

2. ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДЕТЕКТОР

Черенковский счётчик, прибор для регистрации заряженных частиц и γ -квантов, в котором используется излучение Черенкова-Вавилова.

Принцип работы этого детектора основан на регистрации излучения, открытого П.А. Черенковым в 1934 г. и возникающего при движении заряженной частицы в прозрачной среде со скоростью v большей скорости света u в этой среде. Поскольку $u = c/n$, где c - скорость света в вакууме, $c = 4 \cdot 10^8$ м/с, а n - показатель преломления среды, то условие возникновения с черенковского излучения имеет вид $v > c/n$.

Черенковское свечение является когерентным излучением диполей, образующихся в результате поляризации среды пролетающей заряженной частицей, и возникает при возвращении этих диполей (поляризованных атомов) в исходное неполяризованное состояние. Если частица движется медленно, то диполи успевают поворачиваться в её направлении. Поляризация среды при этом симметрична относительно координаты частицы. И излучения отдельных диполей при возвращении в исходное состояние гасят друг друга. При движении частицы со «сверхсветовой» скоростью за счёт запаздывающей реакции диполей они преимущественно ориентируются в направлении движения частицы. Итоговая поляризация оказывается несимметричной относительно местоположения частицы и излучение диполей нескомпенсированным.

Заряженная частица движется в вакууме со скоростью v , которая меньше скорости света c . скорость v может быть сколь угодно мало отличаться от скорости света, но не превышать её. Иное положение в прозрачных веществах. Скорость света c' в этих веществах в n раз меньше скорости света c в вакууме (n - коэффициент преломления вещества. Так, коэффициент преломления воды $n_{H_2O} = 1,33$, а скорость света в воде $c_{H_2O} = 2,26 \cdot 10^8$ м/сек, у плексигласа $n_{пл} = 1,50$, а $c'_{пл} = c/n_{пл} = 2 \cdot 10^8$ м/сек. Если заряженная частица попадает из вакуума в прозрачное вещество со скоростью $v > c' = c/n$, то она будет двигаться в этом веществе со скоростью, превышающей скорость света c' в данной среде. Такое движение электронов в воде наблюдается уже при сравнительно низких энергиях, превышающих 0,26 МэВ.

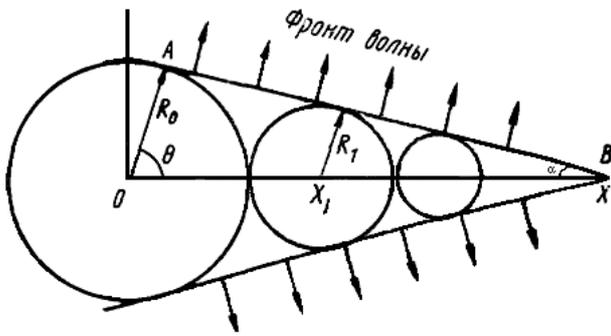


Рис. 28. Схема возникновения черенковского излучения.

Если заряженная частица движется в среде со скоростью u , превышающей фазовую скорость света для данной среды (c/n , n - показатель преломления среды, c - скорость света в вакууме), то частица испускает черенковское излучение. Последнее происходит в определённом направлении, причём величина угла θ между направлением излучения и траекторией частицы связан с u и n соотношением:

$$\cos \theta = c/un = 1/bn \quad (b = u/c). \quad (9)$$

Это соотношение легко понять на основе принципа Гюйгенса. Огибающая световых волн для частицы, двигающейся со скоростью $v > u$, представляет собой конус, вершина которого совпадает с положением частицы в данный момент (точка P' на рисунке), а нормали m к образующим конуса показывают направление распространения черенковского света. На рисунке показано, как частица, проходившая в момент времени t через точку P , породила сферическую электромагнитную волну, которая за время τ распространилась от точки P на расстояние $R = u\tau = c\tau/n$. За то же время частица, двигающаяся со скоростью $v > u$ прошла путь $v\tau > R$ и оказалась в точке P' . Волна от точки P' ещё не успела распространиться в веществе. Конус $AP'A$ - граница области, занятой черенковской электромагнитной волной (её фронт) к моменту $t + \tau$. Угол θ это угол между перпендикуляром, опущенным из точки P на образующую конуса AP' , и линией движения частицы (прямой PP'). Очевидно, косинус этого угла равен отношению длин отрезков R и PP' , т.е. $\cos \theta = u/v = 1/\beta n$.

Интенсивность N черенковского излучения на 1 см пути в интервале длин волн от l_1 до l_2 выражается соотношением:

$$N(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{2\pi Z^2}{137} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sin^2 \vartheta \quad (10)$$

Здесь Z - заряд частицы (в единицах заряда электрона).

В отличие от сцинтилляционного счётчика, где регистрируются частицы с любой скоростью, а излучение изотропно и запаздывает во времени, в черенковском счётчике свет излучается только частицами, скорости которых $v \geq c/n$ ($\beta \geq 1/n$), причём излучение происходит одновременно с их прохождением и под углом ϑ к траектории частицы. С ростом скорости частицы (надпороговой) растут угол ϑ и интенсивность излучения. Для предельных скоростей, близких к скорости света $[(1-\beta) \ll 1]$, угол ϑ достигнет предельного значения:

$$\vartheta_{\max} = \arccos(1/n). \quad (11)$$

Количество света, излучаемое в черенковском счётчике, как правило, составляет несколько % от светового сигнала сцинтилляционного счётчика.

Черенковское излучение является совместным излучением множества атомов среды, расположенных вдоль траектории движения частицы и поляризованных её электрическим полем. Таким образом, непосредственно излучает не частица, а среда. Волновой фронт этого излучения представляет собой поверхность конуса, вершиной которого является частица, а осью – её траектория. Угол раствора конуса фиксирован и определяется скоростью частицы и свойствами среды. Ситуация похожа на ту, которая возникает на поверхности воды при движении катера. Катер, выполняющий в этом примере роль частицы, создает волну возмущения водной поверхности, фронт которой образует острый угол, вершиной которого является катер.

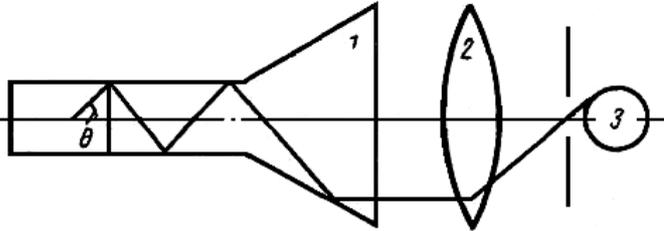


Рис.29. Схема счётчика Черенкова: 1 – цилиндрический радиатор; 2 – фокусирующая линза; 3 – ФЭУ.

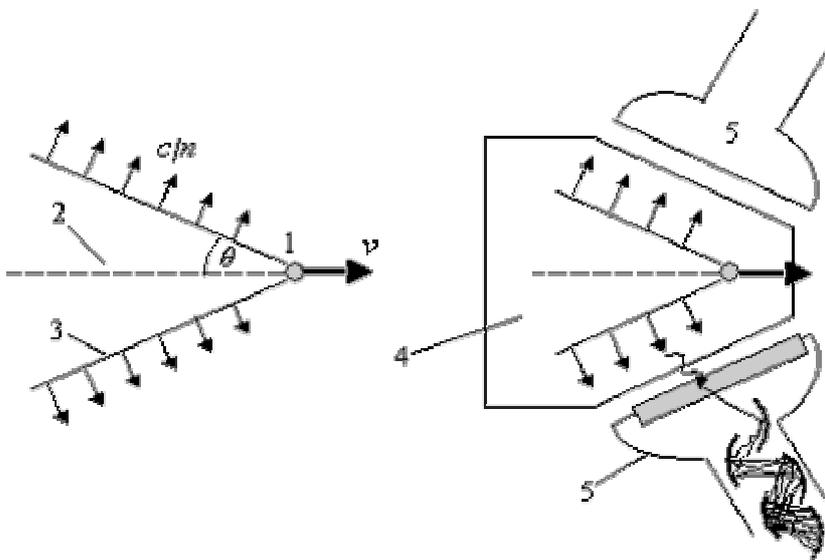


Рис. 30. Принцип работы черенковского счётчика: слева – конус черенковского излучения, справа – устройство счётчика. 1 – частица, 2 – траектория частицы, 3 – фронт волны, 4 – радиатор, 5 – ФЭУ (показано развитие лавины вторичных электронов, вызванное фотоэлектроном), 6 – фотокатод.

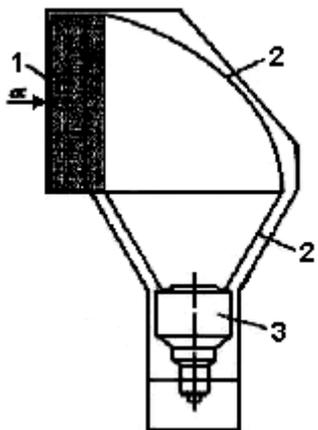


Рис. 31. Детектор черенковского излучения: α – регистрируемая частица, 1 – радиатор, 2 – светопровод, 3 – ФЭУ.

Энергия частицы, конвертируемая в черенковское излучение, мала по сравнению с её ионизационными потерями. Число фотонов, излучаемых на 1 см пути, в зависимости от среды (радиатора) колеблется от нескольких единиц до нескольких сот. Это излучение можно наблюдать визуально и регистрировать с помощью фотоплёнки или ФЭУ. На цветной фотоплёнке, расположенной перпендикулярно направлению движения частицы, излучение, выходящее из радиатора, имеет вид кольца сине-фиолетового цвета.

Зависимость угла излучения θ от β позволяет, определяя этот угол, найти скорость и энергию частицы. С помощью черенковского детектора можно регистрировать частицы с энергиями вплоть до 100 ГэВ. Черенковский счетчик позволяет эффективно выделять высокоэнергичные релятивистские частицы на уровне большого фона низкоэнергичных частиц.

Аппаратура, предназначенная для жидкостно-сцинтилляционных измерений, позволяет также регистрировать излучение Черенкова - Вавилова, возбуждаемое в прозрачных средах высокоэнергетическими β -частицами (пороговая энергия для возбуждения этого излучения в воде составляет 0,267 МэВ).

Обычно черенковский детектор состоит из радиатора (он может быть твёрдым, жидким или газообразным), оптической системы, обеспечивающей сбор и «доставку» черенковских фотонов к фотокатоду ФЭУ (светопровода) и самого ФЭУ (или нескольких ФЭУ). Разрешающее время черенковских счетчиков не превосходит 10^9 с.

Основные элементы черенковского счётчика для детектирования элементарных частиц: радиатор (вещество, в котором $v > c/n$), оптическая система, фокусирующая свет, и один или несколько фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), преобразующих световой сигнал в электрический. Радиаторы изготавливают из твёрдых, жидких и газообразных веществ. Они должны быть прозрачны к черенковскому излучению и иметь низкий уровень сцинтилляции, создающих фоновые сигналы. Стандартные материалы радиаторов: органическое стекло ($n = 1,5$), свинцовое стекло ($n = 1,5$), вода ($n = 1,33$).

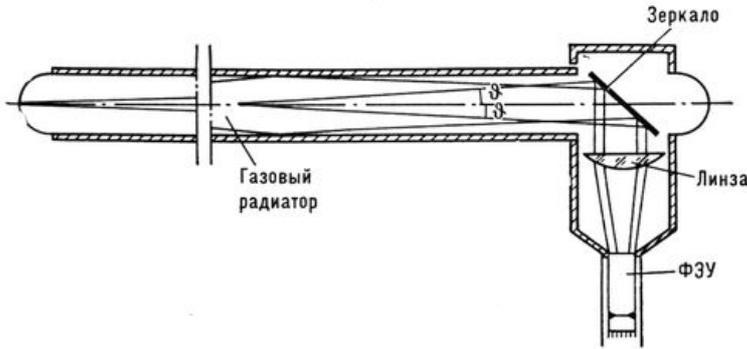


Рис. 32. Схема газового порогового черенковского счётчика на 70 ГэВ ускорителя Института физики высоких энергий. Черенковский свет собирается на катод ФЭУ с помощью оптической системы, состоящей из плоского зеркала и кварцевой линзы.

Черенковские счётчики относятся к пороговым детекторам. Они регистрируют заряженные частицы, перемещающиеся со скоростью $v > c'$. Их применяют для регистрации быстрых электронов,

протонов, пионов и других частиц. С помощью черенковского счётчика определяют энергию частиц. Для этого измеряют угол распространения фронта излучения Черенкова-Вавилова, который однозначно связан со скоростью частицы.

Световая вспышка черенковского излучения по интенсивности примерно в 100 раз слабее сцинтилляции. Поэтому при выборе чувствительного вещества для черенковского счётчика приходится ограничиваться материалами, в которых не происходят сцинтилляции. Обычно это вода и оргстекло. Для регистрации частиц со скоростями, приближающимися к скорости света, используются газы, показатель преломления которых очень близок к 1. Например, черенковский счётчик с воздухом при атмосферном давлении будет реагировать лишь на частицы со скоростями не менее $0,9997 c$.

Используется и зависимость сигнала черенковских счётчиков от скорости. Появление сигнала свидетельствует о прохождении заряженной частицы со скоростью, превышающей пороговую, а схема с двумя счётчиками позволяет выделить частицы, лежащие в узком интервале скоростей. Это дает возможность исследовать спектр частиц с высокими скоростями, а не только регистрировать их появление. Выходной сигнал сцинтилляционного счётчика, как и любого ионизационного прибора, почти постоянен для всех частиц со скоростями выше $2 \cdot 10^8$ м/с ($0,67$ скорости света).

Черенковские счётчики получили широкое применение в экспериментах на ускорителях заряженных частиц, т.к. они позволяют выделять частицы, скорость которых заключена в определённом интервале. С ростом энергии ускорителей и, следовательно, с ростом энергии частиц особенно широкое применение получили газовые черенковские счётчики, обладающие способностью выделять частицы ультррелятивистских энергий, для которых $(l - b) \ll l$. Угол излучения θ в газе очень мал, мала и интенсивность излучения на единицу пути. Чтобы получить вспышку света, достаточную для регистрации, приходится увеличивать длину газовых черенковских счётчиков до 10 м и более. В газовых черенковских счётчиках можно плавно менять показатель преломления, изменяя давление рабочего газа.

Черенковские счётчики существуют 3 типов: пороговые, дифференциальные и счётчики полного поглощения. Основными характеристиками первых двух типов черенковских счётчиков являются эффективность регистрации и разрешающая способность по скорости частиц, т. е. способность счётчика разделять две частицы, движущиеся с близкими скоростями. Пороговый черенковский счётчик должен регистрировать все частицы со скоростями, большими некоторой (пороговой), поэтому оптическая система такого черенковского счётчика (комбинация линз и зеркал) должна собрать, по возможности, весь излученный свет на катод ФЭУ.

Дифференциальные черенковские счётчики регистрируют частицы, движущиеся в некотором интервале скоростей от u_1 до u_2 . В традиционных дифференциальных черенковских счётчиках это достигается выделением оптической системой света, излучаемого в интервале соответствующих углов от J_1 до J_2 . Линза или сферическое зеркало, помещенное на пути черенковского света, фокусирует свет, излученный под углом θ , в кольцо с радиусом

$$R = f\theta, \quad (12)$$

где f — фокусное расстояние линзы или зеркала. Если в фокусе системы поместить щелевую кольцевую диафрагму, а за диафрагмой один или несколько ФЭУ, то в такой системе свет будет зарегистрирован только для частиц, излучающих свет в определённом интервале углов. В дифференциальных черенковских счётчиках с прецизионной оптической системой можно выделить частицы, скорость которых очень мало

отличается от скорости других частиц. Такие черенковские счётчики требуют особого контроля давления газа и формирования параллельного пучка частиц.

Черенковский счётчик полного поглощения предназначены для регистрации и спектрометрии электронов и γ -квантов. В отличие от рассмотренных черенковских счётчиков, где частица теряла в радиаторе ничтожно малую долю энергии, черенковский счётчик полного поглощения содержит блок радиаторов большой толщины, в котором электрон или γ -квант образует электронно-фотонную лавину и теряет всю или большую часть своей энергии. Как правило, радиаторы в этом случае изготавливают из стекла с большим содержанием свинца. В радиаторе из такого стекла, например толщиной 40 см, может практически полностью тормозиться электрон с энергией до 10 ГэВ. Количество света, излучаемого в черенковского счётчика полного поглощения, пропорционально энергии первичного электрона или γ -кванта. Разрешающая способность такого счётчика полного поглощения (по энергии) зависит от энергии и для самых чувствительных ФЭУ может быть выражена формулой:

$$\Delta E \approx \left(\frac{10}{\sqrt{E}} \right) \%, \quad (13)$$

где E — энергия электрона в ГэВ.

Для примера, в Табл. 2 даны характеристики выпускаемых в России сцинтилляционных детекторов импульсного γ -излучения и излучения Черенкова. Эти детекторы предназначены для регистрации импульсных потоков излучения и преобразования их в электрический аналог - импульс тока на выходе детектора.

Табл. 2. Сцинтилляционные детекторы импульсного γ -излучения и излучения Черенкова.

	ССДИ8М	ССДИ8М-01	ССДИЗ1	ССДИ29	СЧДИ1М
Тип сцинтиллятора (чувствительного элемента)	СПС-Б10, СДП	СПС-Б10, СДП	СПС-Б15	СПС-Б15	Твердотельный радиатор Черенкова
Фотоумножитель	СНФТ3	СНФТ5	СНФТ10	СНФТ8	СНФТ8
Максимальная чувствительность к гамма-излучению ^{60}Co ($E_\gamma=1,25$ МэВ), $\text{А}\cdot\text{см}^2\cdot\text{с}/\text{квант}$	$\geq 10^{-10}$	$\geq 10^{-12}$	$\geq 5 \times 10^{-14}$	$\geq 1,7 \times 10^{-12}$	$\geq 7,7 \times 10^{-14}$
Диапазон регулировки чувствительности, раз	10^2	10^2	2×10^2	10^4	10^4
Предел линейности в импульсном режиме, А, не менее	3,0	3,0	1,1	1,3	1,3
Длительность импульсной характеристики на полувысоте, нс	7,0 - 10,0	7,0 - 10,0	5,0	3,0	2,0
Напряжение питания, В	-4000	-3300	-7000 +1800	-5000 +1800	-5000 +1800
Габаритные размеры, мм	110x-420	110x-420	65x245	140x1120	140x-1120
Масса, кг	2,1	2,1	0,6	5,0	5,0

Важность черенковского излучения заключается в том, что оно позволяет прямо (без специальных детекторов) измерять концентрации радионуклидов в водных растворах. На практике, при проведении радиометрических измерений водных проб различного происхождения: питьевой воды, природных, сбросных и технологических вод, широкое распространение получил метод непосредственного измерения активности высокоэнергетичных β -излучающих радионуклидов, растворенных (или инкорпорированных в виде взвеси) в воде, по их Черенковскому излучению. Этот метод наиболее экономичен, и, в тоже время, обеспечивает высокую чувствительность измерений при регистрации таких радионуклидов, как ^{90}Sr . В последние годы востребованность метода во всем мире возрастает. Однако точность получаемых результатов не всегда удовлетворительна, т.к. эффективность регистрации зависит от прозрачности раствора, уменьшение которой приводит к поглощению (тушению) фотонов Черенковского излучения. Способы учёта влияния эффекта тушения на величину эффективности регистрации при проведении Черенковских измерений на жидкостном сцинтилляционном радиометре Бета-2 основаны на методе тройных-двойных отношений. Специальное устройство – т.н. «калибратор многократного применения», облегчает и повышает точность калибровки.