

ПРИРОДА

№ 7, 2004 г.

Лебедев А. Н.

Черенковское излучение в электродинамических структурах

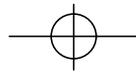
© “Природа”

**Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции**



**Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)**

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco



Черенковское излучение в электродинамических структурах

Член-корреспондент РАН А.Н.Лебедев
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

Эффект Вавилова—Черенкова прочно ассоциируется с электромагнитным излучением точечного заряда, равномерно движущегося в неограниченной сильно преломляющей среде [1, 2]. Отчасти это связано с историей выдающегося открытия П.А.Черенкова, который наблюдал именно электромагнитные волны светового диапазона в очень больших (по сравнению с длиной волны) объемах оптически прозрачного вещества с высоким коэффициентом преломления. Так или иначе, большинство последовавших экспериментальных и теоретических работ было выполнено в рамках таких же условий.

На регистрации черенковского излучения коротковолнового диапазона в различных материалах основаны методы детектирования заряженных частиц, широко используемые в современной экспериментальной физике высоких энергий. Для подобных приложений достаточно очень малой излученной энергии — порой считанных квантов на одну частицу. Поэтому другая сторона эффекта — генерация с его помощью мощного высокочастотного излучения различных диапазонов — кажется, на первый взгляд, довольно неожиданной.

© Лебедев А.Н., 2004

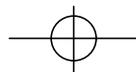
На самом деле эффект Вавилова—Черенкова по существу является основой многочисленных устройств традиционной вакуумной электроники. Кроме того, интерпретация с соответствующих позиций работы таких устройств мощной СВЧ-электроники, как линейные резонансные ускорители, релятивистские мощные лампы бегущей волны или лазеры на свободных электронах, играет иногда принципиальную роль. Конечно, во всех этих случаях речь должна идти о коллективном излучении большого числа электронов, или интенсивных электронных пучков.

Эффект Вавилова—Черенкова как общее волновое явление

Распространение в средах мощных электронных пучков на заметные расстояния невозможно из-за рассеяния, ионизационных потерь, перегрева среды и т.д. Правда, еще в 40-х годах В.Л.Гинзбург указал на возможность черенковского излучения при пролете частицы через вакуумный канал в диэлектрике с достаточным показателем преломления, если диаметр канала сравним с длиной генерируемой волны [3]. Такая схема

действительно опробована и вполне работоспособна, хотя и не совсем удобна с технической точки зрения, так как критична к высокочастотным и механическим свойствам диэлектрика. Кроме того, при генерации электромагнитного излучения для прикладных целей нужно позаботиться, чтобы оно распространялось в заданном направлении (обычно совпадаящем с направлением электронного пучка), а это можно наиболее эффективно осуществить в металлических передающих линиях или волноводах. Короче говоря, с точки зрения рассматриваемого ниже круга явлений каноническая постановка задачи об излучении одиночного электрона в неограниченную среду может встретиться только на страницах учебника по электродинамике.

На первый взгляд, отказ от диэлектрических сред с большим показателем преломления означает и отказ от эффекта Вавилова—Черенкова как такового. Однако даже простейшие попытки взглянуть на этот эффект с более общей точки зрения приводят к установлению его глубоких внутренних связей с широким кругом других физических явлений; недаром теоретическую физику полшутя иногда называют наукой об аналогиях. И дело даже не в извест-



ных физических параллелях между оптическим излучением сверхсветового электрона и акустическим излучением сверхзвукового самолета; перенесение понятий, методов, достаточно общих эффектов из одной области физики в другую часто обнаруживает некоторые новые особенности явления.

К установлению таких аналогий (а по существу внутренних связей) можно прийти на основе общности математической формулировки проблемы. Чрезвычайно широкий круг физических явлений описывается волновыми уравнениями, формулирующими простой принцип — возмущение какой-либо величины в данный момент времени в данной точке пространства вызывает последующие возмущения во всех его точках, если диссипация в системе невелика. Через некоторое время (или достаточно далеко от точки начального возмущения) сигнал «забывает» о своем происхождении и представляет собой совокупность свободных волн (мод) с частотами и конфигурацией, которые определяют только свойствами самой системы.

Иногда свободные волны могут быть и совсем медленными в житейском смысле слова, как, например, поверхностные волны в жидкости. Недаром у Козьмы Пруткова сказано: «Бросая камешки в воду, следи за кругами, ими образуемыми, дабы не было это занятие пустым времяпровождением». Учитывая последнее указание, напомним, что брошенный камешек — это точечное мгновенное возмущение поверхности: он утонул и волна ушла. Но вот от палки, равномерно и достаточно быстро ведомой по поверхности спокойной воды, волны распространяются постоянно, образуя за палкой характерные конусы Маха. Впрочем, иначе и быть не может: если источник равномерно движется со скоростью, большей скорости свободных волн, возмущение никогда не опередит его, оставаясь всегда

сзади. Кстати, нетрудно сообразить, что косинус угла конуса Маха равен просто отношению скорости свободной волны к скорости источника.

На данную тему можно рассуждать долго и не безрезультатно (например, вполне достойно обсуждения, почему конус Маха от сверхзвукового самолета при прохождении через наши уши воспринимается как удар, а волны от корабля имеют хорошо выраженную плавную гармоническую конфигурацию). Однако излучение Черенкова как таковое является, конечно, электромагнитным и будет обсуждаться далее именно в этих рамках.

Синхронизм волн с движением частиц

Очевидно, что для эффективной генерации мощного электромагнитного излучения необходимо получить от каждого электрона как можно большее число квантов, на что требуется достаточно долгое время. Согласно тривиальному закону сохранения, средняя мощность излучения должна быть равна работе, совершаемой в единицу времени электрическим полем волны над равномерно летящей частицей. Чтобы потерять на излучение существенную долю своей энергии, электрон на

всем пути должен находиться примерно в одной фазе волны, систематически подвергаясь тормозящему действию ее продольного поля. Другими словами, скорость электрона v должна быть примерно равна скорости волны v_w .

Речь, конечно, идет о фазовой скорости волны, т.е. о скорости перемещения ее гребня, причем в том же направлении, в каком движется электрон. Применительно к плоским волнам (собственным волнам неограниченного однородного пространства) понятие фазовой скорости обычно ассоциируется со скоростью перемещения фронта. Для диэлектрика с показателем преломления n она равна c/n . Однако скорость перемещения гребня в направлении движения электрона, как ясно из рис. 1, больше и составляет $c/(n \cdot \cos\theta)$. Поэтому из условия равенства скоростей сразу же получается классическое выражение для угла черенковского конуса:

$$\cos\theta = c/vn.$$

Отсюда видно, что в системе разрешено излучение любых волн, у которых фазовая скорость, нормальная к фронту, меньше скорости частицы и $\cos\theta < 1$.

Во избежание недоразумений надо отметить, что фазовая скорость электромагнитных волн в поперечно ограничен-

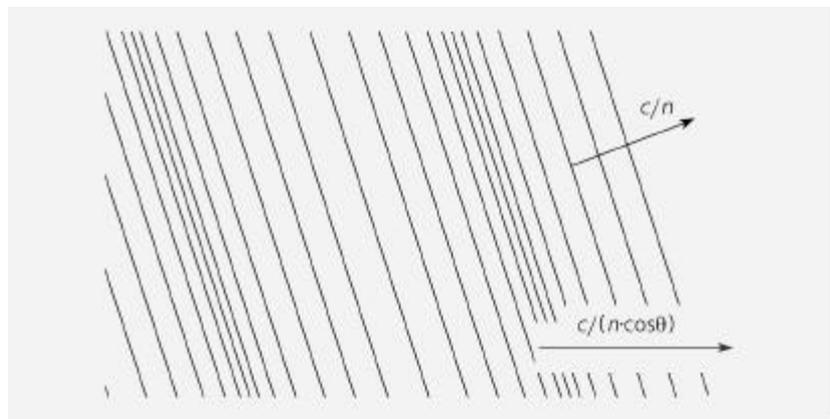
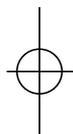
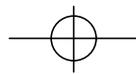


Рис. 1. Фазовая скорость волны перпендикулярно к фронту и вдоль траектории электрона (внизу).





ФИЗИКА

ных волноводных структурах определена только в продольном направлении. Она бывает и больше, и меньше скорости света в пустоте c , хотя на практике имеет тот же порядок.

Если взглянуть на условие равенства скоростей как на условие систематической передачи энергии от частицы волне, т.е. долговременного излучения, то следует сделать логический вывод: частица, синхронная с некоторыми свободными волнами электродинамической системы, может их излучать (равно как и поглощать в зависимости от начальных условий).

Условие синхронизма относится не только к равномерно летящей частице, но и к движущемуся осциллятору, имеющему в лабораторной системе отсчета некоторую частоту Ω . Такой гармонический осциллятор в неограниченной среде будет, конечно, излучать в любом случае, но движение со скоростью v , превышающей скорость свободных волн, имеет неожиданные особенности, непосредственно относящиеся к эффекту Вавилова—Черенкова.

Условие синхронного взаимодействия осциллятора с волной надо записать как $v_{\text{в}} - v = \pm \lambda \Omega / 2\pi$. Физический смысл этого равенства очевиден: систематическая передача энергии возможна, если за время одного периода осциллятора $2\pi/\Omega$ волна обгоняет (знак +) или отстает от частицы (знак -) точно на одну длину волны λ . В частности, из данного соотношения немедленно следует эффект Доплера, который заключается в том, что в направлении своего движения осциллятор излучает частоту ω , превышающую собственную:

$$\omega = 2\pi v_{\text{в}} / \lambda = v_{\text{в}} \Omega / (v - v_{\text{в}}).$$

Отметим, кстати, что при $v \rightarrow v_{\text{в}}$ доплеровское смещение частоты может достигать колоссальных значений.

Однако в данном контексте заслуживает внимания другой вопрос: что происходит с амплитудой колебаний, когда ос-

циллятор излучает? Напрашивающийся ответ — колебания всегда затухают — неверен. Простой расчет, основанный на законах сохранения энергии и импульса, показывает, что изменение энергии колебаний W (т.е. энергии в системе центра тяжести осциллятора) связано с изменением полной энергии E неожиданным соотношением:

$$\Delta W = \Delta E \cdot (1 - v/v_{\text{в}}).$$

Таким образом, если свободная волна имеет скорость, меньшую скорости частицы, то при очевидном уменьшении полной энергии излучателя амплитуда его колебаний возрастает. Поскольку при этом растет и излучаемая мощность, процесс должен развиваться лавинообразно.

Любопытно, что излучение возможно даже при нулевой начальной амплитуде, т.е. при $W = 0$. Такие необычные свойства дали основание назвать это явление аномальным Доплер-эффектом. Его особенности, конечно же, не покушаются на закон сохранения энергии. Источником последней служит энергия продольного движения, которой затрачивается больше, чем необходимо просто на излучение.

Заметим, что аналогичные рассуждения, основанные на законах сохранения, применимы и к равномерному движению свободной частицы, т.е. к черенковскому излучению как таковому. Поскольку внутренняя энергия (т.е. энергия покоя) не может ни уменьшиться, ни увеличиться ($\Delta W = 0$), излучение возможно только при $v = v_{\text{в}}$. Как уже упоминалось, в неограниченной среде это соответствует черенковскому углу $\theta = \arccos(c/vn)$.

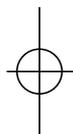
Излучение в волноводных структурах

Коль скоро необходимым условием черенковского излучения оказывается синхронизм ча-

стицы с волной, оно возможно в волноводных или подобных им структурах даже без диэлектрика, играющего в неограниченной среде просто роль замедлителя. Как уже упоминалось, вакуумные волноводные системы так или иначе необходимы для проводки электронного пучка на большое расстояние.

В таких системах поле не обязано спадать с удалением от источника, как было бы в случае неограниченной среды в силу принципа причинности. Последний проявляется теперь в том, что перед частицей поле черенковского излучения равно нулю, а распространяется по системе оно в виде шлейфа (рис. 2). Понятие черенковского конуса в поперечно ограниченной системе теряет смысл. Заметим, что электромагнитная энергия, заключающаяся в шлейфе свободных волн, распространяется с групповой скоростью, которая, как правило, меньше фазовой. Если они направлены в одну сторону, то поле в непосредственной близости к частице «накапливается», монотонно возрастаая с пройденным расстоянием.

Эта картина омрачается только одним, но немаловажным обстоятельством [4]: в металлическом однородном волноводе (или передающей линии) фазовая скорость всех свободных волн больше (или равна) скорости света c . В противном случае в системе отсчета, движущейся вместе с волной, мы увидели бы бессмысленную картину: стационарное электрическое поле в отсутствие своих источников, т.е. зарядов. Чтобы снизить скорость, используют волноводы с диэлектрическим покрытием стенок или системы типа спиралей и волноводов, периодически нагруженных диафрагмами, или, наконец, ребристые поверхности типа дифракционных решеток. В подобных системах возможно распространение медленных волн и, следовательно, черенковское излучение. Надо сразу же подчеркнуть, что во всех слу-



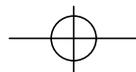
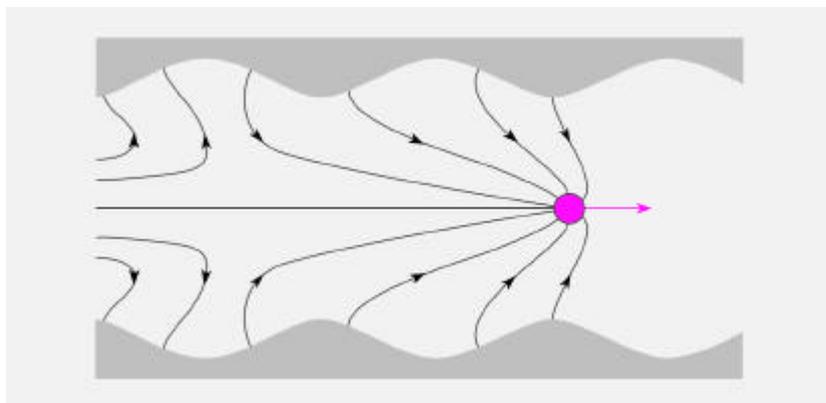


Рис.2. Структура силовых линий электрического поля электрона в гофрированном волноводе медленных волн.



чаях эффективно излучать будет только частица, которая пролетает в непосредственной близости от поверхностей, ведущей волну. За критерий близости можно принять величину порядка длины волны (с некоторыми оговорками для частиц очень высокой энергии). Если совместить это требование с естественными геометрическими ограничениями при транспортировке мощных пучков электронов, становится ясно — использование черенковского излучения для обсуждаемых целей возможно в относительно длинноволновом диапазоне.

Строго говоря, свободные волны в периодических структурах не периодичны в пространстве, так что понятие фазовой скорости применимо к ним только с серьезными оговорками, на которых мы здесь останавливаться не будем. Впрочем, иногда на этой особенности периодических структур основывается альтернативная интер-

претация явления. В качестве примера можно привести так называемый эффект Смита—Перселла, состоящий в том, что частица излучает, пролетая вблизи гофрированной проводящей поверхности. Авторы дали ему не лишнюю изящества интерпретацию: сама частица движется равномерно и прямолинейно, а ее электростатическое изображение в идеально проводящей поверхности испытывает скачки (см. рис.3), так что дипольный момент системы периодически зависит от времени и дает излучение. Правда, такая интерпретация (вместе с понятием электростатического изображения) имеет смысл только для нерелятивистских частиц и при достаточно больших периодах гофра. Специалисты по СВЧ-электронике, конечно, сразу же идентифицируют это явление как хорошо им известное излучение «на гребенке» [5]. К последнему остается только добавить, что в основе

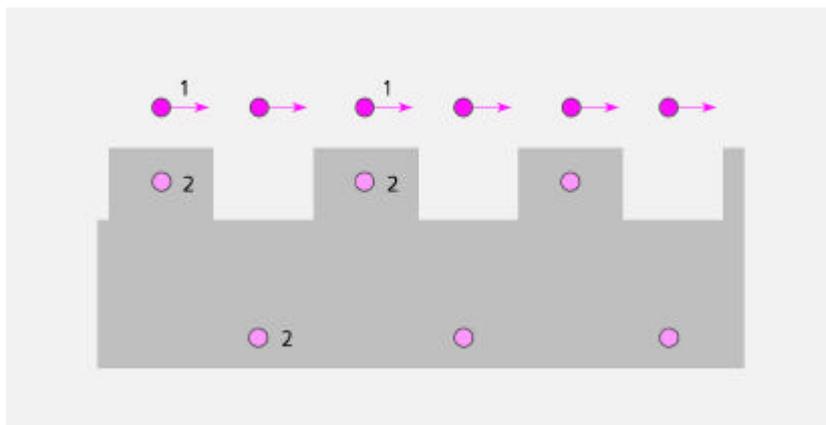
процесса лежит черенковское излучение медленной поверхностной волны, распространяющейся вдоль решетки с той же скоростью, что и частица.

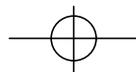
Другой пример альтернативной интерпретации представлен на рис.4, где частица пролетает через последовательность одинаковых электродинамически не связанных резонаторов. С одной стороны, такую систему можно рассматривать как очень сильно диафрагмированный волновод, к которому применима концепция медленных собственных волн. С другой стороны, электромагнитные колебания в резонаторах происходят на одной и той же собственной частоте (мы учитываем только основную моду), хотя и могут быть сдвинуты по фазе, образуя в масштабе всей системы бегущую замедленную волну. В каждом резонаторе частица излучает при выходе из торцевой стенки и при входе в последующую, так что применительно к одной

Рис.3. Интерпретация эффекта Смита—Перселла как излучения переменного диполя.

1 — равномерно движущиеся заряды.

2 — их электростатическое изображение в проводящей





ФИЗИКА

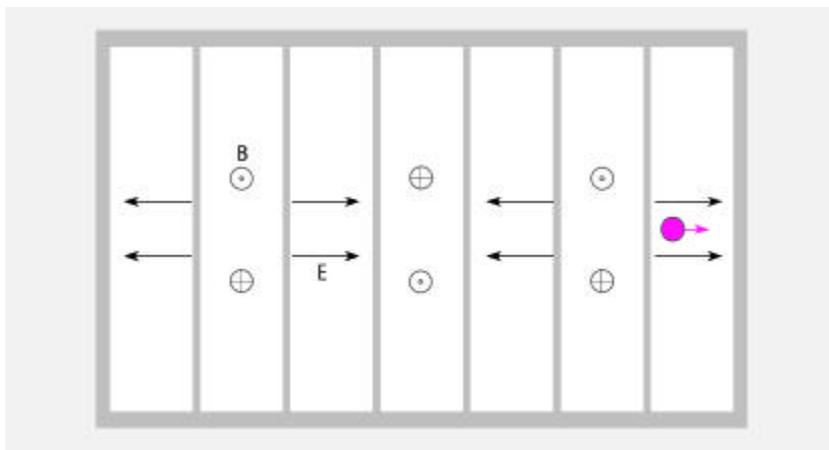


Рис.4. Волна, возбуждаемая электроном в цепочке не связанных резонаторов. В – вектор магнитной индукции, E – вектор напряженности электрического поля.

ячейке эффект естественно интерпретировать как переходное излучение. Сдвиг фазы между соседними ячейками автоматически определяется скоростью частицы, поэтому возникло название «резонансное переходное излучение», иногда распространяемое и на другие периодические системы. На наш взгляд, физически это не слишком оправдано, так как этимологически само понятие «переходное» относится к однократному акту излучения, тогда как «резонанс» подразумевает длительный процесс. Что касается амплитуды поля в уже пройденных частицей ячейках, то она остается без дальнейших изменений, поскольку групповая скорость в системе не связанных резонаторов равна, конечно, нулю.

поле излучения складывается из индивидуальных полей со случайными фазами и, следовательно, с разными знаками. Можно даже сказать, что почти половина частиц излучает энергию, а почти половина поглощает ее. Результирующая же мощность обусловлена этим самым «почти», т.е. случайными отклонениями плотности частиц от равномерной. Такое излучение ансамбля частиц принято называть спонтанным, или полностью некогерентным.

Положение резко меняется, если расположение частиц упорядочено в масштабе длины излучаемой волны. В качестве простейшего примера обычно приводят «точечный» (т.е. с размерами, меньшими длины вол-

ны) сгусток, состоящий из N идентичных частиц. Для него поля излучения точно складываются, а мощность, пропорциональная квадрату поля, увеличивается по сравнению с одной частицей в N^2 (а не в N) раз. Такое излучение называется полностью когерентным, и при большом N оно может достигать значительных мощностей, полностью повторяя по остальным характеристикам — направленности, спектру и т.д. — излучение отдельной частицы.

Как всегда, дьявол кроется в деталях: реальный сгусток одноименно заряженных частиц представляет собой весьма короткоживущее образование, особенно при малых размерах. Поэтому для излучения на ко-

Когерентное черенковское излучение

Мощность черенковского излучения одиночной частицы в лучшем случае составляет по порядку величины лишь доли микроватта, что достаточно для регистрации отдельных частиц, но, конечно, не представляет никакого интереса для генерации электромагнитных колебаний. Даже большое количество одновременно излучающих частиц не исправляет положения. Причина в том, что суммарное

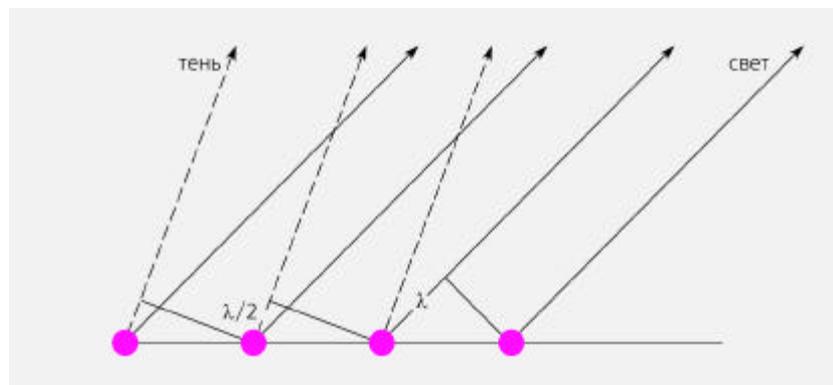
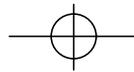


Рис.5. Угловое распределение когерентного черенковского излучения цепочки зарядов. Излучение с длиной волны λ от двух соседних сгустков гасится в направлении, показанном штриховыми линиями, так как волны находятся в противофазе, и усиливается в направлении, показанном



ротких волнах и достаточно длительного число N не может быть велико. Эту трудность можно было бы обойти, жестко размещая излучающие частицы друг относительно друга на расстоянии, равном одной длине волны. Тогда поля излучения в направлении движения складываются по-прежнему в фазе, а размер цуга частиц в продольном направлении и, соответственно, их полное число теоретически ничем не ограничены, кроме длины системы. Практически надо говорить о регулярно расположенных сгустках частиц небольшой плотности.

Такая модель когерентно излучающих частиц имеет существенную особенность, четко выраженную для цепочки, которая излучает в неограниченную среду. Как ясно из рис.5, когерентное сложение при заданной длине волны возможно, если расстояние между сгустками чуть превышает ее. В этом случае когерентное излучение должно быть монохроматическим и резко направленным вперед, что важно для его эффективного использования. В поперечно ограниченных электродинамических структурах, где понятие угла распространения излучения теряет смысл, произвольное периодическое распределение либо вообще не излучает когерентно, либо излучает лишь одну моду с частотой и длиной волны, заданными периодом и синхронной фазовой скоростью.

Индucedированное черенковское излучение

Реализация возможностей когерентного излучения упирается, конечно, в проблему «приготовления» пучка электронов, состоящего из регулярной заданной последовательности сгустков или, по крайней мере, модулированного по плотности с периодом, соответствующим длине волны. В некоторых слу-

чаях это может быть осуществлено небольшой начальной модуляцией скорости частиц с последующей их группировкой в дрейфовом пространстве (клистрон), либо механическим «нарезанием» пучка входным модулятором плотности (чоппертрон). Кстати, последний метод, возможно, получит новое рождение в связи с появлением современных фотокатодов, активируемых последовательностью коротких импульсов лазерного света.

Все эти методы имеют свои недостатки физического или технического характера, особенно при переходе ко все большим мощностям и частотам генерируемого поля. К счастью, сама природа предлагает некоторый альтернативный выход на основе так называемого эффекта индуцированного излучения.

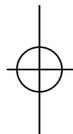
В своей общей постановке эффект индуцированного излучения заключается в том, что полная мощность излучения при наличии уже существующего поля пропорциональна мощности последнего. Более того, излучаемые кванты оказываются точной репликой существующих по частоте, направлению и поляризации. Важно только, чтобы процесс излучения мог превалировать над обратным процессом поглощения. В квантовых генераторах когерентного излучения (мазерах и лазерах) это достигается за счет специфического распределения излучателей по энергетическим уровням (инверсной заселенности). Эффект настолько прост с квантовомеханической точки зрения и стал таким привычным, что его физический механизм даже не обсуждается. Однако в классической системе, какой является поток электронов, механизм индуцированного излучения требует объяснения.

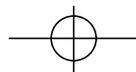
Амплитуда поля черенковского излучения, разумеется, не зависит от наличия уже имеющейся волны. Все дело в коге-

рентном сложении полей. Если поле черенковского излучения находится в фазе с внешним, то выходная мощность увеличивается; если в противофазе, то уменьшается (именно за счет черенковского излучения!). Вопрос в том, каким будет результат при изначально случайном распределении индивидуальных излучателей по фазам.

Для волны, точно синхронной с частицами, и при случайном распределении по фазе ответ прост и довольно пессимистичен: мощность складывается с мощностью имеющейся волны. Интереснее дело обстоит для волн, чуть-чуть более медленных, чем электроны. Излучатели, находившиеся в тормозящей фазе, отдают волне энергию и замедляются, приближаясь к точному синхронизму — их фаза меняется все медленнее и медленнее. Те, что находятся в противофазе, наоборот, ускоряются, быстро меняют фазу и нагоняют первые. Но эти процессы теперь несимметричны. В результате встреча происходит в среднем в тормозящих фазах, где образуются соответствующие локальные увеличения плотности (см. рис.6). Другими словами, реакция излучения такова, что пучок самопроизвольно разбивается на сгустки, находящиеся в тормозящих фазах. Остальное доделывает когерентность, резко увеличивая мощность излучения данной волны. Нетрудно сообразить, что для волн, чуть более быстрых, чем частицы, ситуация обратная — они поглощаются.

В применении к черенковскому излучению все эти рассуждения требуют специальной оговорки, поскольку выше декларировалось, что излучаться может лишь точно синхронная волна. Однако это верно только для бесконечно длинной системы, а на конечной длине излучается спектральная линия конечной ширины. Ясен и критерий синхронности — в реальной системе излучаются все медленные волны, которые не успели





ФИЗИКА

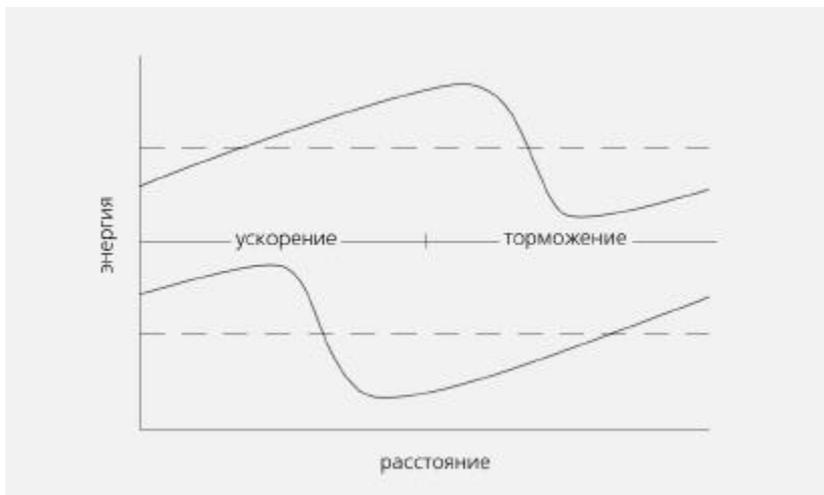


Рис. 6. Перераспределение изначально однородного пучка (штриховая линия) в результате индуцированного излучения (верхняя кривая) и поглощения (нижняя кривая).

ности взаимодействия пучка с волной.

Когерентное излучение взаимодействующих частиц

Упомянутый в заголовке процесс происходит в плотных пучках, где существенно сказываются эффекты взаимного кулоновского расталкивания частиц. Кажущееся интуитивно ясным противодействие кулоновских сил группирующему действию поля излучения при ближайшем рассмотрении не так очевидно. Действительно, в системе отсчета, связанной с пучком, расталкивающее действие кулоновских сил отнюдь не разрушает возникшую по каким-то причинам модуляцию плотности, а лишь инициирует незатухающие и распространяющиеся вдоль пучка симметрично в обе стороны волны (так называемые плазменные волны). В лабораторной системе отсчета эти волны переносятся вдоль пучка в одну сторону, но одна оказывается чуть быстрее частиц пучка (хотя и всегда медленнее света), а другая чуть медленнее. Таким образом, достаточно плотный пучок выглядит как континуум, по которому распространяются волны пространственного заряда. В качестве источника черенковского излучения теперь выступают не отдельные частицы, а максимумы плотности, причем когерентность обеспечивается, когда частота и фазовая скорость волны пространственного заряда совпадают с частотой и фазовой скоростью электромагнитной волны в отсутствие пучка. В итоге создаются новые интересные физические ситуации.

Прежде всего, появляется возможность когерентного черенковского излучения для волн, более быстрых, чем частицы. При этом входящий пучок должен быть изначально промодулирован достаточно быстрой

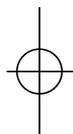
почувствовать свою несинхронность. Это означает, что индуцируется излучение всех возможных волн, отстающих от частицы по фазе не больше чем на π , а все остальные поглощаются пучком либо вообще не взаимодействуют с ним. Поскольку усилению не подвергаются ни точно синхронные волны, ни слишком медленные, имеется некоторая оптимальная мода, которая в конце концов и выживает в борьбе за существование, экспоненциально усиливаясь.

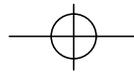
Естественно, чем сильнее описанная автофазировка, пропорциональная мощности волны, тем больше мощность когерентного излучения, которое и надо интерпретировать как индуцированное. Конечно, полной когерентности добиться нельзя, и реально модуляция плотности пучка составляет на практике всего несколько процентов. Однако из-за большого числа частиц результат может быть весьма впечатляющим. Так, мощный пучок сильноточного ускорителя с импульсным током 10 кА излучает импульсную мощность порядка гигаватт, тогда как в режиме спонтанного излучения он должен был бы давать несколько ватт (правда, в данном случае ис-

пользуется несколько другой механизм излучения, но соотношение остается того же порядка и для черенковского генератора).

Сформулируем теперь вывод из этих качественных рассуждений. Если имеется вакуумная электромагнитная структура, допускающая распространение медленных волн, то прямолинейный поток релятивистских электронов спонтанно разбивается на последовательность сгустков и в силу эффекта Вавилова—Черенкова когерентно излучает волны, которые несколько медленнее частиц. В оптимальных условиях при этом оказываются волны, отстающие от частицы на всей длине системы примерно на половину длины волны. Такие волны эволюционируют вдоль системы, существенно повышая свою мощность и монохроматизируясь.

Надо признать, правда, что устройство, основанное на рассмотренных явлениях, известно в радиофизике довольно давно как лампа бегущей волны. Исторически его работа объяснялась из других представлений, но концепция индуцированного черенковского излучения позволяет продвинуться дальше, предсказывая и новые особен-





волной пространственного заряда. По существу, такой метод был бы модификацией упомянутого выше чоппертрона, но позволил бы использовать частицы меньшей энергии. К сожалению, индуцированное излучение в данном варианте невозможно, и амплитуда волны пространственного заряда уменьшается при возникновении и развитии волны излучения.

При совпадении частот и фазовых скоростей электромагнитной волны и медленной волны пространственного заряда возможно и индуцированное излучение. Интересно, что амплитуды обеих волн при взаимодействии возрастают: первая в силу излучения, а вторая из-за сопутствующей группировки частиц. По этой причине медленную волну пространственного заряда относят к классу так называемых волн с отрицательной энергией, имея в виду, что суммарная кинетическая энергия частиц в возбужденном состоянии меньше, чем в равновесном. Так получается потому, что в местах с большей плотностью частицы имеют меньшую скорость, чем в разрежениях.

Суммарный же энергетический баланс остается положительным за счет уменьшения средней скорости частиц. Стоит обратить внимание на внутреннюю связь этого явления и аномального эффекта Доплера, где амплитуда осциллятора возрастает при испускании фотона.

Таким образом, при большой плотности пучка, характерной для электроники больших мощностей, реализуется своеобразный режим, когда вместе с излучением фотона происходит и излучение плазмона — кванта волны пространственного заряда. Коэффициент усиления внешней «затравочной» волны слабее, чем в режиме малой плотности, но практически может достигать очень больших величин.

* * *

Чтобы все сказанное выше не казалось абстрактным теоретизированием, стоит привести некоторые цифры. Наиболее впечатляют, пожалуй, работы по достижению большой импульсной мощности, заложившие основу нового направления — импульс-

ной сильноточной электроники. Уже в первых экспериментах с сильноточными пучками, выполненных на почти интуитивном уровне в начале 70-х годов в Корнелльском университете в США и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН), была получена мощность порядка сотен мегаватт в десятисантиметровом диапазоне длин волн. Первые целенаправленные разработки релятивистской лампы обратной волны были проведены совместно ФИАНом и Институтом прикладной физики (Н.Новгород), а также в Мерилендском университете (США). Рекорд же (в районе десятка гигаватт) принадлежит, по-видимому, Институту сильноточной электроники (Томск). Правда, от практически используемого генератора требуется не только, и даже не столько импульсная мощность, сколько и некоторые другие характеристики — высокий КПД, низкий уровень шумов, стабильность и т.д., но это тема уже другого разговора, не связанного непосредственно с эффектом Вавилова—Черенкова. ■

Литература

1. Болотовский Б.М. // Труды ФИАН. 1982. Т.140. С.95—140.
2. Джелли Дж. Черенковское излучение и его применение. М., 1960.
3. Гинзбург В.Л., Франк И.М. // Докл. АН СССР. 1947. Т.75. С.699—704.
4. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., 1988.
5. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот. М., 1980.