

RADIATION OF FASTER
THAN LIGHT PARTICLES
(CHERENKOV EFFECT)

S. P. DENISOV

The history of the discovery and main properties of Cherenkov radiation are outlined. Modern applications of Cherenkov detectors in experiments in accelerators and with cosmic rays are discussed.

В статье рассмотрены история открытия, объяснение и основные свойства излучения Черенкова. Обсуждены современные применения детекторов черенковского излучения в экспериментах на ускорителях и с космическими лучами.

© Денисов С.П., 1996

**ИЗЛУЧЕНИЕ “СВЕРХСВЕТОВЫХ”
ЧАСТИЦ (ЭФФЕКТ ЧЕРЕНКОВА)**

С. П. ДЕНИСОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

В 1934 году экспериментально обнаружено, а в 1937 году теоретически объяснено одно из красивейших физических явлений – свечение, вызываемое заряженной частицей, которая движется в среде с постоянной скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде. В статье это явление называется по имени первооткрывателя излучением Черенкова, как это принято в зарубежной литературе. В отечественных публикациях его часто называют излучением Вавилова–Черенкова, поскольку Сергей Иванович Вавилов играл активную роль в опытах, проводимых Павлом Алексеевичем Черенковым. Сергей Иванович предложил тему исследований и постоянно интересовался результатами эксперимента.

История открытия эффекта Черенкова, описанная в разделе 2, весьма интересна и поучительна, в первую очередь для молодых ученых. В разделе 3 даны три простых объяснения возникновения излучения Черенкова. Два из них основаны на законах классической волновой оптики – теории интерференции и принципе Гюйгенса, третье – на квантово-корпускулярных представлениях об излучении. В разделе 4 рассмотрены принципы действия и современные применения детекторов черенковского излучения для регистрации элементарных частиц в экспериментах в физике высоких энергий, космических лучах и астрофизике.

Для активных читателей статья сопровождается задачами. Самостоятельное их решение позволит глубже понять излагаемый материал.

Для тех, кто заинтересуется излучением Черенкова и захочет получить о нем больше сведений, в Заключение приведены ссылки на книги как научно-популярные, так и специальные.

В качестве единицы энергии используются электронвольт (эВ), равный энергии, приобретаемой электроном при прохождении разности потенциалов 1 вольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ джоулей), а также производные: $1 \text{ КэВ} = 10^3 \text{ эВ}$, $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$, $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ и $1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$.

2. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ

В начале 30-х годов молодой аспирант Павел Алексеевич Черенков начал изучать люминесценцию растворов солей урана, облучаемых γ -квантами

от радиоактивного источника, содержащего несколько десятых долей грамма радия. Его руководителем был известный в то время специалист по люминесценции Сергей Иванович Вавилов. Люминесценция — это “холодное” свечение вещества под действием внешнего облучения (например, ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами), представляющее собой избыток над тепловым излучением и имеющее длительность, значительно превышающую период световых колебаний. Механизм люминесценции заключается в возбуждении атомов вещества внешним источником и испускании ими света при переходе в основное состояние. Время жизни атома в возбужденном состоянии может быть очень малым (миллиардные доли секунды) или очень большим (несколько часов), но оно всегда конечно. Ко времени опытов Черенкова основные закономерности люминесценции были установлены. Они сводились к следующему:

— интенсивность и спектральный состав люминесценции зависят от типа вещества, его чистоты и температуры;

— излучение происходит изотропно (равномерно во все стороны);

— даже малые примеси некоторых веществ могут заметно уменьшить интенсивность люминесценции (так называемый эффект “тушения”, связанный с конечным временем жизни атома в возбужденном состоянии и возможностью передать за это время энергию возбуждения молекуле примеси, а не излучить ее в виде фотона).

В результате весьма трудных и детальных исследований, продолжавшихся несколько лет, Черенкову удалось доказать, что наряду с люминесценцией при облучении всех использованных в опыте жидкостей некоторыми радиоактивными β - и γ -источниками появляется совершенно новый тип свечения, многие характеристики которого прямо противоположны свойствам люминесценции, а именно:

— интенсивность и спектр излучения почти не зависят от типа вещества, его чистоты и температуры;

— излучение связано с движением в среде электронов (это было установлено в специальных опытах, в которых сосуд с исследуемой жидкостью помещали в магнитное поле);

— излучение поляризовано и направлено вдоль пучка электронов;

— излучение имеет сплошной спектр, максимум интенсивности приходится на синюю часть спектра;

— излучение имеет пороговый характер; оно не вызывается, например, рентгеновскими лучами с максимальной энергией 30 КэВ.

Основные проблемы в исследованиях Черенкова были связаны с тем, что новое свечение оказалось очень слабым. Это сейчас существуют фотоумножители, позволяющие регистрировать отдельные

фотоны, а в 30-х годах наиболее чувствительным детектором света был человеческий глаз. Чтобы заметить свечение даже с очень мощным по тем временам радиоактивным источником, Черенков по часу — полтора адаптировался в полной темноте. За это время чувствительность глаз возрастала в десятки тысяч раз, и можно было наблюдать весьма слабое свечение. Чтобы не вносить в результаты измерений ошибок, связанных с быстрым утомлением глаз, приходилось часто отдыхать, так что общая продолжительность измерений не превышала 2,5 часов в сутки. За три года Черенков провел десятки тончайших опытов. К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет сколько-нибудь подробно описать их.

Первая работа с новыми результатами была опубликована в 1934 году в журнале “Доклады Академии наук СССР” и была воспринята... неоднозначно. Вспоминая этот период своей жизни в лекции на семинаре “Черенковские детекторы и их применение в науке и технике”, посвященном своему восьмидесятилетию и пятидесятилетию открытия эффекта, названного его именем, Павел Алексеевич Черенков говорил:

Возвращаясь к прошлому, могу сказать, что мне не доставляло особого удовольствия узнавать, что мои эксперименты подчас квалифицировались как занятие спиритизмом, часто проводилась параллель с ошибочным эффектом, закрытым Вудом, пресловутыми N-лучами Блондло. Правда, иногда были приятные исключения. Я до сих пор с большим удовольствием вспоминаю восклицание крупнейшего ученого этой эпохи Н. Бора “Wunderbar, Wunderschon!”, повторенное несколько раз после того, как мною было ему показано одно из самых существенных свойств излучения — его пространственная асимметрия. Тем не менее атмосфера недоверия к новому эффекту со стороны научной общественности продолжала сохраняться. Наиболее открытым и резким проявлением этого недоверия был отказ журнала “Nature” опубликовать посланную мною краткую статью с изложением сути явления и его основных свойств...

Увы, как это ни странно, приходится признать, что консерватизм ученых подчас очень силен, и история открытия черенковского излучения не единственное тому подтверждение.

Забегая вперед, скажем, что обнаруженное Черенковым свечение носит универсальный характер в том смысле, что под действием излучения с достаточной энергией должны “светиться” все прозрачные тела, а не только жидкости. До Черенкова с радиоактивными источниками таких излучений работало довольно много физиков. Что же, никто из них не наблюдал нового излучения? Оказывается, наблюдали. И первой из них, скорее всего, была знаменитая Мария Кюри, лауреат двух Нобелевских

премий (по физике и химии), которая заметила голубое свечение бутылей с концентрированными растворами радия. В 1926 году французский физик Малле обратил внимание на голубой цвет прозрачных веществ, расположенных рядом с радиоактивными источниками. Он даже определил спектр свечения и указал на некоторые его отличия от люминесценции. Но Малле не довел своих исследований до конца, не попытался объяснить обнаруженное им излучение. Поэтому его работам (возможно, незаслуженно) не придали особого значения.

Заслуга Черенкова состояла в том, что он не только обратил внимание на новое явление, но и детально изучил все его свойства в той мере, в какой это позволяла сделать экспериментальная техника 30-х годов. Он не успокоился, пока оно не было полностью понято. Мне посчастливилось, будучи аспирантом, работать несколько лет в лаборатории П.А. Черенкова в Физическом институте им. П.Н. Лебедева и затем неоднократно с ним встречаться. На меня производили большое впечатление тщательность, с которой П.А. Черенков готовил и проводил научные исследования, его стремление разобраться в деталях эксперимента и “до конца” понять полученные результаты. Этому же он требовал от своих сотрудников, этому учил молодежь. Иногда приходится слышать, что П.А. Черенкову повезло, что открытие было случайным. Возможно. Наверное, во всех открытиях есть доля везения. Но несомненно другое: обнаружить в 30-х годах черенковское излучение можно было только в результате очень тщательных и тонких экспериментов.

3. ОБЪЯСНЕНИЕ

Первую интерпретацию результатов опытов Черенкова дал С.И. Вавилов в том же номере “Доклады Академии наук СССР”, где была опубликована первая статья П.А. Черенкова. С.И. Вавилов справедливо считал, что обнаруженное излучение есть излучение движущегося в среде электрона, а не атомов среды, но при этом полагал, что оно связано с торможением электронов при их взаимодействии с атомами среды: ведь из классической электродинамики было хорошо известно, что заряд, движущийся с ускорением, излучает. Однако простая гипотеза С.И. Вавилова не могла объяснить всей совокупности экспериментальных фактов, в частности интенсивности излучения и его слабой зависимости от атомного номера атомов среды, и ее пришлось отбросить.

Правильное объяснение оказалось еще проще и очень красивым. Оно было дано только через три года после первой публикации П.А. Черенкова и принадлежало Игорю Евгеньевичу Тамму и Илье Михайловичу Франку, которые показали, что заряженная частица, движущаяся в среде равномерно и прямолинейно со скоростью, превышающей ско-

рость распространения света в данной среде, порождает излучение Черенкова.

Естественно задать вопрос: как же так может быть? Ведь до публикации работы И.Е. Тамма и И.М. Франка в 1937 году считалось, что заряд, движущийся с постоянной скоростью, не может излучать. Да, считалось. Но при этом молчаливо предполагалось, что скорость движения заряда не может превышать скорость распространения света. Но последнее утверждение справедливо только для вакуума. Действительно, в вакууме, согласно теории относительности, скорость распространения света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с является максимальной скоростью, и всегда $v < c$, где v – скорость движения частицы. Другое дело – вещество. Как хорошо известно, в веществе с показателем преломления n скорость света равна c/n и возможно выполнение условия $v > c/n$ без противоречия с теорией относительности.

Покажем, что как из классической волновой оптики, так и из квантово-корпускулярных представлений о свете следует, что заряд, движущийся в среде с постоянной сверхсветовой скоростью, должен непременно излучать. Рассмотрим заряд, движущийся с постоянной скоростью v в прозрачной среде с показателем преломления n вдоль оси z (рис. 1). Согласно классической волновой теории света, каждую точку траектории заряда можно рассматривать как источник электромагнитных волн, распространяющихся во все стороны со скоростью c/n . Разность хода Δl волн, испущенных в точках A и B под углом θ к траектории заряда, определится временем $t_1 = AC \cdot n/c$ прохождения светом отрезка AC (рис. 1) и задержкой $t_2 = AB/v$ начала излучения в точке B , равной времени перемещения заряда из A в B :

$$\Delta l = \frac{c}{n}(t_2 - t_1) = AB \left(\frac{1}{\beta n} - \cos \theta \right), \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad (1)$$

Из элементарной теории интерференции известно, что при $\Delta l = m\lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) и m нечетном волны полностью погасят друг друга, а при m четном или равном нулю – максимальным образом усилятся (здесь λ – длина волны излучения). Допустим, $\cos \theta \neq 1/(\beta n)$. Тогда отрезок AB всегда можно выбрать так, что $\Delta l = \lambda/2$, и в данном направлении свет распространяться не будет (траектория заряда

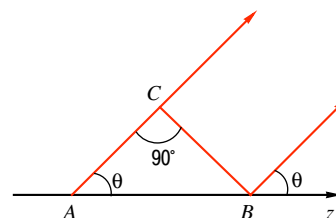


Рис. 1. К расчету разности хода лучей черенковского света.

считается достаточно протяженной, и эффекты, связанные с ограниченностью траектории, рассматривать не будем). И только волны, излученные под углом θ , определяемым из соотношения

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (2)$$

будут всегда иметь нулевую разность хода, независимо от точки излучения. Так как $\cos \theta \leq 1$, то $\beta n \geq 1$, или $v \geq c/n$, то есть излучение возможно только для заряда со сверхсветовой скоростью (в пределе – со световой скоростью) и только в направлении, удовлетворяющем условию (2).

Соотношение (2) можно также получить, пользуясь принципом Гюйгенса. Согласно этому принципу, каждая точка пространства, в которую пришло излучение, сама является источником электромагнитных волн. Поверхность, огибающая

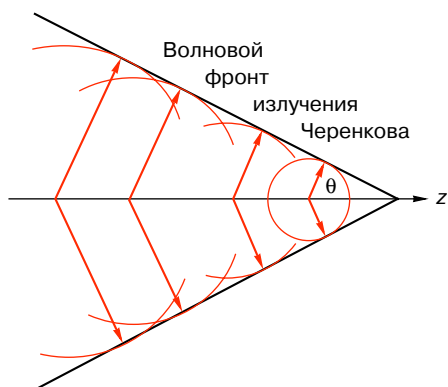


Рис. 2. Построение Гюйгенса для фронта волны черенковского излучения.

вторичные волны в некоторый момент времени, является фронтом реальной волны. На рис. 2 показано построение Гюйгенса для излучения заряда, движущегося со скоростью $v > c/n$. Читателю предлагается самостоятельно получить формулу (2), пользуясь рис. 2, а также провести построение Гюйгенса для излучения заряда с “досветовой” постоянной скоростью и убедиться, что волновой фронт в этом случае определить невозможно. Попробуйте предложить другие доказательства невозможности излучения заряженной частицей, если она перемещается в однородной среде с постоянной скоростью, меньшей скорости распространения электромагнитных волн.

Заметим, что построением, аналогичным изображенному на рис. 2, пользуются для объяснения волн, расходящихся от корабля, плывущего со скоростью, большей скорости распространения волн на поверхности воды. Так же объясняются акустические волны Маха, возникающие при движении

снаряда или самолета со сверхзвуковой скоростью. В обоих случаях направление распространения волн определяется формулой типа (2):

$$\cos \theta = \frac{u}{v},$$

где u – скорость распространения волн, v – скорость движения источника волн. Таким образом, черенковское излучение по существу не является чем-то принципиально новым. Оно имеет аналоги в гидродинамике и акустике.

Рассмотрим теперь излучение “сверхсветовой” заряженной частицы, пользуясь квантовыми представлениями об излучении. С квантовой точки зрения излучение света происходит порциями – фотонами. Фотон, как любая частица, обладает энергией E_c и импульсом p_c , которые даются соотношениями

$$E_c = h\nu, \quad p_c = \frac{E_c}{v_c}, \quad v_c = \frac{c}{n}, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота фотона, v_c – скорость света в среде, n – показатель преломления среды. Фотон отличается от обычных частиц тем, что его масса покоя равна нулю и поэтому он находится в непрерывном движении. Для частиц с ненулевой массой покоя m зависимости энергии E и импульса p от скорости v определяются формулами релятивистской механики

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad p = \frac{\beta E}{c}, \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad (4)$$

Пусть заряженная частица движется вдоль оси z со скоростью v и в некоторой точке траектории излучает фотон с энергией E_c под углом θ (рис. 3). При этом сама частица отклоняется от первоначального направления на угол φ и ее энергия становится равной E' . Напишем, пользуясь рис. 3, уравнения сохранения энергии и импульса для процесса излучения фотона:

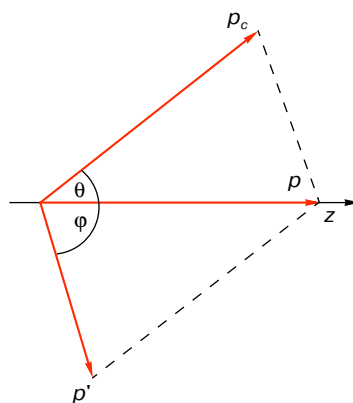


Рис. 3. К выводу уравнений сохранения энергии и импульса для процесса черенковского излучения.

– закон сохранения энергии

$$E = E_c + E'; \quad (5a)$$

– закон сохранения проекции импульса на ось z

$$p = p_c \cos \theta + p' \cos \varphi; \quad (5b)$$

– закон сохранения проекции импульса на ось, перпендикулярную оси z ,

$$0 = p_c \sin \theta - p' \sin \varphi. \quad (5в)$$

Решение системы уравнений (5) с учетом связей (3), (4) приводит к результату:

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n} + \frac{\Lambda n^2 - 1}{\lambda 2n^2}, \quad (6)$$

где $\lambda = v_c/v = c/(nv)$ – длина волны фотона, $\Lambda = h/p$ – длина волны Де Бройля частицы.

Как видно, квантовое выражение (6) для угла черенковского излучения отличается от “классической” формулы (2) наличием дополнительного слагаемого, которое учитывает отдачу (изменение импульса) частицы при излучении. Оценим, насколько важен этот член, например, при излучении “зеленого” фотона ($\lambda \approx 4 \cdot 10^{-7}$ м) в обычном стекле с $n = 1,5$. Заметим, что максимальные значения Λ достигаются для электрона, как самой легкой частицы, при скорости, близкой к порогу черенковского излучения $\beta = 1/n$. Преобразуем с учетом этих замечаний выражение для длины волны Де Бройля следующим образом:

$$\Lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\beta m_e c} \sqrt{1 - \beta^2} = 2\pi \lambda_e \sqrt{n^2 - 1},$$

где $\lambda_e = 3,86 \cdot 10^{-13}$ м – хорошо известная комптоновская длина волны электрона. Теперь легко оценить, что “квантовая” поправка к $\cos \theta$ не превышает $2 \cdot 10^{-6}$. Столь малой величиной всегда пренебрегают и для определения угла черенковского излучения используют формулу (2).

Из вышеизложенного следует, что объяснение излучения Черенкова весьма просто. Более того, оно имеет хорошо изученные аналоги в других областях физики волн и могло быть предсказано за десятки лет до открытия. Сейчас это под силу школьнику старших классов. Так неужели никто до Тамма и Франка не догадался о возможности излучения “сверхсветового” заряда? Оказывается, догадывались. Но эти работы были прочно забыты после создания А. Эйнштейном в 1905 году теории относительности. В лекции, прочитанной в 1958 году в Стокгольме при получении Нобелевской премии, И.Е. Тамм так объяснил этот факт:

Мне кажется, что мы имеем дело с поучительным примером отнюдь нередкой в развитии науки ситуации, когда научный прогресс тормозится не критическим применением правильных физических принципов к явлениям, выходящим за пределы применимости этих принципов.

В течение многих десятков лет всех молодых физиков учили, что свет (и электромагнитные волны вообще) может излучаться только при неравномерном движении электрических зарядов. При доказательстве этой теоремы, явно или неявно, используется тот факт, что теория относительности не допускает движений со сверхсветовой скоростью; согласно этой теории, никакое материальное тело не в состоянии даже достичь скорости света. Тем не менее в течение долгого времени эта теория считалась справедливой без всяких оговорок.

Более того, когда И.М. Франк и я уже разработали математически правильную теорию излучения Вавилова–Черенкова, мы все еще пытались разными способами, которые для нас самих сегодня уже непостижимы, примирить наши результаты с утверждением, что для излучения необходимо ускорение. И лишь на следующий день после первого нашего доклада об этой теории на коллоквиуме Физического института мы внезапно узрели простую истину: предельной скоростью для материальных тел является скорость света в вакууме...

После работ Черенкова, Тамма и Франка началась лавинообразный рост числа экспериментальных и теоретических исследований в этой области. В частности, В.Л. Гинзбург создал квантовую теорию излучения “сверхсветового” заряда. Были разработаны новые методы регистрации элементарных частиц, использующие черенковское излучение (см. следующий раздел). Признанием выдающейся роли Черенкова, Тамма и Франка в обнаружении и объяснении излучения заряда, движущегося в веществе с постоянной сверхсветовой скоростью, явилось присуждение им в 1958 году Нобелевской премии – самой престижной научной премии в мире.

В заключение раздела приведем формулу для расчета энергии черенковского света, излученного частицей с зарядом e на единице пути L в единичном интервале частот $\omega = 2\pi\nu$:

$$\frac{d^2 W}{d\omega dL} = \left(\frac{e}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega. \quad (7)$$

Пропорциональность энергии излучения частоте определяет голубой оттенок свечения Черенкова. Соотношение (7) не может быть выведено, подобно формулам (2), (6), из простых кинематических соотношений. Оно было получено Таммом и Франком путем решения уравнений классической электродинамики – уравнений Максвелла. Если в некотором диапазоне длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ можно пренебречь дисперсией среды, то есть зависимостью n от ω , то число фотонов N , излученных в этом диапазоне, на пути длиной L

$$N = 2\pi \alpha Z^2 L \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \sin^2 \theta, \quad \lambda_1 < \lambda_2, \quad (8)$$

где $\alpha = 1/137$ – постоянная тонкой структуры и Z – заряд частицы в единицах заряда электрона.

Формулу (8) обычно используют для приближенных оценок интенсивности черенковского излучения в некотором спектральном интервале.

Определите самостоятельно углы черенковского излучения в стекле ($n = 1,5$) и в воздухе ($n = 1,0003$) и число фотонов, образованных ультрарелятивистской частицей ($\beta = 1$) на 1 см пути в этих веществах в области чувствительности обычных фотоэлектронных умножителей ($\lambda_1 = 300$ нм и $\lambda_2 = 600$ нм).

4. ПРИМЕНЕНИЕ

Широкое практическое использование черенковского излучения началось после создания высокочувствительных детекторов света – фотоэлектронных умножителей (сокращенно ФЭУ). Оно применяется в основном для регистрации релятивистских частиц в физике высоких энергий и космических лучах при помощи черенковских счетчиков. В этом разделе будут рассмотрены основные разновидности детекторов Черенкова.

4.1. Дифференциальные черенковские счетчики

Дифференциальные счетчики используют для идентификации (определения сорта) частиц в пучках на ускорителях. Обычно такие пучки содержат несколько типов частиц (электроны, мюоны, пионы, каоны, протоны или антипротоны) с разными массами покоя. Пучки формируют при помощи магнитных элементов (магнитов и квадрупольных линз), и поэтому все частицы в них, независимо от массы, имеют одинаковый импульс. Задача дифференциального счетчика – выбрать частицы того сорта, с которыми проводится эксперимент.

Принцип работы дифференциального счетчика иллюстрируется на рис. 4. Черенковское излучение, испускаемое частицей под углом θ , собирается в фокальной плоскости сферического зеркала в узкое кольцо с радиусом $r = (R/2)\text{tg } \theta$, где R – радиус зеркала. Предоставляем читателю возможность самому доказать, что это именно так. Поскольку частицы в пучке имеют разные массы и одинаковый импульс, то их скорости и, следовательно, углы излучения (см. (2)) будут отличаться, а значит, черенковский свет фокусируется в кольца разного радиуса r . Поместив в фокальной плоскости зеркала кольцевую диафрагму подходящего диаметра, можно выделить свет от частиц с определенной массой и зарегистрировать его расположенными за диафрагмой ФЭУ. На рис. 5 показана фотография кольца черенковского света, излученного протонами с энергией 660 МэВ в стекле с $n = 1,51$. Центральное пятно связано с прохождением через фотопластинку пучка протонов. Фотография сделана В.П. Зреловым в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна).

Основной характеристикой дифференциального счетчика является разрешение по скорости $\Delta\beta/\beta$. Продифференцировав формулу (2), получим

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \Delta\theta \text{tg } \theta + \frac{\Delta n}{n}, \quad (9)$$

$\Delta\theta$ определяется в основном угловым разбросом частиц в пучке, а Δn – дисперсией среды (черенковского радиатора). Из (9) следует, что для получения высокого разрешения по скорости нужно использовать хорошо сформированный “параллельный” пучок частиц, малые углы θ и радиаторы с низкой дисперсией. Современные дифференциальные счетчики обладают разрешением $\Delta\beta/\beta \approx 10^{-6}$. В них применяются газовые радиаторы, а угол излучения составляет $\approx 1^\circ$. Чтобы при столь малых углах получить достаточное для эффективной регистрации частиц количество фотонов (см. (8)), счетчики имеют большую длину (до десятков метров). Для компенсации дисперсии иногда используют специальную, достаточно сложную оптику. Попробуйте оценить, какое разрешение по скорости должен иметь счетчик для разделения пионов ($mc^2 = 140$ МэВ) и каонов ($mc^2 = 494$ МэВ) в пучке с импульсом 40 ГэВ/с, используемом для проведения экспериментов в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

4.2. Счетчики типа RICH с регистрацией кольца черенковского света

Целью многих экспериментов на ускорителях является изучение взаимодействия пучков высокоэнергичных частиц с мишенями из различных материалов. Образующиеся при взаимодействии вторичные частицы вылетают из мишени в широком диапазоне углов и поэтому не могут быть идентифицированы при помощи описанных выше дифференциальных счетчиков. Для этого используются детекторы типа RICH (Ring Imaging CHerenkov

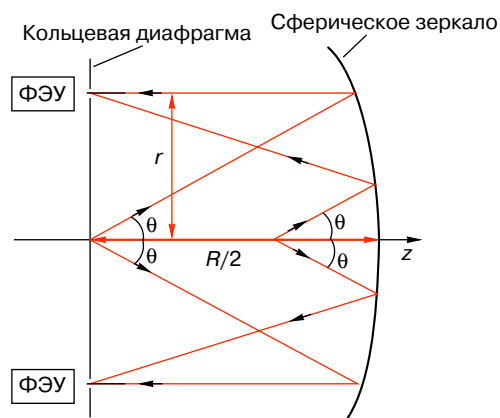


Рис. 4. Фокусировка черенковского света при помощи сферического зеркала и устройство дифференциального черенковского счетчика.



Рис. 5. Фотография кольца черенковского света, излученного в стекле протонами с энергией 660 МэВ.

counter). Они отличаются от дифференциальных счетчиков тем, что в фокальной плоскости сферического зеркала вместо узкой кольцевой диафрагмы располагаются детекторы, позволяющие определить радиус и положение центра кольца сфокусированного черенковского света. По радиусу кольца определяют скорость частицы (и массу, если известен импульс), а по положению его центра — угловые координаты траектории частицы. Рекомендуем читателю самому получить формулы, связывающие направление траектории частицы с координатами центра кольца черенковского излучения в фокальной плоскости сферического зеркала.

4.3. Пороговые черенковские счетчики

В пороговых счетчиках регистрируется черенковский свет, излученный в широком диапазоне углов. В них отсутствует прецизионная фокусирующая оптика. Любая частица, скорость которой превышает пороговое значение $v = c/n$, может быть ими зарегистрирована (отсюда их название). В пороговых счетчиках обычно используются газовые среды. Для газов величина $n - 1$ с хорошей степенью точности пропорциональна давлению. Это позволяет плавно и просто менять показатель преломления радиатора и, следовательно, значение пороговой скорости.

Пороговые счетчики широко применяют в экспериментах на ускорителях для идентификации самых легких частиц (как пучковых, так и вторичных). Для этого давление газа устанавливают таким, чтобы скорости всех других частиц были меньше

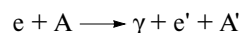
пороговой, и они не могли излучать. Основное достоинство пороговых счетчиков по сравнению с дифференциальными и типа RICH — их простота.

4.4. Черенковские счетчики полного поглощения

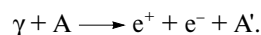
Идентификация и определение энергии электронов и γ -квантов — одна из самых актуальных задач в физике высоких энергий в настоящее время. Это связано, в частности, с тем обстоятельством, что большинство элементарных частиц нестабильно и многие из них через очень короткое время, не позволяющее зарегистрировать их непосредственно, распадаются на электроны и γ -кванты. Изучение таких частиц возможно только путем регистрации продуктов их распада.

Основным способом регистрации электронов и γ -квантов высокой энергии (больше нескольких гигаэлектронвольт) является метод полного поглощения создаваемых ими в среде детектора электромагнитных ливней. Рассмотрим кратко, как возникают и что представляют собой электромагнитные ливни.

Главной реакцией для ультрарелятивистских электронов и позитронов является тормозное излучение γ -кванта в поле атомных ядер:



(штрих означает изменение энергии частицы). Аналогично, самым вероятным процессом для γ -квантов с энергиями в десятки МэВ и выше является образование электрон-позитронных пар:



Посмотрим, что случится при попадании, например, высокоэнергичного γ -кванта в достаточно толстый слой вещества, толщина которого во много раз превышает средний пробег γ -кванта до образования e^+e^- -пары (для плотных сред с большим A средний пробег составляет всего 5 — 10 мм). Через короткое время γ -квант превратится в электрон и позитрон, те, в свою очередь, быстро излучат тормозные γ -кванты, и в результате вместо одного γ -кванта получатся два γ -кванта, e^+ и e^- , причем энергия каждой частицы будет в среднем равна 1/4 от первоначальной. Процесс лавинообразного размножения частиц и дробления энергии будет продолжаться до тех пор, пока реакции тормозного излучения и рождения пар играют доминирующую роль. Затем, при малых энергиях, в дело вступят другие процессы (например, ионизационные потери энергии для электронов и позитронов), приводящие к уменьшению потока частиц. Образовавшиеся в веществе электроны, позитроны и γ -кванты и представляют собой электромагнитный ливень. Легко сообразить, что ливень от первичного электрона или позитрона будет развиваться аналогично ливню от γ -кванта.

Если электромагнитный ливень возник в прозрачном веществе, то электроны и позитроны будут

излучать черенковский свет. Если толщина вещества к тому же достаточна для полного поглощения ливневых частиц, то число черенковских фотонов и, следовательно, сигналы с регистрирующих их ФЭУ будут пропорциональны энергии первичного электрона или γ -кванта. На этом основан принцип измерения энергии черенковскими спектрометрами полного поглощения. В качестве радиаторов в них используются очень прозрачные свинцовые стекла (тяжелые флинты) и некоторые кристаллы. В последнее десятилетие в экспериментах в физике высоких энергий широко используют спектрометры типа ГАМС, разработанные в Институте физики высоких энергий под руководством Ю.Д. Прокошкина. Они представляют собой “стенки”, составленные из блоков оптического стекла. Характерный размер блока $4 \times 4 \times 40$ см³. Каждый блок “просматривается” своим ФЭУ. Важной особенностью спектрометров ГАМС является возможность наряду с энергией измерять с высокой точностью координаты попадающих в детектор частиц по распределению энергии ливня в поперечном направлении. Самый большой спектрометр ГАМС содержит 4000 блоков стекла. Он используется в экспериментах в Европейском центре по ядерным исследованиям (ЦЕРН) вблизи Женевы. Крупные спектрометры типа ГАМС используются в Институте физики высоких энергий, Фермиевской национальной ускорительной лаборатории (США), Брукхэйвенской национальной лаборатории (США).

4.5. Детекторы черенковского излучения для регистрации космических лучей

Электромагнитные ливни могут развиваться не только в плотных средах, но и в газах, в частности в воздухе. Например, γ -кванты с энергиями в десятки и сотни тераэлектронвольт (10^{12} эВ), попадающие в атмосферу Земли из космоса, дают мощное черенковское излучение. Источниками таких γ -квантов являются далекие звезды, и изучение спектров γ -излучения помогает лучше понять процессы, происходящие во Вселенной. Этим занимается молодая наука – гамма-астрономия. Первые эксперименты по наблюдению черенковских вспышек от космических частиц были выполнены еще в 50-х годах В. Голбрайтом и Дж. Джелли, а также Н.М. Нестеровой и А.Е. Чудаковым. В настоящее время функционируют несколько крупных экспериментальных установок, на которых ведутся исследования в области гамма-астрономии. Черенковский свет в них регистрируется либо непосредственно ФЭУ с большими фотокатодами, либо детекторами, похожими на прожекторы (в фокусе прожекторных зеркал, имеющих диаметр до нескольких метров, располагаются чувствительные ФЭУ). Чтобы уменьшить фон от постороннего света и определить направление движения первичного γ -кванта, в одной установке используют ряд таких детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Регистрируются события, когда сигналы в детекторах появляются одновременно. Эксперимент, естественно, ведется только в безлунные ночи при прозрачной атмосфере.

Черенковское излучение сопровождает не только электромагнитные ливни, но и так называемые широкие атмосферные ливни (ШАЛ), возникающие от сильно взаимодействующих космических частиц (адронов). Для изучения ШАЛ также применяются черенковские детекторы.

Но есть один тип космических частиц, которые очень слабо взаимодействуют с веществом, и их нельзя зарегистрировать по ливням в атмосфере: это нейтрино. Изучение космических нейтрино представляет особый интерес, так как может дать информацию о процессах, происходящих в глубинах галактик и звезд, в частности внутри Солнца. Этим занимается новая наука – нейтринная астрономия. Чтобы “уловить” нейтрино, приходится строить очень массивные детекторы – весом в тысячи тонн и более, и помещать их глубоко под землей или под водой, чтобы уменьшить фон от всех других менее проникающих космических частиц. Ниже рассматриваются два примера нейтринных детекторов, в которых регистрируется черенковское излучение от вторичных заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино с водой. Вода является самым дешевым, а иногда и бесплатным черенковским радиатором.

Первый пример – установка KAMIOKANDE-II, расположенная на глубине 1 км в шахте Камиока в 300 км от Токио. В установке используется цилиндрический стальной танк диаметром 15,6 м и высотой 16 м, наполненный водой (вес 3000 т), очищенной от радиоактивных загрязнений. Длина пробега черенковского фотона в воде доходит до 55 м. Более 1000 ФЭУ с полусферическим фотокатодом диаметром 0,5 м используют для регистрации черенковского света. В настоящее время в той же шахте сооружается значительно более крупная установка Super-KAMIOKANDE, которая будет иметь водяной черенковский детектор (вес 50000 т) с 13000 ФЭУ. Super-KAMIOKANDE вступит в строй в 1996 году. Установки KAMIOKANDE предназначены для регистрации нейтрино от Солнца и взрывов сверхновых звезд, а также поиска распада протона с временем жизни до $10^{33} - 10^{34}$ лет.

Другой пример – Байкальский Нейтринный Телескоп (БНТ), использующий воду озера Байкал как черенковский радиатор. Выбор Байкала для создания подводного нейтринного детектора не случаен. Озеро имеет большую глубину (до 1,7 км), и вода его достаточно прозрачна. Кроме того, зимой оно покрывается толстым слоем льда, что упрощает монтаж установки. Черенковский свет от взаимодействия нейтрино на больших глубинах регистрируется фотоумножителями, опускаемыми под воду на специальных тросах – стрингах. В настоящее

время работает только часть БНТ, содержащая около сотни ФЭУ. Предполагается, что число ФЭУ и соответственно объем “просматриваемой” ими воды будет постепенно нарастать. Программа исследований на БНТ включает изучение спектров космических нейтрино и мюонов при высоких энергиях. Отметим, что “свечение” океана на очень больших глубинах связано в значительной степени с черенковским излучением электронов от β -распада ^{40}K .

В заключение раздела упомянем, что существует весьма интересный проект использования льда Антарктиды как черенковского радиатора для регистрации космических частиц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 1994 году открытию П.А.Черенкова исполнилось 60 лет. За это время оно, как и многие другие выдающиеся открытия, прошло путь от недоверия до всеобщего признания и широкого использования. Число работ, посвященных излучению Черенкова и его применению, составляет несколько тысяч. Но это не означает, что все уже понято и изучено. Как теоретические, так и экспериментальные исследования излучения Черенкова продолжаются. Они открывают новые стороны и неожиданные возможности использования этого замечательного явления.

В силу специфики статьи, рассчитанной на учащихся старших классов и преподавателей физики средней школы, и ограниченности ее объема “за бортом” остались многие красивые эффекты, связанные, например, с излучением “сверхсветового” заряда в кристаллах, с радиоизлучением Черенкова, с применением в ускорительной технике, биологии, медицине, химии и др. Для тех, кто захочет глубже ознакомиться с историей открытия, теорией и применениями черенковского излучения, рекомендуется следующая литература:

1. Первые советские Нобелевские лауреаты-физики. М.: Знание, 1984.

Книга включает Нобелевские лекции П.А. Черенкова, И.Е. Тамма и И.М. Франка.

2. *Болотовский Б.М.* Свечение Вавилова—Черенкова. М.: Наука, 1964.

Хорошее научно-популярное изложение истории открытия, теории и практического использования черенковского излучения.

3. *Джелли Дж.* Черенковское излучение и его применения. М.: Иностранная литература, 1960.

Одна из первых книг по черенковскому излучению, многие главы написаны достаточно популярно и не требуют специальных знаний.

4. *Зрелов В.П.* Излучение Вавилова—Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968. Т. 1, 2.

Подробная монография по теории и детекторам излучения Черенкова.

5. *Гинзбург В.Л.* Теоретическая физика и астрофизика. М.: Наука, 1981.

Автор — выдающийся ученый, внесший большой вклад в развитие теории черенковского излучения; книга требует хорошей теоретической подготовки.

6. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике. М.: Наука, 1990.

Сборник содержит оригинальные доклады, представленные на семинаре, посвященном 50-летию открытия черенковского излучения и 80-летию П.А. Черенкова; часть докладов требует специальных знаний.

* * *

Сергей Петрович Денисов, профессор кафедры физики элементарных частиц физического факультета МГУ. В настоящее время начальник отдела нейтринной физики Института физики высоких энергий. Участник открытий масштабной инвариантности в рождении адронов, роста полных сечений адронных взаимодействий, антигелия-3 и t -кварка. Соавтор более 150 публикаций. Лауреат Ленинской премии.