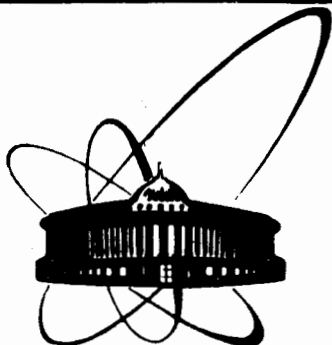


24/2 83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5512/83

P2-83-597

И. М. Франк

О ПОРОГОВОЙ ЧАСТОТЕ
РЕНТГЕНОВСКОГО
ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Направлено в Оргкомитет
II Симпозиума по переходному излучению
частиц высоких энергий
/Ереван, 13-15 сентября 1983 года/

1983

Как хорошо известно, спектр рентгеновского переходного излучения простирается до некоторой $\omega_{гр.}$, величина которой возрастает пропорционально полной энергии частицы E . Для частот $\omega > \omega_{гр.}$ интенсивность быстро падает. Можно положить

$$\omega_{гр} \approx \frac{\omega_p}{\sqrt{2}} \left(\frac{E}{Mc^2} \right), \quad /1/$$

где M - масса частицы, а ω_p - так называемая плазменная или ленгмюровская частота среды, на границе которой возникает переходное излучение

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi Ne^2}{m} \quad /2/$$

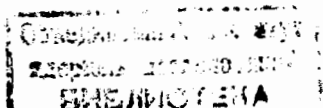
N - плотность электронов в среде, e и m - заряд и масса электрона/. При этом, поскольку граница при $\omega_{гр.}$ не является резкой, а только эффективной, то в численном коэффициенте формулы /1/ имеется некоторый, не очень значительный, произвол.

По-видимому, не является общеизвестным, что $\omega_{гр.}$ имеет простой физический смысл. Как будет видно из дальнейшего, рентгеновское переходное излучение распространяется на область частот $\omega < \omega_{гр.}$, для которых скорость частицы превышает групповую скорость света в среде. Эту особенность $\omega_{гр.}$ можно было бы считать случайным совпадением, если бы она не была характерна для широкого круга явлений, связанных с излучением частиц, движущихся в среде в том случае, когда для его возникновения имеется пороговая скорость.

В самом деле, для излучения света данной частоты всегда существенен показатель преломления, соответствующий этой частоте, т.е. фазовая скорость света. Однако, если искать пороговую частоту, для возникновения самого явления или новых его особенностей, то они всегда определяются величиной групповой скорости по сравнению со скоростью частицы.

В 1942 г. автор этой статьи рассмотрел особенности эффекта Доплера в преломляющей среде /1/. Выяснился ряд особенностей, определяемых показателем преломления, таких, как сложный эффект Доплера /расщепление доплеровской частоты на несколько компонент/ и аномальный эффект Доплера /эффект Доплера при сверхсветовой скорости/. Было найдено условие, при котором эти эффекты возникают.

Говоря о рассмотренном мною эффекте Доплера в среде, в одной из своих лекций Л.И.Мандельштам подчеркнул роль фазовой скорости



света в этих явлениях и упомянул вместе с тем, что и групповая скорость также бывает существенна*. На мой вопрос он ответил, что имел в виду именно пороговые явления в эффекте Доплера. Предполагалось, что они станут предметом нашего совместного обсуждения, однако болезнь и кончина Л.И.Мандельштама помешали этому. Осталось неизвестным, какие физические соображения Л.И.Мандельштам вкладывал в это утверждение.

Что касается полученного мною порогового условия, то его связь с групповой скоростью оказалась элементарной. То же самое было выяснено и для излучения Вавилова-Черенкова /в случае анизотронных сред это не было заранее очевидно/. Обо всем этом мною было сказано позже в Нобелевской лекции 1958 г./3,4/.

Обратимся к рассмотрению этого вопроса для случая переходного излучения. Для этого явления очень существенна величина так называемой когерентной длины /ее часто называют длиной формирования фотона/. По определению, которое было дано еще в 1942 г., когерентная длина равна /1/**:

$$l'(\omega) = \frac{\pi v}{\omega(1 - \beta n(\omega) \cos \theta)}. \quad /3/$$

Здесь v - скорость частицы.

Особенно просто применение когерентной длины l' в случае рентгеновского переходного излучения, поскольку отражением и преломлением волн на границе раздела можно пренебречь. Известно, что, если частица, двигаясь из бесконечности, внезапно останавливается в какой-то точке, то возникающее при этом поле тормозного излучения определяется половиной когерентной длины, примыкающей к точке остановки. Наоборот, если частица мгновенно ускорилась и ушла в бесконечность, то поле определяется половиной когерентной длины у точки ускорения /знаки поля в этих случаях, конечно, противоположны/. Траекторию частицы, пересекающей границу среды и вакуума, можно разбить на два участка - в среде до границы раздела и в вакууме - от границы раздела. Отсюда сразу получаем, что энергия переходного излучения определяется разностью поля от половины когерентных длин в среде и вакууме. Это элементарным образом приводит к известной формуле для энергии переходного излучения /в единице телесного угла в направлении θ по отношению к скорости/

* Упоминание об этом имеется в опубликованном тексте лекций Л.И.Мандельштама /2/.

** Она была впервые применена к рассмотрению эффекта Доплера, и я назвал ее зоной Френеля, так как на этой длине фаза излучаемых волн меняется на π .

$$W(\omega) = \frac{e^2 \beta^2}{4\pi c} \sin^2 \theta \left[\frac{1}{1 - \beta \cos \theta} - \frac{1}{(1 - \beta \cos \theta) + \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \beta \cos \theta} \right]^2. \quad /4/$$

Здесь принято во внимание, что в области рентгеновских частот

$$n = 1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}. \quad /5/$$

Очевидно, что энергия излучения не мала до тех пор, пока разность обоих членов в квадратной скобке существенно отлична от нуля. Для этого, очевидно, необходимо, чтобы

$$(1 - \beta \cos \theta) \leq \frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \beta \cos \theta. \quad /6/$$

Примем, в качестве пороговой величины $\omega_{гр.}$ такую, для которой в уравнении /6/ имеет место равенство. Тогда сразу получаем

$$v \cos \theta = \frac{c}{1 + \frac{\omega_p^2}{2\omega_{гр.}^2}}. \quad /7/$$

Величина, стоящая в правой части /7/, не что иное, как групповая скорость света $W(\omega_{гр.})$ для частоты $\omega_{гр.}$. Таким образом, условие порога*

$$v \cos \theta = W(\omega_{гр.}). \quad /8/$$

Это же пороговое условие имеет место для излучения Вавилова-Черенкова и для сложного и аномального эффекта Доплера. Если пороговое условие выполнено, то в этих эффектах излучение распадается на несколько компонент, причем по крайней мере для одной скорость частицы превышает групповую скорость. В случае рентгеновского переходного излучения при $\omega < \omega_{гр.}$ групповая скорость меньше $W(\omega_{гр.})$ и, следовательно, для основной части излучения скорость частицы превышает групповую скорость света. По-видимому, групповая скорость в пороговых явлениях играет такую же роль, как и фазовая для заданной частоты. Обычное переходное излучение, так же как и обычный эффект Доплера, не являются пороговыми, и к ним это неприменимо.

* Такой же порог имеет место в эффекте плотности тормозного излучения, найденном М.Л.Тер-Микаеляном /5/. Об этом я говорил еще на защите им докторской диссертации. Эффект плотности и рентгеновское переходное излучение однозначно связаны друг с другом.

Задав эффективную величину θ для данного ν , а именно $\theta \sim \frac{Mc^2}{E}$

из /7/, в самом деле можно получить $\omega_{гр.}$, согласующееся с /1/.

Существенно отметить, что в реальном случае счетчиков переходного излучения используется суммирование излучения от многих границ раздела. И толщины слоев вещества и промежутки между ними при этом, конечно, ограничены. Очевидно, что величину энергии из уравнения /4/ можно умножать на число границ раздела только в том случае, когда промежутки между слоями велики по сравнению с величиной когерентной длины, которая в вакууме растет как $\frac{E^2}{M^2c^4}$. Если это условие не выполнено, то энергия излучения будет снижена. Это рассматривалось еще в Нобелевской лекции 1958 г. для случая видимого света и движущихся протонов. При энергии протонов 10^{11} эВ и видимой области спектра когерентная длина около 1 мм, но при энергии 10^{14} эВ она достигает километра. Эта величина уже неразумная, с точки зрения лабораторного эксперимента. Таким образом, для счетчиков видимого света при сверхвысоких энергиях возникают ограничения, зависящие от массы покоя частицы. Быть может, со временем это будет иметь и практическое значение для селекции частиц. В рентгеновской области спектра излучения такие ограничения незначительны /они могут проявляться только в самой мягкой части спектра/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк И.М. Изв. АН СССР, сер.Физ., 1942, 6, с.3.
2. Мандельштам Л.И. Полное собрание трудов. Изд-во АН СССР, М., 1950, т. 5, с. 456.
3. Франк И.М. УФН, 1959, 68, с. 397; Черенков П.А., Тамм И.Е., Франк И.М. Нобелевские лекции, Физматгиз, М., 1960.
4. Франк И.М. ЖЭТФ, 1959, 36, с. 823; 1960, 38, с.1751.
5. Тер-Микаелян М.Л. Докл. АН СССР, 1954, 94, с. 1033.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 августа 1983 года

Франк И.М.

P2-83-597

О пороговой частоте рентгеновского переходного излучения

Рассмотрена связь пороговой частоты рентгеновского переходного излучения с групповой скоростью света в среде. Обсуждается роль когерентной длины в счетчиках переходного излучения.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Frank I.M.

P2-83-597

On the Threshold Frequency of x-Ray Transition Radiation

The relation between the threshold frequency of x-ray transition radiation and the group velocity of light in the medium is considered. The role of coherent length in transition radiation counters is discussed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод автора