

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-

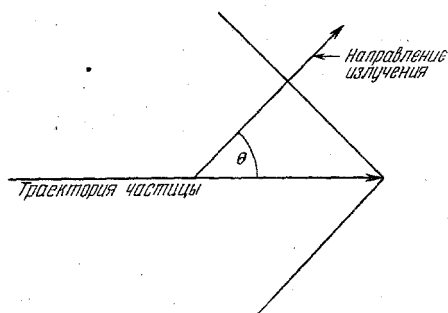


Рис. 1.

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

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

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 $4400 \text{ \AA}$); 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.

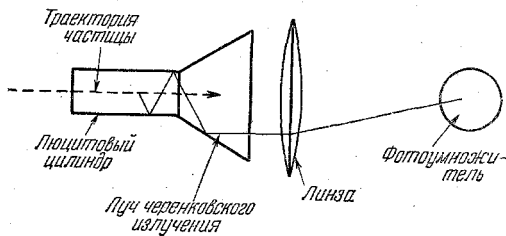


Рис. 2.

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 фотомножителями^{17, 19, 20, 21, 25} (рис. 2). В частности, был использован²⁵ фотомножитель марки 5819, имеющий чувствительность в максимуме 0,065 электрона на фотон (при $\lambda = 4700 \text{ \AA}$) и удобное расположение фотокаатода.

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

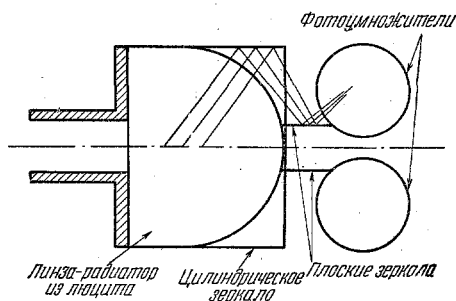


Рис. 3.

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 сталкиваемся

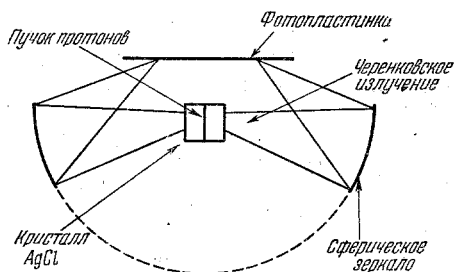


Рис. 4.

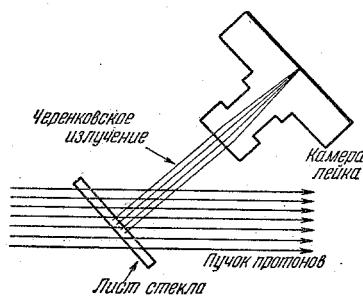


Рис. 5.

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).

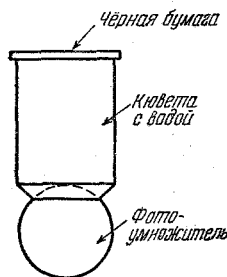


Рис. 6.

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. Сте-

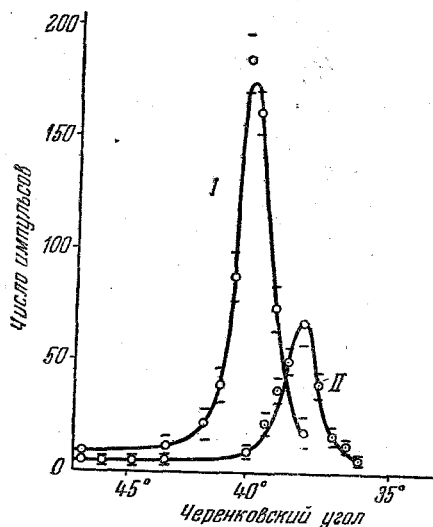


Рис. 7.

пень 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 синхротрона пропускались через графитную

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 и 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 употребляемых 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. Jeffrey, 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. Nedzel a. 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. Weiss 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.
-