
56. *Scuderi S. et al. (ASTI Collab.) // J. High Energy Astrophys. 2022. V. 35. P. 52–68.*
57. *Conceição R. (SWG0 Collab.). arXiv:2309.04577.*
58. *Acciari V. A. et al. (MAGIC Collab.) // Astron. Astrophys. 2020. V. 635. P. A158.*
59. *Abeyssekara A. U. et al. (HAWC Collab.). arXiv:1909.08609.*
60. *Albert A. et al. (HAWC Collab.) // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 896. P. L29.*
61. *Cao Z. et al. (LHAASO Collab.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2024. V. 271. P. 25.*
62. *Зацепин Г. Т., Чудаков А. Е. // ЖЭТФ. 1961. Т. 41. С. 655.*
63. *Чудаков А. Е. и др. Космические лучи // Тр. ФИАН им. П. Н. Лебедева. М.: Наука, 1964. Т. 26. С. 118.*
64. *Kornienko P., Stepanian A. A., Zyskin Yu. L. et al. // Exp. Astron. 1993. V. 4. P. 77.*
65. *Kalekin O. R. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 1994. V. 58. P. 2092.*
66. *Fomin V. et al. // Astropart. Phys. 1994. V. 2. P. 151.*
67. *Sinitsyna V. G. // Nuovo Cim. C. 1996. V. 19. P. 965.*
68. *Sinitsyna V. G. et al. // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2008. V. 175–176. P. 455–458.*
69. *Астапов И. И. и др. // ЖЭТФ. 2022. Т. 161. С. 548–559.*

70. Буднев Н. М. и др. // Науч. сессия секции ядерной физики Отд-ния физ. наук РАН, посвящ. 300-летию РАН, Дубна, 1–5 апр. 2024 г.; ЭЧАЯ. 2025. Т. 56, вып. 3.
71. Sveshnikova L. et al. (TAIGA Collab.) // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85, No. 4. P. 398–401.
72. Grinyuk A., Postnikov E., Volchugov P. et al. (TAIGA Collab.) // PoS (ICRC2021). 2021. V. 395. P. 713.
73. Sveshnikova L. et al. (TAIGA Collab.) // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83, No. 8. P. 962–966.
74. Volchugov P. A. et al. (TAIGA Collab.) // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86, No. 4. P. 483.
75. Volchugov P. et al. (TAIGA Collab.) // PoS (ICRC2023). 2023. V. 686.
76. Alexeenko V. V. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1992. V. 18. P. L83.
77. Cao Z. et al. (LHAASO Collab.) // Sci. Adv. 2023. V. 9. P. 46. ead2778; arXiv:2310.08845.
78. Dzhappuev D. et al. // Astronomer's Telegram. 2022. V. 15669.
79. Troitsky S. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2024. V. 01. P. 016.
80. Петков В. В. и др. // Науч. сессия секции ядерной физики Отд-ния физ. наук РАН, посвящ. 300-летию РАН, Дубна, 1–5 апр. 2024 г.; ЭЧАЯ. 2025. Т. 56, вып. 3.
81. Yashin I. I. et al. // J. Instrum. 2021. V. 16, No. 8. P. T08014.
82. Bogdanov G. et al. // Astropart. Phys. 2018. V. 98. P. 13–20.
83. Petrukhin A. A. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 1. P. 92–99.
84. Amelchakov M. B. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1026. P. 166184.
85. Gromushkin D. M. et al. // J. Instrum. 2017. V. 12, No. 6. P. C07029.
86. Рябов В. А. // Науч. сессия секции ядерной физики Отд-ния физ. наук РАН, посвящ. 300-летию РАН, Дубна, 1–5 апр. 2024 г.
87. Shepetov A. L. et al. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 6. P. 919–928.
88. Beisembaev R. U. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2022. V. 1037. P. 166901.
89. Shepetov A. L. et al. // Astropart. Phys. 2021. V. 133. P. 102642.
90. Glushkov A. V. et al. // J. Exp. Theor. Phys. 2019. V. 128, No. 3. P. 415–422.
91. Alekseev A. K. et al. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84, No. 6. P. 893–906.
92. Abraham J. et al. (Auger Collab.) // Phys. Lett. B. 2010. V. 685. P. 239.
93. Abbasi R. et al. (TA Collab.) // Astrophys. J. 2018. V. 858. P. 76.
94. Glushov A. V. et al. // JETP Lett. 2023. V. 117, No. 9. P. 645–651.
95. Вуков А. М. et al. // Techn. Phys. 2017. V. 62, No. 6. P. 819–836.
96. Atwood W. B. et al. (Fermi Collab.) // Astrophys. J. 2009. V. 697. P. 1071.
97. Veres P. et al. (MAGIC Collab.) // Nature. V. 575. P. 459.
98. Kholupenko E. E. et al. // Techn. Phys. 2018. V. 63, No. 11. P. 1603–1614.