

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**СТЕРЕО-ПОДХОД КОМПЛЕКСА TAIGA К НАБЛЮДЕНИЯМ  
ГАММА-ИСТОЧНИКА В ТУМАННОСТИ DRAGONFLY**

Выполнил студент  
214м группы  
Разумов Александр Юрьевич

---

Научный руководитель  
д.ф-м.н., проф. Кузьмичёв Леонид Александрович

---

Допущена к защите \_\_\_\_\_

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

Москва  
2022

# Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>1 Литературный обзор</b> . . . . .	<b>3</b>
1.1 Космические лучи . . . . .	3
1.2 Черенковское излучение . . . . .	3
1.3 История развития черенковской гамма-астрономии . . . . .	4
1.3.1 Черенковское свечение атмосферы . . . . .	4
1.3.2 Первые опыты . . . . .	5
1.4 Первые успехи наземной гамма-астрономии . . . . .	6
1.4.1 Черенковские телескопы первого поколения . . . . .	6
1.4.2 Черенковские телескопы второго поколения . . . . .	7
<b>2 Алгоритм случайного леса</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>3 Эксперимент TAIGA</b> . . . . .	<b>9</b>
3.1 Основные сведения . . . . .	9
3.1.1 Географические сведения . . . . .	9
<b>4 Методика работы с данными</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>5 Обработка результатов</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>Выводы</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>12</b>

## **Введение**

Предваряющий текст введения, примерно на страницу-две просто о проблематике, в рамках которой поставлена задача, решённая в данной курсовой/дипломе.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Это сноска, делается командой \footnote{ }.

# Глава 1. Литературный обзор

## 1.1 Космические лучи

Космические лучи являются одним из источников информации о физических процессах, проходящих во Вселенной, и о свойствах межзвёздной среды. Прошло больше ста лет с проведения экспериментов Виктора Гесса, результатом которых было обнаружение роста ионизации воздуха с набираемой высотой. На основании этого, Гесс заключил, что из космоса идёт поток ионизирующего излучения, пронизывающий атмосферу Земли. Впоследствии Роберт Милликен предложил называть это излучение космическими лучами.

В настоящее время к космическим лучам относят заряженные субатомные частицы: протоны, электроны, тяжёлые ядра, галактического и внегалактического происхождения.

написать про космолучи

## 1.2 Черенковское излучение

Идея о том, что электрон, передвигаясь в прозрачной среде, будет вызывать излучение с коническим фронтом, была высказана ещё Оливером Хевисайдом ([ссылка](#)). Позже, к аналогичным результатам ([ссылка](#)) пришёл и Арнольд Зоммерфельд, делая расчёты движения заряда со скоростью выше скорости света в вакууме<sup>1</sup>.

Первое упоминание голубого свечения в экспериментах наблюдалось в работах Марии Склодовской-Кюри ([ссылка](#)), однако этому эффекту не было придано значение. Дж. Джелли указывает на то, что первыми систематическими наблюдениями этого эффекта можно считать исследования Маллета, проведённые ориентировочно в 1926–1928. ([ссылка на Джелли](#)). Им был, в частности, обнаружен непрерывный спектр излучения, что противоречило предположению Кюри о люминисцентной природе явления, но ключевые свойства излучения, такие как поляризация и анизотропия, не были им установлены.

---

<sup>1</sup>Необходимо помнить, что в это время скорость света не считалась принципиальным пределом скорости тел. Более того, движение такого заряда в среде с оптическим показателем преломления  $n$  давало решение, не противоречащее результатам СТО

П. А. Черенков, будучи аспирантом С. И. Вавилова, обнаружил неизвестное свечение голубоватого света в прозрачных жидкостях под воздействием  $\gamma$ -излучения солей урана в 1934 г (*ссылка*). Позже, в 1937 г., в работе И. Е. Тамма и И. М. Франка (*ссылка*) была объяснена природа явления, впоследствии названного излучением Вавилова-Черенкова. Согласно их теории, свет испускается средой, через которую проходит заряженная частица со скоростью, превышающей скорость света  $v = c/n$  в данной среде (где  $c$  — скорость света в вакууме, а  $n$  — коэффициент оптического преломления). Дальнейшие эксперименты показали, что:

- спектр излучения и интенсивность не зависят от чистоты вещества и температуры;
- излучение связано с движением электронов в среде;
- свет поляризован и направлен под небольшим углом к направлению пучка электронов;
- эффект имеет пороговый характер, так как не вызывается, например, электронами, рождёнными в веществе под действием рентгеновских лучей;
- спектр излучения непрерывен в излучаемом диапазоне длин волн.

В 1958 г. П. А. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк получили Нобелевскую Премию за открытие и истолкование эффекта Вавилова-Черенкова.

## 1.3 История развития черенковской гамма-астрономии

### 1.3.1 Черенковское свечение атмосферы

В 1948 г. Патрик Блакетт оценил (*ссылка*), что доля в  $10^{-4}$  всего света в ночном небе может приходиться на черенковское свечение, возникающее в атмосферных ливнях, порождённых космическими лучами. В 1952 г. Гэлбрейт и Джелли создали установку (*ссылка*), состоявшую из параболического зеркала диаметром 25 см и двух ФЭУ в фокусе зеркала. Раз в минуту «телескоп» срабатывал в совпадении с квадратным массивом из 16 счётчиков Гейгера-Мюллера, каждый из которых имел площадь  $200 \text{ см}^2$ . В результате эксперимента было установлено, что бо́льшая часть срабатываний установки на световой импульс напрямую коррелирует с регистрацией частиц ШАЛ. Спустя год установка была усовершенствована, а также стало возможным исследовать

поляризацию света. Было обнаружено, что в регистрируемых вспышках преобладала синяя часть спектра, что также играло роль в пользу гипотезы о черенковском свечении атмосферы.

В 1953–1955 гг командой под руководством А. Е. Чудакова проводились систематические измерения пространственного распределения черенковского излучения в горах Памира на высоте около 3800 м над уровнем моря (*ссылка*).

Успех обоих экспериментов и идея о том, что ШАЛ могут быть инициированы не только адронами, но и  $\gamma$ -квантами высоких энергий, стимулировали дальнейшие эксперименты по регистрации  $\gamma$ -излучения космического происхождения с помощью эффекта Вавилова-Черенкова.

### 1.3.2 Первые опыты

В 1958 г. Филип Моррисон предложил вести баллонные измерения (*ссылка*) потоков  $\gamma$ -квантов в энергетическом диапазоне 0,2–400 МэВ от возможных источников космических лучей, так как нейтральное  $\gamma$ -излучение не отклоняется межзвёздным магнитным полем. В качестве возможного источника  $\gamma$ -лучей Моррисон рассматривал Крабовидную туманность, предполагая, что в расширяющейся газовой оболочке туманности может быть множество радиоактивных элементов. По его оценке, можно зарегистрировать поток  $\gamma$ -лучей от  $^{226}\text{Ra}$  в  $10^{-2} \frac{1}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

В 1959 г. Джузеппе Коккони предложил (*ссылка*) конструкцию высокогорной установки по регистрации космических лучей и  $\gamma$ -квантов с ТэВ-ными энергиями с угловым разрешением в  $1^\circ$ . Также он выдвинул оптимистичное предположение о том, что поток  $\gamma$ -квантов от Крабовидной туманности может быть приблизительно в  $10^3$  выше фона. Даже в том случае, если его оценка оказывается слишком оптимистичной, он допускал, сигнал от Крабовидной туманности всё ещё может быть зарегистрирован на земле таким способом.

В 1960 г. была запущена система из 4 телескопов в на Крымском полуострове на берегу Чёрного моря в Кацивели, разработка велась командой А. Е. Чудакова. Позже число телескопов было увеличено до 12. Каждый телескоп представлял из себя параболическое зеркало диаметром 155 см и фокусным расстоянием 60 см; в фокус были помещены ФЭУ с диаметром 4,5 см. Выработка триггера для регистрации события происходила в случае четырёхкратного совпадения регистрации на четырёх телескопах. Средний темп счёта атмосферных событий был немного выше 3 Гц. В течение ночи каждые

7 минут шло сопровождение источника телескопом с точностью в  $0,2^\circ$  по наклонению и  $0,4^\circ$  по азимуту.

В то время не было никакого представления о пульсарах и их периодах, а также об источниках космического рентгеновского излучения, поэтому выбор источников для наблюдения был обусловлен надеждой на то, что источники радиоизлучения также могут быть и источниками  $\gamma$ -квантов. Внушительный список исследованных источников включает в себя Крабовидную туманность, Cygnus A, Cassiopeia A, Virgo A, Perseus A, Sagittarius A.

На сегодняшний момент нам известно, что интегральный поток  $\gamma$ -квантов от Крабовидной туманности с энергиями выше 4 ТэВ составляет приблизительно  $2,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{фотонов}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ , однако верхний предел потока, поставленный Чудаковым и командой, был в 20 раз выше этой величины при суммарном времени измерения Крабовидной туманности около 5,5 ч. Это означает, что для обнаружения значимого сигнала от источника им было необходимо было вести измерения в течение минимум 2200 ч.

Важным следствием отсутствия сигнала стала переоценка потока, заявленного ранее Коккони. Помимо этого, отсутствие сигнала посеяло сомнения в том, что электроны рождаются в туманности в результате столкновения протонов ( $pp \rightarrow \pi \rightarrow \mu \rightarrow e^-$ ). Это означало, что на самом деле электроны могли быть ускорены в туманности.

В последующие годы было проведено несколько экспериментов, в основном, масштаба меньшего, чем эксперимент, проведённый в Крыму. К ним можно причислить британские эксперименты в Организации по исследованию атомной энергии (*A. E. R. E. ссылка*) и исследования в обсерватории Mt. Hopkins (США *ссылка*).

## 1.4 Первые успехи наземной гамма-астрономии

### 1.4.1 Черенковские телескопы первого поколения

В конце 1960-х годов появились первые наблюдения, по результатам которого можно было утверждать наличие высокоэнергичного  $\gamma$ -излучения от точечных космических источников. Гамма-сигнал от Крабовидной туманности был зарегистрирован на телескопе Дублинской группы в долине Гленкаллен (D.J. Fegan et al., *ссылка*). Сперва телескоп состоял из двух посеребрённых зеркал диаметром 92 см, в фокусе каждого из которых был расположен ФЭУ,

обладающий полем зрения в  $5^\circ$ . Средний совместный темп счёт был около 1,7 Гц. На установке также велись наблюдения Cygnus A, M31 и некоторых иных источников. Уровень достоверности детектирования оказался ниже  $3\sigma$ . Совместно с установками *A. E. R. E.* после общей модификации наблюдались положительные избытки, не дававшие, тем не менее, надёжных результатов.

Каждая из перечисленных выше установок, также называемых *черенковскими телескопами первого поколения*, работала по принципу нахождения источника в поле зрения телескопа и фиксировала лишь факт черенковской вспышки. Эта вспышка почти наверняка была изначально инициирована адронном, и поток  $\gamma$ -излучения от источника вычислялся по превышению темпа счёта телескопа с источником в поле зрения над фоновым значением. Нельзя утверждать, что черенковским телескопам первого поколения удалось зарегистрировать источники космического излучения, однако были значительно уточнены оценки верхнего предела потока гамма-излучения.

#### ***1.4.2 Черенковские телескопы второго поколения***

Параллельно с проведением экспериментов упомянутых научных групп шла разработка иных методов детектирования сигнала. Начались длительные поиски решения одной из краеугольных задач наземной гамма-астрономии — проблемы режекции адронного фона.

Первым известным источником гамма-астрономии считается Крабовидная туманность, исследованная с помощью наземного черенковского телескопа Whipple в 1989 году (статья Weekes 1989). Телескоп состоял из зеркала диаметром 10 м и 37-пиксельной камеры с ФЭУ. После подавления изображений, связанных с адронным фоном был обнаружен сигнал  $\gamma$ -квантов со значимостью  $9\sigma$ , который соответствует потоку в  $1.8 \cdot 10^{-11} \frac{\text{фотонов}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$

Спустя три года был открыт второй источник гамма-квантов сверхвысоких энергий: блазар Маркарян-421 в созвездии Большой Медведицы. В это же время проектами HEGRA и CANGAROO был подтверждён сигнал от Крабовидной туманности.



## **Глава 2. Алгоритм случайного леса**

## Глава 3. Эксперимент TAIGA

### 3.1 Основные сведения

#### 3.1.1 Географические сведения

Тункинская долина располагается в Республике Бурятия и является продолжением на запад Байкальской рифтовой системы. Находится на  $51^{\circ}$  с. ш.. С севера долина ограничена Тункинскими гольцами, с юга — хребтом Хамар-Дабан, с запада — Большим Саяном. Изоляция долины системой хребтов создала прекрасный астроклимат, что привлекло сюда множество астрономических проектов. По данным сервиса *MeteoBlue* (<https://www.meteoblue.com/ru/>) в год здесь бывает около 300 солнечных дней. Резкий континентальный сухой климат также этому способствует, хотя влажность повышается за счёт протекания реки Иркут. В августе и сентябре нередки туманы, приводящие к сильному ограничению видимости.

Важно упомянуть о повышенной сейсмической активности региона в силу того, что он находится на глубинном разломе земной коры. Это негативно сказывается на работе прецизионной научной аппаратуры, однако за последние годы крупных разрушений не происходило.

Тункинский астрофизический комплекс, в состав которого входит гамма-обсерватория TAIGA (*Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy*), располагается в Тункинской долине вблизи села Торы на высоте 678 м над уровнем моря. С 1993 г. комплекс является центром изучения космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода ШАЛ. На полигоне была создана установка Тунка-25, с помощью которой были получены важные результаты по методике восстановления ШАЛ и по структуре спектра космических лучей в районе излома (*ссылка*). В 2009 г. установка была расширена до 175 оптических станций, регистрирующих атмосферное черенковское излучение.

С 2013 г. на полигоне ведётся строительство обсерватории TAIGA, в состав которой входят три телескопа TAIGA-IACST (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope), широкоугольная черенковская установка TAIGA-HiSCORE (*High Sensivity COsmic Rays and gamma Explorer*), а также сцинтилляционная установка TAIGA-Muon.

## **Глава 4. Методика работы с данными**

## **Глава 5. Обработка результатов**

## **Выводы**

## Литература

1. *Buchmüller W., Lüdeling C.* Field Theory and Standard Model. — 2006. — Сент. — DOI: 10.5170/CERN-2006-014.1. — URL: <https://cds.cern.ch/record/984122>.
2. Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm / B. Abi [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2021. — Апр. — Т. 126, вып. 14. — С. 141801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.141801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.126.141801>.
3. Test of lepton universality in beauty-quark decays / R. Aaij [и др.] // arXiv preprint arXiv:2103.11769. — 2021.
4. *Langacker P.* The Standard Model and Beyond. — CRC Press, 06.2017. — DOI: 10.1201/b22175. — URL: <https://doi.org/10.1201/b22175>.
5. *Д.С. Горбунов В. Р.* Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. — М.: Издательство ЛКИ, 2008.
6. *Fukugita M., Yanagida T.* Resurrection of grand unified theory baryogenesis // *Physical review letters.* — 2002. — Т. 89, № 13. — С. 131602.
7. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos / Y. Fukuda [и др.] // *Physical Review Letters.* — 1998. — Т. 81, № 8. — С. 1562.
8. Measurement of the Total Active B 8 Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity / S. Ahmed [и др.] // *Physical review letters.* — 2004. — Т. 92, № 18. — С. 181301.
9. High Sensitivity Search for  $\nu e$ 's from the Sun and Other Sources at KamLAND / K. Eguchi [и др.] // *Physical review letters.* — 2004. — Т. 92, № 7. — С. 071301.
10. Review of Particle Physics / M. Tanabashi [и др.] // *Phys. Rev. D.* — 2018. — Авг. — Т. 98, вып. 3. — С. 030001. — DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.98.030001>.
11. *Ramond P.* The family group in grand unified theories // SEESAW 25. — World Scientific, 2005. — С. 265—280.
12. *Asaka T., Blanchet S., Shaposhnikov M.* The  $\nu$ MSM, dark matter and neutrino masses // *Physics Letters B.* — 2005. — Т. 631, № 4. — С. 151—156.

13. *Zwicky F.* On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae // *apj*. — 1937. — ОКТ. — Т. 86. — С. 217. — DOI: 10.1086/143864.
14. *Garrett K., Duda G.* Dark matter: A primer // *Advances in Astronomy*. — 2011. — Т. 2011.
15. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological parameter results / G. Hinshaw [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2013. — Т. 208, № 2. — С. 19.
16. Planck 2018 results-VI. Cosmological parameters / N. Aghanim [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — Т. 641. — A6.
17. *Giagu S.* WIMP Dark matter searches with the ATLAS detector at the LHC // *Frontiers in Physics*. — 2019. — Май. — Т. 7. — С. 75. — DOI: 10.3389/fphy.2019.00075.
18. *Bergström L.* Dark matter candidates // *New Journal of Physics*. — 2009. — ОКТ. — Т. 11, № 10. — С. 105006. — DOI: 10.1088/1367-2630/11/10/105006. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/10/105006>.
19. Feebly-interacting particles: FIPs 2020 workshop report / P. Agrawal [и др.] // *The European Physical Journal C*. — 2021. — Т. 81, № 11. — С. 1—137.
20. Physics beyond colliders at CERN: beyond the standard model working group report / J. Beacham [и др.] // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2019. — Т. 47, № 1. — С. 010501.
21. *Foreman-Mackey D.* corner.py: Scatterplot matrices in Python // *The Journal of Open Source Software*. — 2016. — ИЮНЬ. — Т. 1, № 2. — С. 24. — DOI: 10.21105/joss.00024.