

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ЧЕРЕНКОВА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОТОНОВ И МЕЗОНОВ

В 1947 г. была предложена¹ конструкция счётчиков заряженных элементарных частиц больших энергий, основанная на использовании эффекта Черенкова. К положительным качествам таких счётчиков, названных черенковскими, относятся: их быстрота действия, простота различения частиц разных энергий и одинаковая эффективность счёта как положительно, так и отрицательно заряженных частиц.

Всё же существующие черенковские счётчики требуют усовершенствования многих своих деталей, особенно радиотехнических частей схем.

Как известно, ещё в 1934 г. в лаборатории С. И. Вавилова П. А. Черенковым² был открыт новый вид излучения, происходящего в жидкости при прохождении через неё электронов со скоростями, превышающими фазовую скорость света в данной среде и обладающего характерной направленностью и поляризацией. Позднее выяснилось, что подобное излучение наблюдается не только в жидкостях, но и вообще в диэлектриках. Теорию этого явления, с точки зрения классической электродинамики, дали И. Е. Тамм и И. М. Франк³ в 1937 г.; квантовую теорию эффекта Черенкова разработали А. А. Соколов⁴ и В. Л. Гинзбург⁵. Ферми⁶ рассмотрел случай комплексного показателя преломления, что позволяло единым образом описать потери энергии частиц, быстро движущихся в среде, как на ионизацию, так и на черенковское излучение. В работе О. Бора⁷ было проанализировано соотношение между микроскопическим и макроскопическим подходом к рассмотрению эффекта. Особенности черенковского излучения в анизотропной среде были раскрыты в работах В. Л. Гинзбурга⁸ и А. Коломенского⁹.

Однако эффект Черенкова оказался явлением более общего характера, чем можно было думать сначала. В частности, рядом авторов^{10, 11, 12} было исследовано излучение электрона при прохождении через границу двух сред («переходное излучение») и при приближении к этой границе («подходное излучение»). Также было проанализировано излучение электрона, движущегося в магнитном поле со «сверхсветовой» скоростью, причём оказалось, что оно «не является простым наложением излучения „светящегося“ электрона на излучение „сверхсветового“ электрона, а своеобразно сочетает (в „сверхсветовой“ области) черты того и другого явления»¹³. Излучение «сверхсветового» типа, но не в диэлектрике, а в ферромагнетике, было рассмотрено Д. Иваненко и В. Гургенидзе¹⁴; при этом в ферромагнетике возможно излучение и не заряженных, но магнитных частиц, как, например, нейтронов. И. М. Франк¹⁵ решил классическую задачу эффекта Черенкова для произвольно ориентированных электрических и магнитных мультиполей.

Образно говоря, эффект Черенкова состоит в отрыве электромагнитного поля от порождающей его частицы, когда последняя движется в среде со скоростью v , большей фазовой скорости света $\frac{c}{n}$ в этой среде (n — по-

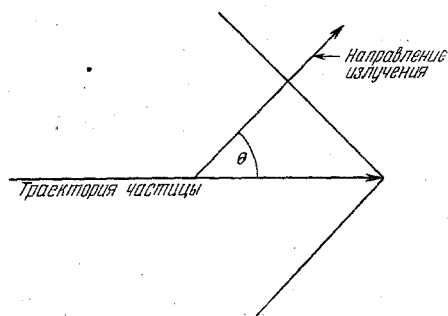


Рис. 1.

казатель преломления среды). При этом фронт волн излучения, создающийся в результате интерференции всех излучаемых частицей волн, образует конус с вершиной в точке нахождения частицы; в остальных направлениях волны гасятся. Если обозначить через θ угол между нормалью к фронту и направлением движения частицы, то³

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

$$\text{где } \beta = \frac{v}{c}.$$

Подробно теория эффекта Черенкова изложена, например, в¹⁶.

Формула Тамма и Франка для числа N фотонов, излучаемых электроном на пути L при скорости v в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , даёт:

$$N = 2\pi\alpha \left(\frac{L}{\lambda_2} - \frac{L}{\lambda_1} \right) \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right),$$

где $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ — постоянная тонкой структуры, n — среднее значение показателя преломления среды (радиатора) в этой спектральной области. Вообще же для частицы заряда Ze излучение составляет

$$\frac{dN}{dL} = 2\pi \frac{Z^2 e^2}{\hbar c^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \Delta\nu \cong 450 \sin^2 \theta$$

квантов на сантиметр пути, если за $\Delta\nu$ принять диапазон частот видимых волн ($3 \cdot 10^{14}$ гц). Тогда, например, движущийся со скоростью света электрон в среде с $n = 1,5$ дал бы в видимой области спектра 250 фотонов на каждый сантиметр пути.

В силу (1) направление излучения зависит от скорости частицы, которая, в свою очередь, зависит от её энергии. В этом и состоит механизм различения частиц по энергиям в черенковских счётчиках.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЁТЧИКОВ

К хорошим, имеющим широкий диапазон действия радиаторам черенковских счётчиков¹ следует предъявлять следующие требования: 1) достаточно малый порядковый атомный номер вещества радиатора для того, чтобы не имело места значительное ионизационное воздействие среды на движение частиц; 2) большое значение n и большая прозрачность, включая и ультрафиолетовую область; 3) оптическая однородность материала радиатора; 4) малая дисперсия. В опытах последних лет^{1, 17—25} применялось чаще всего органическое стекло, известное под названием «плексиглас» или «люцит» с показателем преломления $n = 1,50$ и малой дисперсией (n меняется на 0,01 от $\lambda = 5850 \text{ \AA}$ до 4400 \AA); кроме того, использовалась дестиллированная вода ($n = 1,33$), которая допускает исследование частиц с $\beta > 0,76$, кубические ($1 \times 1 \times 1 \text{ см}^3$) прозрачные кристаллы хлористого серебра ($n = 2,07$) и предлагался фтористый литий.

Обычно в опытах подобного рода используют цилиндр из органического стекла^{1, 17, 18, 25}, вдоль оси которого направляются исследуемые частицы. В других вариантах²¹ также часто используются радиаторы и оптические системы с цилиндрической симметрией. Для наиболее полной передачи излучения к измеряющим приборам и сохранения направленности применяется полное внутреннее отражение черенковского излучения от стенок цилиндрического радиатора.

В дальнейшем излучение или наблюдается непосредственно, или фокусируется на возможно меньшую площадь. Фокусировка затрудняется тем, что большинство частиц идёт не строго по оптической оси системы, а на некотором от неё расстоянии (пучок частиц предполагается параллельным оси). В результате фотоны получают некоторый момент относительно оси, который они в дальнейшем сохраняют и, следовательно, не могут быть сфокусированы точно на продолжение оси системы.

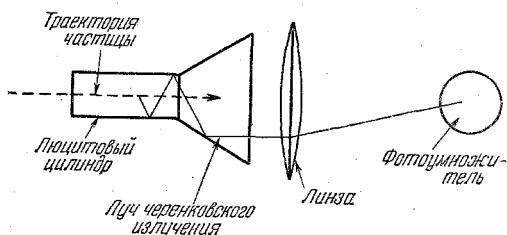


Рис. 2.

Ввиду того, что черенковское излучение поляризовано так, что электрический вектор лежит в плоскости падения на отражающую поверхность (при условии цилиндрической симметрии), то при углах, близких к углу Брюстера, свет полностью проходит через границу раздела двух сред. Это обстоятельство было предложено для разделения излучения, порождённого частицами различных энергий²⁵.

Несмотря на использование протяжённых радиаторов (длина цилиндра 15—20 см), излучение получается недостаточно интенсивным и при его регистрации необходимо прибегать к усилению. Обычно применяются схемы с фотоумножителями^{17, 19, 20, 21, 25} (рис. 2). В частности, был использован²⁵ фотоумножитель марки 5819, имеющий чувствительность в максимуме 0,065 электрона на фотон (при $\lambda = 4700 \text{ \AA}$) и удобное расположение фото-

Подобные устройства обеспечивают регистрацию практически каждой частице, дающей черенковское излучение и проникающей в радиатор на

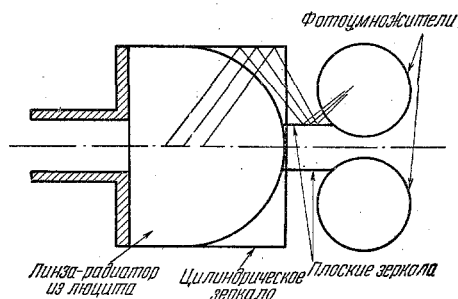


Рис. 3.

глубину нескольких миллиметров. Для устранения шумов, вызванных флуктуационными токами и т. п., широко используются схемы совпадений^{21, 25} (рис. 3). Однако в радиотехнической части аппаратуры мы сталкиваем-

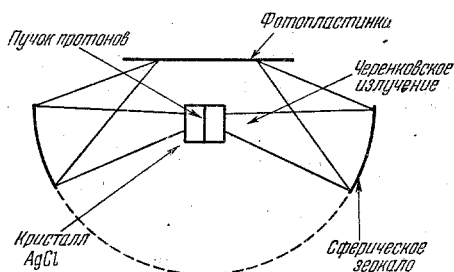


Рис. 4.

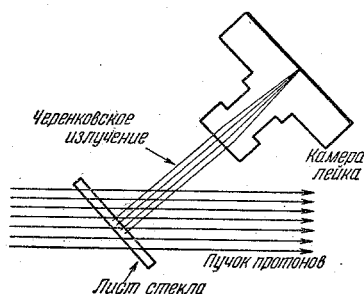


Рис. 5.

ся с трудностями, возникающими вследствие очень малой длительности импульса ($10^{-11} \div 10^{-9}$ сек.) и невозможности преобразования без искажений в современных схемах импульсов короче 10^{-9} сек.^{19, 20, 25}

Существуют и другие пути наблюдения черенковского излучения; один из них основан на свойстве светочувствительных фотоматериалов «суммировать» длительно воздействующее на них слабое освещение^{23, 24} (рис. 4 и 5). Однако такой способ не пригоден для наблюдения отдельных частиц или частиц, имеющихся в малых количествах. Применяют также счётчики Гейгера-Мюллера, чувствительные к свету в диапазоне 2000—3000 Å²⁶.

Иногда в схеме совпадений используют не два фотоумножителя, а фотоумножитель в сочетании с каким-нибудь счётчиком (счётчик Гейгера-Мюллера^{19, 20}, сцинтиллирующий кристалл²²), расположенным перед черенковским радиатором на пути частиц (рис. 6).

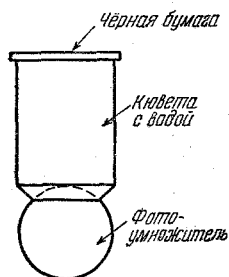


Рис. 6.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКИХ СЧЁТЧИКОВ

Перейдём теперь к результатам, полученным с помощью черенковских счётчиков. Как мы уже видели, эти счётчики можно применять для наблюдения заряженных частиц, обладающих большой энергией (скорость, больше фазовой скорости света в данной среде) и достаточной проникающей способностью. В случае необходимости измерения угла излучения важно ещё иметь хорошо коллимированный пучок частиц. Кулоновское рассеяние уменьшается с помощью подбора радиатора. Степень точности измерения черенковского угла различна для различных конструкций счётчика; она составляет минуты дуги^{23, 25}. При этом точность определения энергии частиц составляла, например, $\pm 0,2$ Мэв при оценке энергии в 340 Мэв (для протонов^{23, 28}).

Важно отметить, что непосредственно удавалось измерять скорость не только электронов, но также протонов, π^{+-} и π^- -мезонов; кроме того, с помощью порождённых и выбитых ими частиц наблюдались нейтроны, γ -лучи (ещё в 1934 г. Черенковым) и π^0 -мезоны.

Черенковские счётчики использовались для определения изменения энергии частиц при прохождении через вещество. Например, в одном из опытов 145-Мэв π^- -мезоны от 170-дюймового синхроциклотрона пропускались через графитную

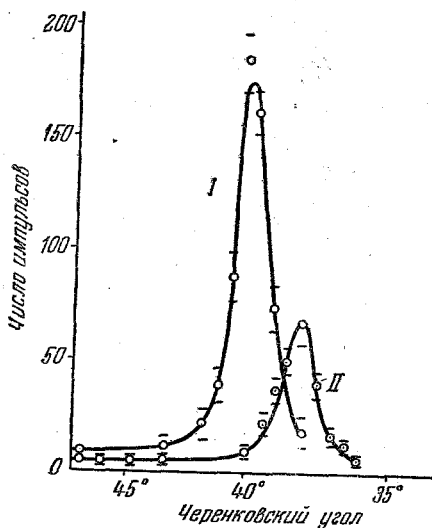


Рис. 7.

пластину толщиной 7,6 см, что должно было вызвать уменьшение энергии π^- -мезонов до 121 Мэв и изменить черенковский угол от 40,4° до 38,1°. Как видно из рис. 7, опыт дал изменение от 39,9° (кривая I) до 38,0°

(кривая II). Общее понижение кривой II вызвано рассеянием мезонов в графите, вследствие чего число их в пучке уменьшилось.

Во многих других случаях, черенковский счётчик может служить простым и удобным прибором для исследования разного рода взаимодействий частиц с веществом; например, предлагалось использовать его для исследования упругого рассеяния частиц.

Примером использования черенковского счётчика может служить также опыт, проведённый^{22, 25} при помощи нефокусируемого люцитового счётчика: цилиндр из люцита, длиною в 6 дюймов, 1,5 дюймов в диаметре, был приведён в оптический контакт с фотоумножителем типа 5819; прибор работал в схеме совпадений с кристаллом-сцинтиллятором. Для протонов с энергией выше 400 Мэв эффективность счёта была высокой, но уже при 350 Мэв число совпадений падало почти до нуля. Прибор был использован в качестве детектора нейтронов от бериллиевой мишени, на которую падали протоны синхроциклотрона с наибольшей энергией 450 Мэв. Был применён радиатор, богатый водородом, и измерялась энергия протонов, выбиваемых из него нейтронами. Полученный спектр энергий нейтронов имел максимум около 406 Мэв и падал до нуля в области 450 Мэв и 360 Мэв при ширине на уровне половинной интенсивности около 32 Мэв.

В другом случае²⁵ в др. исследовались полученные в синхроциклотроне π^0 -мезоны, дававшие при своём распаде мощные γ -лучи, которые в свою очередь порождали быстрые электроны, создававшие черенковское излучение; в качестве радиатора в этом случае использовалась вода.

Наблюдение с помощью черенковских счётчиков мезонов представляет особый интерес также потому, что это даёт возможность применить черенковские счётчики для исследования космических лучей. Было замечено²⁷, что эффект Черенкова позволяет производить точное измерение скоростей отдельных мезонов. Хотя первые опыты с космическими лучами не дали никакого результата¹⁷, однако впоследствии удалось сконструировать прибор, давший удовлетворительный результат. Первоначальные неудачи, вероятно, зависели от радиотехнических недостатков употреблённых схем. Путём комбинирования в схеме совпадений счётчика Гейгера-Мюллера с черенковским счётчиком (рис. 6) было получено^{19, 20} хорошее совпадение данных, полученных с ранее употреблявшейся аппаратурой и со счётчиком Черенкова. На основании опыта, в котором сравнивалось число совпадений для лучей, прошедших через 10 см свинца, и для лучей, попадавших непосредственно на счётчик, было сделано заключение, что 80% эффекта, зарегистрированного счётчиком, вызвано μ -мезонами.

При использовании различных конструкций черенковских счётчиков были, конечно, попутно получены новые подтверждения теории этого эффекта.

В частности, было получено угловое распределение интенсивности черенковского излучения^{23, 24}, совпадающее с теорией.

Изложенные выше результаты показывают, что счётчики, основанные на использовании эффекта Черенкова, могут явиться эффективным средством экспериментального исследования, в особенности при дальнейшем усовершенствовании радиотехнических частей их схем.

Н. Мицкевич

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. I. A. Getting, Phys. Rev. 71, 123 (1947).
2. П. А. Черенков, ДАН 2, 451 (1934).
3. И. Е. Тамм и И. М. Франк, ДАН 14, 107 (1937).
4. А. А. Соколов, ДАН 28, 415 (1940).
5. В. Гинзбург, ЖЭТФ, 10, 589 (1940).

6. E. Fermi, Phys. Rev. **57**, 485, 1940 и статья П. Е. Кунина в сборнике «Мезон», Гостехиздат, 1947 г., стр. 114.
7. Н. Бор и О. Бор, Прохождение атомных частиц через вещество, ИЛ, 1950.
8. В. Гинзбург, ЖЭТФ **10**, 601, 608 (1940).
9. А. Коломенский, ДАН **86**, 1097 (1952).
10. В. Л. Гинзбург и И. М. Франк, ЖЭТФ **16**, 15 (1946).
11. А. И. Резанов, ЖЭТФ **16**, 878 (1946).
12. Н. П. Клепиков, Вестник МГУ **8**, 61 (1951).
13. В. Н. Цытович, Вестник МГУ **11**, 27 (1951).
14. Д. Иваненко и В. Гургенидзе, ДАН **67**, 997 (1949).
15. Статьи И. М. Франка и В. Л. Гинзбурга в сборнике «Памяти Сергея Ивановича Вавилова», 1952, стр. 172, стр. 193.
16. Д. Иваненко и А. Соколов, Классическая теория поля, 1951. и А. Соколов и Д. Иваненко, Квантовая теория поля, 1952.
17. R. H. Dicke, Phys. Rev. **71**, 737 (1947).
18. В. М. Харитонов, УФН **39**, 402 (1949).
19. J. V. Jelley, Proc. Phys. Soc., L. **A64**, 82 (1951).
20. В. Вавилов, УФН **44**, 443 (1951).
21. J. Marshall, Phys. Rev. **81**, 275 (1951).
22. V. A. Nedzela, J. Marshall, Bull. Am. Phys. Soc. **27**, № 1, 29 (1952).
23. R. L. Mather, Phys. Rev. **84**, 181 (1952).
24. УФН **46**, 413 (1952).
25. J. Marshall, Phys. Rev. **86**, 685 (1952).
26. B. Weisz a. B. L. Anderson, Phys. Rev. **72**, 431 (1947).
27. W. H. Furry, Phys. Rev. **72**, 171 (1947).
28. Л. Н. Белл, Природа, **11**, 104, 1952.