

Г.Т. Зацепин и начало гамма-астрономии

А.С. Лидванский

Сто лет со дня рождения Г.Т. Зацепина — хороший повод вспомнить не только о всем известных работах этого выдающегося учёного по физике космических лучей, ядерной и нейтринной астрофизике, но и о некоторых его предложениях, менее известных даже среди специалистов. В частности, именно Г.Т. Зацепин первым высказал идею использования черенковского излучения электромагнитных каскадов в верхних слоях атмосферы для поиска локальных источников гамма-квантов на небесной сфере. Эта идея, опубликованная в 1961 г. в статье Г.Т. Зацепина и А.Е. Чудакова, немедленно была воплощена А.Е. Чудаковым, создавшим в Крыму первый в мире черенковский гамма-телескоп. Метод, предложенный Зацепиным и Чудаковым, по-прежнему является основой гамма-астрономии очень высоких энергий — число открытых с его помощью источников приближается к 200. Новые грандиозные проекты в этой сегодня бурно развивающейся области астрономии увеличат чувствительность метода почти на порядок.

Ключевые слова: гамма-астрономия очень высоких энергий, широкие атмосферные ливни, черенковское излучение

PACS numbers: 07.85.-m, 29.40Ka, 95.55.Ka, 95.85.Pw

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038184>

Содержание

1. Исторические мифы в гамма-астрономии (1019).
 2. Крымский телескоп А.Е. Чудакова и его результаты (1020).
 3. Истинная история гамма-астрономии и роль Г.Т. Зацепина (1020).
 4. Дальнейший прогресс и современное состояние черенковского метода и гамма-астрономии очень высоких энергий (1021).
 5. Перспективы и новые проекты (1022).
- Список литературы (1024).

1. Исторические мифы в гамма-астрономии

Такой источник популярных сведений, как англоязычная Википедия, сообщает в разделе "Ранняя история" статьи "Гамма-астрономия" [1] (после упоминания нескольких теоретических работ, из которых главной является программная статья Ф. Моррисона [2]), что "первый гамма-телескоп, запущенный на орбиту на спутнике Explorer-11 в 1961 г., зарегистрировал менее 100 космических гамма-фотонов. Они оказались приходящими со всех направлений Вселенной, свидетельствуя о наличии некоторого равномерного фона гамма-излучения".

При этом в той же статье Википедии в разделе "Технология детекторов" сообщается, что "фотоны высоких энергий рождают широкие ливни вторичных частиц в атмосфере, которые могут регистрироваться на земле или прямо счётчиками излучения, или оптически через черенковское излучение, испускаемое ультрарелятивист-

скими частицами ливня". И далее там же: "Гамма-излучение в ТэВ-ном диапазоне, испускаемое из Крабовидной Туманности, впервые было зарегистрировано в 1989 г. в Обсерватории им. Уиппла (Маунт-Хопкинс) в Аризоне, США".

В принципе все приведённые факты соответствуют действительности, но изложенная картина, как минимум, неполна, а на самом деле серьёзно искажает действительность.

Но ещё больше, чем в "поп-истории", ранняя стадия развития гамма-астрономии искажена в претендующей на серьёзность компиляции Исследовательского центра архива Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) по астрофизике высоких энергий "История гамма-астрономии, включающая связанные с ней открытия" [3]. В этой работе Леонарда и Герельса последовательность событий в начальной истории гамма-астрономии излагается следующим образом:

"1959 г. — Коккони предлагает искать космические источники гамма-квантов очень высоких энергий с помощью метода наземной регистрации атмосферных ливней;

1960 г. — Чудаков и др. из Института им. Лебедева, следуя предложению Коккони, начинают поиск атмосферных ливней от гамма-излучения сверхвысоких энергий на установке в Крыму. Эксперимент продолжался несколько лет, но определённых результатов не было получено.

1968 г. — первый специально созданный атмосферный черенковский гамма-телескоп построен в Аризоне в Обсерватории Маунт-Хопкинс (позднее переименованной в Обсерваторию им. Уиппла). Этот 10-метровый телескоп до сих пор функционирует."

В этой истории неверно всё, кроме того, что доклад Джузеппе Коккони [4] на Московской конференции по

А.С. Лидванский. Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация
E-mail: lidvansk@lebedev.ru

Статья поступила 7 августа 2017 г.

космическим лучам 1959 г. действительно имел место, и того факта, что атмосферный черенковский гамма-телескоп в Аризоне действительно был построен. Но, в-первых, построен он был к 1977 г., тогда как 1968 годом датируется только начало работ в Обсерватории им. Уиппла. Первые наблюдения велись там с двумя передвижными зеркалами небольшого диаметра. И даже после создания 10-метрового зеркала работа с построением изображения в фокальной плоскости полностью началась в 1984 г., а надёжная регистрация сигнала от Крабовидной Туманности была достигнута только к 1989 г., как правильно сообщается в Википедии.

Во-вторых, Коккони предлагал не просто наземную регистрацию, а регистрацию на очень высоко размещённой в горах установке из сцинтилляционных счётчиков. Таким путём предлагалось перейти из области энергий, характерной для широких атмосферных ливней, к гораздо более низким энергиям и, соответственно, к гораздо большему темпу счёта событий. При этом Коккони сделал оценки ожидаемых сигналов от некоторых источников, в частности от Крабовидной Туманности (впоследствии оказалось, что он ошибся при этом на три порядка).

В-третьих, установка Чудакова в Крыму [5] ни в коей мере не следовала предложению Коккони, а как раз от него отталкивалась. Это и был "первый специально созданный атмосферный черенковский гамма-телескоп" (рис. 1), а вовсе не телескоп в Аризоне, который не был даже вторым. Вторым был маленький телескоп из двух зеркал, построенный в Дублине в 1964 г., когда эксперимент Чудакова был уже давно (в 1963 г.) завершён. Впоследствии было ещё несколько попыток проводить наблюдения с телескопами относительно малых размеров (см. раздел 3). Но даже после создания первого телескопа нового поколения с большим диаметром зеркала (имеется в виду тот самый 10-метровый телескоп в Аризоне, и именно так его уместно именовать) потребовались несколько лет наблюдений для того, чтобы добиться первого безусловно статистически достоверного результата. Фраза из Википедии: "Гамма-излучение в ТЭВ-ном диапазоне, испускаемое из Крабовидной Туманности, впервые было зарегистрировано в 1989 г." — означает, что к этому времени для сигнала от Крабовидной Туманности было накоплено превышение над фоном в девять стандартных отклонений [6]. К этому времени с начала работ в обсерватории Маунт-Хопкинс прошёл 21 год. В таком аспекте совершенно иначе звучит фраза про телескоп Чудакова, что "этот эксперимент продолжался несколько лет, но определённых результатов не было получено".



Рис. 1. Первый черенковский гамма-телескоп (и первый гамма-телескоп вообще), созданный А.Е. Чудаковым с сотрудниками в Крыму.

2. Крымский телескоп А.Е. Чудакова и его результаты

Эксперимент Чудакова просто очень намного опередил своё время. Достаточно сказать, что многие типы объектов, которые были зарегистрированы впоследствии как источники гамма-излучения очень высоких энергий, в то время были неизвестны. Скажем, пульсары были открыты через пять лет после завершения эксперимента. Чудаков и его сотрудники считали перспективными объектами наблюдения прежде всего радиогалактики. К сожалению, из-за несчастливой стечении обстоятельств одна из таких галактик (Лебедь А) в первых сеансах наблюдений дала некоторое превышение над фоном. В связи с этим неоправданно много времени было потрачено на наблюдение именно этого объекта. В итоге значимых сигналов от источников, за которыми велось наблюдение, не было обнаружено. Но даже верхние пределы потока гамма-излучения ТЭВ-ных энергий, полученные для источников в ходе наблюдений, имели важное значение. В частности, для Крабовидной Туманности результат эксперимента Чудакова означал доказательство прямого ускорения электронов в источнике. Главное, однако, заключалось в том, что, вопреки процитированному выше утверждению работы [3], крымский телескоп Чудакова был первым черенковским телескопом. Более того, он вообще был первым прибором, специально созданным для целей гамма-астрономии. Именно поэтому сэр Арнольд Волфендейл, бывший королевский астроном Англии, сделал на подаренном Чудакову экземпляре своей монографии *Гамма-астрономия* [7], написанной в соавторстве с индийским физиком Рамана Мурти, следующую надпись: "Профессору А.Е. Чудакову — отцу-основателю предмета" (рис. 2).

3. Истинная история гамма-астрономии и роль Г.Т. Зацепина

Леонард и Герельс правильно назвали доклад Коккони на Московской конференции по космическим лучам в качестве исторически важной вехи. Именно этот доклад натолкнул Г.Т. Зацепина на идею пойти дальше. Как было сказано в разделе 1, идея Коккони заключалась в

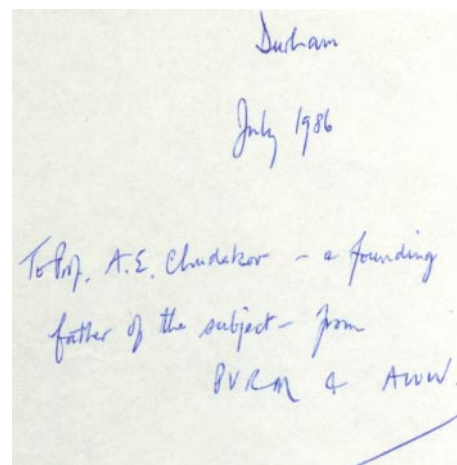


Рис. 2. Дарственная надпись на монографии *Гамма-астрономия* [7] П.В. Рамана Мурти и А.У. Волфендейла "Профессору А.Е. Чудакову — отцу-основателю предмета — от ПВРМ и АУВ".

снижении энергетического порога для ливней от первичных частиц благодаря резкому повышению высоты уровня наблюдений. Идея Зацепина заключалась в гораздо более радикальном повышении уровня регистрации ливней путём перенесения регистрации в верхние слои атмосферы, где релятивистские заряженные частицы ливней малой энергии генерируют черенковское излучение, которое в безлунные и безоблачные ночи может быть зарегистрировано на поверхности земли. Причём снижение времени наблюдения (в самых благоприятных для этого местах Земного шара оно не превышает 10 % от календарного) с избытком компенсируется увеличением темпа счёта событий благодаря снижению энергетического порога. Именно с этой идеей Зацепин пришёл к Чудакову. И он пришёл по правильному адресу. Чудаков к тому времени был признанным специалистом в исследовании черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей. Эксперименты, проведённые им на Памире, были поистине пионерскими в истории этого метода.

После первой регистрации Гэлбрайта и Джелли [8] в 1952 г. черенковского излучения ШАЛ Чудаков почти сразу же приступил к исследованию этого явления на Памире. Причём если первооткрыватели использовали чрезвычайно примитивную технику (зеркало диаметром 25 см и 5-сантиметровый фотоумножитель, размещённые в зачернённом ведре для мусора), то эксперимент Чудакова [9] отличался большим размахом и основательностью. Восемь черенковских приёмников располагались на расстояниях до 100 м от центра установки (использовались варианты с зеркалами и без зеркал). Впервые были получены черенковским методом энергетические спектры космических лучей, изучено пространственное распределение черенковского света в ливнях. При этом следует заметить, что в процессе подготовки своего памирского эксперимента Чудаков впервые наблюдал переходное излучение, предсказанное В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком в 1945 г. Он также первым пришёл к идее о возможности использовать ионизационное свечение воздуха, создаваемое ШАЛ, для нового метода их наблюдения. (Первый детектор этого типа, Fly's Eye, был создан в 1981 г., а в настоящее время флюоресцентные детекторы есть на всех крупных наземных установках для регистрации ШАЛ. Проекты использования этого метода с помощью космических аппаратов находятся в стадии реализации.).

Чудаков сразу оценил идею Зацепина, и они вместе написали статью [10] с предложением нового метода регистрации космических гамма-квантов очень высоких энергий. Одновременно Чудаков развернул работу в Крыму по немедленному воплощению идеи Зацепина. Замечательно, с какой скоростью это было сделано. К моменту выхода из печати работы [10] в 1961 г. уже были проведены наблюдения с первой очередью черенковского телескопа из четырёх зеркал в сезоне 1960 г. Со следующего года телескоп уже был полностью укомплектован 12 зеркалами диаметром 1,5 м и в таком виде проводил наблюдения в течение 1961–1963 гг. Таким образом, Чудаков действительно явился отцом-основателем гамма-астрономии, но так как авторов работы [10] было двое, то и отцов-основателей на самом деле двое. При этом А.Е. Чудаков, человек очень щепетильный в вопросах приоритета, неизменно в частных разговорах подчёркивал, что первоначальная идея принадлежала

именно Г.Т. Зацепину. Замечательно, что для последнего это был краткий эпизод его многогранной научной деятельности. Всё было сделано как бы мимоходом...

4. Дальнейший прогресс и современное состояние черенковского метода и гамма-астрономии очень высоких энергий

К 1989 г. [6] черенковский метод имел в активе один надёжно установленный источник (Крабовидная Туманность). В 1992 г. был уверенно зарегистрирован первый внегалактический источник (объект Mrk 421). К 2003 г. было известно уже десять галактических и восемь внегалактических источников [11]. В настоящее время общее количество гамма-источников, зарегистрированных черенковским методом, приблизилось к 200 и их число непрерывно увеличивается.

Тревор Уикс, который первым добился успеха с 10-метровым зеркалом в Аризоне, относил телескоп Чудакова к первому поколению (1960–1985 гг.) телескопов с отсутствием дискриминации фона или со слабой дискриминацией. В это число Уикс включал также упомянутый в разделе 1 телескоп в Дублине, маленькие телескопы Обсерватории им. Уиппла и Обсерватории Нарабрай (Австралия). Ко второму поколению (1985–2003 гг.) Уикс отнёс свой большой телескоп в Обсерватории им. Уиппла, телескоп ГТ48 А.А. Степаняна в Крыму и телескоп CAT (Cherenkov Array at Themis) во французских Пиренеях, а также телескоп HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) на Канарских островах, телескопы Mark Даремского университета (Англия) и первый вариант телескопа CANGAROO (Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback) в Австралии. Третье поколение телескопов (2003 г. – настоящее время) составляют системы HESS (High Energy Stereoscopic System) в Намибии, MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) на Канарских островах, VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) в Аризоне и CANGAROO-III в Австралии. Именно с этими телескопами, которые (кроме последнего) функционируют и в настоящее время, связано резкое увеличение числа открытых источников. Самый большой диаметр зеркала (17 м) имеет телескоп MAGIC, но по количеству вновь открытых источников лидирует HESS, который, следовательно, пока является наиболее успешным проектом. Здесь, впрочем, надо учесть тот факт, что HESS находится в Южном полушарии, где наблюдается центральная часть галактического диска с наибольшей плотностью галактических источников. Именно поэтому новый проект СТА (Cherenkov Telescope Array), о котором ещё пойдёт речь, спроектирован несимметричным: его южная часть будет значительно больше северной.

Приведённая выше классификация телескопов по поколениям не совсем полна (более полный список можно найти, например, в работе [12]). Существенно то, что она, естественно, отражает особенности изменения методики. Телескопы второго поколения имели зеркало большого диаметра с мозаикой из большого числа фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в фокусе. Черенковское излучение ливней от первичных гамма-квантов и протонов даёт разные образы ливней на этой мозаике, что используется при селекции событий для подавления фона. Это телескопы с построением изображения (imaging technique). На самом



Рис. 3. Один рефлектор системы VERITAS — типичного черенковского телескопа третьего поколения.

деле и в этом Чудаков был пионером, так как он уже использовал в своих экспериментах несколько ФЭУ в фокусе одного зеркала, но это были лишь пробы метода. Т. Уикс начинал с 37 ФЭУ. К настоящему времени построение изображения осуществляется с помощью фотоприёмников со многими сотнями и даже тысячами пикселей. Телескопы третьего поколения представляют собой системы из нескольких зеркал большого диаметра (на рис. 3 показан в качестве примера один телескоп системы VERITAS), разнесённых на большие расстояния для осуществления стереоскопических наблюдений. Следует заметить, что зеркала такого большого диаметра, как правило, собирают из отдельных стандартных элементов, плоских многогранников или небольших сферических зеркал, как в случае рис. 3 (рефлектор Дэвиса–Коттона). Прогресс методики за описываемый период сводился к постоянному увеличению диаметра зеркал (снижение энергетического порога и улучшение чувствительности) и их числа, увеличению поля зрения и повышению углового разрешения телескопов.

Интересным направлением в методике черенковской гамма-астрономии стало использование солнечных электростанций в качестве гамма-телескопов. Многочисленные зеркала таких электростанций в дневное время следят за Солнцем и фокусируют солнечный свет на солнечной башне. В ночное время можно разместить на башне фотоприёмники, а систему управления зеркалами использовать для слежения за возможными источниками. Такие эксперименты были проведены на солнечных электростанциях STACEE (Solar Tower Atmospheric Cherenkov Effect Experiment) в Нью-Мексико и Solar-II в Барстоу (Калифорния); можно назвать также эксперименты CELESTE (ChErenkov Low Energy Sampling and Timing Experiment) во Франции и GRAAL в Испании. Однако значительных результатов этим методом не было получено и существенной конкуренции специализированным телескопам солнечные электростанции не составили.

5. Перспективы и новые проекты

Планируемые черенковские телескопы нового (четвёртого) поколения обещают на порядок увеличить чувствительность по сравнению с таковой существующих телескопов. Основным и наиболее продвинутом здесь

является проект СТА [13]. Следует заметить, что из четырёх телескопов третьего поколения два (VERITAS и MAGIC) расположены в Северном полушарии, а два (HESS и CANGAROO-III) — в Южном. Тем самым обеспечивалась возможность полного обзора неба. Для СТА сразу планируют одновременное создание двух систем черенковских телескопов в Северном и Южном полушариях в рамках одного проекта. Относительно их расположения долго шли дебаты, но в 2017 г. окончательно было определено, что северная часть СТА будет расположена на Канарских островах, а южная — в пустыне Атакама (Чили). Северная и южная части СТА существенно различаются: 19 телескопов на площади $0,5 \text{ км}^2$ на Канарских островах (диапазон энергий 20 ГэВ–20 ТэВ) и 99 телескопов на площади более 4 км^2 в Чили (диапазон энергий от 20 ГэВ до 300 ТэВ). В проекте предусматривается использование зеркал разного размера (наибольшие имеют диаметр 23 м). Зеркала для этого проекта уже производятся, и первые телескопы пока проходят тестирование в Европе. Работы по созданию инфраструктуры на местах будущих обсерваторий уже начались.

Однако не только черенковские телескопы проектируются теперь для гамма-астрономии очень высоких энергий. На рисунке 4 показан вид уже действующей установки проекта HAWC (High Altitude Water Cherenkov observatory) в Мексике [14]. Это черенковская установка и гамма-телескоп, но вовсе не в том смысле, как все описанные выше. Она состоит из водных черенковских детекторов (диаметр одного танка с водой 7,3 м и высота 4,5 м) и регистрирует заряженные частицы ШАЛ на уровне наблюдения, который весьма высок (4100 м над уровнем моря). Но ведь это в чистом виде реализация идеи Коккони, от которой отталкивался Зацепин. История гамма-астрономии, таким образом, продемонстрировала, что она, как и всякая история, движется по спирали. Такое обращение к старой идее стало возможным в известной мере потому, что некоторые страны не жалеют денег на финансирование больших проектов (из рис. 4 можно увидеть, насколько это мощная установка, и легко вообразить, сколько стоит её размещение в горах). Однако HAWC не первая ливневая установка, включающая в свою программу исследований гамма-астрономию. Более ранняя установка Tibet-AS γ (AS (Air Showers) — атмосферные ливни) даже в названии соединяет атмосферные ливни и гамма-излучение. Будущая



Рис. 4. Установка HAWC около Пуэбло в Мексике на высоте 4100 м над уровнем моря (вулкан Сьерра-Негра). Отдельные детекторы представляют собой баки с водой для регистрации черенковского излучения частиц ШАЛ. В сущности, это реализация идеи Коккони 1959 года [4].

установка чрезвычайно масштабного проекта LHAASO (Large High Altitude Air Showers Observatory) [15] в Китае, которая находится в стадии реализации, станет крупнейшей установкой такого типа. Всё это стало возможным благодаря увеличению масштабов установок и прогрессу методики. Большой темп счёта (высокая статистическая точность) и гораздо лучшая, чем прежде, угловая точность позволяют регистрировать точечные источники (гамма-излучение) на равномерном фоне изотропно распределённых космических лучей (протоны и ядра). Что касается диффузного гамма-излучения космического происхождения, то его регистрация требует селекции протонных и гамма-ливней. В связи с этим вновь становятся актуальными такие методы, как регистрация бедных мюонами ливней (проект "Ковёр-3", реализуемый Баксанской нейтринной обсерваторией Института ядерных исследований РАН [16]). Черенковские телескопы с построением изображения там, где такая селекция возможна, являются составной частью более крупных гибридных проектов, как, например, TAIGA – HiSCORE (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy – Hundred Square km Cosmic ORigin Explorer) в Тункинской долине [17]. Но не только возможность применения методов визуализации (imaging technique) остаётся преимуществом черенковских телескопов. Они по-прежнему вне конкуренции при низких энергетических порогах. К настоящему времени лучшие установки черенковского метода обещают довести энергетический порог регистрации гамма-квантов до 20 ГэВ. Это означает, что уже достигнуто значительное перекрытие энергетических диапазонов спутниковых и наземных гамма-телескопов.

Таким образом, несмотря на прогресс других методов наземного наблюдения космических гамма-квантов, черенковский метод сохраняет своё значение и чрезвычайно успешно развивается. Кроме упомянутого проекта СТА, работы по которому идут полным ходом, можно упомянуть, что коллаборация HESS в самое последнее время дополнительно к имеющимся четырём телескопам создала телескоп с зеркалом диаметром 28 м (HESS II). Проект ALEGRO (Atmospheric Low Energy Gamma-Ray Observatory) [12], довольно тщательно проработанный, но ещё не получивший финансирования, также принадлежит новому поколению, как и проект AGIS (Advanced Gamma-ray Imaging System) [18]. Последний находится в стадии обсуждения довольно давно. Его интересной особенностью является попытка использовать не только простые зеркала, но и более сложную оптику для отдельных телескопов. Как и СТА, AGIS предполагает использование телескопов с зеркалами разного диаметра. Зеркала большего диаметра (18–20 м) должны использоваться в рефлекторах Дэвиса – Коттона, а зеркала с диаметром 7 или 12 м (по-видимому, окончательный выбор ещё не сделан) составят вместе с зеркалами малого диаметра телескоп Шварцшильда – Кудера (рис. 5). Всего предполагается разместить 50–100 таких телескопов на площади около 1 км². Приёмная камера каждого из телескопов будет иметь 5000–10000 пикселей. С точки зрения размещения обсерваторий обсуждаются Чили, Аргентина и Мексика. Предполагается активная координация наблюдений с установками проекта СТА.

Проект ALEGRO интересен также тем, что зеркала большого диаметра (около 30 м) предлагается размес-



Рис. 5. Предполагаемый вид оптической системы с двумя зеркалами (телескоп Шварцшильда – Кудера) в проекте AGIS.

тить в условиях высокогорья. Авторы проекта намереваются таким образом дополнительно снизить порог по энергии и довести его до значения около 5 ГэВ. При этом сама идея размещения черенковских зеркал на больших высотах уже воплощена в индийском проекте MACE (Major Atmospheric Cherenkov Experiment) [19], который стоит несколько особняком среди телескопов нового поколения, так как имеет только одно зеркало диаметром 21 м (пока второе по величине в мире), которое установлено на высоте 4270 м над уровнем моря.

Есть и другие проекты, пока ещё находящиеся в стадии обсуждения. Даже если не все из них будут реализованы, из вышесказанного видно, что метод, предложенный Зацепиным и Чудаковым, породил новую вполне самостоятельную область астрономии. Метод трудно стартовал (первые положительные результаты были получены через многие годы после пионерских экспериментов), но сейчас он очень динамично развивается. Этот метод представляет особый интерес для астрофизики, поскольку позволяет изучать объекты, генерирующие потоки самого высокоэнергетичного нетеплового излучения во Вселенной. Среди этих объектов при ТэВ-ных энергиях около 20 % составляют неидентифицированные источники, а примерно по 40 % приходится на галактические и внегалактические источники. Полный их перечень дан в онлайн-каталоге TeVcat (<http://tevcat.uchicago.edu>). Типы и характер этих источников подробно здесь не обсуждаются, так как темой статьи является именно метод и его эволюция.

К сожалению, современные учёные, работающие в этой области, очень мало знают о пионерах своей науки и основателях метода. Ещё около 20 лет тому назад, когда число открытых источников было совсем невелико, был опубликован подробнейший обзор по черенковской гамма-астрономии [20], где имелось около 400 ссылок на литературу, но не было даже упоминания ни о Чудакове, ни о Зацепине. Это полное забвение сочетается иногда с искажениями исторической картины, о которых шла речь в начале статьи. Цель настоящей публикации, помимо желания воздать должное выдающимся учёным, — восстановить, по крайней мере до известной степени, справедливость и заполнить пробел в

знаниях современных исследователей о истории гамма-астрономии.

Список литературы

1. Gamma-ray astronomy. Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma-ray_astronomy
2. Morrison P *Nuovo Cimento* **7** 858 (1958)
3. Leonard P, Gehrels N "A history of gamma-ray astronomy including related discoveries", Version 1.0.8, 2009 November 28 (NASA's HEASARC, High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, 2009)
4. Коккони Д, в сб. *Труды международной конф. по космическим лучам, Москва, 1959* Т. 2 (М.: Изд-во АН СССР, 1960) с. 327
5. Дадыкин В Л, Зацепин В И, Нестерова Н М, Чудаков А Е, в сб. *Космические лучи* (Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева, Т. 26) (М.: Наука, 1964) с. 118
6. Weekes T C et al. *Astrophys. J.* **342** 379 (1989)
7. Ramana Murthy P V, Wolfendale A W *Gamma Ray Astronomy* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1986)
8. Galbraith W, Jelley J V *Nature* **171** 349 (1953)
9. Chudakov A E, Nesterova N M *Nuovo Cimento Suppl.* **8** 606 (1958)
10. Зацепин Г Т, Чудаков А Е *ЖЭТФ* **41** 655 (1961); Zatsepin G T, Chudakov A E *Sov. Phys. JETP* **14** 469 (1962)
11. Weekes T "TeV gamma ray observations and the origin of cosmic rays", in *28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, Japan, 2003*, Invited talk
12. Быков А М и др. *ЖТФ* **87** 803 (2017); Bykov A M et al. *Tech. Phys.* **62** 819 (2017)
13. Actis M et al. (CTA Collab.) *Exp. Astron.* **32** 193 (2011)
14. Abeyssekara A U et al. *Astropart. Phys.* **50–52** 26 (2013)
15. Zha M (LHAASO Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **692** 77 (2012)
16. Dzhappuev D D et al. *J. Phys. Conf. Ser.* **798** 012028 (2017)
17. Budnev N et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **845** 330 (2017)
18. Bugaev V et al. *AIP Conf. Proc.* **1085** 834 (2008)
19. Sharma M et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **851** 125 (2017)
20. Ong R A *Phys. Rep.* **305** 93 (1998)

G.T. Zatsepin and birth of gamma-ray astronomy

A.S. Lidvansky

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation
E-mail: lidvansk@lebedev.ru*

The centenary of G.T. Zatsepin, a well-recognized authority in cosmic ray physics and nuclear and neutrino astrophysics, offers an opportunity both to retrospect the work he is well-known for and to take a look at some of his lesser known ideas, even to specialists. One example is his pioneering proposal to employ the Cherenkov emission from electromagnetic cascades in the upper atmosphere as a tool to search for local gamma-ray sources on the celestial sphere. First published by G.T. Zatsepin and A.E. Chudakov in 1961, the idea was immediately put into practice by the latter in constructing the world's first gamma-ray telescope in Crimea. Zatsepin and Chudakov's method is still today the basis for very high energy gamma-ray astronomy, with the number of discovered sources approaching two hundred. New grandiose projects that are currently underway in this rapidly developing field of astronomy hold promise for an order of magnitude increase in the sensitivity of the method.

Keywords: very high energy gamma-ray astronomy, extensive air showers, Cherenkov radiation

PACS numbers: **07.85. – m**, 29.40Ka, 95.55.Ka, 95.85.Pw

Bibliography — 20 references

Received 7 August 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (9) 1019–1024 (2018)

Physics–Uspekhi **61** (9) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038184>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.05.038184>