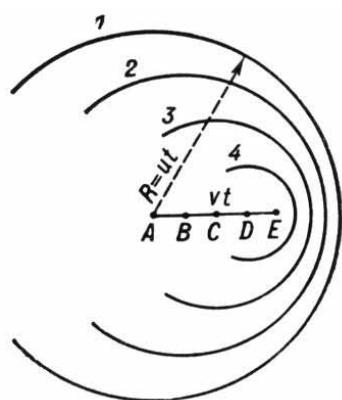


2.3.4 Излучение Черенкова-Вавилова

Черенкова – Вавилова излучение – световое излучение, возникающее при движении в веществе электрически заряженных частиц (например, электронов) со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этом веществе (скорость распространения световых волн). В отличие от тормозного излучения, возникающего при неравномерном движении электрических зарядов, черенковское излучение возникает и при равномерном движении, но при скоростях движения электрона, превышающих скорость света в данной среде. Обнаружено в 1934 П.А.Черенковым при исследовании гамма-люминесценции растворов как слабое голубое свечение жидкостей под действием гамма-лучей. Уже первые эксперименты Черенкова, предпринятые по инициативе С.И.Вавилова, выявили ряд характерных особенностей излучения: свечение наблюдается у всех чистых прозрачных жидкостей, причём яркость мало зависит от их химического состава, излучение имеет поляризацию с преимущественной ориентацией электрического вектора вдоль направления первичного пучка, при этом в отличие от люминесценции не наблюдается ни температурного, ни примесного тушения.

Черенкову удалось доказать, что наряду с люминесценцией при облучении 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.



Обнаруженное Черенковым свечение носит универсальный характер в том смысле, что под действием излучения с достаточной энергией "светятся" все прозрачные тела, а не только жидкости.

Рис. 12. Движение заряженной частицы в среде со скоростью $v < u$. Сферы 1, 2, 3, 4 — положение парциальных волн, испущенных частицей из точек A, B, C, D, соответственно.

На основании этих данных Вавиловым было сделано основополагающее утверждение, что обнаруженное явление — не люминесценция жидкости, а свет излучают движущиеся в ней быстрые электроны (такие электроны возникают под действием гамма-лучей в результате эффекта Комптона). Излучение Черенкова - Вавилова характерно и для твёрдых тел. Различные виды свечения, вызываемого гамма-лучами, наблюдались после открытия радия неоднократно, в частности, свечение жидкостей под действием гамма-лучей исследовалось (1926-29) французским учёным М.Л.Малле, получившим фотографии его спектра. Однако доказательств того, что это явление новое, не было, не установлено было и наиболее характерное свойство излучения (обнаруженное Черенковым в 1936) - его направленность под острым углом к скорости частицы.

Механизм явления был выяснен в работе И.Е.Тамма и И.М.Франка (1937), содержащей и количественную теорию, основанную на уравнениях классической электродинамики. К тем же результатам привело и квантовое рассмотрение (В.Л.Гинзбург, 1940).

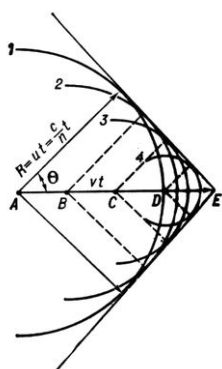


Рис. 13. Движение заряженной частицы в среде со скоростью $v > u$. Угол θ указывает направление возникающего излучения.

Условие возникновения излучения Черенкова-Вавилова и его направленность могут быть пояснены с помощью принципа Гюйгенса-Френеля. Для этого каждую точку траектории заряженной частицы (например, A, B, C, D, Рис. 12 и 13) следует считать источником волны, возникающей в момент прохождения через неё заряда. В оптически изотропной среде такие парциальные волны будут сферическими, т.к. они распространяются во все стороны с одинаковой скоростью $u = c/n$ (здесь c — скорость света в вакууме, а n — показатель преломления света данной среды). Допустим, что частица, двигаясь со скоростью u , в момент наблюдения находилась в точке E. За t секунд до этого она проходила через точку A (расстояние до неё от E равно ut). Следовательно, волна, испущенная из A, к моменту наблюдения представится сферой радиуса $R = ut$ (на рис. 1 и 2 ей соответствует окружность 1). Из точек B, C, D свет был испущен во всё

более и более поздние моменты времени, и волны из них представляют окружности 2, 3, 4. По принципу Гюйгенса парциальные волны гасят друг друга в результате интерференции всюду, за исключением их общей огибающей, которой соответствует волновая поверхность света, распространяющегося в среде.

Пусть скорость частицы u меньше скорости света c в среде (**Рис. 12**). Тогда свет, распространяющийся вперёд, будет обгонять частицу на тем большее расстояние, чем раньше он испущен. Общей огибающей парциальные волны при этом не имеют — все окружности 1, 2, 3, 4 лежат одна внутри другой. Это соответствует тому очевидному факту, что электрический заряд при равномерном и прямолинейном движении со скоростью, меньшей скорости света в среде, не должен излучать свет. Однако положение иное, если

$$u > c/n, \text{ или } \beta n > 1 \quad (3)$$

(где $\beta = u/c$), т. е. если частица движется быстрее световых волн. Соответствующие им сферы пересекаются (**Рис. 13**). Их общая огибающая (волновая поверхность) — конус с вершиной в точке E , совпадающей с мгновенным положением частицы, а нормали к образующим конуса определяют волновые векторы (т. е. направление распространения света). Угол, который составляет волновой вектор с направлением движения частицы (см. **Рис. 13**), удовлетворяет соотношению:

$$\cos q = u/c = c/nu = 1/\beta n. \quad (4)$$

Такой же метод рассмотрения можно провести и для оптически анизотропных сред. При этом нужно учитывать, что скорость света в этой среде зависит от направления его распространения, поэтому парциальные волны не являются сферами. В этом случае обыкновенному и необыкновенному лучам будут соответствовать разные конусы, и излучение будет возникать под разными углами q к направлению распространения частицы согласно соотношению (4). Условие (3) для оптически анизотропных сред формулируется несколько иначе. Во всех случаях основные формулы теории хорошо согласуются с опытом.

Теория показала, что в оптически изотропной среде частица с зарядом e , прошедшая расстояние в l см со скоростью $u > c/n$, излучает энергию:

$$E = \frac{e^2}{c^2} \int_{\beta n(\omega) > 1} \omega \left[1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\omega)} \right] d\omega \quad (5)$$

$\omega = 2\pi c/l$ - циклическая частота света, l - длина волны излучаемого света в вакууме). Подынтегральное выражение определяет распределение энергии в спектре излучения Черенкова - Вавилова, а область интегрирования ограничена условием (4).

Излучение Черенкова-Вавилова возникает при движении не только электрона в среде, но и любой заряженной частицы, если для неё выполняется условие (4). Для электронов в жидкостях и твёрдых телах условие (4) начинает выполняться уже при энергиях $\sim 10^5$ эв (такие энергии имеют многие электроны радиоактивных процессов). Более тяжёлые частицы должны обладать большей энергией, например протон, масса которого в ~ 2000 раз больше электронной, для достижения необходимой скорости должен обладать энергией $\sim 10^8$ эв (такие протоны можно получить только в современных ускорителях).

На основе излучения Черенкова - Вавилова разработаны экспериментальные методы, которые широко применяются в ядерной физике как для регистрации частиц, так и для изучения их природы. Измерение q в среде (радиаторе) с известным n или определение порога излучения позволяют получать из уравнения (4) или условия (3) скорость частицы. Установив скорость частицы и определив её энергию по отклонению в магнитном поле, можно рассчитать массу частицы (это было, например, использовано при открытии антипротона). Для ультрарелятивистских частиц условие (3) начинает выполняться уже в сжатых газах (газовые черенковские счётчики). Излучение Черенкова-Вавилова, возникающее в атмосфере Земли, служит для изучения космических лучей.

Излучение Черенкова-Вавилова может наблюдаться в чистом виде только в идеальных случаях, когда частица движется с постоянной скоростью в радиаторе неограниченной длины. При пересечении частицей поверхности радиатора возникает т. н. переходное излучение. Оно было теоретически предсказано Гинзбургом и Франком (1946) и впоследствии исследовано экспериментально. Сущность его состоит в том, что электромагнитное поле частицы в вакууме и в среде различны. Любое изменение поля частицы всегда приводит к излучению света. При тормозном излучении, например, оно вызывается изменением скорости частицы, а в случае переходного излучения тем, что меняются электромагнитные свойства среды вдоль траектории частицы. В тонком радиаторе, удовлетворяющем условию (3), переходное излучение в известной мере неотделимо от излучения Черенкова-Вавилова. В непрозрачных для света веществах возникающее на их границе переходное излучение играет доминирующую роль, т.к. интенсивность излучения Черенкова-Вавилова снижена его поглощением. Переходное излучение возникает и тогда, когда не выполнено условие (4) (например, при малых

скоростях частицы или, напротив, при излучении ультрарелятивистской частицы в области частот рентгеновского спектра, где $n < 1$ и, следовательно, всегда $bn < 1$). Интенсивность переходного излучения мала и обычно недостаточна для регистрации отдельной частицы. Для эффективной его регистрации может быть использовано суммирование излучения частицы при последовательном пересечении ею нескольких границ раздела.

В 1940 Э. Ферми обобщил теорию излучения Черенкова-Вавилова и., приняв во внимание, что реальная среда обладает способностью поглощать свет по крайней мере в некоторых областях спектра. Полученные им результаты внесли существенные уточнения в теорию т. н. ионизационных потерь заряженными частицами (эффект поляризации среды).

Излучение Черенкова-Вавилова является примером оптики «сверхсветовых» скоростей и имеет принципиальное значение. Излучение Черенкова-Вавилова экспериментально и теоретически изучено не только в оптически изотропных средах, но и в кристаллах (оптически анизотропные среды), теоретически рассмотрено излучение электрических и магнитных диполей и мультиполей. Ожидаемые свойства излучения движущегося магнитного заряда были использованы для поисков магнитного монополя. Рассмотрено излучение частицы в канале внутри среды (например, излучение пучка частиц внутри волновода). При излучении Черенкова-Вавилова новые особенности приобретает эффект Доплера в среде: появляются т. н. аномальный и сложный эффекты Доплера. Можно полагать, что всякая система частиц, способная взаимодействовать с электромагнитным полем, будет излучать свет за счёт своей кинетической энергии, если ее скорость превышает фазовую скорость света.

Теоретические представления, лежащие в основе излучения Черенкова-Вавилова, тесно связаны с др. явлениями, имеющими значение в современной физике (волны Маха в акустике, вопросы устойчивости движения частиц в плазме и генерации в ней волн, некоторые проблемы теории ускорителей частиц, а также генерация и усиление электромагнитных волн).

На базе этого излучения черенковскими счетчиками регистрируются многие высокоэнергетические излучения.

Черенковский счетчик – детектор для регистрации частиц, испускающих Черенкова-Вавилова излучение (которое преобразуется в электрический сигнал с помощью фотоэлектронного умножителя). Применяется в ядерной физике и физике частиц высокой энергии.