
МНОГОЧАСТИЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКЕ 2-я Международная конференция

О КОЛЛЕКТИВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

М. Я. Амусья^{1, 2}, В. Н. Цытович³

¹Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, РАН, Россия

²Институт физики им. Дж. Рака, Хибру университет, Иерусалим, Израиль

³Физический институт им. П. Н. Лебедева, РАН, Россия

Качественно рассмотрены различные проявления коллективных (многочастичных) эффектов при излучении электромагнитных волн от радио- до гамма-диапазонов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мы живем в «море» электромагнитных волн. Свет — это электромагнитные волны. Радио и телевизионные сигналы передаются при помощи электромагнитных волн. С их помощью работает и современная телефонная связь. Можно сказать, что электромагнитные волны вошли в наш быт, в повседневную жизнь так, что мы их иногда мало замечаем. Волны эти разных длин, от тысячных долей миллиметра (свет) до сантиметров, дециметров (телевизионные волны) или до метров и сотен метров (радиоволны). Из космоса на Землю поступают различные электромагнитные излучения: от разнообразных космических источников, которые в радиодиапазоне могут быть ярче многих звезд, от рентгеновских космических источников, и даже, как принято говорить, очень жесткие электромагнитные волны (γ -излучение, которое в сотни и более раз короче световых волн).

Не только мы на Земле, но и сама Земля купается в «море» электромагнитных волн разной природы, разных длин. Каждая из них является отражением каких-либо процессов, происходящих на Земле или в космосе.

Поэтому-то изучение того, как излучаются электромагнитные волны, издавна представляло одну из фундаментальных

проблем естествознания и физики как его части. Зная, как излучаются электромагнитные волны, мы можем их использовать в практических делах на Земле — для передачи информации по радио, телевидению, телефону и т.п., а также составить определенные представления о процессах, которые происходят в отдаленном космосе. Собственно, другой информации об окружающем нас космосе, кроме анализа поступающего на Земле электромагнитного излучения, у нас, по сути дела, нет. Это делает проблему изучения механизмов излучения одной из основных мировоззренческих проблем. На Земле электромагнитные излучения являются не только продуктом экономического развития и современных технологий, но и активно используются как инструмент познания окружающего нас вещества.

Заряженные частицы, проходя через вещество, испускают излучение, анализ которого дает информацию как о структуре вещества, так и о природе самих частиц.

Вопросом о том, как происходит излучение электромагнитных волн зарядами, стали интересоваться сразу же, как только была понята фундаментальная роль, которую играют электромагнитные излучения в современном мире. Некоторое наглядное представление об этом мы здесь дадим, описав, как излучает пульсар.

Несколько слов о том, что такое пульсар. Согласно существующим сейчас представлениям, это сверхплотный остаток взорвавшейся звезды радиусом около 10 км, очень быстро вращающийся (один оборот за доли секунды), и имеющий очень сильное магнитное поле. Для процесса излучения нас сейчас будет интересовать только то, что его магнитное поле можно представить себе как магнит с северным и южным полюсом, не совпадающим с осью вращения пульсара. Пусть этот магнит перпендикулярен оси вращения. Можно представить себе простейшую модель — обычную магнитную стрелку, подвешенную на нити за среднюю часть, и нить, закрученную в одну сторону. Если магнитик отпустить, то он будет вращаться, правда, неравномерно. Примерно так же вращается магнит-пульсар, только очень равномерно — в силу большой инерции и массы звезды, а «закрутил» его взрыв звезды, который привел к образованию сверхплотного пульсара. Итак, рассмотрим простейший пример магнитной стрелки, вращающейся с постоянной угловой скоростью, т.е. вращающейся равномерно. Будет ли она излучать электромагнитные волны? Будет, и понять механизм излучения очень просто. Все электромагнитные волны распространяются с постоянной скоростью (во всяком случае, в пустоте). Эта скорость равна примерно 300 тыс. км/с. Чтобы возбудить волну, нужно, чтобы ее что-то «подталкивало» с такой скоростью. Неужели это может сделать вращающийся магнит? Оказывается, что не только может, но всегда будет это делать, т.е. будет излучать электромагнитные волны.

Так как магнит вращается равномерно, то, чем дальше от центра магнита, тем быстрее вращается магнитное поле. На каком-то расстоянии L скорость вращения силовой линии магнитного поля будет приближаться к скорости света. Это будет на расстоянии $L = c / \omega$, где ω — угловая скорость вращения, c — скорость света. Всякая, даже очень слабая волна на этом расстоянии будет как бы «подталкиваться» полем магнита, или, как говорят, будет усиливаться. А можно сказать и по-другому. Электромагнитные поля не могут «бежать» быстрее света, и поэтому на тех расстояниях, на которых силовые линии вращаются уже со скорос-

тью, близкой к скорости света, они начинают «отрываться» от магнита, образуя электромагнитные волны. Для пульсара это расстояние порядка 100 тыс. км — очень малое по космическим масштабам.

Все электромагнитные волны — носители энергии и импульса, поэтому, излучая электромагнитные волны, пульсар замедляет свое движение: у него отбирается энергия вращательного движения и отнимается вращательный момент. Этот пример нам важен потому, что показывает два важных аспекта механизма излучения. Первый — излучение происходит тогда, когда электромагнитные волны «не успевают» за источником, Второй — всякое излучение электромагнитных волн сопровождается потерей энергии и импульса источником излучения.

Приведенный пример вращающегося магнита, естественно, очень частный, он просто явно нагляден и имеет приложения к таким удивительным космическим объектам, как пульсары. Те же рассуждения, естественно, сохраняются, если, например, на конце нити поместить электрический заряд и заставить его вращаться, закрепив один конец нити. Заряд при этом все время испытывает центробежное ускорение.

Самым ярким и известным примером такого излучения является излучение частиц в магнитном поле, которое (без всякой привязки-ниточки) заставляет вращаться частицу-заряд по окружности, испытывая при этом центробежное ускорение. Излучение релятивистских электронов (со скоростями, близкими к скорости света) в лабораторных ускорителях приходится на видимый и рентгеновский диапазоны электромагнитных волн, а в космосе релятивистские электроны излучают в основном радиоволны, которые детектируются на Земле, и дают информацию о многих явлениях в далеком космосе.

Ясно, что можно было бы не вращать заряд, а заставить его колебаться около некоего положения равновесия. Эффект излучения остается. Поэтому часто говорят, что для излучения нужно ускоренное движение заряда. При этом на определенном расстоянии поле не будет «поспевать» за зарядом и возникнет излучение. Если в вакууме заряд движется равномерно и прямолинейно, то он излучать не может. По-

следнее следует из того, что всегда можно «сесть» на заряд, а там его поле постоянно, и не зависит от времени, а, следовательно, летит вместе с зарядом, не отрываясь от него.

Во всех примерах энергия и импульс электромагнитных волн брались от той частицы, которая подвергалась ускорению, и ее движение было равномерным и прямолинейным. Но мы живем не в мире отдельных частиц, и с отдельными электронами или атомами не столь часто имеем дело. Более реально и чаще всего имеют дело с обычным веществом, в котором большое число частиц и атомов или с взаимодействием отдельных частиц («снарядов», разгоняемых, например, на ускорителях) с веществом мишени, состоящей из большого числа атомов и частиц.

Как же происходит излучение? Не влияют ли одни излучатели на другие? И не может ли быть так, чтобы ускорялись или в общем случае изменяли свое движение одни частицы, а отдавали энергию и импульс в виде электромагнитных волн совсем другие частицы (которые практически мало меняют свое движение)? Это очень интересный круг вопросов, который в общем случае можно было бы определить как эффекты коллективного излучения электромагнитных волн. Оказалось, что такие процессы не экзотичны, а играют фундаментальную роль в процессах излучения. В создании общих физических представлений о механизмах такого излучения особую роль сыграла советская школа научных исследований. Развитие и новые открытия в этом направлении происходят до самого последнего времени. И в первую очередь здесь нужно выделить замечательные работы И. Е. Тамма и И. М. Франка по эффекту Вавилова—Черенкова и работы В. Л. Гинзбурга и И. М. Франка по переходному излучению. Это направление получило дальнейшее развитие в работах советских ученых, в частности одного из авторов настоящей статьи (В. Ц.) и В. Л. Гинзбурга по переходному рассеянию, больших групп исследователей, включая авторов настоящей статьи, по поляризованному тормозному излучению, лазерному пробую, излучению ядерных частиц и даже «элементарных» частиц.

В настоящей статье авторы поставили перед собой задачу по возможности в более

простой форме изложить то новое, что стало достоянием науки в результате последних исследований. Особо важно, что механизмы коллективного излучения, превратившись в новую, по сути дела, физическую концепцию, совсем по-новому осветили и прежние работы по излучению Вавилова—Черенкова и переходному излучению, дали возможность осознать общность физических концепций и дали тот общий взгляд на явления, который может быть даже намного более ценен, чем отдельные эффекты излучения и их интерпретация. Поэтому здесь мы попытаемся изложить этот «общий знаменатель», общее видение явлений, и в рамках такого видения несколько по-иному изложить достаточно известные, возможно, читателю простые механизмы излучения Вавилова—Черенкова и переходного излучения. Ясная и физически наглядная картина приносит обычно большую практическую пользу. Как всякое качественно новое знание, она открывает новые и подчас неожиданные приложения, о которых также пойдет речь в настоящей статье.

2. ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА— ЧЕРЕНКОВА

Это излучение возникает, когда быстрая частица («снаряд») испытывает столкновение или проходит через среду, состоящую из большого числа атомов или молекул, т.е. через обычное вещество. Известно, что вещество может замедлить распространение электромагнитных волн, уменьшить их скорость, которая станет меньше скорости электромагнитных волн в вакууме, т.е. меньше 300 000 км/с. Частицы могут иметь теперь скорости, больше, чем скорость электромагнитных волн в среде (но меньше скорости света в вакууме), которая является предельной скоростью для частиц.

Такие частицы-снаряды создаются многими современными ускорителями. Если частица имеет скорость, большую скорости электромагнитных волн в среде, то поле частицы как бы не поспевает за ней, и должно оторваться от частицы, т.е. излучиться.

Но как же происходит излучение? Излучает ли частица (заряд) или излучает среда, через которую эта частица проходит? Такой вопрос в каком-то смысле бессодер-

жателей, так как процесс излучения, по сути, является коллективным — излучает система частица-снаряд и атомы среды. Ясно, что в движение приходят атомы среды. Электрическое поле частицы-снаряда отталкивает в атомах одноименные заряды и притягивает разноименные. Фактически в атомах среды как наиболее мобильные смещаются электроны. Если налетающая частица заряжена отрицательно, то она отталкивает электроны атома. Их, грубо говоря, становится больше в той части атома, которая дальше всего находится от налетающей частицы, и меньше — в той части, которая ближе всего к налетающей частице, т.е., как говорят, атом поляризуется. Эта поляризация переменна, так как возникает только когда налетающая частица достаточно близко подлетает к атому. Когда она улетает, поляризация пропадает.

Казалось бы, такая переменная поляризация и есть источник излучения. Но эта поляризация происходит вблизи налетающей частицы, а не в той области, где скорость возмущения поле такова, что оно может оторваться и уйти в виде электромагнитной волны. Причем в данном случае не очень существенно, что поляризующиеся электроны в атомах движутся с ускорением при пролете мимо них налетающей частицы. Важно то, что их поляризация (если скорость заряда, например, равна скорости света в среде) за зарядом возникает со скоростью света в среде, т.е. накачивает энергию в электромагнитную волну. Говорят, что переменные поляризации атомов за налетающей частицей когерентны, т.е. что фазы колебаний поляризации жестко «навязаны» налетающей частицей. В грубой модели, когда скорость частицы близка к скорости света в среде, но лишь слегка ее превосходит, атомы перед частицей не поляризованы, а за ней становятся поляризованными, как только она пройдет соответствующий атом, т.е., грубо говоря, каждый атом начинает свои колебания после прохождения частицы. Такая волна поляризации распространяется со скоростью частицы, а ее скорость — это скорость света в среде, т.е. эта поляризация подхлестывает электромагнитную волну, в результате чего происходит ее излучение.

То, что поляризация атомов переменна во времени, тоже играет роль, мы это обсудим несколько ниже. Здесь же мы лишь подчеркнем, что для излучения Вавилова—Черенкова этот эффект по величине — малая поправка, а основной эффект — это когерентность тех поляризаций атомов, которые возникают из-за воздействия поля частицы на атомы среды.

Из этой картины ясно, что участие атомов среды в процессе излучения необходимо: без этого не может быть ни поляризации, ни излучения. Необходимо это и по другой причине — в отсутствие среды скорость электромагнитных волн не могла бы замедлиться до величины, меньшей скорости света в вакууме, а без этого скорость частицы, которая всегда меньше скорости света в вакууме, не смогла бы превысить скорость электромагнитных волн в среде.

Можно было бы при решении вопроса, что же излучает в этом случае — атомы среды или налетающая частица, исходить из того, от чего именно «забираются» энергия и импульс излученных электромагнитных волн, от налетающей частицы или от поляризующихся атомов среды. Однако это не было бы правильным критерием, так как само излучение создается при взаимодействии налетающей частицы со средой, и в отсутствие любого из этих двух компонентов излучение не возникает. Ответ же на поставленный вопрос существует, и ответ однозначный: энергия и импульс излученных электромагнитных волн забираются от налетающей частицы. В этом смысле можно сказать, что излучает именно налетающая частица. Условность этого утверждения очевидна, так как она возникает только из-за определения: тот, кто отдает энергию и импульс, тот и излучает. Фактически же процесс излучения является коллективным, когерентным, и в отсутствие когерентного сложения переменных поляризаций отдельных атомов сам процесс излучения был бы невозможным.

Как же показать, что энергия и импульс электромагнитных волн забираются от самой налетающей частицы?

Во-первых, среда после пролета частицы остается в том же состоянии, в котором она была до пролета частицы, так как вся

поляризация затухает, не оставляя следа. Возникает электромагнитная волна, которая несет свою энергию и свой импульс.

Кстати, ясно, что импульс электромагнитной волны в среде не может быть таким же, как в вакууме (в пустоте), так как волна в среде замедлена и ее скорость меньше скорости в вакууме. Она заставляет, при своем прохождении, колебаться поляризацию среды, и именно это замедляет ее ход, а значит часть импульса электромагнитной волны, распространяющейся в среде, — это импульс, связанный с поляризацией атомов средн. Электроны, колеблющиеся вследствие поляризации, имеют импульс, причем его среднее значение в направлении волны не равно нулю, т.е. импульс электромагнитной волны в среде включает в себя импульс среды, связанный с распространением электромагнитной волны.

Но по-другому волны в среде и не распространяются. Поэтому при излучении часть импульса естественным образом передается среде, в той мере, в какой этого требует распространение в среде электромагнитных волн. Но вот что важно: тот импульс электромагнитной волны и та энергия, которая с ней связана, черпаются исключительно из энергии и импульса налетающей частицы.

Коллективный характер такого излучения станет еще более ясным, если рассмотреть сходные в физическом отношении механизмы излучения, в которых также необходимым элементом выступает поляризация атомов среды или вообще поляризация различных сталкивающихся частиц.

3. ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Пусть теперь скорость частиц (снаряда) меньше скорости распространения электромагнитных волн в среде и, кроме того, постоянна. Будет ли при этом происходить излучение электромагнитных волн? Ответ положителен и по нескольким причинам. Во-первых, никакая среда не будет полностью однородной. Всегда имеются неоднородности ее плотности (причем речь идет о макроскопических неоднородностях), имеются примеси и т.п. Во-вторых, среда имеет всегда микроскопические неоднородности, так как состоит из отдельных атомов, взаимодействие с которыми, хотя и не происходят

в среде так же, как с отдельным атомом, но во многом определяется именно структурой атомов, которая должна характерным образом проявляться.

Рассмотрим сначала макроскопическую (не атомную) неоднородность, простейшим случаем которой являются две различные среды, соприкасающиеся по некоей границе раздела. Налетающая частица должна пересечь эту границу раздела. Когда она находилась далеко от границы раздела и двигалась с некоей скоростью, то своим полем (полем заряда, если это заряд, или полем диполя, если это дипольный момент) она создавала вокруг себя поляризацию окружающих атомов среды.

Эта поляризация видоизменяет само поле в окружении налетающей частицы на достаточном расстоянии от нее. Поляризация, создаваемая частицей с видоизмененным полем, перемещается вместе с частицей, так как оторваться от нее (излучиться) она не может — скорость частицы, по предположению, меньше скорости электромагнитных волн в среде. После пересечения границы раздела сред частица, попав в другую среду (с другой плотностью или с другими свойствами атомов), должна также вызвать поляризацию, видоизменить окружающее ее поле, и эта поляризация снова вдали от границ будет двигаться вместе с частицей.

Но поляризации, возбуждаемые частицей по разные стороны границы раздела, разные, так как среды разные. Следовательно, около границы должна произойти перестройка той поляризации, которая несетя вместе с частицей, и, соответственно, перестройка окружающего ее поля. Это значит, что поляризация, создаваемая около границы, переменна во времени, и это обстоятельство должно вызывать излучение электромагнитных волн так же, как и в приведенном выше примере с пульсаром, на каком-то расстоянии от источника (переменной поляризации, создаваемой зарядом) скорость возмущения будет близка к скорости электромагнитных волн.

Как правило, волны излучаются в обе стороны от границы. Только в случае очень быстрых релятивистских снарядов (т.е. таких снарядов-частиц, скорости которых при-

ближаются к скорости света в данном случае) излучение в основном идет по направлению налетающей частицы. Это излучение называется *переходным излучением* (ибо связано с переходом частицы из одной среды в другую).

Ясно, что пример отдельной резкой границы сред является простейшим. Сходные излучения возникают при многих других неоднородностях, даже если эти неоднородности находятся не прямо на пути частицы, а в стороне от ее траектории, но на расстоянии, на котором поле частицы и окружающая ее поляризация еще эффективно «чувствуют» неоднородность. Свойства среды могут меняться не обязательно в пространстве (пространственная неоднородность), но и во времени. Эффект переходного излучения здесь остается и в этом смысле является весьма общим — любые неоднородности и нестационарности среды приводят к излучению электромагнитных волн, если заряженная частица-снаряд проходит через или около этих неоднородностей.

Всякое такое излучение является коллективным, так как переменная поляризация не может возникать без налетающей частицы, и, следовательно, создается налетающей частицей, а в отсутствие поляризующейся среды от заряда тоже нет излучения. Ставить вопрос о том, что излучает заряд или поляризация — здесь также бессмысленно, но наличие легко поляризующейся среды здесь так же важно, как и отсутствие необходимости изменения скорости заряда-снаряда. Так же, как и в случае излучения Вавилова—Черенкова, масса излучающей частицы могла бы быть и бесконечной, точнее, частицы тяжелые и легкие излучают одинаково при одинаковых скоростях. Объект, который является быстро переменным в процессе излучения, — это фактически легкие электроны поляризующихся атомов среды. Но нельзя сказать, что именно они излучают, поскольку, как подчеркивалось выше, излучение коллективно и определяется эффектом, в котором неразрывно завязано поле самой частицы и его видоизменение из-за поляризации среды.

Косвенно о характере излучения (или о том, что излучает) можно судить, если ответить на вопрос, от чего отбирается энер-

гия и импульс излучаемых волн. Для излучения Вавилова—Черенкова они отбирались от частицы-снаряда. Скорость тяжелых частиц под влиянием среды может измениться весьма незначительно, и этим законно пренебречь. Указанное положение очевидно, но оказывается, что и для легких частиц, несмотря на то, что энергия и импульс отнимаются у них, учет изменения скорости, т.е. ускорение, или, правильнее, отдачи при излучении, является всегда малым эффектом. Скорость можно считать практически постоянной, и не ее изменение вызывает излучение. Заметим, что потеря энергии и импульса и из-за излучения Вавилова—Черенкова также мало меняет скорость частицы.

В случае переходного излучения энергия и импульс также берутся от налетающей частицы, хотя ее скорость практически можно считать постоянной. Но здесь имеется и новый момент, который заключается в том, что часть импульса при излучении забирает на себя граница раздела сред. Вообще, можно было бы сказать и по-другому: передача импульса границе раздела создает возможность излучения частицей, движущейся с постоянной скоростью, электромагнитной волны. Но механизм, осуществляющий такую возможность, действует через переменную поляризацию, возбуждаемую частицей около границы раздела сред.

4. ПЕРЕХОДНОЕ РАССЕЯНИЕ

Обычно рассеяние электромагнитных волн на зарядах происходит так, что падающая волна приводит в движение заряд, а он, перемещаясь в поле падающей волны с ускорением (так как колеблется в нем), становится излучателем вторичных, или, как говорят, рассеянных волн.

Сравнительно недавно одним из авторов (В. Ц.) и В. Л. Гинзбургом было обращено внимание на то, что рассеяние может возникнуть и в том случае, когда заряд не приводится в движение падающей волной. При этом интенсивность такого рассеяния, связанного с коллективными процессами, не только не меньше обычного рассеяния, но может быть и намного больше него. Заряд, который не приводится в движение падающей волной, можно мыслить себе как за-

ряд с очень большой, а в пределе — бесконечной, массой или как каким-либо образом «закрепленный» заряд. Каким же образом он может рассеивать?

Это возникает, если заряд находится в среде. Тогда в отсутствие падающей волны вокруг него возникает вполне определенная поляризация атомов среды и видоизменение из-за этой поляризации окружающего его поля. Такая же ситуация возникает и для любого другого источника поля, помещенного в среду; магнита, диполя и т.п.

Рассмотрим теперь, что происходит с этой поляризацией при падении на заряд (или другой источник поля) электромагнитной волны. Она видоизменяет поляризацию вокруг источника, и эта поляризация, в отличие от той, которая была вокруг источника до падения электромагнитной волны — статической, становится теперь переменной, и, следовательно, становится источником излучения электромагнитных волн. Что же здесь излучает, поляризация или сам заряд? Ответ прежний — эффект этот коллективный. Без заряда нет поляризации и нет излучения. Сама волна при ее распространении создает поляризацию, но последняя является неотъемлемой частью самой волны в среде, и связана только с распространением волны, но не с ее рассеянием (изменением направления интенсивности и т.п.). Рассеяние происходит только на той дополнительной поляризации, которая одновременно создается как зарядом, так и волной.

Случай покоящегося в среде заряда — наиболее наглядный, так как заряд до и после акта излучения неподвижен и все же излучает. Более общий случай, когда заряд движется в среде с постоянной скоростью и на него падает волна, которая рассеивается, причем скорость заряда остается одной и той же, т.е. не меняется в процессе рассеяния, — это общий случай переходного рассеяния.

Можно опять поставить вопрос о том, откуда берутся импульс и энергия излученной (рассеянной) электромагнитной волны. Здесь существенно, что импульс и энергия имеются и у падающей волны. Процесс рассеяния связан с тем, что исчезает падающая волна и появляется рассеянная, т.е. исчезают энергия и импульс падающей волны

и должны быть созданы энергия и импульс рассеянной волны. Значит, в общем случае есть разность энергий падающей и рассеянной волн и разность их импульсов. Как компенсируется эта разность?

Ответ заключается в том, что они берутся от рассеивающего заряда. Это в каком-то смысле указывает на то, что так же, как и при обычном рассеянии, рассеивает сам заряд. Но, как и раньше, процесс является коллективным. Без поляризации, созданной зарядом, и ее видоизменения падающей волной не может быть процесса излучения.

5. ПЕРЕХОДНОЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Тормозным излучением обычно называют то излучение, которое возникает при столкновении двух частиц. Термин довольно условный и исторически возник для того, чтобы подчеркнуть, что при столкновениях частиц они тормозятся (или испытывают отрицательное ускорение), а ускорение или торможение частиц в вакууме, как мы видели, всегда приводит к излучению. Но обычно налетающие частицы — частички-снаряды, — тормозятся в мишени, состоящей из многих атомов. Как же в этом случае происходит излучение?

Мы уже видели, что для излучения частиц в среде совсем не требуется изменения ее скорости. Коллективные процессы поляризации частиц среды могут обеспечить излучение, если скорость частиц больше скорости электромагнитных волн в среде или, в противоположном случае (когда ее скорость меньше скорости электромагнитных волн), если в среде имеются макроскопические, т.е. крупномасштабные неоднородности.

Теперь речь будет идти о тех неоднородностях, которые обязаны своим происхождением атомной структуре вещества.

Во-первых, ясно, что излучение в среде, состоящей из совокупности дискретных атомов конечных размеров, не будет тем же, что и в непрерывной среде, но и не будет суммой излучений на отдельных атомах. Вместе с тем, обычное тормозное излучение вначале трактовалось именно как про-

цесс, происходящий независимо на каждом из атомов, а все излучение — как сумма излучений при последовательном столкновении налетающей частицы с атомами среды.

Кстати, частица-снаряд может пролететь на различных расстояниях от атома, даже пронизать его насквозь, т.е. двигаться через его электронные оболочки или даже пролететь на очень малых расстояниях от заряженного ядра атома — так близко, что электронные оболочки будут влиять на налетающую частицу мало. Это классический пример обычного тормозного излучения, когда сталкиваются два заряда: один легкий (например, электрон), а другой — тяжелый (ядро). Ядро отклоняет легкую частицу от первоначальной траектории (в случае электрона и ядра электрон движется по гиперболической траектории, отлетая от ядра под неким углом к первоначальному направлению движения) и ускорение, связанное с этим отклонением, приводит к излучению, которое и называется тормозным.

Поскольку при прохождении налетающей частицы через вещество мишени всегда имеют место и близкие столкновения (хотя и в небольшом числе), то всегда наблюдается и обычное тормозное излучение.

Тормозное излучение — явление, довольно универсальное, и было обнаружено очень давно, в начале века, в рентгеновских трубках, где поток электронов из катода ударяется о металлический анод. Излучение нашего Солнца тормозной природы. Астрофизики думают, что многие космические источники генерируют рентгеновское и другие электромагнитные излучения тормозным механизмом.

Поэтому тем более важно, что выяснилась ошибочность исходных представлений о тормозном излучении, в которых в течение долгого времени коллективные эффекты, обязанные своим происхождением поляризации частиц, пренебрегались. Однако, чтобы покончить с обычным тормозным излучением, следует ответить на вопрос о том, откуда там берутся импульс и энергия излучаемой волны.

При столкновении двух частиц имеется уже миниатюрный коллектив, состоящий только из двух членов (двух частиц). Утверждение о том, что излучает легкая части-

ца как наиболее подвижная, здесь неточно. Энергия излученной электромагнитной волны действительно берется из энергии налетающей легкой частицы, но импульс «поставляется» как налетающей частицей, так и тяжелым ядром. Ясно, что без передачи импульса ядру процесс излучения был бы невозможен, так как легкий электрон не испытывал бы воздействия и двигался бы свободно, и, следовательно, не излучал бы (эффекты среды и коллективные эффекты в ней мы здесь сознательно при таких рассуждениях игнорируем).

Легко видеть, что спектр обычного тормозного излучения должен быть сплошным, т.е. занимать широкую область частот, от сколь угодно малых до весьма высоких. Очень близкие столкновения редки, но в каждом из них излучается большая энергия. Поэтому распределение по энергиям электромагнитных волн, обязанных своим происхождением обычному тормозному механизму излучения, оказывается слабо зависящим от частоты и простирающимся до весьма высоких частот. Единственным ограничением здесь является условие того, чтобы энергия излученного кванта электромагнитных волн была меньше энергии налетающей частицы. Последнее следует как раз из того, что энергия электромагнитных волн, излученных обычным тормозным механизмом, берется из энергии налетающей частицы.

Примерно тридцать лет назад, благодаря главным образом усилиям советских авторов, работавших в Институте общей физики АН СССР (Москва), Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР (тогда — Ленинград), Московском Физико-техническом институте и Воронежском университете, было обнаружено, что, помимо обычного тормозного механизма, должен существовать и коллективный поляризационный механизм тормозного излучения.

В приведенном выше примере он возникает в случае дальних пролетов налетающих частиц, т.е. пролетов на расстояниях, намного превышающих размеры атома. Налетающая частица тогда уже не почувствует поле ядра, которое оказывается эффективно «заэкранированным» связанными электронами, движущимися в атоме вокруг ядра. Но при этом налетающая частица мо-

жет поляризовать атом своим полем. Эта поляризация переменная, так как сначала налетающая частица находилась далеко от атома и поляризовала его слабо, а затем, подлетев поближе, поляризует его сильнее, и, соответственно, после отлета поляризация постепенно убывает. Такая переменная поляризация должна вызывать излучение электромагнитных волн, которое было названо поляризационным тормозным излучением.

При далеких соударениях излучаются не столь высокие частоты, как при близких, но все же эти частоты могут быть очень большими и попадать даже в рентгеновский диапазон частот. Важно, чтобы длина волны превосходила размер атома. И по интенсивности излучения оно не меньше в этой области частот того, которое возникает от обычного механизма тормозного излучения на «голом» ядре.

Откуда же берется в данном случае энергия и импульс излучающей волны? Оказывается, что здесь дело обстоит так же, как и в случае обычного тормозного излучения, т.е. от налетающей частицы забираются энергия и частично импульс, а часть импульса передается атому как целому (т.е. фактически ядру).

В этом смысле такой механизм очень схож с обычным тормозным излучением. Но различие, и очень существенное, состоит в том, что налетающая частица при поляризационном механизме может вообще не менять свою скорость, т.е. не ускоряться и не тормозиться (за вычетом торможения, обусловленного потерей энергии на излучение фотона), так как все равно она поляризует атом своим полем. Причем величина поляризации зависит только от скорости налетающей частицы, но не от ее массы, и при равных скоростях легкая и тяжелая частицы излучают одинаково.

Таким образом, так же, как и во всех обсуждавшихся в предыдущих разделах механизмах, излучающая частица может быть сколь угодно тяжелой.

Это — качественно новый эффект в тормозном излучении, так как обычное тормозное излучение тяжелых налетающих частиц пренебрежимо мало по сравнению с обычным тормозным излучением легких налетающих частиц.

Можно ли сказать в данном случае, что излучают атомные электроны, которые и создают поляризацию? В определенном смысле, да. Но, как подчеркивалось, этот эффект — коллективный, и без поля налетающей частицы не было бы излучения, а сам атом в конце концов никак не меняется в процессе излучения, так как после пролета налетающей частицы всякие следы поляризации атома исчезают.

При квантовом рассмотрении атом находится на определенном, как говорят, энергетическом уровне. Так как энергия излученной электромагнитной волны, как отмечалось, берется от налетающей частицы, то после столкновения атом остается на том же энергетическом уровне.

Именно в этом состоит нетривиальность эффекта. Хотя, казалось бы, излучают атомные электроны, но от них не забирается энергия. Это может быть только в силу коллективности процесса излучения.

Но есть и другой механизм тормозного излучения, который был назван переходным тормозным излучением. Чтобы объяснить, в чем он состоит, положим, что в среде находится покоящийся заряд. Ранее мы говорили о рассеянии на нем электромагнитных волн, которое происходит из-за того, что заряд окружен поляризованными атомами среды и эта поляризация становится переменной под действием падающей электромагнитной волны. Но ведь такую постоянную поляризацию может вызвать и поле налетающей заряженной частицы, если на покоящийся в среде заряд налетает не волна (называемая падающей на заряд волной), а заряженная частица, которая при подлете все сильнее поляризует окружение покоящегося заряда, а при отлете — все слабее. Происходит излучение, которое было названо переходным тормозным излучением. Здесь также энергия излучаемой волны берется из энергии налетающей частицы, а импульс — частично от налетающей частицы, а частично — от покоящегося заряда. Изменения скорости налетающей частицы, в отличие от обычного тормозного излучения, здесь опять-таки не требуется, хотя энергия и импульс передаются в электромагнитное излучение так же, как и в обычном тормозном механизме. Можно ска-

зять, что переходное тормозное излучение осуществляется путем переходного рассеяния поля налетающей заряженной частицы. Различия между поляризационным тормозным излучением и переходным тормозным излучением не столь велики (а иногда вообще отсутствуют), так как в одном случае поляризация создается электронами самого атома, который сталкивается с налетающей частицей, а во втором — поляризацией других атомов, окружающих заряд.

Пример с зарядом, который помещен в среду и на него налетает другой заряд, довольно частный. Вместо заряда мог бы быть и электрический диполь, и магнитный диполь и, наконец, просто поляризуемый атом.

Но если это атом среды, то, поскольку все атомы равноправны, налетающая частица, поляризовав тот атом, которым мы по каким-то соображениям выбрали в среде, и создав, тем самым, вокруг него поле поляризации, заставляет поляризоваться этим полем и остальные атомы. Последние опять-таки подвержены и поляризации налетающей частицы, и изменению поляризации полем налетающей частицы, той поляризации, которая наведена в выделенном нами атоме. Все они равноправны, и совокупное излучение, строго говоря, не будет суммой излучений отдельных поляризующихся атомов. Иными словами, складываться будут не интенсивности излучений отдельных атомов, а их амплитуды. В этом также состоит коллективный эффект излучения. Но самая интересная картина здесь возникает при генерации излучения в плазме.

6. КОЛЛЕКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ

Говорят, что 99,99 % вещества в окружающем нас мире — это плазма. Плазма имеется уже в ближнем космосе, из плазмы состоят звезды, Солнце, межзвездная среда. В общем, наша Земля — островок в мире плазмы. Плазма — это такое состояние вещества, когда электроны «оторваны» от ядер атомов и движутся свободно. Процесс отрыва происходит автоматически, если нагревать вещество. При не очень больших температурах в плазме встречаются и нейтральные атомы, и атомы, в которых элек-

троны «ободраны» только частично. Их называют частично ионизированными.

Рассмотрим вначале предельно высокие в таком смысле температуры, когда все электроны оторваны от ядер (кстати, для водорода это «не очень» высокие температуры, около 100 тысяч градусов, а в современных установках для создания управляемых термоядерных реакций были достигнуты уже температуры в 100 млн градусов).

В таких условиях плазма — это совокупность свободных электронов и ионов, быстро движущихся в среднем со скоростями, соответствующими температуре плазмы. Где же здесь место поляризации, о которой шла речь выше, когда налетающая частица, отталкивая одни частицы и притягивая другие, поляризовала атом, т.е., грубо говоря, создавала избыток электронов в одной его части и недостаток — в другой? Теперь же все заряды «голые» и свободные: связанных зарядов, образующих атомы, молекулы и т.п., нет.

Оказывается, однако, что в этом случае поляризационные эффекты не только возможны, но и выражены особенно ярко. Для того чтобы понять это, достаточно довольно простых рассуждений.

Предположим, что мы в плазму поместили некий посторонний заряд. Вокруг него движутся свободные электроны и ионы плазмы. Но так как он отталкивает одноименные заряды и притягивает разноименные, в его окрестности в среднем будет меньше зарядов плазмы того же знака, что и помещенный посторонний заряд. Этот недостаток зарядов плазмы означает, что плазмой будет создаваться такое поле, которое «экранирует» поле самого заряда, так что на каком-то расстоянии поле заряда полностью исчезает.

Если в атоме поле ядра экранируется связанными с ним электронами и поэтому в целом атом нейтрален, то заряд, помещенный в плазму, тоже будет экранирован, но уже не связанными с ним электронами, а теми, которые пролетают мимо него, причем это «разные» электроны, но они в среднем, все время «заменяя» друг друга, также экранируют поле заряда. Можно сказать, что заряд, внесенный в плазму, создает вокруг себя поляризацию в виде об-

лака недостатка (или избытка) зарядов (в зависимости от его знака). Однако это динамическое равновесие, когда одни частицы заменяются другими, но в среднем такой «заэкранированный» заряд подобен «классическому» квазинейтральному атому,

Быть может, отличие состоит в том, что в атоме связанные электроны, экранирующие ядро, не так-то легко сместить и изменить поляризацию, тогда как облако свободных электронов около заряда, помещенного в плазму, весьма подвижно. У него нет тех сил, которые привязывают электроны к ядру в атоме, и поэтому поляризацию такого облака значительно легче изменить.

Здесь уместно привести пример, показывающий, насколько радикально коллективные эффекты меняют все наши предшествующие представления о процессах излучения.

Рассмотрим тяжелый ион в плазме. Если бы он был изолирован и находился вне плазмы, то ему было бы очень трудно рассеивать электромагнитные волны, так как у него большая масса и падающая электромагнитная волна не способна его значительно «раскачать». Амплитуда его колебаний в поле падающей волны окажется очень небольшой, и он практически не будет излучать вторичных рассеянных волн т.е. не будет рассеивать (последнее утверждение не вполне точно: рассеяние полностью отсутствует, если масса иона бесконечна, но при конечной и большой массе рассеяние тем меньше, чем больше масса, — обратно пропорционально квадрату массы, так как смещение обратно пропорционально массе).

Совсем иная картина получается, если ион помещен в плазму. Он окружен «облаком» электронов, на которых происходит рассеяние — они приходят в движение под действием падающей волны. Такое рассеяние связано с видоизменением облака экранирующих электронов, которые создают поляризацию вокруг иона, — это переходное рассеяние.

Но мы уже говорили о том, что энергия и импульс передаются при рассеянии именно иону. Так как амплитуда колебаний электронов облака определяется массой электронов, то рассеяние оказывается очень сильным. Рассеивает же именно ион. Так, для

водородной плазмы, когда ионом будет ядро атома водорода (протон), увеличение рассеяния происходит в 4 миллиона раз. Это колоссальный эффект.

Он имеет место, конечно, не для всех длин падающих электромагнитных волн, а только для тех, длина волны которых существенно больше размеров экранирующего облака. Тогда все облако колеблется в поле падающей волны как целое, так как все его части испытывают со стороны падающей волны одно и то же воздействие.

Если длина волны меньше размеров облака, то его части начинают колебаться в разных фазах, синхронного эффекта нет и эффективность рассеяния начинает падать с ростом частоты. Однако для того, чтобы «добраться» до той же эффективности рассеяния (очень малой), которая была до помещения иона в плазму, нужно убрать фактор 4 миллиона, т.е. во сколько раз рассеяние стало более эффективным. Для этого надо продвинуться вверх по частоте (или вниз, по размерам длин падающих электромагнитных волн) достаточно далеко.

Конечно, в пределе очень высоких частот протон и в плазме, и в вакууме рассеивает одинаково.

Рассмотрим теперь ион, который ионизован не полностью, т.е. от него не оторваны все электроны. Что будет с рассеянием электромагнитных волн, если такой ион поместить в плазму? Он окружает себя «облаком» свободных электронов, которые в конечном счете на определенном расстоянии заэкранируют его заряд. Это значит, что он будет содержать около себя как связанные, так и свободные электроны.

Конечно, в общем случае они поляризуются падающей электромагнитной волной по-разному, так как связанные электроны как бы упруго привязаны к иону, а свободные — лишь статистически: пролетая около иона и замещая друг друга, в среднем экранируют ту часть заряда, которая не скомпенсирована связанными электронами.

Но если частота падающей волны достаточно велика (грубо говоря, много больше характерных частот, появление которых обязано своим происхождением «привязке» электронов к иону), то и связанные электроны возмущаются падающей волной почти

так же, как и свободные. А это значит, что под действием падающей волны и связанные, и свободные электроны, экранирующие в данном случае ядро, смещаются совместно или, как говорят, когерентно.

Если еще кроме того длина волны много больше размеров экранирующего «облака» (как правило, облако свободных электронов по размерам много больше иона с остовом оставшихся связанных электронов), то все электроны, окружающие ядро, как связанные, так и свободные, излучают коллективно, совместно. Это значит, что излучение определяется полным зарядом экранирующих электронов, а так как ядро полностью «заэкранировано», то излучение определяется полным зарядом ядра, хотя колеблются и дают переменное возмущение только несвязанные электроны. Говорят, что связанные и свободные электроны в данном случае излучают когерентно.

Этот пример явно показывает, что нет грани между поляризационным рассеянием и переходным рассеянием.

Точно такая же картина наблюдается в плазме и для тормозного излучения. Каждый заряд (если он «голый», без связанных электронов) окружает себя экранирующим облаком. При столкновении двух зарядов эти облака поляризуются, и переменная поляризация приводит к коллективному излучению — это переходное, или поляризационное тормозное излучение. В этом процессе энергия и импульс излученных волн берутся из энергии и импульса сталкивающихся частиц, а не их поляризационных облаков.

Новое здесь в том, что и налетающая частица имеет свое поляризационное облако. То, что поляризационные «облака» после столкновения не могут изменяться, и то факт, что энергию и импульс излученные волны берут только у сталкивающихся частиц, представляется в каком-то смысле даже достаточно очевидным.

Действительно, после столкновения частиц их взаимодействие прекращается, а, следовательно, и воздействие на поляризационные «облака» частиц, которые становятся стационарными. Разлетаются частицы уже с постоянными скоростями. Поляризационное же облако однозначно определяется скоростью частиц и их зарядом.

Совершенно новым и принципиальным следствием является возможность довольно эффективного тормозного излучения при столкновениях тяжелых частиц, правда, для длин волн, превосходящих размеры поляризационных «облаков» (которые определяются концентрацией и температурой плазмы). Если сталкиваются частично ионизованные атомы, то для частот, превышающих характерные частоты связи, свободные и связанные электроны могут излучать коллективно для длин волн, больших размеров поляризационных облаков.

Все это создает совершенно новую картину излучения плазмы, а это излучение возникает не только в огромном числе лабораторных экспериментов, но и есть основа понимания природы многих удаленных космических объектов, которые представляют собой плазму, частично или полностью поляризованную.

Но, помимо практических приложений, здесь возникает довольно глубокий вопрос, который имеет общезначимое значение и показывает пример сложности и диалектичности окружающего нас мира.

Мы все время рассуждали о посторонних зарядах в плазме или о тяжелых ионах. Но чем каждый заряд отличается от тех зарядов, о которых мы говорим, что они помещены в плазму? Да, собственно, может быть, и ничем. Каждый из зарядов плазмы может служить тем, который нами как-то выделен. Собственно, выделить-то его нельзя, так как все частицы одного сорта неразличимы. Но тогда возникает вопрос о том, что происходит с электронами.

Каждый из них как бы тоже должен представлять отдельный заряд, отталкивать другие электроны, создавать вокруг себя их недостаток, который выглядит как положительный заряд, и, следовательно, поле отдельного электрона должно быть также окружено поляризационным облаком, которое экранирует на каком-то расстоянии его поле. То есть электроны в этом смысле также имеют поля «радиационные облака», как и ионы. Но электроны создают и поляризационные облака вокруг ионов.

Где же они «находятся» и как они выступают, например, в рассеянии и тормозном излучении, как экранирующие «обла-

ка» или как центры рассеяния? Об электронах мы говорили лишь потому, что они легкие и легко создают поляризацию, но, в принципе, такая же проблема возникает и для ионов. Хотя под действием, например, поля падающей волны они смещаются меньше, но они участвуют тоже в создании переменной поляризации, как, впрочем, и поляризационного «облака», экранирующего поля заряда (иона или электрона).

От решения этого вопроса зависит ответ на вполне практическую задачу — как излучает единица объема плазмы, т. е. не единичные частицы в плазме, а вся плазма как целое. Ответ на этот сложный вопрос теоретически получить не просто, и долго он оставался нерешенным. Ответ был найден в исследованиях сотрудников Института общей физики РАН (тогда АН СССР) с участием одного из авторов настоящей статьи. И ответ оказался в некотором смысле удивительным.

Чтобы его как-то пояснить, не вдаваясь в подробности теории, стоит сказать, что если смотреть на некий элемент однородной и стационарной среды, то она, вроде бы, излучать и не должна, так как нет переменных зарядов и токов, которые могут излучать. Поэтому излучение происходит в той мере, в которой вещество структурно и, следовательно, из-за теплового движения составляющих его частиц микроскопически неоднородно и нестационарно.

Такую нестационарность и неоднородность называют флуктуационной. Из-за флуктуаций вещество излучает. Задачей является связать такое флуктуационное излучение с излучением отдельных частиц.

Для плазмы эту задачу можно решить до конца, считая, что частица движется почти свободно и случайность флуктуаций подчиняется простейшим закономерностям для, как говорят, статистически независимых величин.

Все сказанное выше имело целью лишь пояснить то, что для плазмы такая задача может быть решена строго и до конца. И ответ оказался, как говорилось, удивительным.

Излучение некоего объема плазмы из-за флуктуаций оказывается таким, как если бы мы все электроны и ионы плазмы считали самостоятельными частицами, окружен-

ными соответствующими облаками поляризованных электронов и ионов. Можно сказать, что излучение происходит так, как если бы все частицы были «одеты в шубы» из экранирующих «облаков», причем число таких «одетых» частиц в точности равно числу действительно имеющихся в этом объеме электронов и ионов.

Это утверждение доказано и для рассеяния, и для тормозного излучения, с учетом всех коллективных эффектов. Таким образом, коллективное излучение — это не только не экзотика — это основное свойство вещества, как бы основной закон природы.

Правда, это доказано для среды, состоящей из свободно движущихся частиц, какой является плазма. Но это самый простой и основной случай, не говоря уже о том, что плазма — это наиболее распространенный вид вещества во Вселенной.

Вместе с тем, этот результат показывает, если можно так выразиться, диалектическую сущность окружающего мира. Частицы одновременно выступают в двух лицах: и как центры взаимодействия, и как экранирующие облака, которые обуславливают коллективный характер излучения.

Возможно, это имеет и более глубокий смысл, как чисто физический (в смысле понимания того, что такое частица и т.п.), так и познавательный.

Здесь же, не вдаваясь в эти «туманные сферы», поразмыслим о том, что же должно происходить в более плотных мишенях обычного вещества, когда статистическая независимость частиц, по-видимому, не имеет места. Взаимодействуют соседи, образуются кластеры, имеется корреляция взаимодействий ближнего и дальнего порядка и т.п.

По-видимому, не столь сложно выделить все коллективные процессы излучения, которые соответствуют системе статистически независимых излучателей (это было сделано как раз в плазме). Тогда разность между наблюдаемыми процессами излучения и теми, которые описываются в рамках статистически независимых излучателей, дадут важную информацию о характере ближних взаимодействий, кластерах и т.п. и могут служить новым мощным инструментом

исследования вещества. Открываются совершенно новые направления исследований взаимодействия налетающих частиц с реальными частицами, в целях исследования их структуры.

Итак, полученные пока лишь на примере плазмы результаты дают основание для весьма важной экстраполяции наших знаний о природе излучения — оно в основной части обязано быть коллективным излучением. Это очень важный и принципиальный вывод.

7. ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОТОНОВ

Вернемся к вопросам, связанным не с общими проблемами, сколь бы важными они ни были, а к тем, которые связаны со взаимодействием отдельных снарядов со сложными мишенями. Этот случай, кстати, является частным примером общей ситуации, или общего утверждения о том, что излучение должно быть коллективным, относиться к любым распределениям частиц, в частности и к таким, когда все частицы, за исключением одной, называемой частицей-снарядом, находятся в состоянии теплового равновесия, частица же снаряд имеет весьма большую направленную скорость.

Такой случай очень распространен, так как делается много экспериментов, в которых частицы-снаряды разгоняются на ускорителях и сталкиваются затем с веществом мишени. Поскольку экспериментов много, то можно себя спросить, неужели в них не проявились коллективные эффекты тормозного излучения, т.е. поляризационное тормозное излучение? Издавна известно, что обычное тормозное излучение велико для электронов.

Поскольку о поляризационном тормозном излучении до последних лет не знали, то для избавления от различных мешающих излучений во многих экспериментах использовали снаряды-протоны. Здесь, казалось, не должно быть тормозного излучения и эксперименты можно проводить в «чистом» виде. Но неожиданно оказалась, что и снаряды-протоны дают достаточно «грязные» условия — появляются какие-то дополнительные излучения.

Долго это было загадкой. И лишь существенно позднее эта загадка была решена.

Мы уже говорили о том, что поляризационное тормозное излучение не зависит от массы частицы. Отсюда следует, что решающим экспериментом, подтверждающим наличие коллективного эффекта, а именно поляризационного тормозного излучения, было бы обнаружение тормозного излучения протонов (или других тяжелых частиц). Во всем этом вопросе удалось разобраться группе японских физиков. Оказалось, что давно наблюдаемое излучение неизвестной природы, возникающее при взаимодействии быстрых протонов с мишенями, полностью может быть объяснено поляризационным тормозным излучением протонов. Таким образом, этот эффект, предсказанный теоретически, нашел хорошее экспериментальное подтверждение и развил общие представления о роли коллективных эффектов в процессах излучения.

8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ОБЫЧНОГО И КОЛЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Если имеется два источника или два механизма излучения и полная интенсивность излучения не является суммой интенсивностей, обусловленных каждым из механизмов излучения в отдельности, то говорят об эффектах интерференции. Интерференция связана с тем, что складываются амплитуды полей, а интенсивность излучения определяется квадратом амплитуды, а квадрат суммы обычно не равен сумме квадратов.

Амплитуды полей могут быть противоположного знака, и тогда суммарная интенсивность оказывается меньшей, а могут быть одного знака, и тогда она больше.

Если же амплитуды равны друг другу по величине, но противоположны по знаку, то имеет место полное «гашение» — интенсивность оказывается равной нулю.

Возникает вопрос о том, не может ли коллективное излучение гасить или усиливать обычное излучение?

Если это так, то здесь тоже могут возникнуть качественно новые эффекты, которые важны как для существующих, так и для новых экспериментов.

Говоря о том, что любое излучение среды соответствует коллективному излучению, мы подчеркивали, что среда как бы состоит из центров излучения (или рассеяния), ок-

руженных поляризационными «облаками», которые неотделимы от этих центров, и если произвольным образом убрать эти «облака», то останутся «голые» центры, которые дадут обычные механизмы излучения, в которых нет коллективных эффектов. Но и при рассеянии и при тормозном излучении налетающая частица или падающая электромагнитная волна действуют как на центр излучения, так и на поляризационное «облако». Следовательно, излучение всегда содержит интерференцию обычного и коллективного излучения.

Выше мы сознательно отвлекались от таких эффектов тем, что мы рассматривали примеры очень тяжелых частиц, скорость которых можно считать неизменной в процессе излучения. Тогда остаются одни коллективные процессы излучения; обычные процессы слабы и интерференцию учитывать не нужно — она тоже мала.

Но в общем случае интерференция может оказаться важной, в особенности для легких налетающих частиц.

Выше мы начинали изложение с примера заряда-электрона, вращающегося по окружности и дающего обычное излучение, и примера прямолинейно движущегося заряда, дающего коллективное излучение Вавилова—Черенкова.

А что будет, если заряд движется в магнитном поле в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде? Должен «работать» и обычный, и коллективный механизм одновременно, и, следовательно, должна быть существенна интерференция. Этот вопрос, рассмотренный одним из авторов весьма давно, показал, что в излучении должны проявляться характерные максимумы и минимумы, отражающие процессы интерференции, а при некоторых частотах излучение вообще может отсутствовать.

Но могут ли процессы излучения «гаситься» в достаточно широкой области длин волн? Оказывается, могут, и наиболее наглядный пример здесь рассеяние электромагнитных волн на электронах в плазме.

Как говорилось, электрон «окружает» себя в плазме поляризационным облаком противоположного знака. Но наиболее подвижны в плазме электроны, они сталкиваются с рассматриваемым электроном, и со-

здается их недостаток, и благодаря этому «виден» положительный заряд ионов.

«Облако» имеет полный заряд, по величине равный заряду электрона, но противоположный по знаку, так что поле заряда заэкранировано на размерах, больших размера облака.

Это «облако» фактически электронное, так как создано уходом электронов как наиболее подвижных, точнее, оно в смысле внешних воздействий имеет массу электрона (но заряд противоположный).

Пусть теперь имеется падающая волна, которая претерпевает рассеяние. Она смещает как сам заряд, так и его «облако», притом в противоположных направлениях. Но поляризации как произведения заряда на смещение не возникает.

Короче говоря, рассеяние на центральном заряде имеет амплитуду, равную и противоположную по знаку амплитуде рассеяния на поляризационном «облаке», и рассеяние полностью отсутствует.

Конечно, утверждение «полностью» нужно понимать не в буквальном смысле, так как некое малое рассеяние остается. Слово «полностью» относится только к предельному случаю, когда размер длины падающей волны бесконечно велик по сравнению с размером поляризационного облака.

В действительности, длина волны часто действительно велика, но конечна. Это значит, что поле волны, хотя и почти однородно на размере поляризационного облака, но все же немного меняется. Поэтому части облака движутся не совсем синхронно, а центральный электрон, будучи точечным, смещается как целое. Поэтому оказывается, что некая малая «раскомпенсация» все же происходит и малое рассеяние имеется. Но оно чрезвычайно мало по сравнению с тем, которое возникает, когда падающая волна рассеивается на «голом» электроне в «вакууме» т.е. имеет место только обычное рассеяние.

Итак, это наглядное и «драматическое» проявление коллективных процессов в рассеянии.

Электрон в плазме, как оказывается, рассеивает пренебрежимо мало, а ион начинает рассеивать, как электрон в вакууме (об этом шла речь выше).

Таким образом, интерференция меняет картину рассеяния качественно и «драматически».

Можно задаться вопросом, как же одно только помещение тех же зарядов в коллектив столь кардинально меняет процесс рассеяния? Ответ на него очевиден — такое изменение возникает только для длин волн, превышающих размер поляризационного облака. В вакууме этот размер — нуль, но и в коллективе частиц могут быть такие волны, длины которых пренебрежимо малы по сравнению с размером поляризационного облака. Для них рассеяние в плазме будет происходить так же, как и в вакууме.

Конкретно, размеры облака зависят от концентрации и температуры плазмы, и, например, в термоядерной плазме составляют доли миллиметра. При меньших температурах эти размеры существенно меньше, вплоть до миллионной доли миллиметра. Размеры облака также резко уменьшаются с ростом плотности. Таким образом, коллективные эффекты могут проявляться не только в радиодиапазоне, но и в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн.

Эффекты интерференции оказываются также весьма существенными для тормозного излучения. Если речь идет о тормозном излучении на отдельных атомах, то надо иметь в виду, что поляризуемость реального атома весьма сложно зависит от частоты. В ней есть и глубокие минимумы и высокие максимумы, что проявляется и в интерференции с обычным тормозным излучением.

Точный расчет такого излучения для сложных атомов в Ленинградском физико-техническом институте позволил сопоставить теоретические предсказания с учетом поляризационного и обычного тормозного излучения и их интерференции с результатами недавно проведенных экспериментов в Харькове и дал хорошее согласие между теорией и экспериментом. Без учета поляризационного механизма излучения такого согласия добиться не удавалось. При некоторых частотах обычное и поляризационное тормозное излучение могут полностью гасить друг друга из-за интерференции.

9. СТРИПТИЗ («РАЗДЕВАНИЕ») АТОМА ПРИ ТОРМОЗНОМ ИЗЛУЧЕНИИ

Явление интерференции приводит к новому качественному эффекту в тормозном излучении, о котором раньше и не подозревали, а именно к «стриптизу» атома. Этот эффект целиком обязан своим происхождением наличию поляризационного тормозного излучения и его интерференции с обычным тормозным излучением. Каждый атом (нейтральный, а не ион) «одет», т.е. заряд ядра полностью экранирован «привязанными» к нему электронами. Сложные атомы имеют несколько оболочек (несколько «одежек»).

Имеется электронная оболочка, которая находится ближе всего к ядру и наиболее тесно привязанная к нему (имеет наибольшие частоты, характеризующие силу «привязки» или частоту обращения электронов по орбите вокруг ядра на этой оболочке). Имеются другие оболочки, которые находятся подальше от ядра, менее жестко с ним связанные и имеющие меньшие характерные частоты. Все оболочки в целом экранируют ядро, и оно является «одетым».

В учебниках, даже недавно вышедших, о тормозном излучении зарядов на атомах говорится как об излучении в приближении экранирования, т.е. атом представляется как «одетый», и если налетающая частица проходит далеко (за последней оболочкой), то она «чувствует» только «одетый» атом. Так считалось до открытия поляризационного излучения. С его учетом ситуация меняется существеннейшим образом.

Будем следить за тормозным излучением налетающего электрона с ростом частоты излученных волн.

Пусть частота вначале меньше характерной для самой внешней оболочки атома. Тогда сместить (поляризовать) электроны этой оболочки трудно и, действительно, излучение происходит так, как будто бы атом был «одетым». Хотя вклад поляризационного излучения здесь есть, но он не меняет драматически процесс излучения.

Повышая частоту, мы дойдем до таких ее значений, которые будут больше частот внешней оболочки, но меньше частот последующей, более внутренней оболочки.

Тогда электроны внешней оболочки смещаются, как свободные, и здесь поляризационное тормозное излучение того же порядка, что и обычное тормозное излучение налетающего электрона, но их амплитуды противоположны по знаку и они почти полностью гасят друг друга. Точнее, тормозное излучение оказывается теперь таким, как если бы у атома не было внешней оболочки — он как бы «скидывает» свою внешнюю оболочку и «раздевается» (в том смысле, что он излучает так, как будто он сбросил внешнюю оболочку — «верхнюю шубу»). Увеличивая дальше частоту, мы обнаружим, что атом «сбросил» следующую оболочку и т.д., вплоть до полного «стриптиза» атома, при котором останется голое ядро. Таким образом, концепция коллективного излучения приводит к кардинально иной картине излучения атома. В пределе высоких частот, т.е. длин волн, превышающих размер оболочек атома, он излучает, как «голый», а вовсе не как «одетый», т.е. экранированный атом. Реально, излучение высоких частот происходит так, как если бы было только само ядро атома («голое» ядро). В этом состоит качественное изменение наших представлений о механизмах излучения.

10. ВЫНУЖДЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОЛЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Всякий механизм излучения, существующий в природе, может стать также и вынужденным излучением или вынужденным поглощением в лаборатории. На этом основаны все лазеры, усилители и генераторы электромагнитных волн.

Самая простая иллюстрация этого — лазер, у которого частота связана с переходом атомной системы между двумя уровнями энергии.

Если атом находится на верхнем уровне, то он может сам по себе перейти на нижний, излучив частоту, соответствующую разности энергий верхнего и нижнего уровней. Это обычное излучение.

Если теперь атом находится на верхнем уровне, то можно направить на атом электромагнитную волну с частотой, соответствующей указанной разности энергий. Она заставит атом перейти в нижнее энергетическое состояние, — это вынужденное поглощение.

Если же атом находится на нижнем энергетическом уровне, то та же самая электромагнитная волна может им поглотиться, и он перейдет в верхнее энергетическое состояние — это вынужденное поглощение.

В реальной среде много атомов, и волна на всем пути встречает подряд различные атомы. Из-за теплового движения они по-разному распределены по энергетическим уровням. Часть из них находится на нижнем энергетическом уровне, часть — на верхнем. В нормальном состоянии вещества на верхнем уровне атомов меньше, чем на нижнем. Предположим, что мы послали электромагнитную волну в такую среду. Она чаще будет встречать атомы на нижнем уровне, чем на верхнем, и поэтому в среднем будет больше актов вынужденного поглощения, чем актов вынужденного излучения. В результате, по прошествии какого-то расстояния интенсивность посланной волны уменьшится — говорят, что она поглощается.

Если же больше атомов на верхнем уровне, то даже не нужно посылать внешнюю волну для того, чтобы получить увеличение интенсивности (что, конечно, как раз и будет иметь место в такой системе). Достаточно тех волн, которые вначале сами зародятся из-за переходов с верхнего энергетического состояния. Затем они будут встречать на своем пути больше атомов в верхнем энергетическом состоянии, чем в нижнем, а, следовательно, их интенсивность с расстоянием будет нарастать лавинообразно.

Это типичный пример усилителя. Система с двумя уровнями энергии — это идеализация даже для атома. Но принцип остается тем же для любых процессов излучения.

Так, например, для того, чтобы механизм излучения Вавилова—Черенкова служил основой для усилителя, нужно, чтобы излучателей было много, т.е. это должна быть совокупность налетающих частиц и, кроме того, чтобы частиц с большей энергией было больше, чем частиц с меньшей энергией. Но это и есть типичный пучок ускоренных частиц.

Кстати, наиболее мощные усилители электромагнитных волн в современной электронике основаны как раз на эффекте Вавилова—Черенкова. Усиление происходит на

мощных релятивистских пучках, а для замедления электромагнитных волн необходимо, чтобы скорость частиц пучка превосходила скорость электромагнитных волн. Используются различные приемы (модулированные волноводы, поверхностные волны и т.д.).

Помимо вынужденного излучения, возможно и вынужденное рассеяние, которое пропорционально не только интенсивности падающей волны, но и интенсивности рассеянной (т.е. излучаемой волны) так же, как и в процессах вынужденного излучения Вавилова—Черенкова, которое пропорционально интенсивности излученных волн.

Наконец, существует и вынужденное тормозное излучение и поглощение, пропорциональное интенсивности излученных волн.

Какую роль играют все эти процессы с учетом коллективного излучения? Оказалось, что роль коллективных процессов в плазме является определяющей. Что касается других сред, то имеется много примеров, говорящих о такой роли.

В общем же случае, влияние коллективных излучений на вынужденные процессы требует еще тщательного исследования и не все возможности здесь исследованы. Не исключены совсем неожиданные эффекты. Это создает определенную перспективу для развития работ в указанном направлении.

Почему же в плазме так существенны коллективные вынужденные излучения? Дело в том, что очень часто возникают такие распределения частиц, в которых частиц с большей энергией оказывается больше и, кроме того, очень много волн с совсем низкими скоростями. Легко показать, что излучения такого типа, когда интерферирует излучение при движении по окружности в магнитном поле и излучение Вавилова—Черенкова, очень распространены (это именно тот процесс интерференции, о котором говорилось выше).

С этими процессами связано большинство неустойчивостей плазмы (так называют в плазме лавинообразное усиление неких волн) при воздействии на нее мощного излучения, пучков, сильных полей.

Что касается вынужденного рассеяния, то в плазме, как правило, это — вынужденный коллективный эффект на поляризованном облаке вокруг иона. Он играет ре-

шающую роль в окончательном распределении волн по их длинам и тем самым определяет такие важные характеристики плазмы, как ее электропроводность, теплопроводность и т.п.

При нагреве плазмы для достижения термоядерных температур также определяющую роль играют поляризационные явления. Таким образом, оказывается, что почти вся современная физика плазмы базируется на двух простых принципах:

- 1) коллективном характере излучательных процессов,
- 2) большой роли вынужденных излучений.

Поэтому все вопросы коллективных излучений сейчас находятся в совершенно практической плоскости, и их понимание нужно и для будущей энергетики (управляемый термоядерный синтез), и для интерпретации излучений далеких космических объектов (астрофизика).

11. СВЕРХПРОЗРАЧНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

Если речь идет о полностью ионизованной или слабо ионизованной плазме или о металлах, в которых электроны образуют так называемую твердотельную плазму, обычное поглощение электромагнитных волн определяется балансом вынужденного тормозного излучения и вынужденного тормозного поглощения. Так как в обычном веществе частиц больших энергий меньше, чем частиц меньшей энергии, то такой баланс приводит к суммарному поглощению волн. Возникает вопрос о том, какую роль здесь может играть вынужденное поляризационное тормозное излучение. Как говорилось, поляризационное и обычное тормозное излучение интерферируют так, что в определенной области частот могут гасить друг друга.

Исследование физиков, работающих в Воронежском университете, показало на конкретных примерах, что в определенной области частот такое гашение может доходить до нуля. Часто эта область частот соответствует оптическому диапазону. Таким образом, вещество в этой области частот становится «сверхпрозрачным». Само по себе это представляет существенный интерес, но важнее, по-видимому, открывающиеся здесь принципиальные перспективы.

Дело в том, что, по-видимому, поляризационным тормозным излучением легче управлять, так как можно изменять характер поляризационной способности различными примесями, внешними полями, или излучениями, к примеру, лазерным или радио.

Управлять поляризационным излучением легче потому, что поляризационное «облако» — это довольно «рыхлое» образование. В плазме оно сильно зависит от температуры и других параметров.

Если бы удалось научиться управлять поляризационным тормозным излучением, то можно было бы перемещать окна «сверхпрозрачности» из одной области частот в другую, ликвидировать или создавать такие окна сверхпрозрачности под действием внешних факторов. Это изменило бы и оптическую технику, и быт (окна, например, зашториваются рабочими нажатием кнопки, т.е. становятся непрозрачными; очки темнеют под действием света, что, кстати, уже есть и т.д.). Ясно, что это пока что в некотором смысле фантазия, но такая, которая могла бы иметь реальную основу.

12. ЛАЗЕРНЫЙ ПРОБОЙ ГАЗОВ

Если лазерное излучение достаточной интенсивности сфокусировать в малом объеме, то происходит пробой газа, зажигается разряд, газ частично ионизируется и становится светящейся плазмой. Механизм этого явления — поглощение лазерного излучения в газе. Мы говорили, что поглощение связано с вынужденным тормозным эффектом. Как же это происходит?

В любом объеме газа всегда имеются свободные электроны, хотя бы из радиоактивного фона космического излучения. Мы говорим, что при тормозном излучении налетающего электрона энергия «забирается» в электромагнитные волны от него (импульс — частично от него и частично от атома).

Что будет с существующими в газе в небольшом числе свободными электронами при наличии интенсивного лазерного излучения? Возникнет вынужденное тормозное излучение и вынужденное тормозное поглощение. Но их баланс направлен в ту сторону, что в результате лазерное излучение в целом поглощается, т.е. доминирует вынужденное поглощение.

Но если при тормозном излучении электрон отдавал энергию в электромагнитное поле, то при поглощении он приобретает энергию от поля.

Итак, в поле интенсивного лазерного излучения то небольшое число электронов, которое присутствует в газе, начинает увеличивать свою энергию. Они разгоняются до тех пор, пока их энергия будет достаточной, чтобы ионизировать другие атомы. При этом появляются новые электроны, они вновь забирают энергию и ионизируют новые атомы, и т.д.

Так нарастает лавина, которая приводит к лазерному пробоям газов. Исследованию лазерного пробоя посвящено множество экспериментов. И вот обнаружилось, что в парах щелочных металлов пробой происходит более чем в сто раз эффективнее.

Воронежские физики показали, что это связано с тем, что в атомах таких веществ способность к поляризации в области частот лазерного излучения очень велика. Поэтому основным механизмом становится не обычное, а поляризационное вынужденное поглощение. Это дало хорошее объяснение большого числа экспериментов.

Таким образом, поляризационное тормозное излучение должно играть определяющую роль в лазерном пробое в парах щелочных металлов. Это еще один конкретный и важный пример, указывающий на роль коллективных и поляризационных эффектов в процессах излучения.

13. ТОКИ УВЛЕЧЕНИЯ

Мы говорили о том, что лазерное излучение передает электронам энергию. Но естественно, что оно передает не только энергию, но частично и импульс. Направленное движение электронов создает ток, а он — магнитное поле. Такие токи называются токами увлечения. Наибольшую роль коллективные излучения при создании токов увлечения играют не в случае тормозного механизма поглощения, а в случае вынужденного поглощения Вавилова—Черенкова. В плазме таким образом создают мегаамперные токи, которые играют важную роль во всей проблеме управляемого синтеза. Вынужденное рассеяние не создает больших токов увлечения, потому что, как говори-

лось, рассеяние на электронах подавлено, а ионные токи не столь велики.

14. РАДИАЦИОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА И БУФЕРНЫЙ ГАЗ

Атомы газа при столкновениях поляризуются и поэтому создают поляризационное излучение. Если это излучение не успевает поглотиться (объем достаточно мал), то оно охлаждает газ. Исследования ленинградских физиков показали, что в первом приближении при столкновении одинаковых атомов поляризационное тормозное излучение из-за эффекта интерференции отсутствует. Учет релятивистских поправок дает слабое излучение, падающее с понижением температуры. Но эффект интерференции отсутствует, если сталкиваются разные атомы, поэтому примешивая другой (буферный газ) можно добиться радиационного охлаждения.

Эти два примера дают представление о возможных практических приложениях обсуждавшихся эффектов. Ясно, что этим не могут быть исчерпаны все возможности. Исследователей, как можно думать, ждут новые интересные и неожиданные результаты.

15. КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Поляризационное тормозное излучение возникает и при соударении нейтральной ядерной частицы — нейтрона с атомом. Нейтрон, конечно, взаимодействует с атомом электромагнитно, своим магнитным моментом. Но это слабое взаимодействие. Наиболее сильным является ядерное взаимодействие с ядром атома. Нейтрон смещает его из исходного положения в центре электронных оболочек и на время столкновения создает в атоме поляризацию, которая и приводит к поляризационному тормозному излучению.

Такое излучение для медленных нейтронов является едва ли не единственным способом детектирования его прохождения через вещество, так как медленный нейтрон практически не вызывает ядерных реакций, по которым можно было бы судить об его взаимодействии с веществом.

Из всего сказанного ясно, что коллективные механизмы излучения и рассеяния, связанные с поляризацией либо самих

сталкивающихся или рассеивающих частиц, либо с поляризацией их окружения, — явление довольно универсальное. Для этого необходима лишь структурность частиц и способность их к поляризации, т.е. чтобы частицы состояли из более элементарных и облетающих электрическим зарядом.

При столкновении нуклонов с ядром (пусть теперь атомная оболочка отсутствует) поляризация возникает внутри ядра из-за перемещения в разные стороны протонов и нейтронов ядра или просто из-за изменения его формы — вместо, например, шарообразного оно становится вытянутым и сплюснутым. При этом поляризационное излучение будет уже очень жестким с длиной волны в сотни тысяч или миллион раз меньшей, чем при поляризации атомных оболочек. Наконец, сами составные элементы ядра — нуклоны — тоже не элементарны. В свою очередь, они состоят из электрически заряженных кварков, а другие ядерные частицы — мезоны — из кварков и антикварков. Поляризационное тормозное излучение возникает поэтому и при столкновении нуклонов (например, двух нейтронов), а также нуклонов и нейтральных мезонов.

16. ОБЩИЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМЫ КОЛЛЕКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Для истинно нейтральных частиц, не имеющих даже магнитного момента, поляризационный механизм — единственный, который приводит к испусканию электромагнитных волн. Наиболее интенсивно их излучение происходит при частотах, близких к частотам каких-либо внутренних движений сталкивающихся частиц — так называемое резонансное излучение. Для ядерных частиц этому соответствует очень большие энергии, сопоставимые с теми, которые надо затратить на рождение самих ядерных частиц.

Все, сказанное здесь в конце нашего изложения имеет целью показать большую общность и универсальность поляризационного механизма излучения, на языке которого могут быть изложены и старые наблюдения в ядерной физике.

Встает и вопрос, более фундаментальный: излучение электромагнитных волн — это процесс рождения частиц-фотонов. Не играют ли коллективные процессы роль в

рождении других частиц в различных реакциях с элементарными частицами? Да и сами «элементарные» частицы полностью и до конца до сих пор не известны. Чем дальше углубляются в микромир, тем больше обнаруживается «структурность» тех частиц, которые считались элементарными. Оказалось, что ядерные частицы — нуклоны, мезоны, состоят из кварков, глюонов и т.п.

В истинной теории частиц-«кирпичиков» мироздания, если таковые существуют, каждая из них должна как бы состоять из

всех остальных. Не является ли это «полем» для проявления коллективных эффектов при рождении одних частиц другими, при их столкновениях и т.п.?

Начав с простых вещей, мы подошли к вопросам общефизического звучания. Однако это не должно заслонить множество тех практических приложений коллективных излучений, над которыми сейчас интенсивно работают большие группы физиков и которые мы в самой общей форме попытались донести до сознания широкой аудитории.