

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.А. ЧЕРЕНКОВА

Черенковское излучение: от открытия до создания и применения черенковских детекторов

Ю.А. Башмаков

Обсуждается история открытия эффекта Черенкова. Описываются первые эксперименты по наблюдению черенковского излучения на ускорителях заряженных частиц и в космических лучах. Приводится качественная картина формирования излучения. Кратко рассматриваются типы черенковских детекторов и их применение в физике высоких энергий.

Ключевые слова: черенковское излучение, черенковские детекторы, ускорители заряженных частиц, космические лучи, классическая электродинамика, электрон, протон

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65. + g**, 29.40.Ka, 41.60.Bq

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505f.0502

Содержание

1. Введение (502).
2. Открытие эффекта (503).
3. Исторический ландшафт (503).
4. Пространственная асимметрия — направленность излучения (503).
5. Качественная картина формирования излучения (504).
6. Экспериментальное исследование свойств излучения (505).
7. Заключение. Основные типы черенковских счётчиков и их применение (506).

Список литературы (506).

1. Введение

В 1932 году П.А. Черенков поступил в аспирантуру Физико-математического института им. В.А. Стеклова к С.И. Вавилову. Институт в то время находился в Ленинграде. Двумя годами позднее, в 1934 г., на его основе был образован Физический институт Академии наук СССР им. П.Н. Лебедева (ФИАН), в котором П.А. Черенков проработал до последних дней своей жизни. С.И. Вавилов, основоположник школы физической оптики в Советском Союзе, продолжатель традиций, заложенных П.Н. Лебедевым, к тому времени уже был широко известным учёным благодаря своим фундаментальным работам по исследованию люминесценции и квантовой природы света. Следует также отметить широкий научный кругозор С.И. Вавилова, который нашёл, в частно-

сти, отражение в целом ряде его работ принципиального характера, опубликованных в журнале *Успехи физических наук (УФН)* в 1920-е годы.

Как вспоминает П.А. Черенков в статье "На пороге открытия" [1], к сожалению, оставшейся малозамеченной, в качестве диссертационной работы ему было предложено провести изучение люминесценции растворов ураниловых солей под действием γ -лучей. Напомним, что, согласно [2], С.И. Вавилов предложил определять люминесценцию как свечение, представляющее собой избыток над температурным (тепловым) излучением при условии, что такое избыточное излучение обладает длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Отметим в качестве курьёза, что в популярном учебном пособии [2] параграф "Излучение Вавилова – Черенкова" помещён в главу "Фотолюминесценция" как раз следом за приведённым выше определением понятия люминесценции.

Предложенная С.И. Вавиловым схема постановки эксперимента была довольно типичной для того времени, когда быстрые частицы получались исключительно от радиоактивных источников. Уникальность рассматриваемых опытов состояла в том, что была предпринята попытка наблюдения оптического излучения с характерными энергиями фотонов атомного масштаба (порядка нескольких электронвольт), вызываемого действием частиц с высокой (около 1 МэВ) энергией. Такой подход через много лет получит развитие при создании источников электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне, от терагерцевой до рентгеновской области, на основе релятивистских пучков электронов с энергией в несколько десятков или сотен МэВ. П.А. Черенков принимал активное участие [3] в разработке этих методов.

Отметим, что в последние годы в результате значительного прогресса лазерных технологий появилась

Ю.А. Башмаков. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" (Московский инженерно-физический институт), Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Российская Федерация
E-mail: bashm@x4u.lebedev.ru

Статья поступила 29 января 2015 г.

принципиально новая возможность осуществления ядерных реакций при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом в результате поглощения веществом большого числа оптических лазерных фотонов [4].

2. Открытие эффекта

П.А.Черенков в своей первой, ставшей классической, статье "Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации" [5] показал, что для всех без исключения чистых жидкостей наблюдается свечение, которое сосредоточено в сине-фиолетовой части спектра. Источником γ -лучей служил препарат радия. Исследуемые жидкости наливались в платиновые сосуды, имеющие форму напёрстка, но несколько большего размера: их средний диаметр составлял 3 см. Причём радий мог помещаться как под дно сосуда, так и в щель, параллельную оси сосуда. Забегая вперёд, можно было бы предположить, что вследствие разности длины путей, проходимых γ -радиацией в этих двух случаях, должны заметно различаться и соответствующие им значения интенсивности свечения. Открытый торец сосуда просматривался с помощью оптической системы. В качестве детектора излучения служил человеческий глаз. Свечение чистого растворителя было очень слабым. Для его фиксации требовалась феноменальная зоркость наблюдателя. Гораздо позднее П.А. Черенков проводил параллель между своими первыми опытами и исследованиями Резерфорда по рассеянию α -частиц, в которых детектором сцинтилляций также служил человеческий глаз.

Была исследована поляризация наблюдаемого света. Свечение оказалось частично поляризованным. Измерения поляризации контролировались опытами по наблюдению свечения растворов ураниловых солей, испускающих неполяризованный свет. При выборе оптимальных условий опыта степень линейной поляризации составляла чуть более 20 %, причём преимущественная плоскость электрического вектора была параллельна направлению распространения γ -лучей.

Для "выяснения роли жёсткости возбуждающей радиации" были выполнены опыты с рентгеновскими лучами. Использовалась рентгеновская трубка с ускоряющим напряжением 32–34 кВ. Эксперименты подобного типа с рентгеновскими лучами проводились и гораздо ранее. С результатами одной из работ [6] по исследованию рентгеновской флуоресценции некоторых органических соединений, выполненной в 1920 г., П.А. Черенков сравнивает свои результаты: "Оказалось, что большинство жидкостей свечения не обнаруживает". Это обстоятельство, которое в неявной форме фактически указывает на пороговый характер эффекта, П.А. Черенков особо отмечает в своей Нобелевской лекции [7].

Отметим, что в качестве единственной количественной характеристики, отличающей вещества, излучение которых исследовалось, в [5] приводится относительное число электронов в единице объёма n_e^{lq} . Эта величина лежит в диапазоне от 41 до 104, причём для большинства жидкостей она попадает в узкий интервал, от 41 до 50. С.И. Вавилов в статье [8], опубликованной в том же номере журнала сразу же вслед за статьёй [5], после детального анализа опытов П.А. Черенкова выдвигает гипотезу о причинах возникновения эффекта: "Наиболее

вероятной причиной γ -свечения мы считаем излучение при торможении комптоновских электронов". В качестве подтверждения своей теории он ссылается, в частности, на то, что для различных жидкостей величины n_e^{lq} мало различаются. Предположение о том, что эффект вызывается быстрыми электронами, в дальнейшем нашло экспериментальное подтверждение. Однако в заключение сделано предсказание: " γ -свечение может наблюдаться, вероятно, только в прозрачных жидкостях". Это предположение находится в явном противоречии с результатами последовавших вскоре экспериментов.

3. Исторический ландшафт

Рассмотрим "исторический ландшафт", сопутствовавший открытию. По общему мнению, 1932 год был замечательным годом в истории развития современной физики. Иногда его называют даже "годом чудес" в физике атомного ядра и элементарных частиц [9]. Действительно, в этом году были открыты нейтрон и позитрон. Вслед за открытием позитрона в космических лучах в 1933 г. были обнаружены электрон-позитронные (электромагнитные) ливни. В дальнейшем эти ливни сыграют значительную роль в черенковских счётчиках полного поглощения. В 1934 г. будет развита теория радиационных потерь энергии электроном при его движении в веществе.

Вместе с тем следует отметить отсутствие источников релятивистских электронов и тем более протонов. Методы наблюдения за частицами также были весьма ограниченными. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) к тому времени ещё не был разработан. Однако именно в эти годы наметился существенный прогресс в развитии ускорителей заряженных частиц. Всё в том же 1932 г. Дж. Кокрофт и Э.У. Уолтон сконструировали каскадный генератор, позволивший ускорять протоны до кинетической энергии 700 кэВ. Была осуществлена первая ядерная реакция с использованием искусственно ускоренных протонов. В 1934 г. Э. Лоуренс, модифицировав схему линейного резонансного ускорителя, предложенного Р. Видером, запатентовал конструкцию циклотрона — первого резонансного циклического ускорителя с постоянным во времени и однородным магнитным полем [10]. Вскоре будут построены первые циклотроны.

С.И. Вавилов внимательно следил за развитием ядерной физики за рубежом. Примерно в это же время им с целью исследования возможности постройки большого циклотрона была образована так называемая циклотронная группа, в которую наряду с другими молодыми физиками ФИАНа вошёл и П.А. Черенков. Многие из них впоследствии стали известными учёными. Однако до открытия В.И. Векслером — одним из членов циклотронной группы — принципа автофазировки оставалось ещё целых десять лет.

4. Пространственная асимметрия — направленность излучения

В первых опытах, выполненных П.А. Черенковым, имела возможность изменения и чёткого регулирования лишь параметров жидкостей, свечение которых исследовалось. Сравнительной доступностью этих опытов, вероятно, и определяется большое (около 20) число исследованных жидкостей. Кроме того, геометрия



Павел Алексеевич Черенков (1950 г.). Фотография любезно предоставлена Е.П. Черенковой.

металлического сосуда позволяла проводить исследование свечения, равномерно распределённого по объёму жидкости и изотропного. Что касается источника возбуждения, то не были с достаточной точностью известны не только энергетический спектр и геометрические характеристики пучка, но и сам тип частиц: фотоны или электроны.

Очевидно, что, как и в опытах, приведших к открытию нейтрона, для того чтобы ответить на вопрос о том, вызывается ли эффект заряженными или нейтральными частицами, необходимо было использовать магнитное поле, что и было сделано П.А. Черенковым [11]. В последующих работах он описывает более тонкие эксперименты. В этих опытах была реализована аксиально-симметричная геометрия [18]. Прозрачный тонкостенный цилиндрический сосуд с жидкостью был окружён зеркалом, выполненным в виде перевёрнутого усечённого конуса. Сверху сосуд закрывался непрозрачной для света крышкой. Радиоактивный источник располагался вне зеркала. На современном языке такую геометрию, пожалуй, можно было бы назвать 2π -геометрией: она позволяла беспрепятственно наблюдать излучение, распространяющееся во всех направлениях в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. Пространственное распределение свечения могло не только наблюдаться визуально, но и фотографироваться. В результате проведённых исследований было обнаружено наиболее замечательное свойство излучения, радикально отличавшее его от всех известных к тому времени видов излучения, — его пространственная асимметрия.

В дальнейшем было подробно исследовано угловое распределение излучения. По мнению П.А. Черенкова [1], открытие пространственной асимметрии имело решающее значение для построения И.Е. Таммом и И.М. Франком теории нового явления [13].

П.А. Черенков в лекциях в Московском инженерно-физическом институте (МИФИ), где он преподавал более 30 лет, рассказывая студентам об эффекте, носящем его имя, всегда называл его не иначе как излучение электронов (или частиц), движущихся в веществе со сверхсветовой скоростью, что фактически повторяет название его знаменитой статьи "Visible Radiation Produced by Electron Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light" [18].

5. Качественная картина формирования излучения

Рассмотрим обсуждаемый эффект качественно. Как известно, в рамках классической электродинамики электромагнитное поле точечного, равномерно движущегося в вакууме заряда, если его скорость близка к скорости света, имеет форму, близкую к форме плоского диска. Плоскость диска нормальна к направлению движения заряда. Очевидно, что распределение поля аксиально-симметрично относительно вектора скорости частицы $\mathbf{v}$ и симметрично относительно медианной плоскости диска. Такое распределение поля может быть заменено набором плоских электромагнитных волн, на чём основан метод эквивалентных (виртуальных) фотонов. В этом приближении волновой вектор каждого виртуального фотона $\mathbf{k}$ параллелен $\mathbf{v}$: фотон как бы сопровождает частицу. Поперечная составляющая волнового вектора $k_{\perp}$ равна нулю. Если частица движется в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, то очевидно, что поле перед зарядом будет практически отсутствовать (на это обстоятельство обращал внимание ещё О. Хевисайд [12] в 1889 г.). Аксиальная симметрия сохраняется. Однако диск преобразуется в конусообразное тело, по форме напоминающее волан для игры в бадминтон. В представлении художника, оформлявшего Нобелевский диплом П.А. Черенкова, это выглядит, как показано на рис. 1. При разложении такого поля в "виртуальные фотоны" $k_{\perp} \neq 0$ и фотоны будут "убегать" от частицы.

Отметим, что распределение поля, аналогичное показанному на рис. 1, называется кильватерным (wake field) и оно встречается при рассмотрении движения быстрых заряженных частиц и ступков в различных средах, например в плазме.

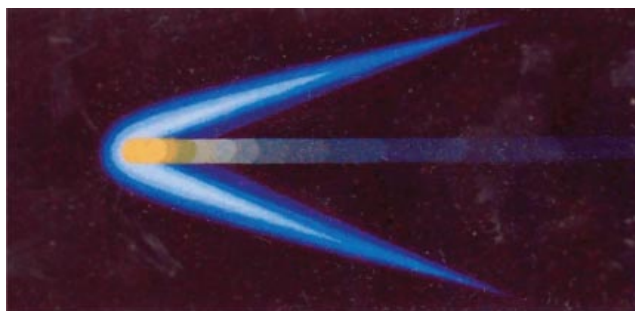


Рис. 1. Качественная картина формирования черенковского конуса.

Качественно черенковское излучение может быть рассмотрено и на квантовом языке. Поскольку "масса" фотона в среде отлична от нуля, законы сохранения энергии и импульса не запрещают испускания таких фотонов "свободным" зарядом. Простое кинематическое рассмотрение с учётом свойств среды даёт для угла испускания фотона значение, практически совпадающее с классическим.

Количественная теория эффекта Черенкова в рамках классической электродинамики была разработана И.Е. Таммом и И.М. Франком [13]. Они показали, что заряд Ze , движущийся в среде с показателем преломления n_ω со скоростью $v = \beta c$, превышающей фазовую скорость света в этой среде, испускает N квантов на 1 см пути в спектральный интервал $d\omega$:

$$N(\omega) d\omega = \frac{2\pi Z^2 e^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n_\omega^2}\right) d\omega. \quad (1)$$

Излучение на заданной частоте распространяется под черенковским углом, определяемым выражением

$$\cos \theta_\omega = \frac{1}{\beta n_\omega}. \quad (2)$$

Очевидно, что излучение возникает только тогда, когда скорость частицы превышает своё пороговое значение: $\beta n_\omega > 1$.

В ряде работ [12, 14–17] отмечается, что соотношение (2) впервые было получено О. Хевисайдом в 1888 г. Однако следует иметь в виду, что его рассмотрение было проведено в рамках теории эфира для гипотетического заряда. Электрон был открыт только в 1898 г. Как отмечает П.А. Черенков [1], работы Хевисайда не стимулировали постановку какого бы то ни было эксперимента и оказались надолго забытыми.

6. Экспериментальное исследование свойств излучения

Первые эксперименты с прямыми монохроматическими и узконаправленными пучками заряженных частиц были выполнены в 1938 г. Эти опыты, которые были стимулированы, по признанию их авторов, экспериментальными работами П.А. Черенкова и теоретической работой И.Е. Тамма и И.М. Франка, ставили своей целью количественную проверку теории. В [19] использовались электроны с энергией 2 МэВ, полученные от электростатического генератора. Для отклонения излучавшегося света от траектории электронов, как и в опытах П.А. Черенкова, использовалось коническое зеркало. Было показано, что для целого ряда жидкостей и твёрдых тел направление испускания излучения точно описывается соотношением $\cos \theta = 1/(\beta n)$. Для всех жидкостей и твёрдых тел излучение характеризуется непрерывным спектром, который простирается с возрастающей интенсивностью от инфракрасной области до ультрафиолетового края поглощения света в данной среде. Грубые измерения показали, что электрон с энергией 1,9 МэВ до полной остановки в воде в интервале от 4000 Å до 6700 Å испускает около 40 квантов.

Отметим, что в наше время характерное голубоватое свечение воды наблюдается в водяных атомных реакторах. Это свечение свидетельствует о наличии быстрых

электронов, возникающих в результате деления продуктов распада, и оно может быть использовано для контроля за работой самого реактора или для наблюдения за остаточной радиоактивностью отработанных стержней.

Первые наблюдения излучения не от электронов, а от других частиц были выполнены [20] только в 1951 г. Использовался пучок релятивистских протонов ($\beta = 0,68$), выведенных с помощью электростатического дефлектора из 184-дюймового (диаметр круговых магнитных полюсов) синхротрона (фазотрона) Калифорнийского университета в Беркли (США). Этот синхротрон на начальном этапе своей работы ускорял протоны до кинетической энергии, не превышающей 350 МэВ. Поэтому, чтобы достичь порога возникновения излучения, использовались материалы с большим показателем преломления. Свет детектировался фотографическим методом. Эти опыты показали, что излучение не зависит от массы частицы. Более того, чем тяжелее частица, тем менее она подвержена многократному рассеянию и потерям энергии в веществе, что позволяет более подробно исследовать свойство направленности излучения.

На рисунке 2 показано черенковское кольцо, излучаемое протонами высокой энергии в стеклянной пластинке, расположенной перед экраном. Следует обратить внимание на малую толщину кольца. В центре изображения находится пятно, оставленное протонами пучка, пересекающими экран.

После успешных опытов по наблюдению и исследованию основных свойств черенковского излучения на электронных и протонных ускорителях естественно было перейти к экспериментам с космическими лучами. Космические лучи доставляют на Землю частицы разных сортов с очень высокими энергиями. В [22] было установлено черенковское излучение от мезонов, входящих в состав космических лучей. Как и в опытах

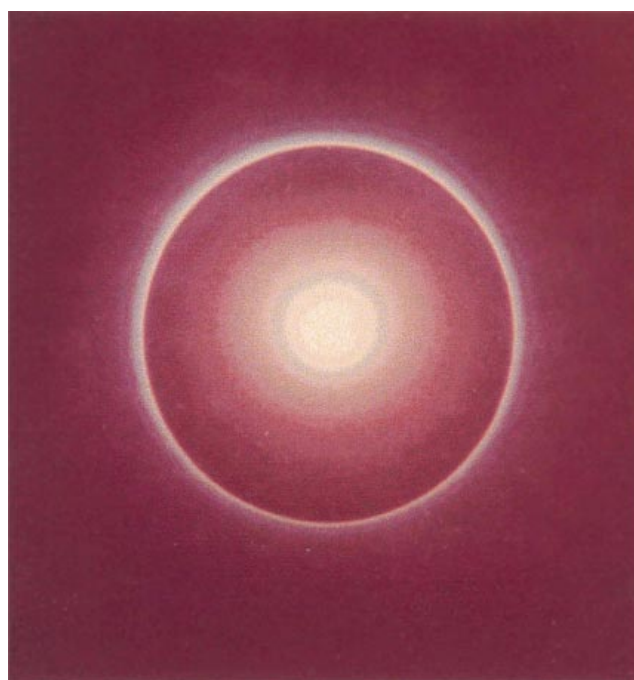


Рис. 2. Черенковское кольцо от протонного пучка. Фотография сделана В.П. Зреловым [21].

П.А. Черенкова, в качестве мишени использовалась дистиллированная вода. Световые импульсы наблюдались с помощью фотоэлектронного умножителя. Наблюдение черенковского излучения, сопровождающего прохождение космических лучей через атмосферу, описывается в [23]. Авторы статьи [23] направили в ночное небо зеркало и с помощью фотоумножителя зафиксировали короткие световые импульсы, коррелирующие с регистрацией отдельной частицы в космических лучах.

7. Заключение. Основные типы черенковских счётчиков и их применение

Уникальная зависимость свойств черенковского излучения от параметров частицы делает весьма привлекательным его использование для детектирования элементарных частиц. Наибольшей наглядностью отличается принцип действия черенковских детекторов с регистрацией колец излучения, так называемых RICH (Ring Imaging Cherenkov detectors) [24]. Этот тип детекторов был разработан гораздо позднее, чем остальные черенковские детекторы. Принцип действия таких детекторов основан на визуализации и последующей компьютерной обработке изображения кольца черенковского излучения (см. рис. 2). Изображение кольца может формироваться с помощью детектирования и локализации ультрафиолетовых фотонов с использованием либо многопроволочных ионизационных камер, либо годоскопических и малогабаритных фотоэлектронных умножителей. В соответствии с методом считывания сигнала детекторы этого типа разделяются на несколько групп. RICH может быть использован для идентификации адронов с большим поперечным импульсом как на ускорителях с неподвижной мишенью, так и на установках со встречными пучками — коллайдерах.

Среди остальных видов черенковских детекторов отметим следующие: газовые черенковские счётчики, черенковские спектрометры полного поглощения, годоскопические черенковские счётчики, позиционно чувствительные черенковские счётчики с оптическими волокнами. Характерной особенностью газовых черенковских счётчиков является возможность изменения энергетического порога регистрации частицы посредством изменения давления. Большой интерес представляют разработка и использование аэрогельных черенковских счётчиков.

В качестве одного из первых и наиболее ярких примеров применения черенковских счётчиков в физике высоких энергий укажем на ту важную роль, которую сыграло их использование в экспериментах, в результате которых был открыт антипротон [25]. Вскоре после этого, в 1958 г., И.Е. Тамм, И.М. Франк и П.А. Черенков были удостоены Нобелевской премии по физике.

Автор признателен Е.П. Черенковой, инициировавшей настоящий доклад и предоставившей ряд материалов из личного архива П.А. Черенкова, и В.С. Дюбкову за помощь в подготовке презентации.

Список литературы

1. Cherenkov P A *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **248** 1 (1986)
2. Ландсберг Г С *Оптика* (М.: Наука, 1976)
3. Алферов Д Ф, Башмаков Ю А, Черенков П А *УФН* **157** 389 (1989); Alferov D F, Bashmakov Yu A, Cherenkov P A *Sov. Phys. Usp.* **32** 200 (1989)
4. Di Piazza A et al. *Rev. Mod. Phys.* **84** 1177 (2012)
5. Черенков П А *ДАН СССР* **2** 451 (1934); Cherenkov P A *C.R. Acad. Sci. USSR* **2** 451 (1934); Черенков П А *УФН* **93** 385 (1967)
6. Newcomer H S *J. Am. Chem. Soc.* **42** 1997 (1920)
7. Cherenkov P A *Science* **131** 136 (1960)
8. Вавилов С И *ДАН СССР* **2** 457 (1934); Vavilov S I *C.R. Acad. Sci. USSR* **2** 457 (1934); Вавилов С И *УФН* **93** 383 (1967)
9. Вейнер Ч *УФН* **112** 129 (1974); Weiner C *Phys. Today* **25** (5) 40 (1972)
10. Лоуренс Е О, Куксей Д *УФН* **13** 527 (1937); Lawrence E O, Cooksey D *Phys. Rev.* **50** 1131 (1936)
11. Черенков П А *ДАН СССР* **12** 413 (1936); Cherenkov P A *C.R. Acad. Sci. USSR* **12** 413 (1937)
12. Тяпкин А А *УФН* **112** 735 (1974); Tyapkin A A *Sov. Phys. Usp.* **17** 288 (1974)
13. Тамм И Е, Франк И М *ДАН СССР* **14** 107 (1937); Tamm I E, Frank I M *C.R. Acad. Sci. USSR* **14** 107 (1937); Тамм И Е, Франк И М *УФН* **93** 388 (1967)
14. Kaiser T R *Nature* **247** 400 (1974)
15. Govorkov B B *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **553** 9 (2005)
16. Болотовский Б М *УФН* **179** 1161 (2009); Bolotovskii B M *Phys. Usp.* **52** 1099 (2009)
17. Ershkovich A, Israelevich P *Phys. Today* **66** (8) 8 (2013)
18. Čerenkov P A *Phys. Rev.* **52** 378 (1937)
19. Collins G B, Reiling V G *Phys. Rev.* **54** 499 (1938)
20. Mather R L *Phys. Rev.* **84** 181 (1951)
21. Зрелов В П *Излучение Вавилова – Черенкова и его применение в физике высоких энергий* (М.: Атомиздат, 1968); Zrelov V P *Cherenkov Radiation in High-Energy Physics* (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1970)
22. Jelley J V *Proc. Phys. Soc. A* **64** 82 (1951)
23. Galbraith W, Jelley J V *Nature* **171** 349 (1953)
24. Seguinot J, Ypsilantis T *Nucl. Instrum. Meth.* **142** 377 (1977)
25. Chamberlain O, Segrè E, Wiegand C, Ypsilantis T *Phys. Rev.* **100** 947 (1955); Чемберлен О, Сергэ Э, Виганд К, Ипсилантис Т *УФН* **58** 685 (1956)

Cherenkov radiation: from discovery to RICH

Yu.A. Bashmakov

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse 31, 115409 Moscow, Russian Federation
E-mail: bashm@x4u.lebedev.ru*

The history of the discovery of the Cherenkov radiation is reviewed. Its early observations at particle accelerators and in cosmic rays are described and how it forms is qualitatively discussed. The types and high energy physics applications of Cherenkov detectors are briefly described.

Keywords: Cherenkov radiation, Cherenkov detectors, particle accelerators, cosmic rays, classical electrodynamics, electron, proton

PACS numbers: 01.30.Bb, **01.65. + g**, 29.40.Ka, 41.60.Bq

Bibliography — 25 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 502 – 506 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505f.0502

Received 29 January 2015

Physics – Uspekhi **58** (5) (2015)