

7-83

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P-312

И.М. Франк

ИЗЛУЧЕНИЕ  
ВАВИЛОВА - ЧЕРЕНКОВА

Текст лекции на Всемирной выставке  
в Брюсселе 13 августа 1958 года

Дубна, 1959 год

P-312

И.М. Франк

ИЗЛУЧЕНИЕ  
ВАВИЛОВА - ЧЕРЕНКОВА

Текст лекции на Всемирной выставке  
в Брюсселе 13 августа 1958 года

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## § 1. О свете и веществе

Мне предстоит рассказать здесь о явлении, в котором обнаружилась удивительная связь между тем, что мы зовем обычным видимым светом, привычным нам по тысячам различных явлений, и невидимым миром мельчайших частиц вещества, несущихся с громадными скоростями, — частиц, изучаемых современной ядерной физикой. Явление, о котором я буду говорить, было обнаружено в 1934 году советским физиком П.А.Черенковым и в научной литературе получило название эффекта Черенкова или излучения Черенкова. Важнейшую роль в этом открытии сыграл другой советский физик — С.И.Вавилов, под руководством которого молодой Черенков начинал эти исследования. Правильнее было бы называть это явление эффектом Вавилова-Черенкова. Этого названия, принятого в советской литературе, я и буду придерживаться.

Когда мы говорим о свете, то у каждого из нас прежде всего возникает представление о двух его свойствах — об яркости и цвете. Следует задуматься о том, как много знаний об окружающем нас мире мы черпаем с помощью только этих двух свойств света. Ведь к различным проявлениям этих двух свойств, в основном, сводится все, что мы видим вокруг себя. Однако, понятие цвет — это лишь частное проявление удивительного многообразия различных видов света, которые мы зовем его спектральным составом. За различием длин волн света, определяющих его спектр, в свою очередь скрыто громадное разнообразие его свойств. Ведь на первый взгляд радиоволны ничем не похожи на гамма-лучи, испускаемые радиоактивными веществами. Между тем, и то, и другое свет — в одном случае чрезвычайно большой, а в другом — исключительно малой длины волны. Различие длин волн не является единственной величиной, от которой зависят свойства света. Для свойств света существенна, например, его поляризация, хотя наш глаз и не способен ее различать. Между особенностями испущенного света и веществом существует глубокая связь. Наблюдение света, а тем более его изучение, раскрывает нам многие тайны вещества.

Здесь нет возможности рассматривать сложный и интересный вопрос о природе света. Я хочу отметить только одну особенность, связанную с возможными скоростями движения частиц вещества и скоростью света. Она

стала очевидной в результате созданной Эйнштейном теории относительности, в правильности которой теперь не может быть сомнений.

Мы привыкли, что любое материальное тело, состоящее из атомов и молекул, может двигаться с произвольной скоростью. То же самое относится к любым его составным частям, вплоть до мельчайших, — электронам и ядрам, входящим в состав атомов, а также протонам и нейтронам, из которых построены ядра атомов. Разумеется, скорость движения зависит от условий, в которых находится частица или совокупность частиц и может быть как очень малой, так и очень большой. Известно, однако, что законы природы накладывают на движение частиц вещества одно очень важное ограничение. Даже в пустоте, где их движению ничто не препятствует, их скорость не может достигнуть, а тем более превысить некоторую предельную величину, равную скорости света в пустоте. Эту скорость обычно обозначают буквой  $c$ . Величина ее  $c = 300\,000$  километров в секунду.

То же самое правильно и для частиц, наблюдаемых в космических лучах или получаемых с помощью современных ускорителей, например, для мезонов или частиц, которые даже физики, привыкшие ничему не удивляться, называют странными. Несмотря на то, что энергии таких частиц, наблюдаемых в космических лучах, часто огромны, их скорость всегда на некоторую, хотя и очень малую величину, меньше скорости света в пустоте. В то же время свет в пустоте, я подчеркиваю, именно в пустоте, может распространяться только с этой единственной скоростью, недостижимой для частиц вещества.

## § 2. Люминесценция

Для нас привычно, что свет, взаимодействуя с веществом, может поглощаться, т.е. исчезать, и, наоборот, при некоторых условиях вещество способно излучать свет.

Сейчас мы хорошо знаем, что излучение обычного / т.е. видимого, ультрафиолетового или инфракрасного / света почти всегда вызывается различными процессами, связанными с изменением движения электронов, окружающих ядра атомов.

В различных процессах излучения света веществом, при невысоких его

температурах, большое значение имеет, так называемая, люминесценция. Это явление состоит в том, что атомы или молекулы, получив энергию извне, затем целиком или частично излучают ее в виде света. Существует много видов люминесценции. Дело не только в огромном изобилии различных сортов молекул, каждая из которых испускает характерный для нее спектр люминесценции, но и в многообразии механизмов, с помощью которых молекуле сообщается необходимая для люминесценции энергия. Если источником энергии, вызывающей свечение, является свет, то это фотолюминесценция, если химические процессы, — то хемилюминесценция; при возбуждении свечения потоком электронов — катодолюминесценция и т.д., и т.д. Во всем этом многообразии есть нечто общее. Оно состоит в том, что люминесцирующие частицы, поглотившие энергию, излучают ее в виде света не сразу, а всегда в течение некоторого промежутка времени. Это время может быть очень большим и продолжаться часы и даже дни, но может быть и ничтожно малым — всего сотые и даже тысячные от миллионной доли секунды. Однако, и в этом случае оно вполне измеримо. Существенно, что не может быть люминесценции, не обладающей конечным временем высвечивания, как это впервые отметил советский физик С.И. Вавилов. В открытии явления Вавилова-Черенкова это утверждение сыграло важнейшую роль.

Радиоактивные вещества выделяют энергию, и вполне естественно, что она может служить источником люминесценции, которая так и называется радиолюминесценцией. Это явление известно давно. Еще Пьер и Мария Кюри сразу же после открытия ими радия обнаружили, что полученные радиоактивные препараты светятся в темноте. Радиоактивные вещества при своем распаде выбрасывают быстро движущиеся заряженные частицы и испускают  $\gamma$  — лучи, которые, проходя через вещество, выбивают из атомов электроны, т.е. также заряженные частицы. Все эти частицы, двигаясь в веществе, понемногу отдают свою энергию атомам и молекулам, с которыми они сталкиваются. Естественно, что если эту энергию получают молекулы, способные люминесцировать, то возникает радиолюминесценция.

Радиолюминесценцией теперь широко пользуются для обнаружения быстрых частиц. Для этого используют хорошо люминесцирующие вещества, в которых каждая попадающая в них быстрая частица вызывает вспышку люми-



несценции, а эту световую вспышку измеряют специальным прибором - фотоумножителем, обладающим удивительной чувствительностью к свету. Такие люминесцентные счетчики стали применяться лишь в последние годы, благодаря развитию техники фотоумножителей. До этого времени явление радиолюминесценции не привлекало к себе большого внимания и среди различных видов люминесценции было, пожалуй, одним из наименее изученных.

Тот факт, что в течение почти сорока лет, отделяющих работы Кюри от работ Вавилова и Черенкова, никто даже не заподозрил в свечении, возбуждаемом радиоактивными излучениями, чего-либо, кроме явлений люминесценции, не может вызывать удивления. Отдельные случаи радиолюминесценции были надежно установлены, и наличие очень слабого свечения, наблюдавшегося в других случаях, казалось естественным. Впрочем, оснований для каких-либо сомнений не могло и возникнуть. Дело в том, что до работ Вавилова не было количественных методов определения яркости столь слабых свечений, а тем более методов выяснения их природы.

### § 3. Эффект Вавилова-Черенкова

Впервые именно Вавилов и Черенков в 1934 году установили тот замечательный факт, что во многих случаях основное свечение, вызываемое радиоактивными веществами, как раз не люминесценция. Оказалось, что все без исключения жидкие, а как стало очевидно в дальнейшем, и твердые вещества светятся, если в них попадают быстрые электроны из радиоактивных веществ. Теперь мы знаем, что такое же свечение вызывают и любые другие, достаточно быстро движущиеся, заряженные частицы.

Специальные опыты показали, что у этого излучения отсутствует характерный признак, присущий люминесценции, а именно, - нет конечного времени высвечивания. Это, следовательно, не люминесценция, т.е. не светятся возбужденные молекулы или атомы, а излучает сама движущаяся заряженная частица в результате какого-то взаимодействия со средой.

Вскоре работы Черенкова показали, что это не только новое явление, но и что оно обладает совсем необычными свойствами. В самом деле, одно из самых привычных для нас свойств любого источника света состоит в том,

что он излучает свет во все стороны. Кажется очевидным, что свет от любого пламени или лампы мы увидим независимо от того, с какой стороны мы на него смотрим /если только на пути распространения света не поставлена какая-либо преграда/. Правда, интенсивность света, излучающегося в разные стороны, может быть различна. Например, при фотолюминесценции не все направления равноправны, если свет, возбуждающий люминесценцию, падает на сосуд с люминесцирующей жидкостью с какой-то одной стороны. При этом количество излучаемого в данном направлении света люминесценции, вообще говоря, будет зависеть от угла с направлением первичного пучка света. Однако и здесь во взаимно противоположные стороны всегда излучается равное количество света /разумеется, если свет люминесценции по дороге не поглощается/.

Совсем не так дело обстоит для излучения Вавилова-Черенкова. Прозрачное вещество, например, кусок пластмассы будет светиться, если направить на него пучок быстрых электронов, и это, казалось бы, аналогично люминесценции, например, под действием пучка света. Однако, в данном случае излучающее свет вещество /т.н. радиатор/ будет казаться темным, если смотреть на него с той стороны, откуда падают электроны и будет казаться светящимся, если смотреть навстречу пучку электронов. Особенно наглядно эту особенность можно продемонстрировать, если поместить радиатор между полюсами электромагнита. Магнитное поле, как известно, заставляет движущиеся электроны отклоняться в ту или иную сторону. Поэтому достаточно включить магнитное поле или изменить его направление, как вместе с направлением движения электронов будет поворачиваться и пучок излучаемого света. Яркость возрастает, если электроны отклоняются полем в ту сторону, с которой производится наблюдение, и, наоборот, она станет слабее; если электроны отклоняются от наблюдателя. Построенный П.А. Черенковым прибор, иллюстрирующий эту особенность, демонстрировался на Брюссельской выставке во Дворце науки.

Пожалуй, самая удивительная особенность в этой направленности излучения состоит в том, что свет излучается не прямо в направлении движения частицы, а под некоторым, вполне определенным, острым углом к ее траектории. Точнее говоря, свет распространяется в направлении образующих конуса,

осью которого является направление движения частицы.

На рис.1 представлена схема опыта, с помощью которого может быть обнаружен и измерен конус излучения Вавилова-Черенкова. Тонкий параллельный пучок  $B$  моноэнергетических частиц большой энергии пронизывает прозрачный радиатор  $R$ , сделанный из пластмассы. В радиаторе возникает излучение, идущее под некоторым углом  $\theta$  к пучку частиц. Излучение выходит из радиатора и на фотопластинке  $F$  получается круг. Измерив радиус круга и зная геометрию опыта, легко определить угол  $\theta$ . При этом надо принять во внимание, что при переходе света из радиатора в воздух происходит преломление света, увеличивающее угол  $\theta$  в соответствующее число раз. На рис.2 представлена фотография, полученная в результате такого опыта. На ней отчетливо видно колечко, создаваемое радиацией Вавилова-Черенкова. Источником излучения служили протоны с энергией 860 Мэв от синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Фотография получена советским физиком В.П.Зреловым и потребовала экспозиции всего несколько минут. Белый круг в центральной части снимка - это паразитный эффект, вызванный попаданием на пластинку пучка рассеянных протонов. Такой опыт стал возможен лишь в результате удивительного прогресса техники получения быстрых частиц, достигнутого теперь физикой.

#### § 4. Природа явления

С такой удивительной направленностью излучения, как в эффекте Вавилова-Черенкова, мы встречаемся в оптике видимого света впервые. Однако, если говорить не о волнах света, а вообще о распространении волн, то это явление вполне обычно, и каждому из нас приходилось его наблюдать неоднократно.

В самом деле, каждому привычны волны на воде, которые расходятся от носа корабля или лодки и которые нетрудно получить, если вести по поверхности воды концом палки. Линии волн, начинаясь от носа движущегося корабля, тянутся в стороны и назад. Направление распространения этих волн перпендикулярно их фронту, т.е. направлено вперед под острым углом к направлению движения корабля. Если смотреть с корабля



на воду, то эта линия волн кажется неподвижной, т.е. она перемещается вперед вместе с кораблем. Одновременно с этим волны, несомненно, движутся и в стороны. Действительно, когда корабль идет вдоль берега, то на берег все время обрушиваются новые и новые участки волн. Таким образом, волны действительно движутся вперед и вбок, т.е. под острым углом к движению корабля.

Это легко пояснить с помощью рисунка 3. Пусть движение началось в точке А. Волны будут распространяться под острым углом  $\theta$  с некоторой скоростью  $u$ . Когда источник волн дойдет до точки В, то фронт волн, линия которого перпендикулярна направлению их распространения, займет положение  $BF'$  с левой стороны от корабля и  $BF''$  с правой. Когда корабль дойдет до точки С, волны займут положение  $cg$  и  $cg'$ . Таким образом, картина волн будет, как целое, перемещаться вместе с кораблем. Единственное изменение, которое будет происходить, состоит в том, что по мере движения гряда волн с каждой стороны корабля будет становиться все длиннее. Нетрудно определить величину угла  $\theta$ . В самом деле, направление распространения волн  $AF$  и фронт волн  $BF$  являются катетами прямоугольного треугольника, гипотенуза которого  $AB$  совпадает с направлением движения корабля. При этом длина катета  $AF$  пропорциональна скорости волн  $u$ , а гипотенузы  $AB$  — скорости движения источника волн, которую обозначим  $v$ . Следовательно, их отношение есть косинус угла  $\theta$ , под которым уходят волны, или

$$\cos \theta = \frac{u}{v}.$$

Хотя мне не хотелось бы заниматься рассмотрением формул, но я все же должен обратить внимание на это, казалось бы, весьма элементарное соотношение. В самом деле, говоря о волнах на воде, мы не сомневаемся в том, что они в самом деле должны возникать. Однако, написанная формула говорит, что это вовсе не так уж обязательно. Действительно, косинус угла обязательно меньше единицы или, в крайнем случае, равен единице. Таким образом, мы неявно сделали предположение, что скорость источника волн  $v$  больше, чем скорость волн  $u$ . Если  $v$  уменьшается, то уменьшается и угол  $\theta$ , а при  $v$  равном  $u$ , угол  $\theta$  равен нулю. Это критическая скорость, при которой волны перестают уходить вбок.

Они движутся вместе с излучателем. При меньших скоростях формула теряет смысл и можно показать, что появление волн становится невозможным.

Мы приходим, таким образом, к выводу, что существует порог в излучении волн при  $v = c$ . Этот вывод, на первый взгляд, кажется странным, так как волны на воде мы наблюдаем как будто бы во всех случаях. В действительности, однако, противоречие здесь кажущееся. Дело в том, что скорость волн на воде не есть строго постоянная величина, она зависит от многих факторов и во всех случаях очень невелика. Поэтому практически всегда возможно появление волн на воде.

Однако, если мы перейдем к рассмотрению волн в воздухе, то существование пороговой скорости проявится вполне отчетливо. Скорость волн в воздухе — это скорость звука. Когда скорость самолета достигает скорости звука, то сопротивление воздуха резко возрастает. Самолетостроители называют это сопротивление звуковым барьером. Этот звуковой барьер есть ничто иное, как порог скорости, при котором сам самолет, а не только его реактивные двигатели, становится источником звуковых волн. На создание этих волн затрачивается энергия и именно поэтому сопротивление его движению резко возрастает. Сверхзвуковой самолет действительно вызывает при полете сильнейший грохот, напоминающий взрыв.

Эти волны, возникающие при движении со скоростью, большей скорости звука, были известны давно. Хорошо известен, например, конус волн, расходящихся от летящего снаряда. Часто их называют волнами Маха — по имени ученого, впервые получившего их фотографии. Отметим, что мы все время говорим о волнах, возникающих при равномерном и прямолинейном движении в однородной среде. Если одно из этих условий нарушено, то возникновение волн возможно, конечно, при любой скорости.

Мы начали рассмотрение с волн на воде и перешли к звуковым волнам в воздухе. Если мы перейдем к рассмотрению световых волн, то получим то, что называют эффектом Вавилова-Черенкова. Возможность такого перехода кажется, однако, противоречащей тому, что говорилось в начале лекции.

Общеизвестно, что излучение света происходит при неравномерном дви-

жении электрического заряда, например, при колебательном движении или при его торможении. Столь же очевидным казалось, что при равномерном и прямолинейном движении свет излучаться не должен.

Этот вопрос имеет довольно длинную историю. О существовании волн Маха было известно еще до того, как возникла теория относительности. Исходя из аналогии с этими волнами, знаменитый английский физик лорд Кельвин в 1901 году утверждал, что атом, движущийся равномерно, но со скоростью, большей чем скорость световых волн, должен излучать свет. Несколькоми годами позже, независимо от Кельвина, другой известный физик — Зоммерфельд пришел к тому же выводу. Позже теория относительности доказала, что скорость, большая скорости света в пустоте, недостижима и предсказания Кельвина и Зоммерфельда были забыты. О них вспомнили лишь тогда, когда эффект Вавилова-Черенкова был не только обнаружен, но исследован и объяснен.

Правильность теории относительности, разумеется, неоспорима, и именно ею необходимо пользоваться при изучении свойств частиц очень больших энергий, которые составляют предмет современной ядерной физики. Однако, такие частицы обладают свойствами, которые трудно было учесть в то время, когда появились работы Кельвина и Зоммерфельда. Энергия частиц может быть настолько велика, что они способны проходить заметный, а иногда и очень большой путь в толще плотного вещества. Хотя их скорость всегда меньше величины  $c$ , т.е. скорости света в пустоте, однако в этом случае существенна не  $c$ , а скорость света в том веществе, в котором движется частица. Свет здесь не может распространяться свободно. От атома к атому свет движется, конечно, с той же скоростью, что и в пустоте, но на своем пути он взаимодействует с атомами и молекулами. Они, в свою очередь, испускают световые волны. Результат такого последовательного испускания и поглощения волн состоит в том, что суммарная волна движется в веществе со скоростью /физики называют ее фазовой скоростью/ иной, чем в пустоте. Эта скорость в  $n$  раз меньше, где  $n$  то, что называется показателем преломления. Иными словами, фазовая скорость волн в среде есть  $\frac{c}{n}$ . Для плотных прозрачных веществ, таких, например, как стекло или плексиглас, показатель преломления заметно больше единицы. В т.н. тяжелых

стеклах скорость света примерно вдвое меньше, чем в пустоте. Что касается быстрых электронов, испускаемых радиоактивными веществами или выбиваемых в веществе  $\gamma$ -лучами, то в большинстве случаев они имеют начальную скорость, отличающуюся от скорости света в пустоте на одну десятую и менее. Таким образом, их скорость превышает скорость распространения световых волн в плотном веществе и значит такие частицы должны излучать световые волны. Это и есть излучение Вавилова-Черенкова. Оно, следовательно, аналогично звуку, порождаемому самолетом, летящим со сверхзвуковой скоростью, или волнам на воде, создаваемым движущимся кораблем. В неожиданном виде здесь осуществляется то, что, казалось бы, совершенно невозможно, и даже как будто бы, на первый взгляд, противоречит законам природы.

#### § 5. Излучение Вавилова-Черенкова и свойства быстрых частиц

Интенсивность излучения Вавилова-Черенкова очень слаба. Было нелегко его обнаружить и еще труднее изучить. В распоряжении физика вначале был только один прибор, пригодный для количественных измерений, правда замечательный по своему совершенству, — это человеческий глаз. После адаптации к темноте, т.е. после пребывания в течение некоторого времени в темноте, человеческий глаз приобретает удивительную чувствительность. Он позволяет видеть и измерять излучение Вавилова-Черенкова от сравнительно небольшого числа быстрых электронов. Визуально, и с помощью фотографий, которые в то время требовали многочасовых экспозиций, Черенкову удалось детально исследовать природу явления. Предложенное Таммом и автором этой лекции объяснение явления, как излучения, возникающего при сверхсветовой скорости движения, не только оказалось правильным, но и подтвердилось во всех деталях.

Ряд лет эффект Черенкова представлялся оптическим явлением, интересным только с принципиальной точки зрения. Однако, несколько лет тому назад положение резко изменилось. Это связано с удивительным прогрессом экспериментальной техники. Был создан новый прибор, по чувствительности и скорости восприятия значительно превосходящий человеческий глаз. Это —

фотоумножитель, о котором уже упоминалось в связи с люминесцентными счетчиками. Фотоумножитель способен регистрировать не только свет люминесценции. Когда частица, имеющая очень большую скорость, попадает в прозрачную, нелюминесцирующую среду, то возникает вспышка излучения Вавилова-Черенкова, которую также может регистрировать фотоумножитель. Эта вспышка способна рассказать о частице, ее создавшей, очень многое. Прибор, предназначенный для регистрации вспышек излучения Вавилова-Черенкова, называют черенковским счетчиком.

Из сказанного очевидно, что такие счетчики пригодны специально для изучения частиц большой энергии. Но именно быстрые частицы стоят сейчас в центре внимания ядерной физики, и по этой причине эффект Вавилова-Черенкова приобрел теперь столь большое значение.

Прежде чем переходить к рассмотрению конкретных вопросов, вернемся к соотношению, определяющему направление распространения волн, о котором уже говорилось. Оно, естественно, является общим для любых волн и, в частности, для излучения Вавилова-Черенкова. Следует только подставить в него величину скорости волн. Для световых волн эта скорость равна  $\frac{c}{n}$  и, следовательно, для эффекта Вавилова-Черенкова имеем

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}.$$

Если в среде, показатель преломления которой  $n$  известен, измерить угол, под которым испускается свет по отношению к скорости движения, то, тем самым, будет найдена скорость  $v$ . Это очень точный способ измерения скорости, и в физике быстрых частиц его в сильной степени не хватало.

Черенковские счетчики позволяют также определить направление, в котором летит частица. В самом деле, пусть к веществу, в котором возникает свет, т.е. к радиатору, фотоумножитель приставлен с какой-то одной стороны. Тогда свет будет зарегистрирован только когда частица летит в сторону фотоумножителя. При обратном направлении движения частицы свет в фотоумножитель не попадет в силу удивительной направленности излучения Вавилова-Черенкова. На Брюссельской выставке во Дворце науки демонстрировался черенковский счетчик, как раз иллюстрирующий эту особенность. Он регистрирует частицы космических лучей, которые, как известно, в основном, идут сверху вниз. Поэтому, когда радиатор расположен над фотоумножителем, он считает

частицы. Если прибор перевернуть вверх ногами, то счет почти прекращается.

Быть может это покажется странным, но такая возможность определения направления движения очень существенна. Немногие методы пригодны для этого. Это не всегда возможно даже с помощью такого замечательного прибора, как камера Вильсона, в которой непосредственно виден и фотографируется путь пролетевшей частицы.

Действительно, в камере Вильсона сама летящая частица не видна, а виден только след, который остается на ее пути после того, как она пролетела. Но пролетела ли частица по этой траектории, например, справа налево или слева направо, остается неизвестным, если только на своем пути она не затормозилась заметным образом, что обычно видно по характеру следа, или не столкнулась с другой частицей. Между тем, в некоторых случаях очень существенно знать направление, в котором двигалась частица. В самом деле, обычно мы отличаем частицы с различным знаком электрического заряда по их отклонению в магнитном поле. Однако, положительная частица отклоняется в магнитном поле совершенно так же, как отклонилась бы отрицательно заряженная частица, но движущаяся в противоположном направлении. Для того, чтобы определить знак заряда, необходимо знать направление движения.

Черенковские счетчики позволяют также определить и величину массы летящей частицы. В самом деле, отклонение частицы в магнитном поле обратно пропорционально ее импульсу, т.е. произведению массы на скорость. Черенковские счетчики позволяют измерить скорость и тем самым становится известной и масса ее. При этом нет необходимости обязательно измерять угол, под которым происходит излучение. Излучаемая частицей энергия возрастает с увеличением угла излучения /она пропорциональна квадрату синуса угла  $\theta$  /. Поэтому о скорости можно судить прямо по яркости вспышки.

Возможность определения скорости, массы и знака заряда частиц с помощью черенковских счетчиков особенно ценна при поисках новых частиц, когда надо найти искомую частицу среди огромного числа других, получаемых с помощью современных ускорителей.

Имеет значение и тот факт, что частицу, попадающую в черенковский



счетчик, можно зарегистрировать практически мгновенно. Ведь в отличие от люминесцентных счетчиков здесь отсутствует время высвечивания. О том, насколько все это существенно, можно судить по тому, что черенковские счетчики были использованы для одного из интереснейших открытий последнего времени — открытия антипротона.

Эта удивительная частица, давно предсказанная теоретически, является как бы двойником протона, но обладает не положительными электрическим зарядом и магнитным моментом, а отрицательными. Так же, как протон вместе с электроном образует атом водорода, антипротон, вместе с положительным электроном — позитроном, мог бы образовать атом, совершенно подобный атому водорода по физическим и химическим свойствам.

До последнего времени не удавалось наблюдать антипротон. Для того, чтобы такая частица могла возникнуть, необходима энергия, равная нескольким миллиардам электронвольт. При этом, антипротон не может существовать длительно. Сталкиваясь с протоном, он должен превращаться в другие частицы. Только после того, как американскими учеными был построен ускоритель, дающий протоны с энергией свыше 6 миллиардов электронвольт, можно было надеяться найти антипротон, и он действительно был обнаружен. При этом черенковские счетчики сослужили чрезвычайно важную службу.

Однако, исследования на ускорителях — это далеко не единственное применение, которое нашло излучение Вавилова-Черенкова при исследовании быстрых частиц. Немаловажное значение оно имеет и при изучении космических лучей.

Чем больше скорость частицы приближается к скорости света в пустоте, тем меньше может отличаться показатель преломления  $n$  данной среды от единицы, для того чтобы излучение Вавилова-Черенкова могло возникнуть. Скорость распространения световых волн в воздухе, равная  $\frac{c}{n}$ , всего на 3 десяти тысячных меньше, чем скорость света в пустоте. Однако, энергия значительной части частиц космических лучей столь велика, что их скорость отличается от скорости света в пустоте на еще меньшую величину. Даже в воздухе космическая частица обгоняет световые волны и, значит, порождает радиацию Вавилова-Черенкова. Свет этот очень слаб и распро-

страняется практически в том же направлении, в каком летит частица /в этом случае угол  $\theta$  очень близок к нулю/.

Эти особенности открывают новые возможности исследования космических лучей. В самом деле, частицы космических лучей, несущие громадную энергию, приходят в атмосферу земли из мирового пространства. Они сталкиваются с ядрами атомов воздуха и создают вторичные частицы. Возникают т.н. ливни космических частиц, иногда состоящие из громадного числа частиц. Энергия падающей частицы распределяется при этом между многими частицами и в ряде случаев они не доходят до поверхности земли или доходит их небольшая часть. Как же узнать о том, что случилось высоко в атмосфере? Оказывается это можно увидеть, в буквальном смысле этого слова, оставаясь на земле. В самом деле, космическая частица могла поглотиться, но излученный ею свет пойдет дальше и достигнет земли в том месте, к которому летела частица. Невооруженным глазом увидеть этот свет, разумеется, нельзя. Однако, если направить на небо параболическое зеркало, а в фокусе его поместить фотоумножитель, то можно регистрировать вспышки света от ливней космических лучей, возникающих высоко в атмосфере. По яркости вспышки можно судить о числе частиц в ливне, а, следовательно, и о том, что произошло высоко в атмосфере.

На рис. 4 видны параболические зеркала для наблюдения возникающего в атмосфере излучения Вавилова-Черенкова от космических лучей. Опыты проводились на высокогорной станции Академии наук СССР, расположенной в горах Памира /высота около 4000 м над уровнем моря/.

Не во всех случаях необходимо наблюдать частицы космических лучей издалека. Мы уже говорили, в связи с возможностью определения движения частиц, о черенковском счетчике, регистрирующем частицы космических лучей. Отметим одну его особенность. Скорость космических частиц очень близка к скорости света, которой соответствует максимально возможный угол излучения. Поэтому угол излучения  $\theta$  практически одинаков для всех космических частиц. Одинакова и зависящая от угла излучения яркость вспышки. Следовательно, такой счетчик не может различать между собой различные т.н. элементарные заряженные частицы, встречающиеся в космических лучах, например, протоны, мезоны, электроны, позитроны и другие частицы. Все они

дадут одинаковую вспышку, величина которой пропорциональна пути космической частицы в радиаторе. Даже этот, казалось бы, недостаток оказывается в некоторых отношениях полезным. В Физическом институте Академии наук СССР, в Москве, построен радиатор громадных размеров. Это бак высотой 7 метров, заполненный водой и имеющий хорошо отражающие свет стенки. Свет, возникающий в баке, регистрирует множество фотоумножителей, размещенных на его поверхности.

На рис.5 виден большой водяной бак, служащий радиатором черенковского счетчика. Фотография сделана во время монтажа этой установки в Физическом институте АН СССР.

Такой бак - это как бы в тысячу раз сжатая земная атмосфера. Если в этот бак приходит пучок космических частиц, то яркость вспышки определится числом частиц и длиной их пробега в воде до остановки. Иными словами, яркость вспышки измерит суммарную энергию этих частиц, что почти невозможно сделать другими способами.

Используют эффект Вавилова-Черенкова и для изучения космических лучей вне земной атмосферы. Так, черенковский счетчик установлен на третьем советском искусственном спутнике Земли и его показания передаются по радио. Модель третьего спутника с черенковским счетчиком, установленным на нем, демонстрировалась в павильоне Советского Союза на Брюссельской выставке.

Он предназначен для решения очень интересной задачи. В небольшом радиаторе этого счетчика, через который космические частицы свободно пролетают, яркость вспышки не должна зависеть от природы частиц. Однако, это правильно только для так называемых элементарных заряженных частиц, заряд которых по абсолютной величине одинаков. Но если в радиатор попадает частица, имеющая больший электрический заряд, например, ядро атома, вспышка будет ярче. Теория показывает, что она пропорциональна квадрату электрического заряда.

Известно, что среди частиц космических лучей, приходящих из мирового пространства, имеются не только протоны, но, в небольшом числе, и более тяжелые ядра. Превосходные фотографии траекторий таких частиц, полученные

профессором Оккиалини, демонстрировались во Дворце науки на Брюссельской выставке. О количестве этих частиц и их природе пока еще известно недостаточно. Черенковский счетчик на искусственном спутнике Земли специально регистрирует вспышки повышенной яркости, создаваемые попадающими в него атомными ядрами. Число вспышек определит поток ядер и величина вспышки - их заряд.

Я привел здесь несколько примеров того, каким образом это удивительное излучение позволяет проникать в невидимый мир микроскопических частиц огромных энергий.

Научились ли мы видеть все, что возможно, и все ли мы знаем о самом явлении? Было бы опрометчиво утверждать, что это так. Мы говорили здесь о яркости, угле излучения, пороговой скорости и о том, как, используя эти свойства, можно судить об излучающих свет заряженных частицах. У этого излучения есть и еще одно важное свойство - поляризация излучения, которая пока еще не используется в исследованиях. Кроме того, все, что говорилось, относилось к заряженным частицам. Однако, возможный круг явлений здесь значительно шире. Приведем несколько примеров.

Физики давно задумывались о том, почему в природе мы встречаем только электрические заряды и не встречаем свободных магнитных зарядов. Можно думать, что они вообще не могут существовать, но быть может мы просто пока не научились их наблюдать. Теория говорит, что летящий магнитный заряд, подобно электрическому, также будет создавать радиацию Вавилова-Черенкова. Однако, именно различие в поляризации света позволит с достоверностью отличить излучение магнитного заряда, если он существует, от электрического.

Мы говорили об излучении отдельных частиц, но можно поставить вопрос об излучении движущейся системы, состоящей из многих частиц. Что бы ни двигалось со сверхсветовой скоростью, излучение всегда должно возникать. Можно предвидеть, что будет обладать удивительными свойствами излучение летящего со сверхсветовой скоростью атома, а также группы заряженных частиц /т.н. сгустка частиц/.

Мы говорили до сих пор о движении частиц в обычных т.н. изотропных средах. Свообразные особенности приобретает эффект Вавилова-Черенкова в кристаллах, а также в том удивительном газе, который физики называют электронной плазмой. По оптическим свойствам электронная плазма, помещенная в магнитном поле, в какой-то мере аналогична кристаллу и эффект Вавилова-Черенкова в ней возможен.

Всё это-различные проявления оптики сверхсветовых скоростей и, в сущности, мы и сейчас еще стоим только на пороге ее изучения. Это совсем особая область. Мы видели, что в пустоте движение со скоростью, большей скорости света, невозможно. В среде оно оказывается осуществимым, но природа не полностью снимает свой запрет. При таком движении всегда затрачивается энергия на излучение, т.е. возникает сила, тормозящая движение и, значит, противодействующая ему.

Отметим, что этот эффект может быть обратимым. Если заставить двигаться среду мимо частицы, то она заставит частицу ускориться. Расчеты показывают, что основанные на этом т.н. когерентные методы ускорения частиц, в принципе, возможны.

Я упомянул здесь лишь о немногих вопросах, над которыми работают сейчас физики. Было бы ошибкой думать, что круг исследований, связанных с эффектом Вавилова-Черенкова, завершен.

Рукопись получена издательским отделом  
26 февраля 1959 года.

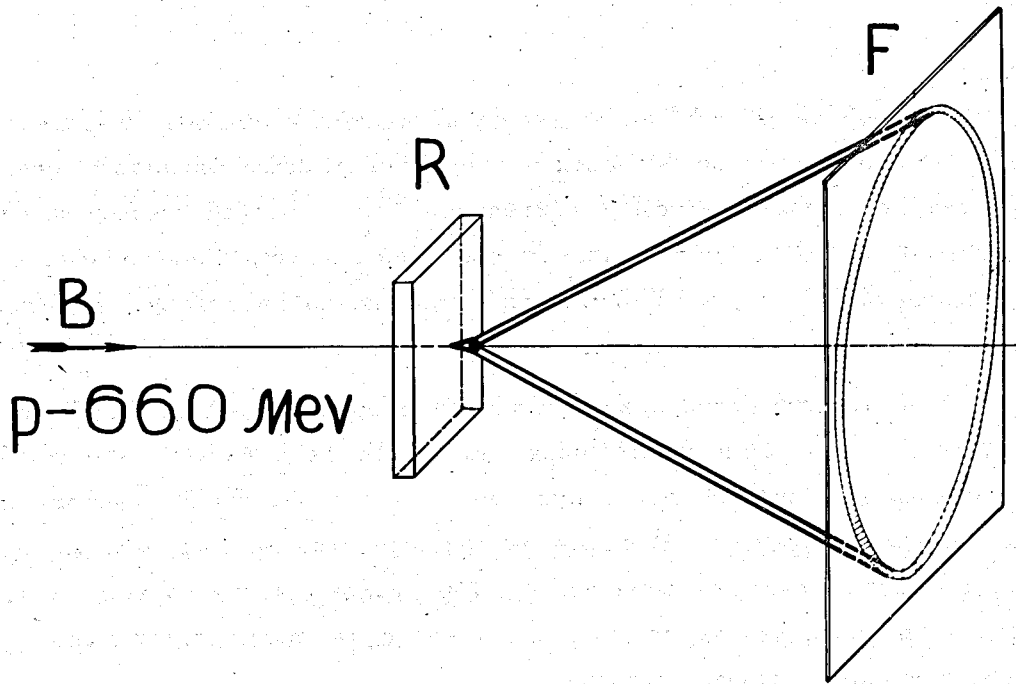


Рис. 1.

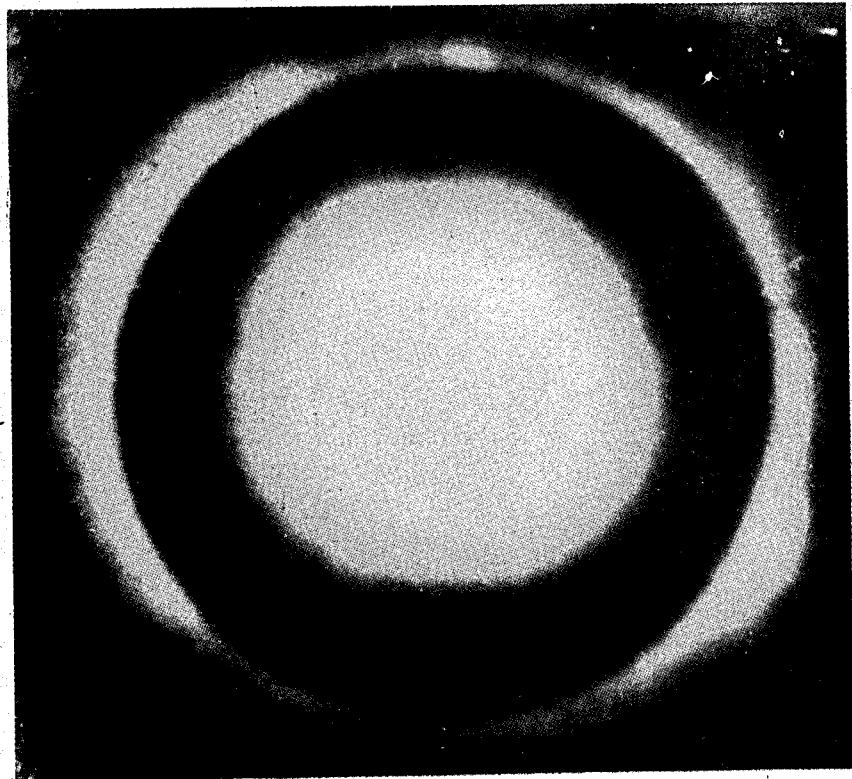


Рис. 2.



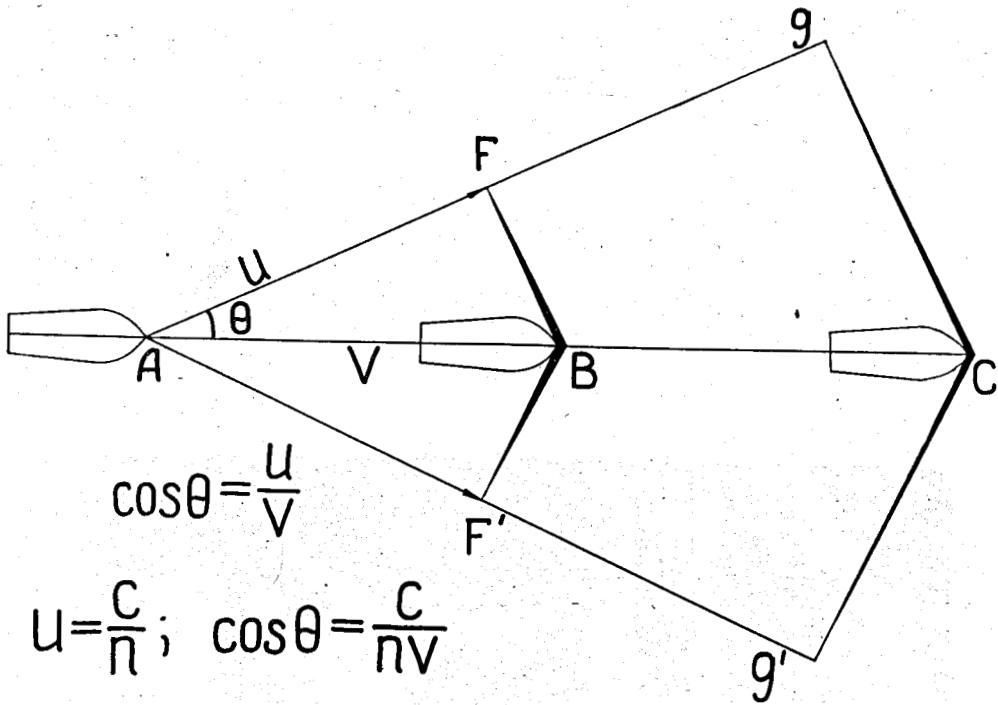


Рис. 3.



Рис. 4.

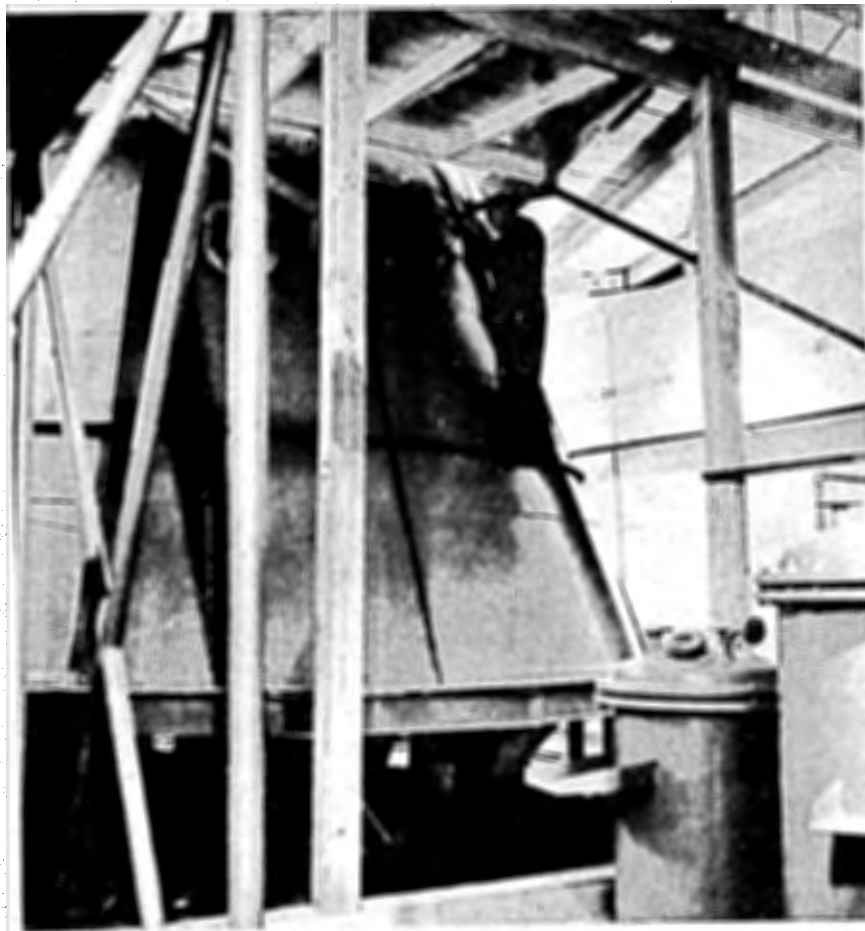


Рис. 5.