

ПРИРОДА

7 04



В НОМЕРЕ:

3 ЛУЧ СВЕТА В ЦАРСТВЕ ЧАСТИЦ

К 100-летию со дня рождения П.А.Черенкова
Черенкова Е.П.

Заметки к семейной хронике (4)

Говорков Б.Б.

Вспоминая Павла Алексеевича
Черенкова (10)

Лебедев А.Н.

Черенковское излучение
в электродинамических структурах
(14)

Денисов С.П.

Детекторы черенковского излучения
(22)

Болотовский Б.М.

Физики и лирики (31)

35 Добровольский В.В.

Роль органического вещества почв в миграции тяжелых металлов

Значительная часть тяжелых металлов, концентрирующихся в биосфере, входит в состав водорасстворимых комплексных органических соединений, которые представляют собой почвенные гумусовые кислоты.

Лекторий

40 Галактионов В.Г.

Происхождение специфических иммуноглобулинов

Сегодня очевидно, что появление множества специфических белков, защищающих организм от самых разных патогенных вторжений, имеет длительную историю. Изучение ее стало возможным благодаря успехам молекулярной биологии и генетики.

47 Кароль И.Л., Киселев А.А.

Атмосферный метан и глобальный климат

Научные сообщения

53 Басов И.А.

Поднятие Шатского: эхо важнейших
событий мела и палеогена
198-й рейс «ДЖОИДЕС Резолюшн»

Вибе Д.З.

Розы в южном небе (79)

Звезда, пожирающая свои планеты
(80)

55 Богданов В.И.

Судьба уровнемерных знаков Балтийско-Ладожского региона

Нанесенные на прибрежные скалы метки, от которых отмеряли уровень моря в былье времена, могут быть полезными и в современных метрологических исследованиях.

62 Журавлев А.Ю.

Среди рифов и мифов

Строить рифы, как выяснилось, способны многие организмы, а не только кораллы. В истории Земли одних рифостроителей сменяли другие, а устойчивость рифовой экосистемы зависела (и зависит) от того, насколько быстро она может восстановиться, если ее целостность нарушена внешними силами. Но своего прежнего облика система, подобно любой другой, никогда не приобретает.

69 Паевский В.А.

Трудная жизнь пернатых многоженцев

Мир птиц красочен и многогалк; столь же разнообразно их поведение, особенно в брачный период. У пернатых нет нравственных запретов, все подчинено единственной цели — продолжению рода.

78

Архивные SMS-ки

«Не вижу в нем надобности для
СССР...»

81

Новости науки

К Луне — с новым «мотором» (81). Продлена миссия «Улисса» (81). Будущее космического телескопа «Хаббл» (82). На Нептун пришло лето (82). Полярные сияния: взгляд изнутри (83). Яркие электронные эмиттеры на углеродных нанотрубках (83). Менять ли стеклянные очки на пластиковые? Исаков Д.В. (83). Перепись бенгальского тигра (84). Жизнь в озерах поддерживает наземные экосистемы. Гиляров А.М. (84). Вирус против жаб. Семенов Д.В. (85). Паго взят под надзор (86). Гляциогенные землетрясения (86). Динамика таяния льда в арктических морях (87). Потепление в высоких широтах (88). Немореходные динозавры (88). Очень древняя находка «современного» европейца (88). Пещера Ласко в опасности (89). Коротко (39)

Рецензии

90 Малахов В.В.

Новая история «одного рода
пресноводных полипов с руками
в форме рогов»

91

Новые книги

93 Борисов В.П.

Токарные художества
Петра Великого

В конце номера

ЛУЧ СВЕТА В ЦАРСТВЕ ЧАСТИЦ

К 100-летию со дня рождения П.А.Черенкова



Находясь в Париже, В.И.Вернадский в 1924 г. писал своему другу И.И.Петрункевичу: «Любопытны указания, которые я имею с разных сторон в области точного знания, на появление молодых талантов из народной среды. Может быть, в этом – главная возможность возрождения... Возрождение зависит от неизвестных нам законов появления больших личностей».

В том же 1924-м начался путь к известности парня из деревенской глубинки, выбравшего своей судьбой физику и ставшего спустя десятилетия лауреатом Нобелевской премии.

В 1934 г. П.А.Черенков (1904–1990), начав работать в ФИАНе под руководством С.И.Вавилова в качестве аспиранта, совершил открытие, сыгравшее важную роль в развитии эксперимента в физике элементарных частиц – обнаружил излучение света «быстрыми электронами» (т.е. электронами, имеющими скорости, превышающие скорость света в среде). Теоретическое объяснение его природы дали И.Е.Тамм и И.М.Франк, разделившие с П.А.Черенковым высшую в мире научную награду, присужденную в 1958 г. всем троим «за открытие и интерпретацию эффекта Черенкова». У нас чаще говорят «эффект Вавилова–Черенкова». Это восстанавливает справедливость по отношению к Вавилову как руководителю работы и ученому, сделавшему ряд важных предложений в ходе анализа обнаруженного излучения, но не умаляет заслуг Черенкова, которому судьба безошибочно доверила роль первооткрывателя. Павел Алексеевич обладал неповторимой совокупностью исключительно важных для экспериментатора качеств.

Открытие Черенкова довольно быстро обратило на себя внимание специалистов из разных стран, а когда началось стремительное развитие его практических приложений, прежде всего благодаря черенковским счетчикам элементарных частиц, его имя стало едва ли не самым часто упоминаемым в работах по экспериментальной физике.

Научная изоляция СССР помешала более раннему выдвижению Черенкова на соискание Нобелевской премии. Хотя теперь известно, что по меньшей мере одна такая попытка была. В 1952 г. кандидатуру Черенкова предлагал Леон Розенфельд, известный физик-теоретик, в то время профессор Манчестерского университета. При этом он отмечал трудности с представлением текстов работ, описывающих эффект Черенкова, и смог приложить только их список. Однако со временем положение изменилось. Наша страна и ее наука больше открылись миру. В 1958 г. П.А.Черенков, И.Е.Тамм и И.М.Франк стали первыми физиками нашей страны – лауреатами Нобелевской премии.

Хочется надеяться, что читателям очерков и статей, которые мы публикуем, будет интересен и эффект Черенкова, и феномен самого Черенкова. В заключение добавим, что с 1999 г. РАН присуждает премию им.П.А.Черенкова за выдающиеся достижения в экспериментальной физике высоких энергий.

Заметки к семейной хронике

Посвящаю памяти моего брата Алеши

Е.П.Черенкова,
кандидат физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

В очерке об отце, Павле Алексеевиче Черенкове, можно было бы придерживаться сухих фактов. Надеюсь, неизбежные отклонения оживят ее.

В ленинградском общежитии Академии наук для аспирантов декабрьским вечером 30-го года за новогодним столом — хоть на столе и стояло четыре рюмки, — но собрались трое: Вера Зажурило, Павел Черенков, Андрей Пупыкин. Корни их знакомства вели в Воронежский университет. Павел с Андреем и одновременно учились в университете, и были земляками — родились и выросли в селе Новая Чигла, что в ста километрах от Воронежа. Вера училась в Воронежском университете на одном курсе и отделении с подругой Марией Путинцевой. Именно для Марии, невесты Павла, предназначалась четвертая рюмка.

Но в тот вечер ее не могло быть за их столом... Много событий стояло позади этого небольшого застолья в их еще молодой жизни. Радости и беды, везение и невезение, закономерности и случайности... Позади. А впереди...

Павел родился в самом начале XX в., 28 июля 1904 г. Отец его, Алексей Егорович, был по-крестьянски умелым и ловким

человеком. Вел вместе с женой домашнее хозяйство, держал дом-шестистенку, крупную и мелкую скотину, имел собственную продовольственную лавку, ездил в извоз за продуктами для своей торговли, плотничал, в период 1914—1917 гг. был мобилизован в армию и выслужил чин поручика. Семья жила небедно. Впрочем, село, расположенное в полосе черноземья, еще до 1861 г. — отмены крепостничества — считалось достаточно богатым. Жители его были государственными крестьянами, не знавшими больших поборов или притеснения со стороны властей. Позднее, когда в тех краях прошла железная дорога, расстояние до нее и связь были такими, что о городских новостях узнавали больше по слухам. Вместе с тем село было заметное — с заводами мериносовых овец, битюговых лошадей, сахарным и маслобойным.

О матери Павла Алексеевича, Марии Павловне Прытковой, известно немного. Она умерла, когда моему отцу было два года. Крестьянин не может жить без хозяйки в доме. Алексей Егорович женился. Рождались дети. При высокой детской смертности того времени выжили и выросли пятеро — Мария, Павел, Варвара (от первого брака), Екатерина и Татьяна (от второго). Мальчик оставался единствен-

ный. Позднее сестры вспоминали, что мачеха не была одинаково ровна со всеми детьми. У падчериц остались обиды на всю жизнь. Так же не хватало душевного тепла пасынку. Возможно, это наложило отпечаток на его характер. Мачеха прятала его зимнюю шапку, чтобы не ходил в школу, а занимался мужскими домашними делами. Приходилось иногда убегать без шапки.

Самым большим увлечением стали книги. В селе была библиотека — единственная на весь Бобровский уезд Воронежской губернии. (Это ли не везение?!). Чтение при отличной памяти дало мальчику настолько широкий кругозор, что его познаниям потом удивлялись его уже взрослые соратники.

Из-за гражданской войны учеба прошла в два этапа. После окончания церковно-приходской школы, когда в селах и городах настали годы многократных фронтовых действий и вылазок банд, годы безвластия и неразберики (голодное время!), Павел работал чернорабочим, каторщиком. Затем доучивался в школе-гимназии, переведенной в село из Боброва. Учителя отмечали его способности, прочили большое будущее.

После окончания в 1924 г. школы он поступил на физико-математическое отделение Воронежского университета. Студ-

денческое и преподавательское окружение, городская жизнь, по его словам, оставили самое яркое впечатление. Стипендия была небольшой, приходилось подрабатывать уроками, разгрузкой вагонов, в каникулы, во время наездов домой, — счетоводом на мельнице.

По окончании университета — преподавание в школах Козлова (Мичуринска). Сюда же на полтора года позже, в 1930 г., приехала воронежская выпускница литературного отделения Мария Путинцева. Здесь они познакомились, здесь начался их совместный дальнейший путь. Красивые, умные, начитанные, трудолюбивые, веселые, верящие в широкие горизонты, раскрывающиеся перед страной и молодежью. Летом по путевке они обхеали Крым. Прочитав объявление в газете, Павел написал заявление о приеме в аспирантуру в ленинградский Физико-математический институт Академии наук, прошел собеседование и был принят.

Прекрасное будущее, которое вскоре должно было наступить, встречало на своем пути самые неожиданные и даже странные события и препятствия. Когда до села Новая Чигла дошла колхозификация, Алексея Егоровича как зажиточного крестьянина лишили избирательных прав и осудили на два года высылки. В этих черных списках оказался было и Павел. Но в ту пору он не был постоянным жителем села, его фамилию зачеркнули. Можно сказать, повезло.

Отец Марии Путинцевой, профессор-филолог Воронежского университета, краевед и этнограф, был в ноябре 1930 г. арестован по «делу краеведов» и осужден на 5 лет лагерей. Это большой судебный процесс, по которому проходило более 90 человек.

С осени 1930 г., после зачисления в аспирантуру, Павел стал жить в Ленинграде, а Мария смогла приехать к нему только после окончания процесса, во время которого оставалась ря-

дом с матерью; 30 апреля 1931 г. они зарегистрировали брак.

Последовала проблема: устроиться с жильем в общежитии, добиваться отдельной комнаты — не только для себя и жены. Там же как член семьи поселилась младшая из папиных сестер, Татьяна. (Из-за трудностей деревенской жизни отец забрал ее к себе, еще работая в Козлове.) После того, как моего дедушку Алексея Михайловича отправили в ссылку, в ту же комнату общежития перебралась и бабушка Мария Михайловна — ей некуда было больше деться. Осенью 32-го в семье родился первенец — Алексей, в первые годы жизни очень болезненный ребенок. (Спустя четыре года, уже в Москве, появилась на свет дочь Елена.)

Мария то и дело оставалась без работы. С одеждой было трудно, и все-таки зимнее пальто Павла Алексеевича отправили Алексею Михайловичу. Хлеб, сушившийся на сухари для пересылки в лагерь, покупали на карточки матери Веры Зажурило — той самой, которая встречала с Павлом и Андреем Новый, 1931 год. Примерно здесь наш рассказ перешагнул время новогоднего застолья, с которого он начался.

Что же происходило далее?

Светлой частью того периода стала сама аспирантура. С 1932 г. в аспирантуре Академии началось оживление. Сергей Иванович Вавилов взял к себе трех аспирантов, среди них оказался и П.А.Черенков. Роль Вавилова в своей научной судьбе отец оценивал чрезвычайно высоко. Сергей Иванович предложил каждому выбрать одну из трех тем. Самая простенькая, мало привлекательная, не обещавшая интересных выводов тема — по исследованию люминесценции — досталась Павлу, по-видимому, как самому провинциальному из аспирантов. Что бы позже ни говорили участники и современники научных и колоннаучных событий, развивавшихся вокруг одной из аспирантских тем, распределение их было не столько



Алексей Егорович Черенков.
Новая Чигла. 20-е годы.



Павел после окончания школы.
Новая Чигла. 1924 г.



С сестрой Татьяной (слева) и невестой Марией Путинцевой (стоит). Козлов. 1930 г.



С дочерью Еленой. 1940 г.



С Марией Алексеевной 30 лет спустя.

везением для Павла Алексеевича, сколько просчетом всех остальных — тех, кто не взялся за аспирантскую тему Черенкова или не присоединился к теоретическим поискам позднее.

Немного позже, в 1934 г., Институт разделился на Математический и Физический. По воспоминаниям сотрудников довоенного Физического института (ФИАН), в нем хранилась особая атмосфера дружественности, доброжелательства, глубокого интереса к физике, светлой веры в успехи научных трудов. В немалой степени это определялось личностью директора, С.И. Вавилова — глубоко интеллигентного и доброжелательного человека. В 1934 г. в Москву

переехала Академия наук, а вместе с ней и Физический институт с сотрудниками.

Уже не раз вспоминали о том, что перед началом опыта по люминесценции Павлу Алексеевичу приходилось подолгу сидеть в комнате без освещения, чтобы глаз адаптировался к полной темноте. Поговаривали, будто аспирант Вавилова занимается спиритизмом. Кое-кто из сильных физиков считал эти опыты ненужными или вовсе чушью.

Аспирант Черенков, при всем своем усердии, точности в исполнении экспериментов, при особом внимании к каждой детали опытов, огромной ответственности за свою работу, испытывал некоторое недоумение:

наблюдению люминесценции мешало непонятное добавочное свечение, какой-то фон, избавиться от которого не удавалось никаким способом. Мудрость Вавилова не позволяла сомневаться в том, что занятия «спиритизмом» имеют большой смысл. Однако аспиранту требовалось немало воли и старания, чтобы не потерять веры в свои силы.

В ходе работы по основной теме Павел Алексеевич одновременно изучал и мешающий фон, то голубоватое свечение, которое — вначале к его большой досаде — отвлекало от главного. Защита кандидатской благополучно прошла в 1935 г., но исследования фонового свечения продолжались. Опыты проводи-



Семья Черенковых в Голицыно. 1948 г.

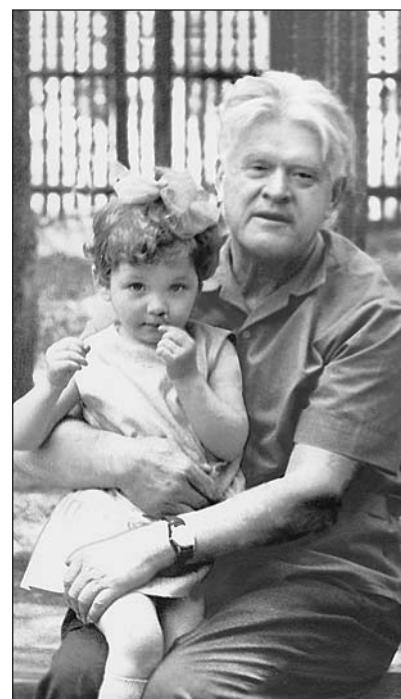
лись с помощью простейших инструментов — в рамках технических возможностей первой половины XX в. Свойства неизвестного излучения, зафиксированные именно в таких экспериментах, оказались решающими для истинного понимания его природы.

Первая публикация Черенкова по новому виду излучения относится к 1934 г. Одновременно была опубликована статья Вавилова с первоначальной попыткой дать теоретическое объяснение эффекта, принципиально важные свойства которого были обнаружены в экспериментах. Немного позже Сергей Иванович посоветовал И.М.Франку и И.Е.Тамму заинтересоваться таинственным излучением и подсказал круг литературы, которая помогла бы найти ответ. Черенковым был выполнен тот объем экспериментов, который

давал полную возможность теоретического описания излучения, а Франк и Тамм в 1937 г. на основе классической электродинамики создали теорию излучения.

Важно также подчеркнуть, что в 1937 г. Черенков опубликовал статью, в которой была выдвинута идея использования излучения для измерения скоростей быстрых электронов. Это позднее привело к созданию многочисленных научных приборов — разнообразных детекторов, названных его именем (о некоторых из них говорят «черенкатор»). Продолжив опыты, Павел Алексеевич подтвердил количественную сторону теории Франка и Тамма. Исследование излучения велось им до 1944 г.

Сначала открытие встретило недоверие. Статью Черенкова не приняли в журнале «Nature»,



С внучкой Татьяной. 1977 г.



На обеде в ратуше по поводу вручения Нобелевской премии. Слева — с королем Швеции, Густавом VI Адольфом; справа — с принцессой Сибиллой. Стокгольм. 1958 г.

но затем через пару месяцев ее благополучно опубликовал журнал «The Physical Review». Тем не менее Д.В.Коллинз и В.Д.Рейлинг в 1938 г. и Г.О.Виков и Д.Е.Гендерсон в 1943 г. сумели повторить эксперимент. Коллинз и Рейлинг впервые использовали термин «Cherenkov radiation». В тексте о присуждении Нобелевской премии открытие получило название «эффект Черенкова» и так вошло в мировую литературу и повседневную практику.

Отступлю от научной стороны жизни отца. Будет нарушена и хронология событий. В 1932 г. выпустили из лагеря Алексея Михайловича Путинцева. Профессор-филолог вынужден был вместе с супругой скитаться по городам России в поисках работы и хоть какого-нибудь жилья, пусть за печкой. В лагере он потерял здоровье, и весной 1937 г. его не стало. Мама любила своего отца невероятно сильно, и эта потеря отразилась на ее здоровье. Летом 1937 г. арестовывают его брата, священника Михаила Михайловича.

В те же 30-е вернулся из ссылки Алексей Егорович Чerenков и некоторое время работал на стройке московского метро. В самом конце 1937 г. его снова арестовывают — по разнарядке. Так рассказал односельчанин, схваченный вместе с ним — тому удалось бежать. Как теперь известно из архивных документов, мой родной дедушка и двоюродный были судимы «тройками», а это, как правило, означало расстрел. На фоне таких семейных событий шла научная работа Павла Алексеевича перед войной.

С началом войны Физический институт довольно быстро эвакуировали в Казань. Нашу семью разместили как подселянцев в комнате довольно большого одноэтажного дома на Большой Красной улице, с русской печкой и «удобствами» на улице. Мы прожили там до весны 1943 г. Вначале с питанием дело обстояло неплохо. Позже стали жить голодно. Иногда, особенно к вечеру, была бы рада самой маленькой крошке хлеба. Как-то

фиановцы отправились в провинцию за едой, но вернулись без какой-либо «добычи».

Отец время от времени уезжал в командировку, в Подмосковье участвовал в работах оборонного значения. Мама, как и в Москве, работала в Воениздрате, затем на картонажной фабрике клеила коробочки для патронов. Самая тяжелая работа началась позже — сопровождающим продуктовые грузы. Помню, домой она приходила в ватнике и ватных брюках. Очень уставала. Была у нее какая-то многодневная поездка на товарной платформе в небольшом домике с печкой, и особая проблема заключалась в том, чтобы достать дрова и «отоварить» карточки. Семьи научных сотрудников подкармливались огородами, участки раздавали во время войны и в Казани и позже — в Москве.

Возвращение из эвакуации было радостным — домой, в нашу «комфортабельную» коммунальную квартиру. В 1934 г., при переезде из Ленинграда, родители получили две комнаты в большой коммунальной квартире на 2-й Тверской-Ямской, вблизи площади Маяковского (ныне — Тверская). Такие условия считались неплохими. Но по возвращении из Казани пришлось столкнуться с тем, что в московском доме отопительная система не работает. Сооружали «буржуйки», с выводом трубы через форточку. Из мест стыковки труб капал деготь. Таков был быт почти всего города.

В те времена, впрочем, как и в Казани, научные сотрудники имели льготные карточки — на большее число и больший ассортимент продуктов и промтоваров. Получали их в так называемых «лимитных» магазинах. Относительные преимущества создавали чувство «обеспеченности». Однако помню свои дырявые валенки и штопаное зимнее пальто. Для Алеша мама перешивала пальто из дедушкиных вещей. Постепенно тяготы жизни отступали.

В послевоенные годы папина работа, связанная с ускорителями элементарных частиц, была переведена на «закрытую» тематику. В тот же период он преподавал в институтах: сначала в Энергетическом (МЭИ), затем в Инженерно-физическом (МИФИ). Годы шли. Прибавлялись папины награды. Ядерной тематике придавалось особое значение. Наградами отмечались как отдельные успехи, так и юбилеи.

Особенно радостным моментом осенью 1958 г. было присуждение отцу Нобелевской премии (вместе с И.М.Франком и И.Е.Таммом). В стране недавно уже был прецедент — Нобелевскую премию получил академик Н.Н.Семенов. В ту пору эта награда, имеющая высший международный статус, казалась сказкой. В том же 1958 г. премия по литературе была присуждена замечательному поэту Борису Леонидовичу Пастернаку, но он был вынужден от нее отказаться.

Сборы для поездки в Стокгольм по совету сотрудников дипломатического аппарата начались с консультаций. В Москве находилась жена советского посла в Швеции Эра Калмановна Гусева. Она подробно рассказала маме о требованиях к одежде. Мужчинам — фраки, женщинам — платья определенной длины, обязательно с декольте, украшения только натуральные, никаких мехов, даже самых дорогих. Платья не должны повторяться ни на одном приеме. Рассказала о манере держаться в зависимости от титула особы визави. Несмотря на тщательное обсуждение всех условностей, на один из светских приемов мама пришла — по незнанию — без шляпки. Великосветские хозяева и благородные гости, конечно, сделали вид, что этого не заметили.

По правилам Нобелевского фонда лауреаты могут пригласить с собой на празднества родственников и друзей без ограничения их количества. Но мы уже знали, что по неписанным законам того времени даже

самые близкие родственники поехать не смогут (ах, как нам этого хотелось!).

С нашими тремя Нобелевскими лауреатами смогла поехать только моя мама. На аэродроме их встречал советский посол и представители Нобелевского комитета. Поселили в Гранд-отеле. Вечером все четверо вышли прогуляться по городу. В вестивилю к ним подошел фоторепортер и попросил разрешения сопровождать их во время прогулки. Так он получил дополнительную, «эксклюзивную» информацию, а мои родители — несколько фотографий, прекрасного качества и интересных. Нобелевские торжества приходятся на предрождественские дни. Витрины магазинов выглядели особенно празднично. Теперь многим трудно представить себе, насколько однообразны и убоги были наши витрины 58-го года. Мама оценила ту жизнь, что увидела в Швеции, так: «Все, как у нас до революции».

Каждому из лауреатов полагался ежедневный гид. Павлу Алексеевичу и Марии Алексеевне помогали разобраться во всех случайных стокгольмских проблемах и сам гид, и его невеста. Торжественную картину вручения премии королем Швеции дополняло присутствие королевской семьи: королевы, ее невестки и трех красивых внучек-принцесс. Принц, современный король, в то время не был на празднестве, потому что ему было только 11 лет*.

Я не ставила задачи описать полный научный путь Павла Алексеевича. В последующие годы после 58-го его проблемами были научные и научно-организационные. От работ по созданию ускорителей элементарных частиц его отвлекали многочисленные поездки: на научные

конференции, совещания научно-организационного характера, по делам Комитета защиты мира, юбилейного характера. Особенно интересными для папы оказались юбилейные торжества, посвященные 350-летию публикации трудов Галилея «Диалоги о двух главнейших системах мира — плтоломеевой и коперниковской» и 150-летию со дня рождения Нобеля.

Хотелось добавить, что бесконечно любознательная натура отца влекла его в походы, притягивала к чтению книг самых разнообразных, последние годы — к живописи и музыке. Он всегда предпочитал активный отдых. Зимой — лыжи, летом — теннис и прогулки. Теннис был его большим увлечением. Он любил участвовать в соревнованиях, любил натягивать струны на ракетки. Очень любил фотографию — «щелкать» аппаратом и самому печатать снимки. Он оставил огромное количество фотографий (к сожалению, на них мало изображений его самого). На снимках мелькают какие-то «незнакомые» козы, коты, ослики. Он любил животных, любил жизнь, любил людей, хотя не всегда правильно в них ориентировался.

Для него мир всегда был так же необычайно интересен, как в далеком детстве, когда он прикоснулся языком к заиндевевшей ручке двери — это был его первый «научный» эксперимент. Он всегда вглядывался в суть вещей, событий, явлений — как и положено естествоиспытателю. Старался самостоятельно находить ответы, преодолевать встречающиеся трудности.

Последняя его потеря, которую он преодолел с большим трудом, была преждевременная кончина Марии Алексеевны. Оставшиеся годы он радовался внукам — Тане и Андрюше. О последних днях своего отца он так никогда и не узнал. Трудно рассудить, чего в его жизни было больше — удач, невезения, счастья... Но я твердо знаю, чего было много — преодоления. ■

* В нашем журнале неоднократно описывались торжества, связанные с вручением Нобелевской премии. См., напр.: Тамм И.Е. О торжественной церемонии в Швеции // Природа. 1995. №7. С.99—102; Блох А.М. Нобелевский фестиваль 1996 года // Природа. 1997. №5. С.81—89.

Вспоминая Павла Алексеевича Черенкова

Б.Б.Говорков,
доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева
Москва

Начиная со студенческих лет, я не перестаю восхищаться научным подвигом академика П.А.Черенкова, выдающегося физика-экспериментатора, который открыл удивительной красоты явление — излучение заряженной частицы, движущейся равномерно и прямолинейно в оптически прозрачной среде со скоростью, больше фазовой скорости света в ней [1]. Более того, Черенков установил и скрупулезно исследовал все основные свойства нового излучения: универсальность, спектр, поляризацию и, наконец, самое главное свойство нового излучения — направленность — концентрацию излучения в узком конусе с осью в направлении движения заряженной частицы с углом при вершине конуса, описываемым знаменитой формулой:

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n(\omega)}.$$

Здесь β — скорость частицы в единицах скорости света в пустоте (c), n — показатель преломления среды, зависящий от частоты свечения.

Следует особо выделить важную слагающую открытия Черенкова — его прямое указание на возможное применение нового вида излучения как метода измерения скоростей частиц высоких энергий по порогу излучения [2].

© Говорков Б.Б., 2004

Все опыты Черенкова, проводившиеся с участием его руководителя академика С.И.Вавилова, отличались удивительной простотой и изяществом, ясностью цели и последовательностью. В большей части экспериментов применялся разработанный Вавиловым с учениками метод использования человеческого глаза для количественных измерений световых потоков по порогу зрения [3]. Метод требовал длительной настройки глаза в абсолютной темноте, тщательной подготовки всех деталей установки, которую Черенков осуществлял всегда самостоятельно.

Следует отметить, что впервые использовать человеческий глаз в качестве надежного инструмента для измерения интенсивности светового потока предложил известный естествоиспытатель А.Лавуазье. В 1763 г. тогда еще юный Лавуазье, которому был 21 год, принял участие в конкурсе, объявленном Королевской Академией наук, на отыскание лучшего способа освещения Парижа. Он сопоставлял освещенности, даваемые различными типами фонарей (масляными и со свечами, с рефлекторами и без них) при поисках оптимального варианта освещения города. При этом все свои измерения Лавуазье проводил в темной комнате, обитой черным сукном. На своем собственном опыте он убедился, что человеческий глаз решает задачу оценки освещенности наилучшим образом. Предложения

Лавуазье были изложены в капитальном труде и отмечены золотой медалью Королевской Академии наук в 1766 г.

Мне посчастливилось всю жизнь проработать в лаборатории Черенкова. Поэтому многие детали исследований, приведших к открытию эффекта Черенкова, мне стали известными из уст самого Павла Алексеевича. Так, на мой вопрос, как ему удалось впервые увидеть предельно слабое новое излучение, он ответил, что впервые наблюдал новое свечение при проведении фоновых экспериментов. Вавилов поставил перед ним, тогда аспирантом, задачу изучить люминесценцию растворов ураниловых солей при облучении их γ -квантами от радиоактивного радиевого источника. Проводя измерения люминесценции упомянутых растворов, Черенков решил посмотреть, не влияют ли на люминесценцию стенки стеклянного стаканчика и сам чистый растворитель — серная кислота. Павел Алексеевич рассказывал, что, заметив свечение стаканчика с чистым растворителем, он очень удивился. Тогда он направился на склад Физического института им.П.Н.Лебедева (ФИАН) и собрал там все прозрачные жидкости. Вернувшись в лабораторию, он повторил опыты по наблюдению свечения с другими чистыми веществами. Все жидкости светились! Причем все примерно с равной интенсивностью ($\pm 15\%$).

Попытки потушить свечение по методам, разработанным Вавиловым с учениками (использование гасящих добавок, нагрев жидкостей и др.), оказались безуспешными — все жидкости светились и все тут! При очередной встрече со своим руководителем Павел Алексеевич подробно рассказал о неожиданном результате измерений фона. В итоге обсуждения появились новые планы и идеи в постановке опытов, доказывающих нелюминесцентный характер излучения, в частности выясняющих роль электронов в получении нового излучения. Так рассказывал Павел Алексеевич о своем первом наблюдении излучения, которое потом получило наименование эффекта Вавилова—Черенкова.

Первая попытка объяснения природы нового излучения была предпринята самим Вавиловым. Исходя из измеренных характеристик свечения, наблюдавшегося Черенковым, Сергей Иванович показал, что наблюдаемый эффект вообще не может быть каким-либо видом люминесценции, так как время его высвечивания $<10^{-10}$ с, и предположил, что новое свечение есть тормозное излучение электронов в растворителях, возникающих при комптоновском рассеянии фотонов от радиоактивного источника.

Павел Алексеевич мне также рассказывал, как он подготовил к печати первую статью от имени двух авторов (Вавилова и Черенкова), которая содержала и описание результатов проведенных опытов, и возможное теоретическое объяснение природы нового свечения. Черенков рассматривал эту статью как совместную работу со своим руководителем. Сергей Иванович одобрил содержание статьи, но предложил разделить ее на две части: экспериментальную — автор Черенков и теоретическую — автор Вавилов. Это и было реализовано. Во втором томе «Докладов Академии наук» за 1934 г. обе работы были напечатаны одна за другой.



Обсуждение деталей эксперимента около синхротрона С-25. Москва. 1958 г. Слева от Павла Алексеевича — А.Я.Беляк, справа — Ю.М.Адо.



С лауреатами Государственной премии СССР, сотрудниками лаборатории фотомезонных процессов ФИАНа. Троицк. 1973 г. Сидят (слева направо): С.П.Харламов, П.П.Черенков, А.Н.Тавхелидзе (ИЯИ), Б.Б.Говорков. Стоят: А.И.Лебедев, И.Е.Тамм, А.С.Белоусов, М.И.Адамович.

Как же встретила научная общественность открытие нового вида излучения? В течение длительного времени экспериментальные результаты Вавилова и Черенкова вызывали недоверие. В докладе на юбилейной конференции 1984 г., приуроченной к 50-летию открытия излучения, Павел Алексеевич вспоминал, что его эксперимен-

ты подчас квалифицировались как занятия спиритизмом в темной комнате.

Известно, что в тот начальный период один из ведущих европейских журналов отказался от итоговой статьи по новому излучению без какого-либо внятного объяснения. Здесь уместно вспомнить известного английского физика О.Хевисай-

да (1850–1925), который писал: «Опыт научил меня, что если статья отвергнута по неубедительным и общепринятым причинам, то это значит, что статья непривычно оригинальна и хороша. Факт!» [4].

В 1888 г., почти за полвека до фиановских ученых, Хевисайд теоретически открыл «коническое излучение» электрического заряда, движущегося со скоростью, большей скорости света в эфире (пустоте) или в диэлектрике [5]. Далеко не все знают об этой истории и расчете Хевисайда, впоследствии надолго забытого.

Следует заметить, что до создания теории относительности Эйнштейна в 1905 г. ничто не препятствовало рассмотрению движения частиц как в пустоте (эфире), так и в среде со скоростями, равными и большими скорости света. Хевисайд не разделял движение электрона в эфире и в веществе, рассматривая эти две задачи одновременно с учетом диэлектрической постоянной ϵ и магнитной постоянной μ как для эфира, так и для среды. Более того, он отмечал, что будет использовать и для эфира постоянные ϵ_0 и μ_0 , не полагая их равными 1, как предлагал Герц. Хевисайд подчеркивал, что эфир рассматривается в качестве некой среды, обладающей электрическими и магнитными свойствами, и поэтому считал более физичным оставить для нее обозначения характеристик ϵ_0 и μ_0 , как и для любой другой среды. Только после создания теории относительности движение частиц в пустоте и в среде резко разграничились. В первом случае их движение со скоростью больше скорости света в вакууме абсолютно запрещено. Движение частиц со скоростью выше фазовой скорости света в среде вполне допустимо. Свое открытие Хевисайд сформулировал так: «Электрическое смещение (индукция) для точечного заряда представляет собою коническую поверхность сзади заряда, сопровождающую дополнительным

распределением внутри конуса. Очевидно, возникают тяущие назад силы, и энергия будет равномерно затрачиваться при постоянном нарастании конуса в его вершине, что целиком покрывается действием прилагаемой движущейся силы. Это то, что я подозревал в 1888 г. и позже разработал в математическом исследовании». Хевисайд также делает замечание, касающееся практической важности своего открытия (26 февраля 1898 г.). «Это может стать практически важным в связи с “катодными лучами” и “Х-лучами”, поскольку Дж. Дж. Томсон и другие сделали недавно заключение из экспериментов, что скорости заряженных частиц оказываются значительными по сравнению со скоростью света. Если это целиком подтвердится, мы можем надеяться, что увеличение напряжения произведет скорости, превышающие скорость света, если они уже не существуют, и таким образом, приведет к конической теории (the conical theory). В своих расчетах Хевисайд естественно получил и значение угла при вершине конуса, соответствующее известной формуле $\cos\theta = 1/\beta$ (у него $n=1$). Хевисайд в своих работах опередил время на полвека.

Черенкова несправедливо и неприлично долго не выбирали в Академию (открытие — 1934–1937 гг., Нобелевская премия — 1958 г., член-корреспондент — 1964 г., академик — 1970 г.). В воспоминаниях о своем отце, выдающемся физике-экспериментаторе XX в., Е.К.Завойском, его дочь Н.Е.Завойская писала: «Однажды летом еще в начале 60-х годов, когда мы делали покупки на Центральном рынке, отец издалека показал мне плотного немолодого мужчину. Запомни, — сказал он, — это живой укор Академии». Слова относились к Черенкову, автору крупного открытия, который в те годы еще не был удостоен звания академика.

Как относились зарубежные коллеги к Черенкову, я могу

проиллюстрировать на одном эпизоде, связанном с Сэмюэлем Тингом, американским ученым китайского происхождения, и относящимся к его первому знакомству с Черенковым. Дело происходило в 1970 г. в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), где проходила Международная конференция по аппаратуре в физике высоких энергий. Участие в ней принимали многие выдающиеся физики-экспериментаторы из разных стран, с том числе и из США: П.Пановский, С.Тинг и др. Присутствовал там и П.А.Черенков.

Сэмюэль Тинг — физик, который к тому моменту стал известен рядом интересных экспериментов на крупнейших ускорителях мира, привлекших к себе внимание мирового сообщества. По этой причине или по складу характера держался он на публике очень уверенно. Может быть, он предчувствовал свои будущие успехи: в 1976 г. он стал Нобелевским лауреатом за открытие в 1974 г. J/ψ -частицы. Но эти события еще были впереди.

Черенков, который к тому времени уже давно был Нобелевским лауреатом, напротив, держался очень скромно. Шло заседание в конференц-зале лаборатории теоретической физики ОИЯИ. Черенков выбрал себе место далеко не в первых рядах и посадил меня рядом с собой (это был восьмой ряд, я сидел с краю). В перерыве между заседаниями Тинг подошел ко мне и спросил, не мог бы я познакомить его с Черенковым. Зная демократизм Павла Алексеевича и принятые в ФИАНе нормы общения, я ответил: «No problems. Пойдемте, я вас познакомлю». Но не тут-то было. Всегда уверенный в себе Тинг вдруг как-то слегка стушевался: «Нет, Борис, вы пойдите и спросите у П.А.Черенкова, считает ли он возможным, чтобы вы познакомили меня с ним. Если он согласится оказать мне внимание, подайте мне знак рукой». Я поднялся и передал просьбу. Павел Алек-

сеевич тоже как-то стушевался, заерзal: «Борис Борисович, мне как-то неудобно. Может быть, не нужно все это!» Проявив некоторые дипломатические усилия, я уговорил Павла Алексеевича и подал знак рукой Тингу. И вдруг произошло что-то необыкновенное. Тинг, который находился у входа в зал заседаний, человек немаленького роста, вдруг изменил позу, принял положение полупоклона, принятого на Востоке как форма выражения уважения, сложил руки ладонями вместе и, «вперив» взгляд в Черенкова, медленным шагами, не меняя позы, стал двигаться к Павлу Алексеевичу. Это было настолько необычно, что все обратили на это внимание. Обсуждения смолкли. Неторопливо Тинг поднялся на восьмой ряд к Черенкову, где и был ему представлен. Затем последовало интересное обсуждение черенковских детекторов, причем Тинг демонстрировал необыкновенное внимание и учивость по отношению к Павлу Алексеевичу. Так прошла первая встреча этих двух физиков.

Нечто похожее произошло и в Троицке (там расположен филиал ФИАН), где Черенков познакомился с известным американским профессором Дж.Хабблом. Описывая позднее этот эпизод, Хаббл не находил других эпитетов по отношению к Черенкову, нежели легендарный и т.п.

Очень интересно отношение к своим открытиям самого Черенкова. Во время одного из заседаний упомянутой выше конференции, где в каждом докладе звучало его имя: черенковские счетчики, черенковские спектрометры, излучение Вавилова—Черенкова и т.д., Павел Алексеевич наклонился ко мне и тихо



На конференции «Черенковские детекторы и их применение в науке и технологии», посвященной 50-летию открытия излучения и 80-летию Павла Алексеевича. Июль 1984 г.

сказал на ухо: «Борис Борисович, вы знаете, мне все время кажется, что все это относится не ко мне. Что где-то, когда-то жил другой Черенков, вот о нем все и говорят».

Правильная теория эффекта Черенкова, которая полностью объяснила все свойства излучения, была создана в 1937 г. на основе классической электродинамики выдающимися учеными ФИАНа И.Е.Таммом и И.М.Франком [6]. Они показали, что открытые Вавиловым и Черенковым свечение представляют собой излучение заряженной частицы (электрона), движущейся равномерно и прямолинейно со сверхсветовой скоростью в материальной среде, и получили основную формулу направленности излучения и потерю энергии в единицу времени — знаменитую формулу Тамма—Франка. Все расчеты выполнены ими с учетом дисперсии, т.е. зависимости показателя

преломления среды от частоты испускаемого света.

Дальнейшее развитие теории излучения Вавилова—Черенкова связано с именами И.Е.Тамма (временные вопросы излучения), И.М.Франка (использование в теории представления о «длине формирования фотона», введенного Е.Л.Фейнбергом, и др.), В.Л.Гинзбурга (разработка квантовой теории излучения Вавилова—Черенкова), Б.М.Болотовского, В.Н.Цытовича, В.П.Зрелова, Г.А.Аскарьяна, А.А.Коломенского и др.

Уже перечисление этих имен показывает, какой повышенный интерес излучение Вавилова—Черенкова вызывало у многих наших известнейших физиков. Исторически так сложилось, что необычайно тесное сотрудничество теоретиков и экспериментаторов обеспечило многолетнюю определяющую роль российской науки в изучении излучения Вавилова—Черенкова. ■

Литература

1. Вавилов С.И. Свечение Черенкова // Природа. 1991. №3. С.21—23.
2. Зрелов В.П. Излучение Вавилова—Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М., 1968.
3. Брумберг Е.М., Вавилов С.И. // Изв. АН СССР. 1933. Серия VII, 919.
4. Appleyard R. Oliver Heaviside — In Pioneers of electrical communication. 1930.
5. Heaviside O. Electromagnetic theory. L., 1922.
6. Тамм И.Е., Франк И.М. // Докл. АН СССР. 1937. №14.

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 квантами 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 соответствующими 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 совпадающем 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 полушутя иногда называют наукой об аналогиях. И дело даже не в известных 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 определяются 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 времязпровождением». 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 сообра-

зить, 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 каковое является, конечно, электромагнитным и будет обсуждаться далее именно в этих рамках.

Синхронизм волны 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, совершающей 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 ограниченных волноводных структурах определена только в продоль-

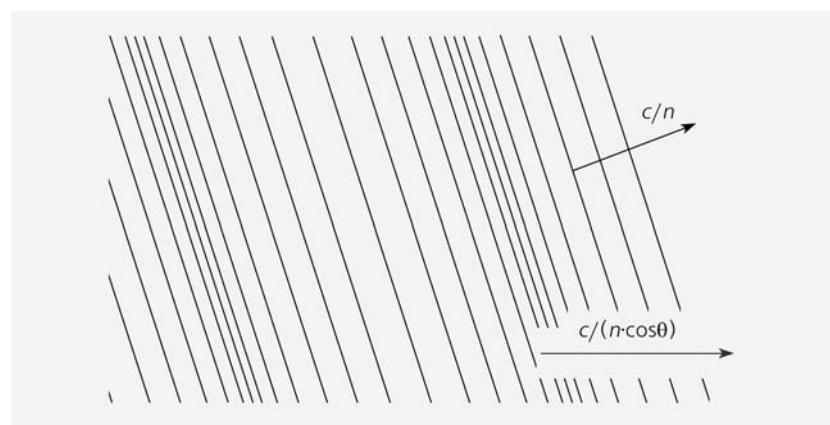


Рис. 1. Фазовая скорость волны перпендикулярно к фронту и вдоль траектории электрона (внизу).

ном 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 $v_b - v = \pm \lambda \Omega / 2\pi$. 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:

$$\omega = 2\pi v_b / \lambda = v_b \Omega / (v - v_b).$$

Отметим, кстати, что при $v \rightarrow v_b$ доплеровское смещение частоты может достигать колоссальных значений.

Однако в данном контексте заслуживает внимания другой вопрос: что происходит с амплитудой колебаний, когда осциллятор излучает? Напрашивавшийся ответ — колебания все-

гда 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:

$$\Delta W = \Delta E \cdot (1 - v/v_b).$$

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 $v = v_b$. Как уже упоминалось, в неограниченной среде это соответствует черенковскому углу $\theta = \arccos(c/vn)$.

Излучение в волноводных структурах

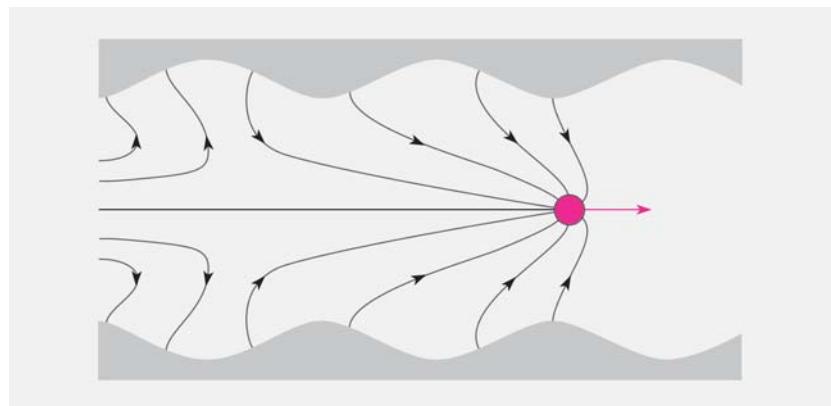
Коль скоро необходимым условием черенковского излучения оказывается синхронизм частицы с волной, оно возможно в волноводных или подобных

им структурами 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 возрастая 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 случаях эффективно излучать будет только частица, которая

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



пролетает в непосредственной близости от поверхностей, ведущих 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 интерпретация явления. В качестве примера можно привести так

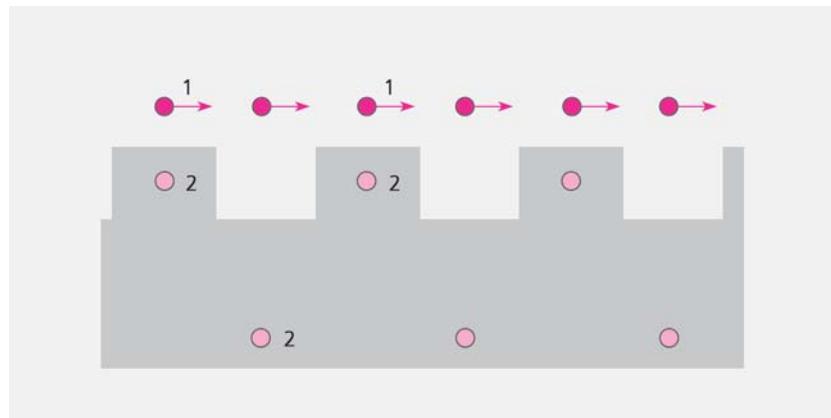
называемый эффект Смита—Перселла, состоящий в том, что частица излучает, пролетая вблизи гофрированной проводящей поверхности. Авторы дали ему не лишенную изящества интерпретацию: сама частица движется равномерно и прямолинейно, а ее электростатическое изображение в идеально проводящей поверхности испытывает 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 поверх-

ностной 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 учтем 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 ячейке эффект естественно интерпретировать как переходное

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

1 — равномерно движущиеся заряды.
2 — их электростатическое изображение в проводящей стенке.



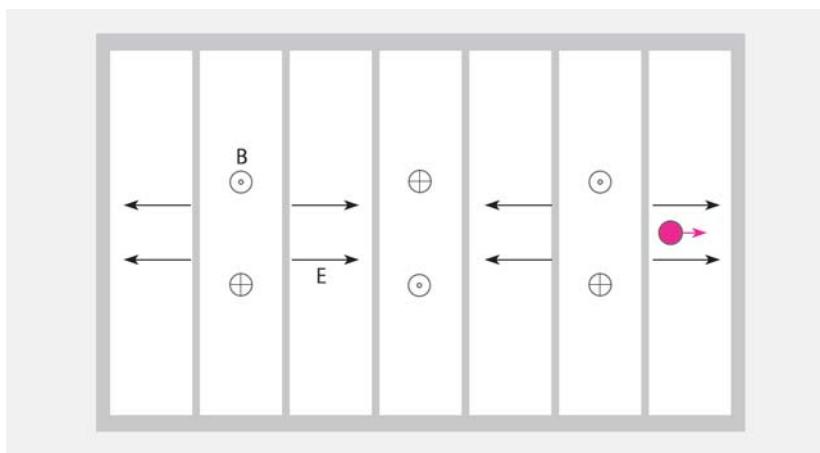


Рис.4. Волна, возбуждаемая электроном в цепочке не связанных резонаторов.
B — вектор магнитной индукции,
E — вектор напряженности электрического поля.

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 долговременный 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.

чайными 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 волны) 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 одновременно заряженных частиц представляет собой весьма коротковивущее образование, особенно при малых размерах. Поэтому для излучения на коротких волнах и достаточно длительного числа N не может

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 поле излучения складывается из индивидуальных полей со слу-

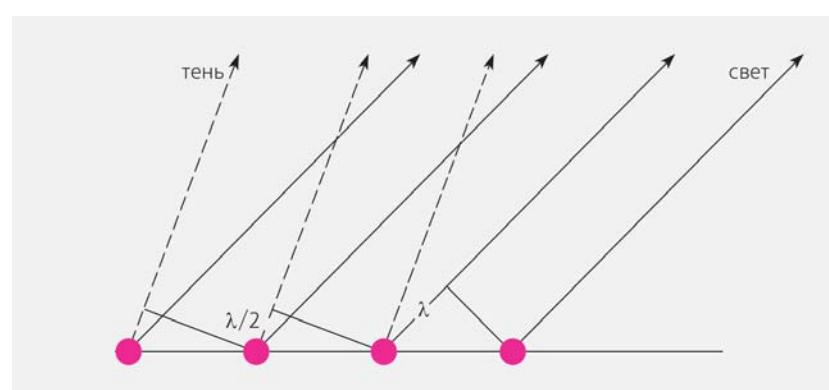


Рис.5. Угловое распределение когерентного черенковского излучения цепочки зарядов. Излучение с длиной волны λ от двух соседних сгустков гасится в направлении, показанном штриховыми линиями, так как волны находятся в противофазе, и усиливается в направлении, показанном сплошными линиями (волны синфазны).

быть велико. Этую 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 попечно 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.

Индукционное 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 случаях это может быть осуществлено небольшой начальной мо-

дуляцией скорости частиц с последующей их группировкой в дрейфовом пространстве (клистрон), либо механическим «нарезанием» пучка входным модулятором плотности (чопперtron). 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 за-селенности). 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 когерентном 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 волн, точно синхронной с частицами, и при случайному 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 почувствовать свою несинхронность. Это означает, что инду-

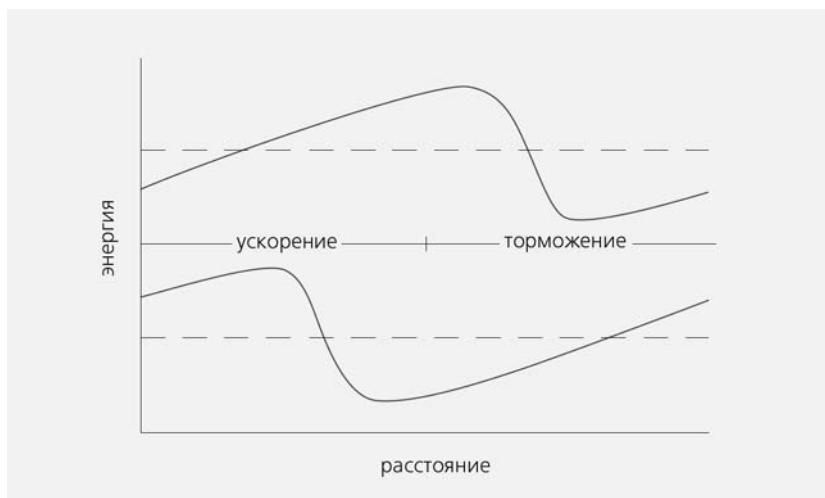


Рис.6. Перераспределение изначально однородного пучка (штриховая линия) в результате индуцированного излучения (верхняя кривая) и поглощения (нижняя кривая).

цируется 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 усилинию 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 используется несколько другой механизм излучения, но соот-

ношение 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 особенности 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 контигум, 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 волной пространственного заряда. По существу, такой метод был бы модификацией упомянутого выше чоппертона, но поз-

волил 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 положитель-

ным 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 зависит от тока пучка несколько 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.

Детекторы черенковского излучения

Член-корреспондент РАН С.П.Денисов
Институт физики высоких энергий
Протвино

В последние десятилетия было создано так много самых разных черенковских счетчиков, а область их применения настолько расширилась, что не стоит и пытаться охватить все в одной статье. Попробуем на конкретных примерах дать представление о том, сколь велико практическое значение эффекта излучения сверхсветовых частиц, открытого П.А.Черенковым 70 лет назад.

Свойства черенковского излучения

Свечение Черенкова возникает при движении заряженной частицы в среде со скоростью v , превышающей скорость c/n распространения света в этой среде (c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды), т.е. при

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}. \quad (1)$$

Излучение имеет узкую угловую направленность, обнаруженную Черенковым еще в первых опытах. В изотропных средах оно распространяется вдоль поверхности конуса под

углом θ к траектории частицы таким, что

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}. \quad (2)$$

Интенсивность свечения была рассчитана И.Е.Таммом и И.М.Франком. Если на пути длиной l изменение β мало и в диапазоне длин волн $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ($\lambda_2 > \lambda_1$) можно пренебречь дисперсией среды (т.е. зависимостью n от λ), то число фотонов, излученных в этом спектральном интервале, равно

$$N = 2\pi\alpha Z^2 l \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = 2\pi\alpha Z^2 l \cdot \sin^2\theta \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right), \quad (3)$$

где $\alpha = 1/137$ — так называемая постоянная тонкой структуры и Z — заряд частицы в единицах заряда электрона.

Чтобы представить масштаб эффекта, рассмотрим два примера. Пусть сначала ультрарелятивистская частица ($\beta \approx 1$) с $Z=1$ движется в воздухе, показатель преломления которого при давлении 1 атм и температуре 20°C равен 1.000273. Тогда угол θ составит 23 мрад или чуть больше 1°, и на пути 1 м частица излучит всего около 50 фотонов в интервале длин волн $0.3 < \lambda$ (мкм) < 0.7 , который соответствует области чувствительности обычных фо-

тоэлектронных умножителей (ФЭУ). В слегка расширенном диапазоне $0.2 < \lambda$ (мкм) < 0.7 (ФЭУ с кварцевыми окнами) число фотонов составит уже 90.

Теперь представим, что та же частица пересекает слой стекла с $n = 1.5$ и толщиной 1 см. В этом случае $\theta = 48^\circ$, и в стекле образуется около 500 фотонов в области λ от 0.3 до 0.7 мкм.

Получается, что свечение весьма слабое: не случайно Черенкову приходилось подолгу адаптироваться в темной комнате, чтобы его увидеть (глаз в то время был самым чувствительным «фотоэлементом»). Из-за малой интенсивности перспектива практического применения черенковского излучения открылась не сразу. Лишь с созданием ФЭУ, способных регистрировать очень слабые потоки света вплоть до отдельных фотонов, положение резко изменилось, и, начиная с 50-х годов прошлого столетия, началось бурное развитие детекторов частиц, основанных на эффекте Черенкова.

Остановимся на тех из них, которые предназначены для идентификации (определения масс) релятивистских частиц в экспериментах на ускорителях и для регистрации космического излучения. Далее, как это принято в физике высоких энергий, скорости частиц будут измерять-

ся в единицах скорости с распространения электромагнитных волн в вакууме, заряды — в единицах заряда e электрона, энергии E — в МэВ (10^6 эВ) и ГэВ (10^9 эВ), импульсы p — в МэВ/с и ГэВ/с, массы — в МэВ/с². Например, массы электрона, мюона, π^\pm - и K^\pm -мезона и протона равны соответственно 0.511, 106, 140, 494 и 938 МэВ/с².

Газовые черенковские счетчики

Основная задача черенковских счетчиков в экспериментах на современных ускорителях с энергиями в десятки и сотни ГэВ состоит в идентификации частиц, для чего измеряются их скорости β и затем по известным импульсам p определяются массы покоя $m = p \sqrt{1-\beta^2} / \beta c$. Скорость релятивистской частицы, энергия которой во много раз превышает mc^2 , можно с хорошей точностью вычислить по формуле:

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{mc}{p} \right)^2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что, например, разница скоростей π - и K -ме-

зонов с одинаковым импульсом $p = 40$ ГэВ/с, доступным на протонном ускорителе Института физики высоких энергий (ИФВЭ) в г. Протвино, составляет всего $7 \cdot 10^{-5}$, и для их разделения необходимо измерять скорости с точностью $\Delta\beta \leq 10^{-5}$. Столь высокая точность может быть достигнута при помощи газовых черенковских счетчиков — пороговых, дифференциальных или типа RICH.

В пороговых черенковских счетчиках для идентификации частиц используется условие (1): излучают черенковский свет и, следовательно, могут быть зарегистрированы только те частицы, скорость которых превышает пороговую величину $\beta_c = 1/n$. Рис. 1, а представляет оптическую схему одного из пороговых счетчиков, используемых в ИФВЭ, а рис. 1, б показывает, как с его помощью можно, например, отделить π^+ -мезоны от K^+ -мезонов и протонов в пучке частиц с импульсом 35 ГэВ/с. Счетчик наполняется аргоном. При не очень больших давлениях P зависимость показателя преломления аргона от P можно выразить приближенной формулой: $n(P) = 1 + 3 \cdot 10^{-4} P$. Используя приведенные выше соотноше-

ния, нетрудно оценить пороговое значение давления $P \geq 1.7 \cdot 10^3 \cdot (mc/p)^2$, при превышении которого частица с массой m и импульсом p начнет излучать черенковский свет. При давлении аргона ниже порога для π^+ -мезонов срабатывание счетчика в основном связано с небольшой (~1%) примесью позитронов и μ^+ -мезонов в пучке, сцинтиляциями аргона под действием проходящих через счетчик частиц и шумами ФЭУ. Скорость счета при этом находится на уровне нескольких отсчетов/с. Как только давление перешагнет порог, соответствующий началу излучения пионов, скорость счета начинает быстро расти и постепенно выходит на плато, когда число черенковских фотонов становится достаточным для регистрации каждого пиона. Аналогичные скачки скорости счета наблюдаются при переходе давления через пороги излучения каонов и протонов. Из рис. 1, б следует, что при давлении аргона 0.2–0.3 атм. счетчик регистрирует почти все пионы и слабо чувствителен к каонам и протонам.

Очевидно, что при помощи одного порогового счетчика указанным способом можно

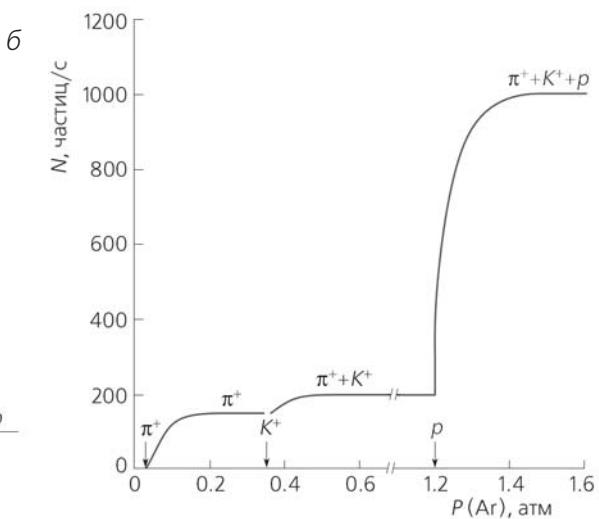
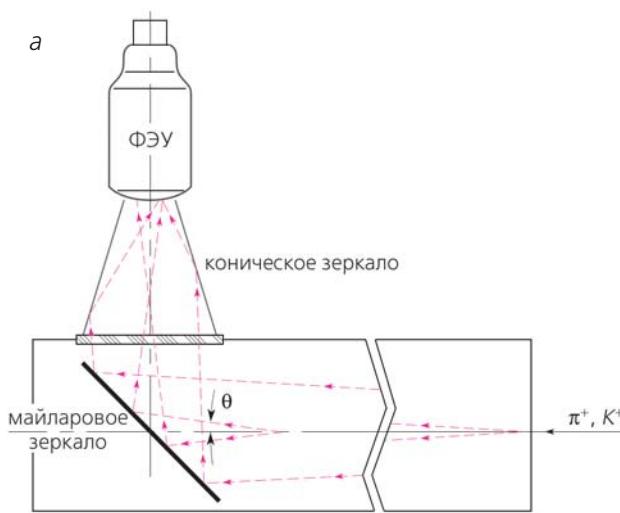


Рис. 1. Схема порогового черенковского счетчика (а) и зависимость скорости счета частиц в пучке с импульсом 35 ГэВ/с от давления аргона в пороговом черенковском счетчике (б). Стрелками показаны пороговые значения давления.

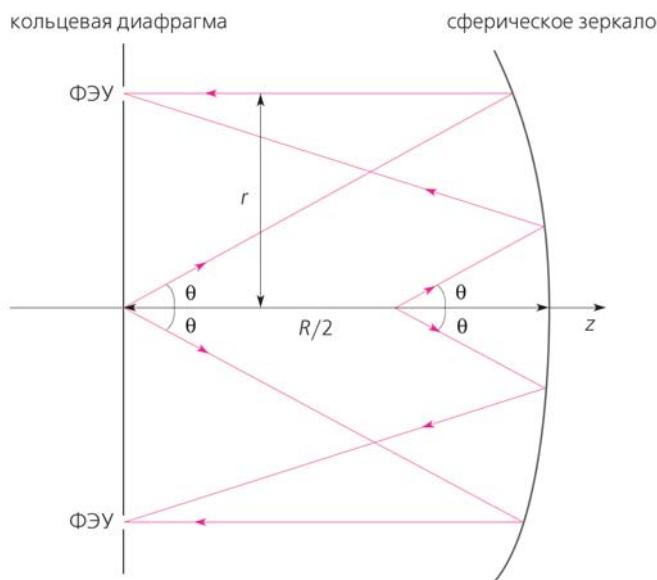


Рис.2. Схема дифференциального счетчика.

идентифицировать только самые легкие частицы. Представляем читателю самому сообразить, как можно выделить в пучке, например, каоны, используя два пороговых счетчика. Но обычно для этой цели применяют дифференциальный счетчик.

Разделение частиц с разными массами по скоростям в дифференциальных черенковских счетчиках основано на связи (2) между скоростью β и углом θ . Черенковский свет, излученный под углом θ , собирается в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) в кольцо радиуса

$$r = \frac{R}{2} \operatorname{tg} \theta, \quad (5)$$

где R — радиус зеркала. Если в фокальной плоскости расположить кольцевую диафрагму и установить за ней ФЭУ, можно выделить частицы со скоростью β , определяемой формулами (2), (5) (значения r , R и n предполагаются известными).

Точность $\Delta\beta$ определения скорости ограничивается несколькими факторами, главный из которых — дисперсия газа

в счетчике, т.е. зависимость показателя преломления n и, следовательно, угла θ от длины волны света λ (рис.3). Этот эффект приводит к тому, что кольцо черенковского излучения в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) окрашено во все цвета радуги, причем его внешний радиус имеет фиолетовый оттенок, а внутренний — красный (рис.4). Оказывается, что $\Delta\beta = \Delta n/n$, где Δn — изменение показателя преломления в интервале $\lambda_1 \dots \lambda_2$ чувствительности счетчика (рис.3). Отношение $\Delta n/n$ зависит от сорта газа, примерно пропорционально его давлению и для современных приборов находится в пределах $(2 \dots 4) \cdot 10^{-5}$ в спектральном диапазоне от 0.2 до 0.7 мкм. Можно ли построить дифференциальный счетчик с лучшим разрешением? Да, можно.

Простой путь — сужение спектрального диапазона (рис.3) и/или уменьшение давления газа и, следовательно, угла излучения. Однако это невыгодно, так как оба варианта приводят к потере и без того малой интенсивности черенковского света (3). Ослабление свечения при

уменьшении угла излучения или «обрзезании» спектрального диапазона можно, вообще говоря, компенсировать увеличением длины счетчика. Но тогда быстро растут не только продольные, но и поперечные размеры детектора, усложняется его конструкция и возрастает стоимость. Кроме того, размеры счетчика часто бывают ограничены условиями эксперимента. Более сложное, но и более эффективное решение проблемы — прибегнуть к специальной оптике, компенсирующей зависимость $\theta(\lambda)$. Впервые такое устройство (дублет конических призм из кристалла NaCl и плавленого кварца, установленный перед кольцевой диафрагмой) было применено в счетчике [1], который использовался для идентификации частиц в пучках ускорителей ЦЕРН и ИФВЭ. Компенсация дисперсии газа позволяет достигнуть разрешения $\Delta\beta/\beta \sim 10^{-6}$ при регистрации частиц в пучках с энергией сотни ГэВ.

Отметим, что все черенковские фотонны, независимо от места излучения, собираются в фокальной плоскости одновременно. Благодаря этому черенковские счетчики обладают очень хорошим временным разрешением, которое определяется только свойствами ФЭУ и регистрирующей электроники.

На рис.5 показана зависимость скорости счета π^- , K^- -мезонов и антипротонов с импульсом 45 ГэВ/с от величины показателя преломления рабочего газа (CO_2) в дифференциальном счетчике с компенсацией дисперсии [2], разработанном в ИФВЭ. Видно, что при помощи счетчика можно надежно идентифицировать все три сорта частиц, хотя доля каонов в пучке составляет всего ~ 0.01 , а антипротонов еще в 10 раз меньше. Счетчик использовался во многих экспериментах на ускорителе ИФВЭ, в том числе для исследований закономерностей рождения частиц в сильных взаимодействиях, которые привели

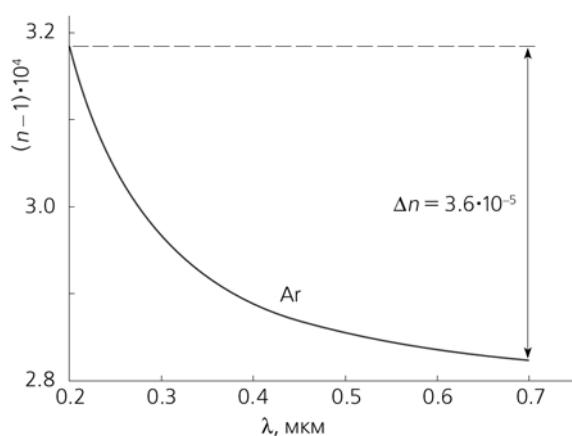


Рис.3. Зависимость показателя преломления аргона от длины волны.

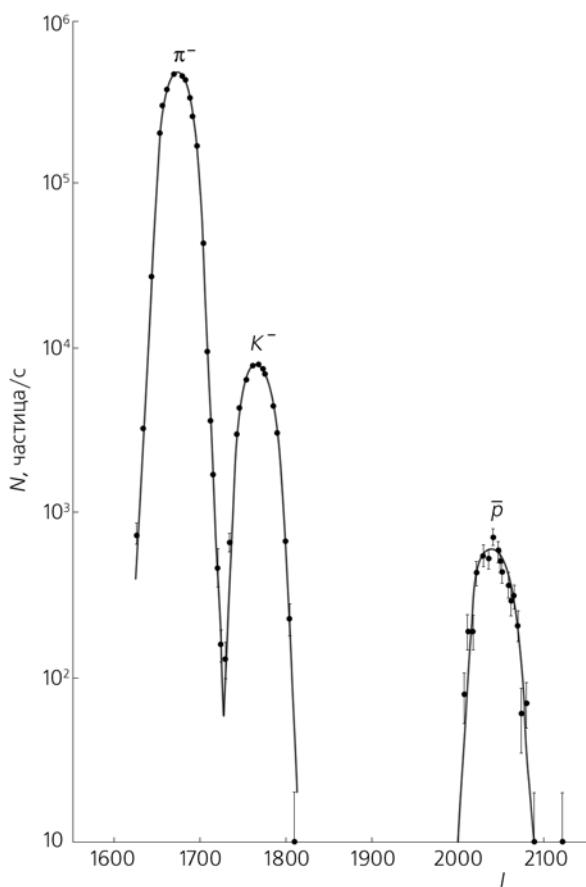


Рис.4. Положение кольца черенковского света в фокальной плоскости сферического зеркала (см.рис.2). Радужная окраска кольца связана с дисперсией газа.

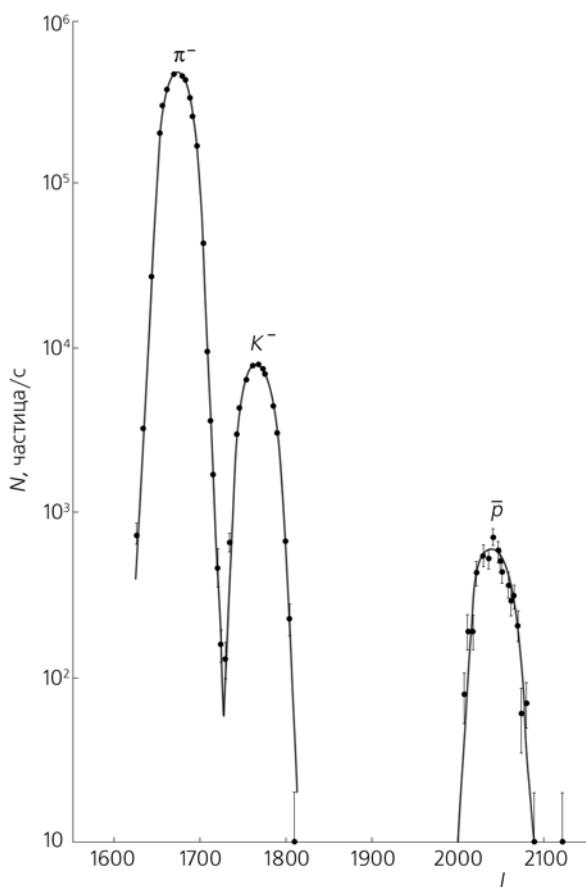


Рис.5. Идентификация π^- , K^- -мезонов и антипротонов в пучке отрицательных частиц с импульсом 45 ГэВ/с при помощи дифференциального счетчика [2] с компенсацией дисперсии, наполненного CO_2 . l — число делений шкалы интерферометра, пропорциональное $(n-1)$.

к открытию масштабной инвариантности в образовании адронов [3].

Основные недостатки дифференциальных счетчиков — сильное ограничение на разброс частиц по углам и способность регистрировать в данный

момент только одну частицу. Поэтому они применяются, в основном, для идентификации частиц в хорошо сформированных пучках. Когда необходимо регистрировать частицы в большом интервале углов и/или одновременно несколько

частиц, применяют детекторы типа RICH.

Если траектория заряженной частицы не параллельна оси счетчика Z (рис.2), а имеет относительно нее угловые координаты θ_p , ϕ_p , то кольцо, в которое соберется черенковский

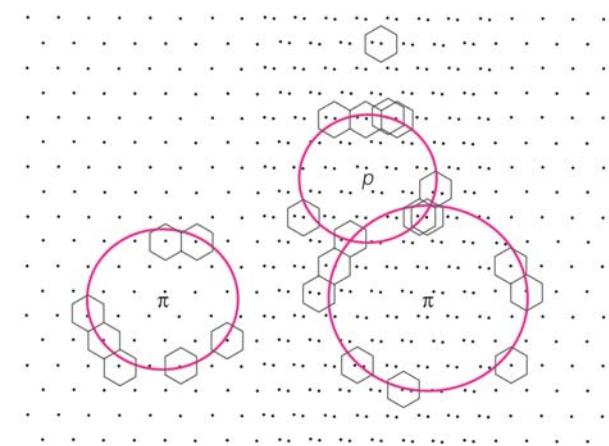


Рис.6. Кольца черенковского излучения от протона и двух π -мезонов, зарегистрированные в детекторе RICH [4]. Точками показаны центры ФЭУ в матрице, шестиугольниками — сработавшие ФЭУ.

свет в фокальной плоскости сферического зеркала, сместится: его центр будет иметь полярные координаты $r_0 = R/2 \operatorname{tg}\theta_p$, $\phi_0 = \phi_p$ (рис.4). Таким образом, определив положение центра и радиус r кольца черенковского излучения, можно не только измерить скорость частицы, но и найти угловые координаты ее траектории, что и реализуется в счетчиках RICH (Ring Imaging Cherenkov). В них вместо кольцевой диафрагмы (рис.2) в фокальной плоскости помещаются приемники, способные эффективно регистрировать отдельные фотоны и измерять их координаты — например, ФЭУ с небольшим диаметром фотокатода. Один из первых счетчиков RICH, в котором для регистрации колец черенковского света использовалась матрица из 736 умножителей с диаметром фотокатода 10 мм, был создан в 1989 г. для экспериментов на ускорителе ИФВЭ [4]. На рис.6 показан случай, когда в матрице одновременно зарегистрированы три кольца. По радиусам кольцам были рассчитаны скорости соответствующих им частиц, и затем по известным импульсам, измеренным при помощи магнитного спектрометра, определены их массы покоя: две частицы оказались пионами и одна — протоном. Позднее в ИФВЭ был разработан и изготовлен 10-метровый счетчик RICH [5] с матрицей из 2848 ФЭУ для экспериментов в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (ФNAL) в США. Счетчик заполнялся неоном при давлении 1 атм. Он позволял разделять пионы и каоны до энергий 185 ГэВ и пионы и протоны — до 320 ГэВ.

Регистрация кольц черенковского излучения матрицей из большого числа ФЭУ имеет целый ряд достоинств, но вместе с тем делает RICH весьма дорогим прибором. Кроме того, точность определения координат фотона ограничена диаметром фотокатода ФЭУ. Дешевле вместо матрицы ФЭУ использо-

вать, например, дрейфовые проволочные камеры или газовые электронные умножители GEM [6], которые имеют очень хорошее координатное разрешение, но уступают ФЭУ по другим характеристикам, например, по временному разрешению.

Спектрометры полного поглощения

Измерение энергии и идентификация γ -квантов и электронов (позитронов) высокой энергии — важнейшие задачи в физике частиц. Это связано, в частности, с тем, что большинство частиц нестабильно, и многие из них через очень короткое время, не позволяющее зарегистрировать их непосредственно, распадаются в конечном счете на γ -кванты и электроны. В качестве примера можно привести распады π^0 - и η -мезонов на 2 γ -кванта или J/ψ^- , ψ^- , Υ -частиц и переносчика слабого взаимодействия Z^0 -бозона на электрон и позитрон. Указанные частицы играют фундаментальную роль в микромире, и многие эксперименты в физике высоких энергий направлены на изучение их свойств и закономерностей образования.

Единственный для γ -квантов и один из основных для электронов способ определения энергии в области больше нескольких ГэВ — метод полного поглощения электромагнитных ливней, создаваемых ими в веществе детектора. Рассмотрим, как возникают электромагнитные ливни.

Результатом взаимодействия ультрагрелятивистских электронов и позитронов с атомными ядрами A среди чаще всего становится тормозное излучение фотонов:

$$e + A \rightarrow e' + A' + \gamma$$

(штрих означает изменение энергии частицы). Аналогично, самым вероятным процессом для γ -квантов с энергиями в де-

сятках МэВ и выше оказывается образование электрон-позитронных пар:

$$\gamma + A \rightarrow e^+ + e^- + A'.$$

Посмотрим, что случится при попадании, например, высоконергичного γ -кванта в очень толстый (≥ 40 см) слой оптического стекла, скажем, марки ТФ1 (тяжелый флинт). Пролетев в таком стекле примерно 2 см, γ -квант превратится в электрон и позитрон, которые, в свою очередь, на той же дистанции ~ 2 см потеряют около половины энергии на тормозное излучение. Тормозные фотоны, пролетев опять ~ 2 см, породят новые пары e^+e^- и т.д. Этот процесс лавинообразного размножения частиц и, следовательно, дробления их энергии будет продолжаться до тех пор, пока реакции тормозного излучения и рождения пар играют доминирующую роль. Затем, когда средние энергии частиц в ливне станут меньше так называемой критической энергии (для стекла ТФ1 она составляет ~ 20 МэВ), в дело вступят другие процессы (например, ионизационные потери энергии для электронов и позитронов), приводящие к уменьшению потока частиц. Образовавшиеся в веществе электроны, позитроны и γ -кванты и составляют электромагнитный ливень. Число частиц в ливне достигает максимума на глубине стекла $t = 15 \div 20$ см, а затем быстро уменьшается и при $t \geq 40$ см становится пренебрежимо малым. Легко сообразить, что ливень от первичного электрона или позитрона будет развиваться аналогично ливню от γ -кванта.

Естественно, ливневые электроны и позитроны излучают в стекле черенковский свет. Суммарная длина треков всех электронов и позитронов в ливне и, следовательно, число черенковских фотонов оказывается пропорциональным энергии первичной частицы. Таким образом, измерив при помощи фотоумножителя интенсивность вспышки черенковского

излучения в толстом блоке стекла, можно определить энергию частицы, вызвавшей ливень. Точность измерения энергии определяется формулой $\Delta E/E = 0.05\sqrt{E} + 0.01$, где E измеряется в ГэВ. При энергиях электронов и γ -квантов больше 25 ГэВ энергетическое разрешение становится лучше 2%.

Заметим, что для частиц с массой m интенсивность тормозного излучения $\sim 1/m^2$. Самая близкая по массе частица к электрону — мюон. Поскольку $m_\mu/m_e \approx 2 \cdot 10^2$, вероятность излучения тормозного γ -кванта мюоном почти в 40 000 раз меньше, чем для электрона, и он реально не вызовет развития электромагнитного ливня в стекле. И действительно, черенковский свет от мюона (обусловленный как излучением самого мюона, так и быстрыми электронами, выбитыми им из атомов в стекле) гораздо слабее, чем свет от электронов и γ -квантов высокой энергии. На этом основан принцип идентификации электронов и γ -квантов при помощи спектрометров полного поглощения.

В настоящее время широкое применение в экспериментах на ускорителях для регистрации электронов и γ -квантов нашли спектрометры полного поглощения типа ГАМС [7], разработанные в ИФВЭ под руководством Ю.Д.Прокошкина. Они представляют собой «стенки» из блоков особо прозрачного оптического стекла, как правило, марок Ф8 или ТФ1. Характерный размер блока $4 \times 4 \times 40$ см. Каждый блок «просматривается» своим ФЭУ. Наряду с энергией такие спектрометры позволяют измерять с высокой точностью координаты попадающих в детектор частиц (по распределению энергии ливня в поперечном направлении). Самый большой спектрометр ГАМС, созданный в ИФВЭ около 20 лет назад для экспериментов в ЦЕРН, содержит 4000 блоков стекла. Крупные спектрометры этого типа используются в

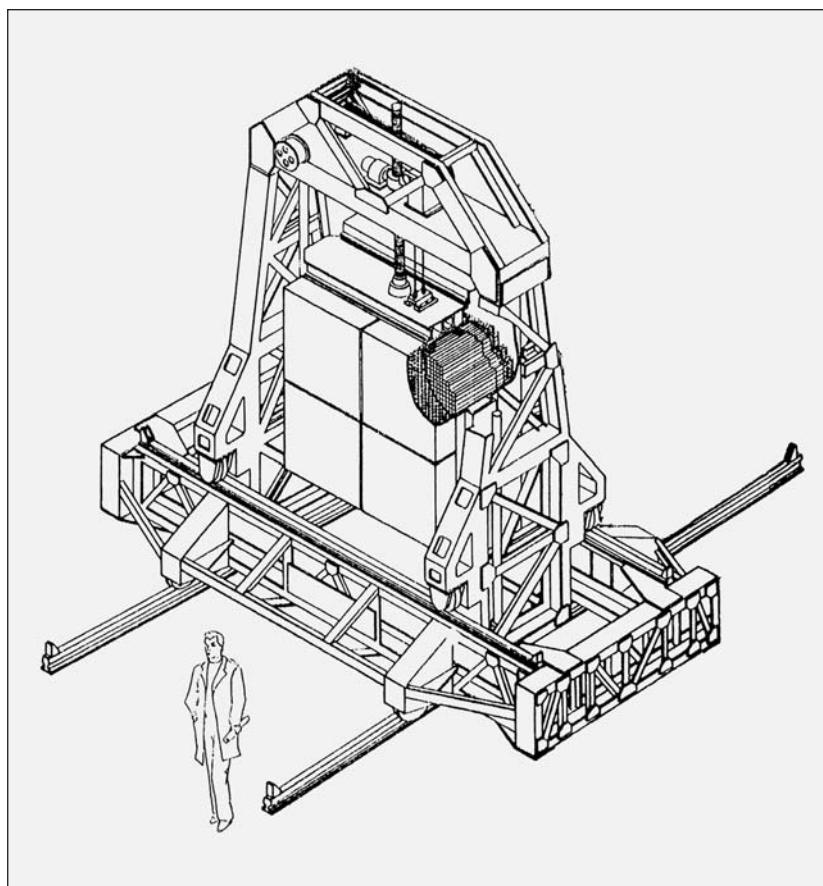


Рис.7. Общий вид детектора ГАМС-2000, используемого в экспериментах на ускорителе ИФВЭ.

ИФВЭ (рис.7), ФНАЛ и Брукхейвенской национальной лаборатории (США).

Регистрация космических частиц

Электромагнитные ливни могут развиваться не только в плотных средах, но и в газах, включая атмосферу Земли. Например, средний путь γ -кванта в воздухе до превращения в электрон и позитрон равен 390 м при давлении 1 атм. С точки зрения развития ливня атмосфера эквивалентна 50-сантиметровому блоку стекла ТФ1, и высоконергичные γ -кванты, попадающие в атмосферу из космоса, должны дать мощное черенковское излучение. Источниками таких γ -квантов служат далекие

звезды, и изучение энергетических спектров γ -квантов помогает лучше понять процессы, происходящие во Вселенной. Этим занимается молодая наука — гамма-астрономия.

Первые эксперименты по наблюдению черенковских вспышек от космических частиц были выполнены еще в 50-х годах прошлого столетия В.Голбрайтом и Дж.Джелли, а также Н.М.Нестеровой и А.Е.Чудаковым. Сейчас функционируют несколько крупных экспериментальных установок, на которых проводятся исследования в области гамма-астрономии. Черенковский свет в них регистрируется либо непосредственно ФЭУ с большими фотокатодами, либо детекторами, похожими на прожекторы. В фокусе прожекторных зеркал, имею-

ших диаметр до нескольких метров, располагаются чувствительные фотоприемники. Чтобы уменьшить фон от постороннего света и определить направление движения первичного γ -кванта, в одной установке используется ряд таких детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, причем отбираются события, когда сигналы в детекторах появляются одновременно. Эксперимент, естественно, ведется только в безлунные ночи при прозрачной атмосфере.

Черенковское излучение сопровождает не только электромагнитные ливни, но и так называемые широкие атмосферные ливни, которые возникают при взаимодействии космических адронов высоких энергий с ядрами азота, кислорода и других компонентов воздуха. При этом обильно рождаются

π^0 -мезоны, которые быстро распадаются на два γ -кванта, вызывающих электромагнитные ливни. Благодаря регистрации черенковского излучения удается получать информацию о широком атмосферном ливне на всем пути его развития, тогда как другие методы позволяют исследовать характеристики ливня лишь на определенной глубине атмосферы.

Здесь нельзя не упомянуть космическую обсерваторию, носящую имя французского физика П.Оже, одного из пионеров исследования космических лучей. Обсерватория создается в Аргентине при сотрудничестве ученых из 19 стран. Ее основу составляют 1600 детекторов, расположенных через 1.5 км на площади 3000 км². Каждый детектор представляет собой цилиндр с основанием 10 м² и высотой 1.2 м, заполненный во-

дой. Черенковский свет, излученный в воде заряженными частицами широкого атмосферного ливня, собирается на полусферический ФЭУ с диаметром фотокатода 23 см. Помимо черенковских счетчиков в установке имеются детекторы для регистрации флуоресценции воздуха, вызванной взаимодействием заряженных частиц с атомами азота. Обсерватория нацелена на изучение ливней с предельно высокими энергиями $\geq 10^{20}$ эВ.

Но есть один тип космических частиц, которые очень слабо взаимодействуют с веществом и их нельзя зарегистрировать по ливням в атмосфере — это нейтрино. Изучение космических нейтрино представляет особый интерес, так как может дать информацию о процессах, происходящих в глубинах галактик и звезд, в частности вну-

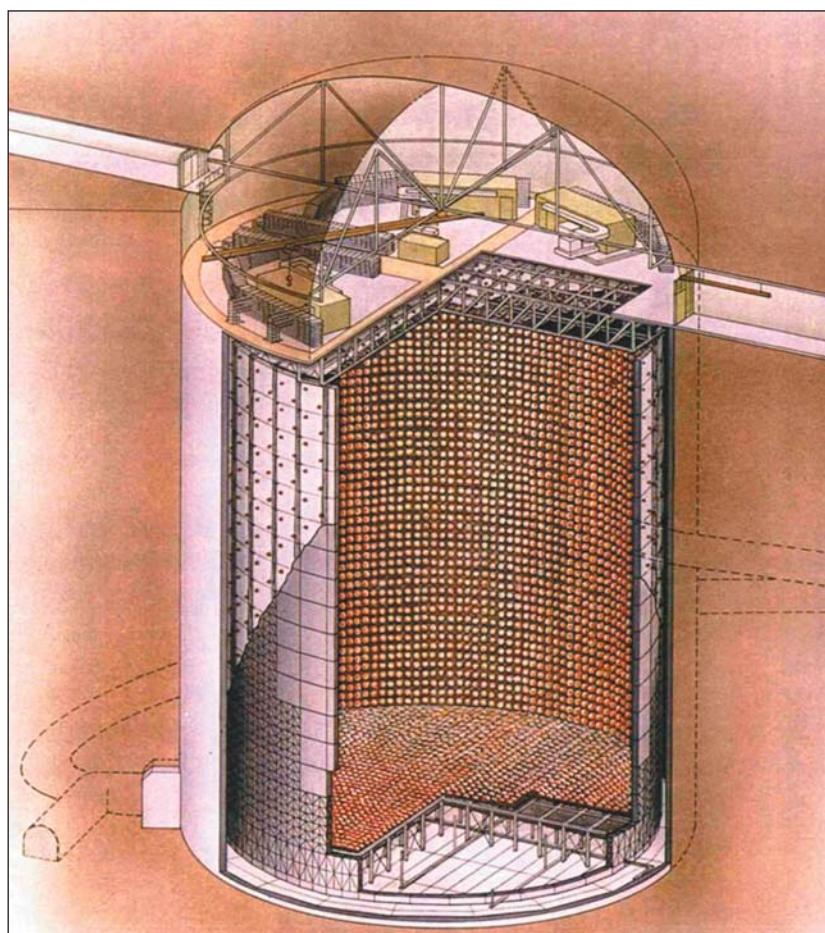
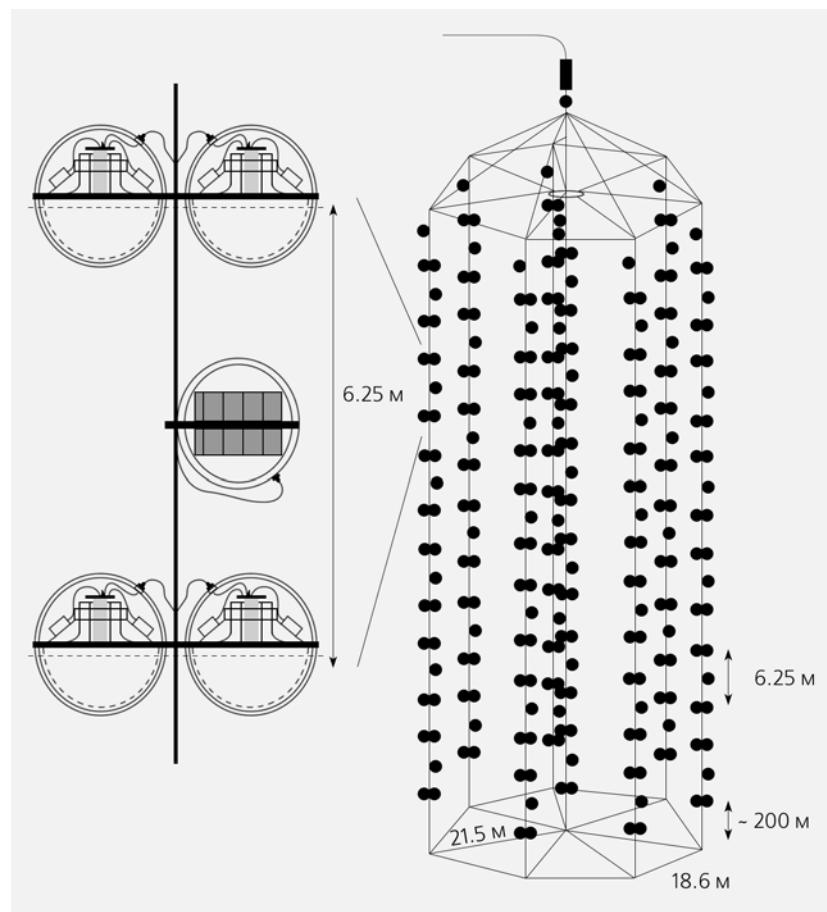


Рис.8. Общий вид установки SuperKamiokande. 50 000 т очень чистой воды находятся в цилиндрическом резервуаре высотой 41.4 м и радиусом основания 20 м. Возникающий в воде черенковский свет регистрируется при помощи 11 000 полусферических ФЭУ с диаметром фотокатода 0.5 м.

Рис.9. Схема расположения детекторов черенковского излучения Байкальского нейтринного телескопа.



три Солнца. Это епархия еще одной новой науки — нейтринной астрономии. Чтобы «уловить» данные частицы, приходится строить гигантские детекторы — весом в тысячи тонн и более — и помещать их глубоко под землей или под водой для снижения фона от всех других, менее проникающих, космических частиц. А регистрируется в данном случае все то же черенковское излучение — от вторичных заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино в воде (вода — самый дешевый, а иногда и бесплатный черенковский радиатор).

Крупнейший подземный водный детектор — SuperKamiokande [8] (рис.8). Он расположен в глубокой шахте под горой Kamioka в 300 км от Токио. Основные направления исследований связаны с регистрацией нейтрино: измерением потока

нейтрино от Солнца и изучением энергетического спектра нейтрино, которые возникли при взаимодействии космических лучей в атмосфере. В частности, данные, полученные на этой установке вместе с результатами опытов на другой подземной установке SNO (Канада), использующей тяжелую воду (D_2O), позволили обнаружить осцилляции солнечных нейтрино [9]. К сожалению, в 2002 г. на японской установке произошла авария, в результате которой вышло из строя значительное число дорогостоящих ФЭУ. В настоящее время установка восстанавливается, и скоро исследования на ней будут продолжены.

Байкальский нейтринный телескоп [10] — первый глубоководный детектор космических частиц. Выбор озера Байкал обусловлен большой глубиной (до 1.7 км) и прозрачностью во-



Рис.10. Монтаж гирлянды из ФЭУ в скважине, пробуренной в ледяном покрове Антарктиды.

ды. Кроме того, зимой оно покрывается толстым слоем льда, что упрощает монтаж установки. Черенковский свет от мюонов и взаимодействий нейтрино на больших глубинах регистрируется фотоумножителями, опускаемыми под воду на специальных тросах — стрингах (рис.9). Установка предназначена для исследования энергетических спектров нейтрино и мюонов, а также поиска новых частиц с необычными свойствами, которые могли бы прилететь из далеких миров. Сейчас строятся еще 3 глубоководных детектора — ANTARES, NESTOR и NEMO. Все они располагаются в Средиземном море у берегов Греции, Италии и Франции на глубинах от 2.4 до 4.1 км. Идея использования естественных водоемов для регистрации космических нейтрино была впервые сформулирована А.А.Марковым в 1960 г.

Кроме глубоководных существуют и наземные водные детекторы космических лучей. К ним относится, например, созданная в Московском инженерно-физическом институте установка НЕВОД, которая способна

регистрировать все основные компоненты космических лучей, включая прошедшие сквозь Землю нейтрино.

Не только вода, но и лед используется в качестве радиаторов черенковского излучения космических частиц. В Антарктиде были обнаружены много-километровые слои прозрачного льда, и этим воспользовались физики для создания на Южном полюсе комплекса AMANDA [11]. Черенковский свет, возникший во льду, регистрируется несколькими гирляндами из фотоумножителей, опущенных в глубокие отверстия (рис.10). По сравнению с водой лед обладает целым рядом преимуществ: он неподвижен, в нем нет светящихся микроорганизмов, создающих фон на больших глубинах естественных водоемов, радиоактивный фон льда очень мал, низкая температура способствует уменьшению шумов ФЭУ. Сейчас недалеко от детектора AMANDA строится еще более грандиозное сооружение под названием ICECUBE, в котором «просматриваемый» объем льда составит 1 км³. Главное направление работ на установках

AMANDA и ICECUBE — нейтринная астрономия.

* * *

Черенковские счетчики играют исключительно важную роль в физике частиц. Именно они были основным инструментом в экспериментах на ускорителях по обнаружению и исследованию образования антивещества, изучению закономерностей рождения и взаимодействия ядерно-активных частиц — адронов, поиску новых частиц и процессов в микромире. Трудно переоценить и значение черенковских детекторов для регистрации космических лучей. Использование в качестве радиаторов черенковского излучения земной атмосферы, искусственных и естественных водоемов и антарктических льдов позволило создать уникальные по своим возможностям установки для исследований в области гамма- и нейтринной астрономии. Результаты этих работ существенно расширили наши знания о процессах образования и свойствах космических частиц, в частности нейтрино. ■

Литература

1. Duteil P., Gilly L., Meunier R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1964. V.35. P.1523—1524.
2. Бушин Ю.Б., Горин Ю.П., Денисов С.П. и др. // ПТЭ. 1971. №1. С.65—67.
3. Бинон Ф., Денисов С.П., Дютейль П. и др. // ЯФ. 1970. №11. С.636—639. Phys.Lett. 1969. B30. P.506—509.
4. Kozhevnikov A., Kubarovskiy V., Molchanov V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1999. V.A433. P.164—167.
5. Engelfried J., Filimonov I., Kilmer J. et al. // Nucl. Instr. Meth. V.A431. P.53—69.
6. Sauli F. // Nucl. Instr. Meth. 1997. V.A386. P.531—534.
7. Binon F., Buyanov V.M., Donskov S.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1986. V.A248. P.86—102.
8. Fukuda S., Fukuda Y., Hayakawa J. et al. (SuperKamiokande Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. 2003. V.A501. P.418—462.
9. Копылов А.В. Солнечные нейтрино: новые результаты // Природа. 2004. №2. С.5—11.
10. Arpesella C., Bellotti E. and Bottiro F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1994. V.B35. P.290—293.
11. Halzen F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1995. V.B38. P.472—483.

ФИЗИКИ И ЛИРИКИ

Б.М.Болотовский,
доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева
Москва

Более 40 лет прошло с того дня, как Нобелевский комитет присудил премию трем советским физикам — П.А.Черенкову, И.Е.Тамму и И.М.Франку — за открытие и объяснение очень красивого физического явления. Открытие было сделано в 1934 г. — задолго до присуждения Нобелевской премии. Годы позволяют оценить значение сделанного в прошлом. Но такой разрыв во времени между открытием и наградой имеет и свои отрицательные стороны. Не все участники открытия получают признание при жизни. Нобелевская премия посмертно не присуждается. С.И.Вавилова уже не было в живых в год присуждения премии — он умер за семь лет до этого.

В том же самом 1958 г. Нобелевская премия по литературе была присуждена знаменитому советскому поэту и писателю Б.Л.Пастернаку — за роман «Доктор Живаго» и стихи к нему. Роман прекрасен, а стихи еще прекраснее, и Пастернак, без сомнения, был достоин Нобелевской премии. Но в романе «Доктор Живаго» были высказаны (иногда от имени автора, а чаще — от лица героев романа) взгляды, в общем довольно безобидные, которые, тем не

менее, расходились с официальной партийной идеологией. Поэтому роман впервые вышел на Западе. Присуждение Пастернаку Нобелевской премии было воспринято советским руководством как диверсия против страны победившего социализма. Началась массированная травля Пастернака.

Присуждение же премии физикам было встречено партийным руководством как большая победа. Во всех газетах помещались статьи о советской науке, о существе и значении открытия, о физиках, которые удостоены премии. В газете «Правда» была напечатана статья, подписанная сразу несколькими академиками. Писал ее Б.М.Вул, тогда член-корреспондент АН СССР и заведующий лабораторией полупроводников ФИАН, в стенах которого было сделано открытие. С черновиком этой статьи Бенцион Моисеевич приходил ко мне. Написав, Вул хотел быть уверенным, что она не содержит физических неточностей. Помню, Бенцион Моисеевич держался таинственно, завел меня для чтения в пустой кабинет и вздрагивал при каждом стуке. Если говорить о физической стороне, статья не вызвала у меня возражений. Я только посоветовал добавить фразу о том, что на советских искусственных спутниках Зем-

ли установлены специальные приборы для исследования многозарядных ионов — черенковские счетчики, в которых космические частицы регистрируются по излучению Вавилова—Черенкова. Вул такую фразу добавил.

Кроме того, я предложил воспользоваться случаем и напомнить о замечательном физике, выдающемся учителе, основателе большой и плодотворной научной школы академику Л.И.Мандельштаме. Через несколько лет после смерти Мандельштама его обвинили в идеализме, рассыпали на этом основании том его трудов, преследовали его учеников. Я предложил вставить в статью, посвященную нобелевским лауреатам, фразу (пишу по памяти): «Работа, удостоенная Нобелевской премии, есть результат плодотворного сотрудничества двух замечательных научных школ — экспериментальной школы академика Вавилова и школы теоретической физики академика Мандельштама». Вул согласился. Через день статья появилась в «Правде» за подпись нескольких академиков. Все, что печаталось в газете «Правда», воспринималось как непререкаемая истина. Нападки на Мандельштама прекратились. Спасибо Нобелевскому комитету. Не дали в свое время Леониду



И.Е.Тамм, П.А.Черенков и И.М.Франк. Стокгольм, ноябрь 1958 г.



Б.Л.Пастернак. 1920 г.

Исааковичу Нобелевскую премию за открытие комбинационного рассеяния, так хоть помогли избавить его от посмертного шельмования.

Поскольку я в то время занимался теорией излучения Вавилова—Черенкова, дирекция института поручила мне встречаться с корреспондентами, репортерами, фотографами и писателями, которые готовили материалы по Нобелевской премии. Самых лауреатов было решено беспокоить как можно меньше.

Работники пера имели весьма смутное представление о существе открытия и нередко писали полный бред. Мои робкие замечания они встречали в штыки, упрекали в узости кругозора, в том, что я не понимаю специфику художественного творчества. Высказывались намеки, что мои «придирики» вызваны желанием получить от автора взятку за одобрение материала.

Пришел в эти дни в институт писатель, успевший написать книжку для школьников о замечательном открытии. Он оста-

вил мне рукопись для ознакомления. В книжке рассказывалось, как Черенков в лаборатории изучал поведение жидкостей под воздействием гамма-излучения. Процесс открытия описан был так: «Неожиданно Черенков увидел, как из воды показался синий конец». Я уже много чего научился об открытии, был знаком с немалым числом поэтических вольностей, но «синий конец» поставил меня в тупик. Всякая попытка наглядно представить себе, о чем писал автор, приводила к картинам, не имевшим ничего общего с физикой. Когда мы встретились с автором, я его спросил:

— Что вы имели в виду, когда писали, что Черенков увидел синий конец?

Автор заволновался:

— Где конец? Какой конец? Покажите!

Я ему показал фразу. Он прочитал и с явным облегчением сказал:

— Это машинистка напутала. Не конец, а конус.

Следовательно, по мысли автора, Черенков увидел в воде си-

ний конус. На самом деле Черенков в условиях опыта никакого конуса не видел и не мог видеть. Я об этом сказал писателю. Тот ответил:

— Детям нужны понятные объяснения.

— Но это же неверное объяснение, — пытался я возразить.

— Зато понятное, — отрубил автор.

Что было делать? Как правило, автор, когда я пытался исправить неверное высказывание в его очерке, отказывался вносить предлагаемое исправление:

— Я буду писать так, как считаю нужным, а вы можете писать, как вы хотите. И я зарабатываю, и вы заработаете.

Мой голос был совещательный. Что авторы хотели, то и писали. Душа моя была уязвлена многочисленными искажениями физического смысла.

Прошло несколько дней моей деятельности в качестве секретаря по вопросам печати. Както мне на работу позвонил мой однокурсник по университету Глеб Анфилов. Он стал писателем-фантастом, и я иногда встречал в печати его рассказы.

Глеб предложил мне написать «беседу» об открытии для всесоюзного радиокомитета. Мог бы он и сам написать, ведь у него было высшее образование по физике, но предложил это сделать мне.

— Ты этим занимался, ты хорошо напишешь, — сказал он.

Я сомневался, что смогу, но Глеб меня уговорил. Я не знал, каким требованиям должна удовлетворять «беседа» на радио. Глеб предложил встретиться и вместе пойти в радиокомитет, пообещал познакомить с редактором, который сможет ответить на все мои вопросы. Так и договорились.

В назначенный день мы с Глебом пришли в здание радиокомитета на Пушкинской площади. Глеб познакомил меня с редактором. Если правильно помню, фамилия редактора была Жардинье. Сначала этот человек мне понравился. Он поговорил со мной, расспросил о некоторых подробностях открытия, а потом сказал:

— Если вы напишете все, что сейчас мне рассказали, это будет хорошая «беседа».

Он усадил меня за свободный стол в комнате, где сидели несколько сотрудников, и ушел, пообещав вернуться через полчаса. Глеб Анфилов распрощался со мной и тоже ушел.

Редактор пришел через час. Я уже все написал, сидел и ждал. Сотрудники не обращали на меня никакого внимания. Редактор забрал два исписанных листочка и опять ушел, наверное, понес текст своему начальству. На этот раз он отсутствовал минут десять. Когда он вернулся, по его виду я определил, что статья получила одобрение высокого начальства.

— Вы прирожденный популяризатор, — сказал он с улыбкой. — Статья пойдет, и мы рассчитываем на дальнейшее сотрудничество. Ваша «беседа» будет прочитана по радио тогда (он назвал время). А конец мы сами допишем, это вас пусть не беспокоит.

— Какой конец? — тупо спросил я, не понимая еще всей опасности.

— Конец про Пастернака.

Я не понимал (а мог бы понять), что мало было только похвалить советских физиков и рассказать о значении их открытия. Надо было тут же еще и обругать Пастернака, а также и Нобелевский комитет, который пошел на поводу у поджигателей холодной войны и присудил премию за антисоветский роман, не имеющий никаких литературных достоинств. В газетах и журналах тех дней большинство материалов, посвященных Нобелевской премии по физике за 1958 г., а вернее почти все материалы заканчивались рассуждениями такого рода: присуждение Нобелевской премии советским физикам есть дело вполне справедливое и заслуживающее одобрения, а вот премия «литературному сорняку» Пастернаку за антисоветский роман есть обреченная на заведомый провал диверсия против сил мира и социализма. Осуждая Пастернака, советские люди были единодушны, тем более, что никто из них не читал (и не мог прочесть) роман «Доктор Живаго». Те, у кого при обыске обнаруживали текст, получали три года лагерей. Роман был издан в Советском Союзе только лет через двадцать пять после описываемых событий, и тогда появилась горькая шутка: выпустили, наконец, роман «Доктор Живаго» и тех, кто его читал. Но это произошло много позже. В то время доступа к роману не было.

А у тех, кто его не читал, даже малейших сомнений не могло возникнуть, что «Доктор Живаго» — это злонамеренная антисоветская стряпня, беспомощная в литературном отношении. Логика рассуждений была такая же, как у одного из героев в романе Анатоля Франса «Остров пингвинов»: бездоказательное высказывание не может быть подвергнуто сомнению. Если бы в подтверждение приводились какие-то доказательства, их, при нали-

чии сомнения, можно было бы проверить. А раз доказательств нет, то и сомневаться не в чем.

Вот и я должен был в конце своей «беседы», написанной для радио, осудить Пастернака. В тексте, который я передал редактору, такого осуждения не было. Редакция радиокомитета бралась сама добавить необходимое. Но мне этого очень не хотелось.

— А надо ли смешивать большое научное достижение с грязным политическим скандалом? — спросил я.

— Надо, надо, — сказал редактор в ответ на мои сомнения. — Радио — это пропаганда.

В нашем дальнейшем разговоре я старался его убедить, что Нобелевская премия по физике не имеет никакого отношения к Нобелевской премии по литературе, а в написанной мной «беседе» речь идет о физике и о физиках, и я не хочу вставлять никаких высказываний о литературе вообще и Пастернаке в частности. Редактор отвечал, что и Пастернак, и его роман заслуживают осуждения, весь советский народ его (Пастернака) осуждает и это необходимо вставить в написанную мною «беседу». Он несколько раз повторил: «радио — это пропаганда» и «радио — это политика». Сотрудники, сидевшие в комнате, прекратили разговоры между собой и внимательно слушали наш разговор.

Наконец, я сказал, что если редакция настаивает, чтобы я вставил в «беседу» осуждение Пастернака, то я предпочитаю забрать свою работу.

— Какой вы несговорчивый, — сказал редактор. — Ну, давайте сделаем так: мы прочтем вашу «беседу», потом сделаем пазузу, а потом другим голосом — я подчеркиваю, другим голосом — скажем про Пастернака.

— Голосом Пастернака, — сказал один из сотрудников, ви-дом помоложе.

Редактор не обратил на высказывание никакого внимания. Или сделал вид, что не обратил.

Я же настаивал, что не хочу добавлять никаких высказываний такого рода, ни с паузой, ни без паузы.

— Ладно, — сказал, наконец редактор, — не хотите — не надо. Хозяин — барин.

Он сообщил мне день и час, когда будет передача с моей «беседой», и мы распрощались.

У меня от всей этой истории осталось чувство смутной тревоги, возможного подвоха — не вполне осознанное беспокойство. Несмотря на слова редактора, я все же опасался, что в текст «беседы» будут вставлены слова, осуждающие Пастернака. А я не только не хотел его ругать, я ему сочувствовал. Уж очень беспощадной была травля, развязанная против него в печати и на радио.

В назначенный день и час я заранее сел к репродуктору, чтобы проверить, не изменили ли на радио мой текст. Но оказалось, что в указанное время шла другая передача. Видимо, редактор, сообщая мне день и час, что-то перепутал или в программе произошли изменения. Так я и не услышал своей «беседы».

Через пару дней мне позвонил редактор и спросил, слушали я «свою» передачу и каково мое впечатление. Узнав, что мне не удалось ничего послушать, удивился и обещал, если еще раз будут транслировать эту передачу, сообщить заранее. Больше он мне не звонил.

Оказалось, что, как правило, мало кто из моих знакомых слу-

шал радио, а из тех немногих, кто это делал, не было никого, кто бы прослушал «беседу».

Опросил я человек шесть, и безрезультатно. Седьмой же, когда я к нему обратился, сказал:

— Так, так. По ФИАНу ходит слух, что якобы Болотовский подходит по очереди ко всем сотрудникам и хвастается, что написал «беседу» для радио.

Мои объяснения никак его не разубедили. Пришлось прекратить расспросы.

Надежда на выяснение, как это нередко бывает, пришла со стороны. Милочка, жена моего брата Володи, сказала, что какая-то женщина у нее на работе слушала передачу, где речь шла о Болотовском.

— Там говорилось, что Болотовский получил Нобелевскую премию.

Я Милочке объяснил:

— Это не Болотовский получил Нобелевскую премию, а наши физики. Ты узнай, не говорилось ли в той передаче про Пастернака.

Милочка узнала и на следующий день сообщила:

— В той передаче говорилось про Пастернака.

— Что именно говорилось?

— Пастернак тоже получил Нобелевскую премию.

— Ты узнай, ругали Пастернака или нет.

Милочка продолжила расследование и назавтра доложила:

— В тот день Пастернака столько раз ругали по радио, что она не помнит, ругали его в передаче про физиков или нет.

И эта моя попытка выяснить положение дел окончилась неудачей.

Прошло еще две недели, прежде чем я узнал, наконец, горькую правду. Вернулся из длительной командировки сотрудник нашего института С.Аксенов. Я дружил с ним и его женой З.Чижиковой. Сережа провел около месяца в Горьком. Приходя с работы в гостиницу, он иногда включал в своем номере репродуктор. И вот в один из дней он услышал мою «беседу». Как сказал мне Сережа, в конце «беседы» без всякой паузы и тем же голосом была произнесена стандартная уже к тому времени ругань в адрес Пастернака. Что в точности было сказано, Сережа не помнил, и я этого уже, по всей видимости, никогда не узнаю.

Я очень переживал тогда (и до сих пор переживаю), что дал себя обмануть. Потом думал над тем, есть ли способ, с помощью которого можно было бы этого избежать, возможно, потребовать, чтобы я сам зачитал свой текст. Тогда бы ничего не смогли добавить. Но вовсе не очевидно, что меня допустили бы к микрофону — ни голос мой, ни дикция не были подходящими для радио. В конце концов я пришел к выводу, что не надо мне было с самого начала ввязываться в это дело. Все же прав был редактор. Радио — ни в коем случае не информация. Радио — это политика и пропаганда. Так было в те годы. Так и осталось. ■