

Беседы по актуальным проблемам науки

Ученые выступают
в Центральном лектории
Всесоюзного общества
„Знание“

Физика 1964 года

ФИЗИКА 1964 года

В беседе участвуют:

доктор физико-математических наук

Л. В. Келдыш,

кандидат физико-математических наук

И. Д. Новиков,

доктор физико-математических наук профессор

Я. А. Смородинский,

доктор физико-математических наук профессор

В. А. Фабрикант

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1965

К ЧИТАТЕЛЯМ

Сборник «Физика 1964 года» составлен из выступлений ученых-физиков на очередном вечере цикла «Беседы по актуальным проблемам науки», состоявшемся 11 февраля 1965 года в Центральной лектории Всесоюзного общества «Знание». В беседах приняли участие доктор физико-математических наук Л. В. Келдыш, кандидат физико-математических наук И. Д. Новиков, доктор физико-математических наук профессор Я. А. Смородинский, доктор физико-математических наук профессор В. А. Фабрикант. Все стенограммы выступлений исправлены и дополнены авторами.

Содержание

	Стр.
Л. В. Келдыш. Сверхпроводимость в неметаллических системах	3
И. Д. Новиков. Как умирают звезды	11
Я. А. Смородинский. Новое в физике элементарных частиц	18
Еще раз о несохранении четности	18
Магические числа 35 и 56	22
Кварки и антикварки	23
В. А. Фабрикант. Новые применения лазеров	24

Составитель А. Г. Чернов
Редактор И. Б. Файнбойм
Худож. редактор Е. Е. Соколов
Техн. редактор М. Т. Перегудова
Корректор Г. П. Ефименко
Обложка А. Г. Ординарцева

Сдано в набор 27.VII 1965 г. Подписано к печати 31.VIII 1965 г. Изд. № 81.
Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,95.
А 01383. Цена 6 коп. Тираж 48 700 экз. Заказ 2521.
Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Л. В. Келдыш,
доктор физико-математических наук

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В последние годы снова резко повысился интерес к явлению сверхпроводимости. В значительной мере это объясняется тем, что после построения в 1957 году микроскопической теории сверхпроводимости Бардиным, Купером и Шриффером (БКШ), Боголюбовым, Горьковым и другими, появилась возможность, по крайней мере принципиальная, направленного поиска сверхпроводников с теми или иными заданными свойствами.

До самого последнего времени сверхпроводимость наблюдалась только в металлах и при очень низких температурах — не выше 20°K . Кроме того, сверхпроводящее состояние разрушается обычно уже относительно слабым магнитным полем (порядка 10^3 — 10^4 гаусс), и поэтому токи, пропускаемые через такой сверхпроводник, также не могут быть велики. Все эти обстоятельства существенно ограничивают возможности использования сверхпроводимости, и естественно поэтому, что одним из центральных вопросов теории сверхпроводимости в настоящее время является вопрос о том, можно ли надеяться получить такое вещество, в котором сверхпроводящее состояние существовало бы при значительно более высоких температурах и магнитных полях.

Основной результат БКШ-теории состоит в том, что в системе Ферми-частиц, находящейся при достаточно низкой температуре, любое сколь угодно малое притяжение между частицами приводит к кардинальной перестройке состояния. Частицы (в дальнейшем мы имеем в виду электроны) слипаются в пары, причем таким образом, что все пары находятся в одном и том же состоянии — имеют одинаковый суммарный импульс. В равновесном состоянии, т. е. в отсутствии тока, импульсы всех пар равны нулю. Следовательно, слипаются электроны с одинаковыми по величине, но противоположно направленными импульсами. Иными словами, электронные пары, обладающие свойствами Бозе-частиц, образуют Бозе-конденсат, который ведет себя, как заряженная сверхтекучая жидкость. Существенно при этом, что спаривание является коллективным эффектом — связанное состояние двух электронов возникает только в том случае, когда большое число дру-

гих пар находится в этом же состоянии и энергия связи каждой пары растет с числом пар в этом состоянии. Поэтому всякое изменение импульса пары, связанное с ее удалением из конденсата, должно сопровождаться ее разрывом и требует, следовательно, значительной затраты энергии. Это последнее обстоятельство и приводит к устойчивости сверхпроводящего тока.

Энергия связи Δ в каждой паре при нулевой температуре, когда спарены все электроны вблизи поверхности Ферми, определяется шириной той области энергий электронов, в которой эффективно притягивающее взаимодействие ϵ_0 , плотностью электронных состояний на интервал энергий вблизи поверхности Ферми N и средним значением энергии притяжения двух электронов V :

$$\Delta_0 = \epsilon_0 e - \frac{1}{NV}, \quad (1)$$

С ростом температуры T тепловое движение разрывает часть пар, так что число их в конденсате уменьшается, а вместе с тем уменьшается и $\Delta(T)$ — энергия связи в каждой паре. При некоторой критической температуре T_c по порядку величины, близкой к $\frac{\Delta_0}{k}$ (k — постоянная Больцмана), $\Delta(T_c)$ об-

ращается в ноль, т. е. сверхпроводящее состояние исчезает.

Энергия связи Δ определяет и то критическое значение магнитного поля H_c , в котором разрушается сверхпроводящее состояние. Дело в том, что в присутствии магнитного поля в сверхпроводнике возникает сверхпроводящий ток, магнитное поле которого полностью компенсирует в объеме сверхпроводника внешнее магнитное поле. Этот эффект выталкивания магнитного поля из сверхпроводника, так называемый эффект Мейснера, является одной из наиболее характерных черт явления сверхпроводимости. Энергия компенсирующего магнит-

ного поля на единицу объема сверхпроводника равна $\frac{H^2}{8\pi}$, где

H — напряженность внешнего поля.

Очевидно, что в достаточно сильном поле, когда эта энергия станет больше, чем связанное со спариванием уменьшение энергии при переходе от нормального состояния к сверхпроводящему, существование сверхпроводящей фазы будет термодинамически невыгодным и произойдет его разрушение. Энергия, выделяющаяся при образовании одной пары, равна 2Δ , а участвуют в образовании пар главным образом электроны в узкой области энергий вблизи поверхности Ферми шириной порядка Δ . Число таких электронов порядка $N\Delta$, а полное уменьшение энергии при переходе к сверхпроводящему со-

стоянию порядка $N\Delta^2$. Приравнивая эту энергию энергии критического магнитного поля $\frac{H_c^2 c}{8\pi}$, получим

$$H_c \sim \sqrt{N\Delta}.$$

Плотность состояний вблизи поверхности Ферми N вряд ли может быть в каких-либо веществах много большей, чем в типичных сверхпроводящих металлах. Поэтому повышение критического поля H_c может быть достигнуто в веществах с большой энергией связи Δ , т. е. с высокой критической температурой, если такие вещества могут быть найдены.

Однако проблема увеличения критического магнитного поля, до которого может существовать сверхпроводимость, получила несколько неожиданное решение в 1961 году, когда было обнаружено, что некоторые сплавы (Nb_3Sn , $NbZr$) остаются сверхпроводящими в полях вплоть до 100 гаусс. Явление это было предсказано А. А. Абрикосовым на основе полуфеноменологической теории сверхпроводимости, предложенной В. Л. Гинзбургом и Л. Д. Ландау. Показано, что в некоторых сплавах при полях больших H_c может возникать так называемое смешанное состояние, характеризующееся тем, что магнитное поле проникает в сверхпроводник в виде тонких нитей, пронизывающих образец. Между этими нитями вещество остается сверхпроводящим, и, естественно, достаточно, чтобы хоть небольшая доля объема образца была сверхпроводящей, для того чтобы сопротивление всего образца равнялось нулю. С другой стороны, термодинамическая невыгодность сверхпроводящего состояния резко уменьшается в этой ситуации, так как магнитное поле выталкивается из сверхпроводника лишь частично.

В настоящее время получены сплавы, сохраняющие сверхпроводящие свойства в полях, близких к 200 гаусс. Это открытие имело крайне важное значение для использования явления сверхпроводимости в физических исследованиях и в технике, в частности в технике получения сильных магнитных полей. Магниты, основанные на сверхпроводящих соленоидах, уже сейчас получили широкое распространение.

Перспективы дальнейшего использования сверхпроводников в технике, кажется, были бы почти безграничны, если бы не то печальное обстоятельство, что во всех известных на сегодняшний день случаях сверхпроводящее состояние осуществляется только при очень низких, а потому труднодоступных температурах. Поэтому вопрос о будущем сверхпроводимости связан в первую очередь с проблемой повышения критических температур, если это вообще возможно.

Величина критической температуры T_c , связанная с энергией образования пары Δ , определяется в основном, как вид-

но из формулы (1), тем притягивающим взаимодействием V , которое приводит к спариванию электронов. В металлах это притяжение, согласно идее Фрелиха, возникает вследствие взаимодействия электронов с колебаниями кристаллической решетки — фононами. Обмен фононами между двумя электронами приводит к притяжению их друг к другу. Это взаимодействие эффективно для электронов с энергиями в узкой области вблизи поверхности Ферми шириной $\epsilon_0 \sim kT_d$, где T_d — так называемая дебаевская температура, равная по порядку величины максимальной энергии фононов. Само электрон-фононное взаимодействие в металлах является обычно довольно слабым, т. е. $NV \ll 1$, и имеются теоретические указания на то, что сильным оно не может быть принципиально: при сильном взаимодействии кристаллическая решетка становится неустойчивой, т. е. перестраивается в какую-то другую модификацию. Учитывая, что дебаевские температуры для типичных металлов невелики — порядка $100\text{—}200^\circ\text{K}$, мы видим из формулы (1), что критические температуры в таких условиях должны быть очень малы — много меньше 100°K , что и наблюдается в действительности. Поэтому возникает вопрос, не может ли сверхпроводимость возникать за счет какого-то другого, более сильного взаимодействия, и не следует ли искать такую возможность в других веществах, не относящихся к классу обычных и хорошо исследованных металлов, или в металлах, но при необычных условиях.

За последние годы в этом направлении появился ряд теоретических работ, среди которых наибольший интерес возбудила работа Литтла о возможности сверхпроводящего состояния в длинных органических молекулах. Притяжение между электронами, предложенное в этой работе, имеет кулоновскую природу и поэтому связано с энергиями порядка 1 электроновольта, что соответствует температурам порядка тысяч градусов, на два порядка превышающим энергии, характерные для взаимодействия, связанного с фононами.

Схематически модель, рассматриваемая Литтлом, состоит из длинной одномерной цепочки атомов, вдоль которой свободно перемещаются электроны, т. е. имеется металлическая проводимость, и боковых отростков. Относительно последних предполагается, что они являются сильно поляризующимися. С квантовомеханической точки зрения это означает, что у молекул, образующих боковые отростки, имеется по крайней мере один низкий возбужденный уровень (с энергией возбуждения $1\text{—}2$ электроновольта, обладающий большим дипольным моментом).

В такой модели свободный электрон центральной цепочки, двигаясь вблизи одного из боковых отростков, поляризует его, так что на ближнем конце отростка наводится значительный положительный заряд. Этот заряд притягивает к себе другие

электроны центральной цепочки, в результате чего возникает эффективное притяжение этих электронов к тому, который вызвал первоначальную поляризацию отростка. По оценкам Литтла, это притяжение может оказаться больше прямого кулоновского отталкивания, действующего между электронами в центральной цепочке, так что результирующее суммарное взаимодействие между ними будет иметь характер притяжения со средней энергией взаимодействия $V \approx 1,5-2$ электронвольта.

Рассматривая далее полученную таким образом систему с помощью методов теории БКШ, автор приходит к выводу, что в ней должно возникнуть сверхпроводящее состояние, причем роль ϵ_0 в формуле (1) эффективной области энергий, в которой действует спаривающее взаимодействие, играет энергия возбуждения того уровня молекулы — бокового отростка, который обладает большим дипольным моментом. Энергия эта, как указано выше, считается порядка 2 электронвольта, что приводит к критической температуре сверхпроводящего перехода, близкой к 2000°K .

Этот результат, если он справедлив, представляет феноменальный интерес, и поэтому не удивительно, что работа Литтла привлекла всеобщее внимание. Не говоря уже о возможных технических применениях, наличие в органических молекулах сверхпроводящего состояния с его своеобразной высокой степенью упорядоченности могло бы, как указывает автор, иметь кардинальное значение для ряда биологических процессов.

Работа Литтла вызвала, однако, ряд возражений как принципиального характера, так и относящихся к убедительности сделанных выводов. Исходная модель сама по себе представляется разумной, так как металлическая проводимость в некоторых органических молекулах, по-видимому, действительно существует, а примеры молекул, которые, обладая большой поляризуемостью, могли бы играть роль боковых отростков, непосредственно указаны в статье.

Более того, интересным дополнительным результатом этой статьи является утверждение о том, что переход в сверхпроводящее состояние может произойти даже в том случае, когда молекула в исходном состоянии не обладает металлической проводимостью при условии, что энергия образования пары Δ превышает первоначальную энергию связи электронов в центральной цепочке.

Основное возражение связано, однако, с тем, что результат Литтла противоречит известной теореме о том, что в одномерной системе невозможен фазовый переход в упорядоченное состояние. С физической точки зрения, это связано с тем обстоятельством, что в одномерной цепочке атомов каждый атом связан с другими только через своих ближайших сосе-

дей. Поэтому случайное достаточно большое флуктуационное смещение в одной точке сразу приводит к нарушению корреляции между атомами, находящимися справа и слева от этой точки. В двух- и трехмерном случае это, очевидно, не так, поскольку корреляционная связь между двумя данными атомами, отстоящими далеко друг от друга, осуществляется не только через атомы, лежащие на прямой, соединяющей два данных атома, но и через очень большое количество других атомов, лежащих в стороне от этого кратчайшего пути. Поэтому для полного нарушения корреляции между двумя отдаленными атомами потребовалась бы существенная флуктуация на целой плоскости между двумя этими атомами, что крайне маловероятно. Формально это обстоятельство выражается в том, что флуктуации в одномерной системе оказываются настолько большими, что разрушают упорядоченное состояние.

Строго говоря, это рассуждение не относится непосредственно к модели Литтла, так как оно основано на предположении о короткодействующем характере сил, связывающих только ближних соседей. Однако широко распространено мнение, что результат этот имеет более общий характер и фазовые переходы в упорядоченную фазу в одномерной цепочке вообще невозможны.

Феррел рассмотрел этот вопрос специально в применении к модели Литтла. Он показал, что колебания электронной плотности, которые имеются и в трехмерном сверхпроводнике, но играют там малую роль, в одномерном случае приводят к разрушению сверхпроводящего состояния уже при сколь угодно низких температурах. Иными словами, уже нулевые колебания электронной плотности полностью нарушают упорядоченность электронов, характеризующую сверхпроводящее состояние. Этот результат, правда, также не является абсолютно убедительным, так как характер спектра и даже само существование колебаний электронной плотности модели Литтла не установлены достаточно надежно.

Кроме того, как указали авторы работы, выводы Феррела относятся лишь к бесконечной линейной цепочке, а к макромолекуле, состоящей из большого, но конечного числа звеньев, колебания электронной плотности могут привести лишь к существенному понижению критической температуры. Предполагая, что центральная цепочка в модели Литтла состоит из 10^5 атомов, они получили, что колебания электронной плотности приблизительно на порядок уменьшают энергию связи пар.

В связи с вопросом о возможности сверхпроводящего перехода в одномерной системе представляет интерес также результат Латтиндтера, рассмотревшего некоторый очень схематический пример одномерной системы электронов, сильно

отличающейся от модели, использованной Литтлом. Он показал, что рассмотрение такой системы методами теории БКШ приводит к выводу о существовании в ней сверхпроводимости. В то же время эта модель допускает точное решение, показывающее, что основное состояние системы не является сверхпроводящим.

Возражения другого рода связаны с недостаточно правильным рассмотрением в работе Литтла самого поляризационного взаимодействия между электронами, играющего в этой теории основную роль. Проведенные Литтлом оценки основаны на теории возмущений, в то же время энергия взаимодействия электрона с поляризованным боковым отростком оказывается значительно больше энергии возбуждения того уровня, который связан с возникновением дипольного момента. Совершенно ясно, что это обстоятельство должно привести к значительному смещению этих уровней и кардинальной перестройке бокового отростка, а может быть, и всей молекулы в целом.

Поэтому вычисления Литтла показывают, что предлагаемая им модель молекулы, по-видимому, неустойчива и должна спонтанно перестраиваться в какое-то другое состояние. При этом совершенно очевидно, что это новое состояние будет сверхпроводящим, а не диэлектрическим.

Исходя из несколько иной точки зрения, можно сказать, что притяжение, используемое Литтлом, является результатом того факта, что его модель приводит к возникновению отрицательной диэлектрической проницаемости. Устойчивость такой системы, в которой одноименные заряды (не только электроны в центральной цепи) притягиваются друг к другу, требует тщательного рассмотрения.

Таким образом, результаты работы Литтла нельзя, по-видимому, считать доказанными сколько-нибудь надежно. Однако идеи, положенные в ее основу, и вопросы, возникающие при ее анализе, представляют исключительный интерес. В этом и состоит, наверное, основная ценность этой работы. В частности, не исключена возможность образования сверхпроводимости за счет сильного кулоновского притяжения в системах неоднородных, но обладающих отрицательной диэлектрической проницаемостью. А системы, в которых диэлектрическая проницаемость отрицательна хотя бы в какой-то области частот, заведомо и широко распространены, а также могут быть приготовлены искусственно. Интересная возможность возникновения дополнительного притяжения между электронами была указана Вонсовским и Свирским.

Основное возражение против возможности существования сверхпроводимости в модели Литтла, как указано выше, связано с одномерностью этой модели. Поэтому особый интерес приобретает предложенная несколько ранее Гинзбургом и

Киржницей поверхностная сверхпроводимость, т. е. сверхпроводимость по поверхности твердого тела. Дело в том, что на поверхности кристалла, как было показано впервые Таммом, могут возникать дополнительные электронные состояния, быстро затухающие в глубь кристалла. Электроны, находящиеся на таких уровнях, могут, однако, перемещаться вдоль поверхности. Гинзбург и Киржниц показали, что при наличии притяжения между электронами в такой системе может возникнуть и сверхпроводящее состояние. Формально в такой двухмерной модели флуктуации также оказываются бесконечными. Однако расходимость их очень слабая — логарифмическая, и поэтому для любого тела конечных размеров она совершенно несущественна.

Интересно, что сверхпроводимость на поверхностных уровнях могла бы существовать в принципе и в том случае, когда по своим объемным свойствам вещество является диэлектриком.

Взаимодействие электронов в этом случае также может быть весьма специфичным. Оно, например, может возникать из-за взаимодействия электронов с рэлеевскими поверхностными волнами.

Гинзбургом было указано также, что для усиления притяжения между электронами можно использовать механизм Литтла, вводя в кристалл сильно поляризующиеся примесные атомы, что и в этой модели может привести к резкому увеличению критической температуры.

Многочисленные возможности представляет также исследование сверхпроводимости в полупроводниках, где в очень широких пределах могут варьировать концентрации электронов, а также характер их взаимодействия с фононами и друг с другом.

В отличие от предыдущих случаев, рассмотренных выше и предсказанных пока чисто теоретически, сверхпроводимость в ряде полупроводников уже обнаружена экспериментально. Теоретически она впервые была рассмотрена Гуревичем, Ларкиным и Фирсовым и затем Козном.

Первые экспериментальные результаты были получены на соединении GeTe и на титанате стронция SrTiO_3 . Последний случай представляет особый интерес, и мы остановимся на нем несколько подробнее. Дело в том, что титанат стронция во многом подобен титанату бария — типичному сегнетоэлектрику. Хотя в самом титанате стронция сегнетоэлектрический переход и не происходит, но он очень близок к такому переходу. Диэлектрическая проницаемость его при низких температурах достигает огромных значений ($\sim 10^3$ — 10^4). Поэтому кулоновское отталкивание электронов друг от друга — основной фактор, препятствующий появлению сверхпроводимости, — в этом веществе практически отсутствует.

С микроскопической точки зрения, сегнетоэлектрический переход, по современным представлениям, возникает в силу того, что частота одного из так называемых оптических колебаний решетки стремится к нулю. Это означает, что к нулю стремится квазиупругая сила, препятствующая соответствующему типу деформации, и решетка кристалла становится неустойчивой, т. е. перестраивается.

Но с другой стороны, из теории дисперсии электромагнитных волн в кристаллах известно, что частоты оптических колебаний соответствуют линиям поглощения в кристаллах, а некоторая область частот, больших этой характерной частоты, является областью аномальной дисперсии, т. е. диэлектрическая проницаемость в ней отрицательна. Поэтому если эта область частот вносит существенный вклад во взаимодействие между электронами, то взаимодействие это будет притягивающим.

По существу такой механизм притяжения аналогичен тому, который рассматривает Литтл, но в его модели отрицательная диэлектрическая постоянная обусловлена электронной поляризуемостью, а здесь — поляризуемостью ионной решетки. Существенно поэтому, что в титанате стронция при низкой температуре одна из частот оптических колебаний оказывается очень низкой, т. е. низко лежит область аномальной дисперсии. Может быть, именно этим объясняется то обстоятельство, что, по сообщению авторов, сверхпроводимость в SrTiO_3 появляется уже при очень малых концентрациях электронов $\sim 10^{17}$.

В заключение подчеркнем еще раз, что достигнутое в настоящее время понимание природы явления сверхпроводимости позволило значительно расширить круг тех веществ, в которых это явление может существовать, и породило надежду на то, что могут быть получены сверхпроводники, существенно отличающиеся по своим свойствам от обычных металлов. Число таких возможностей, как мы видели, очень велико и трудно представить себе, что все они окажутся бесплодными. Однако основной вопрос о том, может ли быть получен сверхпроводник с достаточно высокой критической температурой (хотя бы порядка 100°K), пока еще остается открытым.

И. Д. Новиков,
кандидат физико-математических наук

КАК УМИРАЮТ ЗВЕЗДЫ

В разных областях физики время от времени ученые обнаруживают то, что, по их убеждению, существовать никак не может, и наоборот: того, что они предсказывают теоретически и рассчитывают увидеть, на самом деле не находят. Когда

да подобное случается в физике элементарных частиц, это кажется естественным, ибо здесь чрезвычайно малы объекты и наглядные представления невозможны. Но когда речь идет о космических масштабах, ситуация резко меняется. Вот такой конфликт происходит сейчас в астрономии. Астрономы не находят в космосе тех объектов, которые, по их предположению, должны обязательно существовать. И они видят реальные объекты, которые существовать, по их убеждению, никак не могут. Все это подчиняется общим принципам развития, эволюции, которые вторгаются все более глубоко в астрономическую науку.

В прошлом и начале нашего века в астрономии господствовала идея стационарности. Астрономы изучали во Вселенной такие стационарные объекты, как солнечная система, долго существующая и почти не изменяющаяся в течение огромного времени.

Сейчас в космосе изучаются процессы очень быстрые, протекающие иногда на глазах одного человека, одного поколения. Речь идет в первую очередь о тех процессах, которые особенно активно изучались в прошлом году. Я должен предпослать этому краткое изложение истории вопроса.

Двигающей силой конфликта в астрономии является проблема конечной судьбы звезды. Астрономы много знают о равновесной стадии эволюции звезды. Звезды типа Солнца — это газовый шар, который находится в гидродинамическом равновесии; она не расширяется, не сжимается. Сила взаимного тяготения частиц уравновешена силой внутреннего давления газа.

Кроме того, внутри звезд при высокой температуре протекают ядерные реакции. Энергия, выделяемая в этих реакциях, просачивается сквозь вещества наружу и излучается с поверхности звезды.

В Солнце вблизи центра температуры достигают порядка 13 миллионов градусов, плотность недр Солнца — несколько десятков граммов в кубическом сантиметре. Изучен химический состав Солнца, известно, как будет происходить его эволюция и как протекает эволюция других звезд. Теорию медленной эволюции звезд, заключающейся в выгорании ядерного горючего, мы знаем хорошо. Следствия этой теории подтверждаются астрономическими наблюдениями.

Основываясь на этих фактах, можно быть уверенным, что наши сведения о поведении веществ в недрах звезд правильны. Мы правильно представляем себе, что происходит при температуре Солнца, звезд, поэтому все выводы теории о дальнейшей судьбе звезды представляются вполне надежными. К чему они ведут?

Время медленной эволюции Солнца, т. е. исчерпания запасов ядерной энергии, составляет примерно 10^{10} лет.

Половину своей жизни Солнце уже прожило, половину еще предстоит прожить. Что же будет после окончания ядерного периода эволюции? Казалось бы, тут думать нечего. Звезда остынет, когда исчерпаются источники энергии, и превратится в твердый темный холодный шар, типа большой планеты. Но в действительности это не так. Масса Солнца очень велика. Поэтому при охлаждении сила тяготения сожмет вещество до такой плотности, что электронные оболочки атомов окажутся раздавленными. Электроны не будут принадлежать отдельным атомным ядрам. Если звезда все более охлаждается, то давление электронного газа не стремится к нулю, а остается вполне определенным, конечным. Это связано с тем, что электрон подчиняется принципу Паули: два электрона в одинаковом состоянии находиться не могут. Поэтому, когда электроны с одинаковыми импульсами подходят друг к другу, они не могут оставаться близко и будут отталкиваться. При достаточно низкой температуре много электронов обладают одинаковыми импульсами. Это вызывает появление сильного отталкивания — упругости электронного газа. Такое состояние называется вырожденным.

Качественно упругость холодного вырожденного газа была предсказана в 1928 году Я. И. Френкелем.

Упругость холодного электронного газа и будет поддерживать звезду. Звезда, например Солнце, сожмется до плотности около 10^{+8} — 10^{+9} грамм в кубическом сантиметре. Средняя плотность Солнца сейчас составляет 1 грамм в кубическом сантиметре. Дальнейшее сжатие прекратится, так как давление вырожденных электронов уравнивает силу тяготения и звезда будет находиться в равновесии. Такие звезды известны. Их называют белыми карликами, так как они белого цвета. Белые карлики закончили свою ядерную эволюцию. Но такая смерть может постигать только звезды, масса которых не очень велика, не более 1,2 массы Солнца. Если масса будет большей, то сила тяготения при сжатии такого шара в процессе остывания становится настолько большой, что звезда превращается не в белый карлик, а сожмется до гораздо большей плотности. Если масса звезды заключена в интервале от 1,2 массы Солнца примерно до двух масс Солнца, то она превращается в так называемую нейтронную звезду. Вещество сжимается до плотности около 10^{+14} граммов в кубическом сантиметре, т. е. до плотности атомного ядра. Такие звезды были предсказаны в тридцатых годах академиком Л. Д. Ландау.

Размеры звезды станут совсем небольшие — около 10 километров. Это — крошка-звезда. Естественно, что когда в такой звезде поле тяготения станет очень велико (гравитационный потенциал порядка 0,2 квадрата скорости света), начнут проявляться эффекты общей теории относительности. В этом

случае нужно учитывать все факты, связанные с теорией тяготения Эйнштейна.

Если же масса звезды будет больше, чем две массы Солнца, то никакое равновесное состояние после охлаждения невозможно, звезда будет неограниченно сжиматься. Никакая сила давления, даже упругость газа, при ядерной плотности не в состоянии воспрепятствовать сжатию. Причины этого заключаются в изменении закона тяготения. По закону Ньютона, сила тяготения прямо пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Только когда расстояние стремится к нулю, сила стремится к бесконечности. По теории Эйнштейна, сила на поверхности стационарного тела стремится к бесконечности, когда размеры стремятся не к нулю, а к так называемому гравитационному радиусу, равному $2G—M/c^2$.

Сила тяготения нарастает гораздо быстрее при больших потенциалах, чем по закону Ньютона. Поэтому звезда будет неограниченно сжиматься и ничто ее остановить не может.

В сильном поле тяготения меняются свойства пространства и времени. Для внешнего наблюдателя время на сжимающейся звезде все замедляет свой темп, и при стремлении размеров звезды к гравитационному радиусу все процессы на ней как бы застывают. Замедление времени проявляется, хотя и слабо, уже в полях тяготения обычных звезд, и астрономические наблюдения подтверждают это. Из-за замедления течения времени сжатие звезды останавливается для внешнего наблюдателя при размерах $R=2G—M/c^2$, и внешний наблюдатель никогда не увидит того, что происходит при плотностях вещества больше, тех, которые соответствуют этому размеру. Картина сжатия на этом останавливается, застывает.

Такие звезды, коллапсирующие, находящиеся в существенно нестационарном состоянии, но для внешнего наблюдателя представляющиеся застывшими, удобно называть застывшими звездами. Это — третий тип конца звездной эволюции. Вопросы теории релятивистского сжатия разрабатываются в лаборатории академика Я. Б. Зельдовича.

Астрономы наблюдают белые карлики, но не видят ни нейтронных, ни застывших звезд. Тот факт, что до сих пор из умирающих звезд найдены только белые карлики и не найдены конечные состояния, соответствующие звездам большой массы, а также отсутствие равновесного конечного состояния для большой массы — заставляло думать, что звезда как-то избавляется от излишка массы и все же превращается в белого карлика. Но наблюдения показали, что так вряд ли может быть.

Выяснилось, что если бы каждая звезда в конце своей жизни превращалась в белого карлика, то белых карликов было бы зарегистрировано гораздо больше. Избавляясь пу-

тем взрыва от излишка массы, звезда, например, в 10 масс Солнца должна обязательно сбросить 9 масс Солнца газа, и только 10% первоначальной массы останется и превратится в белый карлик. Подобный баланс кажется странным. Кроме того, такие взрывы должны быть наблюдаемы, их можно отождествить со вспышками сверхновых звезд.

Известно, что в нашей Галактике вспыхивает в среднем только одна сверхновая звезда в 300 лет. Расчеты показывают, что ежегодно в Галактике кончают свою жизнь несколько звезд достаточно большой массы. И если бы все они вспыхивали как сверхновые, то астрономы видели бы несколько взрывов в год. Таким образом, имеется явное несогласие. Следовательно, звезды не обязательно избавляются от излишка массы, и поэтому могут превращаться в нейтронные или застывшие звезды. Тем не менее астрономы их не наблюдают. Весь драматизм положения заключается в том, что не наблюдают звезды наиболее важные для проверки общей теории относительности! Правда, наблюдать такие звезды (если они вообще есть) очень трудно.

Нейтронные звезды чрезвычайно малы и сильно разогреты. В момент образования их температура на поверхности достигает 10 миллионов градусов. Поверхность Солнца имеет температуру всего 6 тысяч градусов. При температуре 10 миллионов градусов звезды будут излучать главным образом рентгеновские лучи с длиной волны около нескольких ангстрем. Чтобы найти нейтронные звезды, надо использовать приемники рентгеновских лучей. Но рентгеновские лучи наблюдать на поверхности Земли невозможно, атмосфера поглощает такое излучение. Поэтому соответствующие приборы надо выносить за пределы атмосферы.

Рентгеновские источники действительно были обнаружены за последние годы, и это вселило некоторую надежду на то, что наконец найдены нейтронные звезды, давно предсказанные астрономами. Эти эксперименты проводились в США на ракетах, посылаемых за пределы атмосферы.

И вот в прошлом году был сделан очень интересный опыт, который поставил под сомнение гипотезу существования в Галактике нейтронных звезд. Эксперимент осуществила в США группа Фридмана. Он заключался в том, что один из источников рентгеновских лучей был измерен особенно тщательно (его угловой размер).

Если это звезда, то с большого расстояния она должна представляться точкой, т. е. источник рентгеновских лучей должен быть точечный. Один из рентгеновских источников совпадает с известной Крабовидной туманностью, которая возникла в 1054 году, когда вспыхнула сверхновая звезда в нашей Галактике.

Измерения Фридмана заключались в том, что он исполь-

зовал одно интересное явление. Луна, оказывается, может время от времени проходить по небу так, что заслоняет собой Крабовидную туманность. Непосредственно измерить угловые размеры рентгеновского источника с достаточной точностью современная аппаратура не позволяет. Но наблюдая покрытие Луной этого источника, можно определить: сразу ли исчезает рентгеновское излучение или постепенно, а затем вычислить размеры рентгеновского источника. Идея этого опыта была предложена профессором И. С. Шкловским.

Измерения показали, что размеры источника составляют $1/5$ туманности. Расстояние до туманности и ее размеры известны. Поперечник ее около $1/10$ парсека, что составляет 3 тысячи миллиардов километров. Источник занимает $1/5$ туманности, т. е. имеет размер 600 миллиардов километров, или примерно три световые недели. Напомню, что размеры нашей солнечной системы составляют всего несколько световых часов, а расстояние от Земли до Солнца — 8 световых минут.

Размеры источника говорят, что это не нейтронная звезда, и, таким образом, вся концепция отождествления рентгеновских источников с нейтронными звездами оказалась поколебленной.

Совсем недавно И. С. Шкловский показал, что Крабовидная туманность, возможно, является досадным исключением, что только этот источник имеет такие протяженные размеры, другие источники могут быть действительно нейтронными звездами.

Так это или не так, мы не знаем, и наблюдения самого ближайшего будущего должны окончательно ответить на вопрос: наблюдаем мы нейтронные звезды или нет? Сейчас рентгеновских источников известно около десятка.

Нейтронные звезды имеют на поверхности температуру 10 миллионов градусов, но они быстро остывают. Это свечение длится 100 лет, а затем источник ослабевает и звезда становится невидимой. Невидимы и застывшие звезды, которые, как уже отмечалось, своим гравитационным полем не выпускают излучения.

Как же можно пытаться наблюдать эти объекты? Оказывается, по полю тяготения. И нейтронные и застывшие звезды притягивают к себе другие небесные тела так же, как и нормальные звезды.

Если мы наблюдаем какую-либо звездную систему, скажем, шаровое звездное скопление или далекую галактику, то изучая движение звезд в периферийных частях галактики, мы можем определить массу всей звездной системы. В самом деле, когда тело движется по круговой орбите под действием тяготения, то центростремительное ускорение должно совпадать с гравитационным ускорением, т. е.:

$$\frac{v^2}{R} = \frac{GM}{R^2}.$$

Если по измерению лучевых скоростей известны размеры R системы и скорость звезд v , то можно определить массу этого объекта. Сюда будут входить массы видимых звезд, невидимых звезд, газа, пыли, иными словами все, в том числе такие виды материи, как нейтрино, гравитационные волны и т. д.

Кроме того, можно оценить количество видимых звезд и вычислить их массу, определить массу видимого газа, видимой пыли. Вычитая теперь из полной массы массу видимых составляющих, мы получим массу невидимого компонента, главную часть которого составляют невидимые звезды.

Существуют и другие методы, но пока ни одним из них воспользоваться нельзя, так как они не дают еще достаточной точности. Вот что можно сказать об объектах, которых пока не нашли в космосе.

Существуют объекты в некотором смысле прямо противоположные. Мы их видим, но не знаем, что это такое. Речь идет о знаменитых сверхзвездах, о которых много говорилось в популярной печати, и поэтому я скажу о них коротко.

Известно, что астрономы в последние годы открыли точечные источники радиоизлучения, которые совпадают с точечными оптическими объектами. Это сверхъяркие образования во Вселенной, в десятки раз ярче галактик, но они имеют маленькие размеры — около световой недели и находятся далеко от нас: самая далекая из известных сверхзвезд отстоит от Земли на расстоянии 5 миллиардов световых лет. Масса этих объектов, вероятно, около 10^8 масс Солнца.

Что это такое? Казалось бы, это гигантская звезда большой массы. Однако доказано, что таких звезд быть не может. Дело в том, что большая звезда может удерживать свою большую массу только потому, что она очень нагрета. Главную роль в давлении, поддерживающем массу газа и препятствующем сжатию, играет свет. А это ведет к тому, что такие звезды находятся на границе устойчивости. Им достаточно немного остыть, и тяготение сожмет звезду. Ядерные реакции в недрах такой звезды идти не могут потому, что в центре температура все же недостаточно велика.

Наблюдения взрывов в ядрах некоторых галактик указывают, что там протекают явно нестационарные взрывные процессы, на что особенно обращает внимание В. А. Амбарцумян. Возникает мысль, что сверхзвезды — это также взрывы, бурно развивающиеся на наших глазах процессы, природу которых мы пока не понимаем.

Все эти процессы важны потому, что могут осуществляться в самых необычных условиях. Например, физики мечтают на Земле о магнитных полях в сотни тысяч гаусс, а у сверх-

звезд они могут быть 10^{10} гаусс. Таким образом, эти исследования важны не только с точки зрения астрономии, но они представляют большой интерес и для физиков, решающих земные проблемы.

Итак, астрономы видят объекты, природы которых понять пока не могут. Они также не знают наверняка, чем кончается эволюция звезды. Может быть, две загадки можно объединить в одну? Возможно, что обе эти проблемы связаны.

Наиболее вероятно, что последней стадией эволюции остывающей звезды является катастрофическое сжатие с возможными взрывами. Сверхзвезды же — это, вероятнее всего, также проявления гигантского взрыва. Над всеми этими проблемами работают сейчас астрофизики.

Я. А. Смородинский,
доктор физико-математических наук, профессор

НОВОЕ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В физике элементарных частиц в 1964 году произошло много событий. Этот год был полон новостей. О многих из них мы узнали в августе в Дубне, где состоялась XII международная конференция по физике элементарных частиц, на которой раз в два года подводят итоги прошедших событий и обсуждают результаты и планы экспериментальных и теоретических работ во всем мире.

Еще раз о несохранении четности

Наиболее сенсационным событием года было открытие явления несохранения четности¹. Многие, наверное, скажут, что это уже было один раз открыто.

Действительно, несколько лет назад (в 1956 году) неожиданно обнаружили, что считавшийся очевидным факт об отсутствии в неорганической природе разницы между правым и левым оказался неверным.

Начнем с простого примера. Во всех учебниках электротехники рассказано, что для того чтобы определить направление магнитного поля в соленоиде, или для того чтобы выяснить, какова сила, которая действует на движущийся заряд или ток в магнитном поле, надо произвести определенные манипуляции с правой или левой рукой и тогда определенный

¹ По причинам, которые здесь трудно объяснить, говорят о несохранении Т-четности или временной четности. Однако это не имеет никакого отношения к необратимости термодинамических процессов, как это иногда думают!

для каждого правила палец будет показывать либо на силу, либо на ток. В учебниках даны правила, которые предписывают, как именно надо вертеть руками. Возникает, естественно, вопрос, откуда вообще в электротехнику попадают человеческие руки, винты и штопоры; почему вообще магнитное поле должно быть как-то связано с асимметрией тела человека. Ясно, что ответ может быть только тот, что у магнитного поля вообще нет направления, а что направление вводится просто для удобства, а правила в действительности работают только потому, что безразлично, какой рукой пользоваться — правой или левой, лишь бы пользоваться одной и той же рукой на протяжении всей книги.

Это, казалось бы, не слишком остроумное рассуждение, в действительности содержало глубокие физические причины. Утверждалось, что никакими способами нельзя определить направление магнитного поля, что магнитное поле не имеет направления и его направление придумано только для нашего удобства. Так считали все и, как оказалось, без достаточных к тому оснований.

Как сейчас уже всем известно, существует физическое явление, которое позволяет определить направление магнитного поля без помощи рук. Это физическое явление, например, проявляется при наблюдении радиоактивного распада вещества. Явление было открыто при опыте с радиоактивным изотопом кобальта, помещенным в сильное магнитное поле. Электроны, вылетающие из кобальта при его распаде, летят преимущественно в направлении, обратном направлению магнитного поля, которое до сих пор выбиралось лишь условно. Магнитное поле оказалось величиной, направление которой можно измерить с помощью чисто физического, а не биологического эксперимента. Это было открытием право-левой асимметрии в неорганическом мире, так как в органическом мире такая асимметрия, напротив, крайне резко выражена и представляет собой одно из наиболее интересных свойств любого живого организма.

Признав несимметрию мира, физики все же не могли совсем отказаться от своих предубеждений; было высказано предположение, что мир обладает все же симметрией, но несколько более скрытой.

В рассуждении с магнитным полем, о котором только что говорилось, т. е. в опыте с кобальтом, распадающимся в магнитном поле, естественно предполагалось, что имеется кобальт, состоящий из протонов, нейтронов и электронов, и именно с таким кобальтом происходят описанные события. То, что в конце участвуют электроны, а не позитроны, протоны, а не антипротоны, связано с реальными условиями нашего мира.

При этом, однако, добавляли, что если бы заменить нейт-

роны на антинейтроны, протоны на антипротоны, электроны на позитроны, то направление вылета позитрона было бы обратным, так что в антимире направление магнитного поля определилось бы обратным образом. В таком зарядово-зеркальном мире мы, пользуясь правилами учебника электротехники, должны были поменять правую и левую руки. В результате немного изменяется понятие о симметрии: вместо симметрии право-левой вводится связь право-левой симметрии и симметрии между миром и антимиром.

Казалось очевидным, что свойства природы таковы, что природа может отличать правое от левого, только связывая эти различия со знаком заряда. Если заменить право на лево, а заряд минус на заряд плюс, то должны наблюдаться такие же эффекты, как в исходном мире; это значит, что могут быть в принципе два абсолютно тождественных мира, в которых будут одинаковые правила физики, только электроны будут называться позитронами, а правое будет левым. Существующая симметрия мира была названа Ландау комбинированной симметрией; так ее называют и сейчас.

Этот факт, установленный лет восемь назад, казался безусловным. И тем не менее все оказалось не так. Природа не захотела удовлетвориться простой схемой, которую ей навязывали. Обнаружить отклонение от этого правила оказалось не легко. Лишь в 1964 году в августе два человека — Кронин и Фити сообщили о следующем эффекте, который они неожиданно для всех наблюдали.

Существует в природе так называемый нейтральный ка-ноль-мезон. Нейтральные ка-мезоны, у которых есть партнеры анти-ка-ноль-мезоны, обладают необычными свойствами.

Когда пучок таких мезонов выпускают наружу из ускорителя в вакуум, то обнаруживается, что мезон делится на два пучка частиц: их называют ка-ноль один и ка-ноль два. Один из них K^0_1 будет распадаться быстро со временем 10^{-10} секунд на два пи-мезона.

Поэтому, если мы будем находиться около самого ускорителя, то будем наблюдать именно такой распад.

Но если мы отойдем немного от ускорителя, то в пучке останутся только долгоживущие мезоны, которые получили название K^0_2 . Эти мезоны живут 10^{-8} секунд и распадаются на три пи-мезона.

Обе частицы K^0_1 и K^0_2 ведут себя по-разному: если мы от мира перейдем к антимиру и если комбинированная симметрия существует, то в вакууме K^0_1 не может превратиться в K^0_2 , а K^0_2 не может превратиться в K^0_1 . Это значит, что вдали от ускорителя нельзя обнаружить распадов на два пи-мезона.

Все считали, что существует в природе строгая симметрия, которая не разрешает одной частице K^0_2 распадаться на три пиона, а другой K^0_1 распадаться на два пиона.

Это казалось настолько естественным (в который раз!), что в течение многих лет никто серьезно не пытался проверить это утверждение. Лишь в прошлом году такой опыт был сделан, и оказалось, что примерно с вероятностью 0,2% в пучке частиц K^0_2 наблюдаются распады на два пиона. Этому сначала не хотели поверить даже сами авторы. Они очень долго повторяли опыты, но результат не менялся. А затем, уже в нескольких лабораториях мира, опыты повторены, и стало ясно, что распад частиц на два пиона, считавшийся запрещенным, происходит. Происходит он, однако, с очень малой вероятностью. Мы столкнулись со странным положением: с одной стороны, процесс, который считался абсолютно запрещенным, на самом деле происходит, но, с другой стороны, он происходит очень редко; природа словно подшутила над нами, выдав нам процесс, который мы считали невозможным, но показала его почти на границе возможности современного эксперимента.

Что отсюда следует? Опыты идут, выдвигается масса разных гипотез. Наиболее эффектной, но оказавшейся несостоятельной, была гипотеза, которая предполагала, что существуют какие-то большие галактики, которые действуют на частицы и античастицы в нашей Галактике по-разному, тем самым нарушая симметрию мира.

Очень интересно, что такая, казалось бы, туманная гипотеза в действительности была подвергнута экспериментальной проверке, и последние опыты показывают, что такого космического поля, по крайней мере достаточно сильного, чтобы вызвать наблюдавшийся эффект, не существует.

Возникает вопрос, не существует ли еще какого-то нового взаимодействия, которого мы не знаем (оно уже получило название пятого взаимодействия).

Мы знаем, что существуют четыре типа взаимодействия:

1. Гравитационное.

2. Электромагнитное.

3. Сильное, т. е. ядерное взаимодействие, которое держит частицы внутри ядра.

4. Слабое, то, которое вызывает радиоактивный бета-распад ядер, приводит к распадам K^0_2 на два пиона и вообще к распадам, происходящим за сравнительно долгое по ядерной шкале время.

Возникает вопрос, не существует ли еще одного типа взаимодействия, более слабого, чем ядерное, которое и приводит к нарушению законов сохранения.

Опыты продолжаются. Теоретики пытаются найти связь этого явления с другим. В мае 1965 года появилась еще одна смелая гипотеза о том, что причина нарушения симметрии лежит в электродинамике, что в процессах с участием фотонов

и тяжелых частиц, в таких, когда одна частица превращается в другую, симметрия нарушается. Посмотрим, что скажут об этом физики-экспериментаторы?

Магические числа 35 и 56

Расскажем теперь о том, как в хаосе частиц продолжает устанавливаться порядок.

Последним событием здесь было появление магических квантовых чисел — чисел 35 и 56. То, что большая часть существующих частиц может быть разбита на два класса — давно известно. Я напому терминологию, потому что она сейчас уже, по-видимому, установилась. Тяжелые частицы сейчас называют адронами. Адроны бывают двух сортов — барионы, в которые входят протоны, нейтроны, частицы, о которых сейчас будет сказано, и мезоны, роль которых состоит главным образом в передаче взаимодействия между частицами. Каждая из этих частиц, кроме заряда, обладает еще спином — моментом количества движения. Поэтому можно сказать, что в природе частицы отличаются по разным признакам. Частицы могут отличаться зарядом и могут отличаться спином. Если говорят, что частица имеет спин $1/2$, то это просто выражение того факта, что частица может находиться в двух состояниях: с «проекциями спина» плюс половина и минус половина. Если частица имеет спин $3/2$, это значит, она может находиться в четырех состояниях: $+3/2$, $+1/2$, $-1/2$, $3/2$.

Наконец, если частица имеет спин — 1, то она может находиться в трех состояниях: — 1, 0, 1.

Оказалось, что очень простая схема утверждает, что мезоны могут находиться в 35 состояниях, а барионы — в 56. Эти состояния легко перечислить, и схема соединит в себе явно начало новой периодической системы элементарных частиц.

Начнем с мезонов. Оказалось, что существует 8 мезонов, которые обладают спинами, равными нулю, т. е. не имеют собственного магнитного момента. Это мезоны

$$\pi^+, \pi^-, \pi^0, K^+, K^-, K^0, \text{анти } K^0, \eta^0,$$

всего 8 частиц.

Существует 9 мезонов со спином 1. Это мезоны

$$\rho^+, \rho^-, \rho^0, \varphi^0, \omega^0, K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \text{анти } K^{*0}.$$

Не трудно сосчитать, что всего здесь 8 мезонов, у которых нет спина и 9 мезонов, каждый из которых имеет три состояния (спин 1), так что $8 \times 1 + 9 \times 3 = 35^1$.

¹ π^+ есть анти π^- , K^+ есть анти K^- , ρ^+ есть анти ρ^- , K^{*+} есть анти K^{*-} . Мезоны π^0 , ρ^0 , φ^0 , η^0 называются истинно нейтральными частицами; они (как фотон) совпадают со своими античастицами.

Эти 35 частиц укладываются в квадратную табличку из $6 \times 6 = 36$ клеток, но одна частица исключается. Это следствие теории групп, которая требует, чтобы в такой квадрат были поставлены не 36, а только 35 частиц.

Далее имеется 56 барионов, которые также легко перечислить. Среди барионов, кроме 56 частиц, есть еще и 56 античастиц. У мезонов и частицы и античастицы входили в одну группу.

Среди этих барионов есть 8 частиц со спином $1/2$:

$$n, p, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \Lambda^0, \Xi^0, \Xi^-$$

и имеется 10 частиц со спином $3/2$. Это:

$$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^-, \Sigma^{*+}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*-}, \Xi^{*-}, \Xi^{*0}, \Omega^-.$$

Омега-минус — эта частица, которая утвердила всю схему. Было предсказано, что существуют частицы с массой 1676 миллионов вольт, спином $3/2$ и временем жизни 10^{-10} секунды. Это было настолько смелое предсказание, что в него поверили очень немногие.

В декабре 1963 года рождение такой частицы было обнаружено. В 1964 году наблюдали еще одну омега-частицу.

Для наблюдения первой из Ω^- частиц было просмотрено 300 тысяч фотоснимков!

Итак, есть 8 частиц с двумя спиновыми состояниями и 10 частиц с четырьмя спиновыми состояниями, а всего $8 \times 2 + 10 \times 4 = 56$.

Таким образом, заметная часть частиц сейчас уложилась в два таких мультиплета.

Существует еще несколько десятков частиц, свойства которых изучены хуже. Многие частицы, которые здесь перечислены, живут очень мало, примерно 10^{-22} — 10^{-23} секунды, и тем не менее их свойства хорошо изучаются.

Новая теория классификации частиц — так называемая схема унитарной симметрии принесла важный результат.

Так оказалось, что отношение магнитного момента нейтрона к магнитному моменту протона должно быть равно $2/3$.

Для всех было почти чудом, что вычисленная величина так хорошо совпала с экспериментальным значением 0,632.

Последнее открытие подействовало на физиков очень сильно, и те, кто сомневались в новом подходе к теории, сейчас сами интенсивно включились в ее разработку.

Кварки и антикварки

В мире частиц, может быть, живут монстры — частицы с удивительным свойством, поиски которых ведутся в лабораториях мира.

Я надеюсь, что таких частиц не существует, но если бы

они были, то обладали бы очень интересными свойствами. Их поиски ведутся всюду. Многим очень хочется, чтобы была найдена какая-то частица, из которой были бы сделаны все остальные. Для нуклонов эта роль оказалась непосильной.

Оказывается, есть основание предположить, что может существовать частица, названная кварком, которая обозначается ξ (соответственно и антикварк $\bar{\xi}$).

Предполагают, что кварк и антикварк вместе составляют мезон, а так как кварк имеет спин половину, то из двух половинок можно сделать мезон со спином 0 или мезон со спином 1. Если же взять три кварка, то можно сосчитать, что они дают пятьдесят шесть состояний. Из трех половинок можно сделать спин либо $1/2$, либо $3/2$. Словом, из кварков можно сделать как раз столько адронов, сколько надо, если считать, что мезоны состоят из ξ и $\bar{\xi}$, а барионы из трех кварков.

Далее теория предсказывает, что у кварка заряд может быть равен либо $+2/3$ или $-1/3$ от заряда протона (а у ξ либо $-2/3$ либо $+1/3$).

До сих пор все частицы имели целочисленный заряд, и на частицу с таким небывалым зарядом стоит поохотиться. Охота за частицами, которых никто не видел, вызвала большой интерес. Многие включились в серьезные поиски кварков. Однако пока кварки не обнаружены. Поиски кварков связаны с вопросом, который давно возник: можно ли найти самую элементарную из всех частиц. Сначала все физики смеялись над теми, кто задавал такой вопрос, потом стали смеяться друг над другом, но в конце концов пришли к выводу, что в принципе такая возможность может и существовать, что вопрос не такой глупый. Самые элементарные частицы должны обладать дробным зарядом и иметь весьма необычные свойства. Но природа не любит тривиальных решений. До сих пор кварки не обнаружены. Складывается впечатление, что это слишком просто, чтобы быть правдой.

Итак, вот три главнейших события прошедшего года. Ниспровергнут закон сохранения четности, установлена новая классификация частиц и посеяно сомнение (если не опровергнуто) в существовании самой элементарной частицы — кварка.

В. А. Ф а б р и к а н т,
доктор физико-математических наук, профессор

НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

То, о чем я расскажу, корнями уходит в далекие времена, а реализовано было совсем недавно. Наиболее интересные результаты опубликованы в конце 1964 года. От идеи, даже

очень красивой, до ее реализации, как известно, дистанция большого масштаба.

Все, очевидно, слышали об успехах квантовой электроники. Это новая область техники, которая, в частности, позволила создать генераторы света совершенно нового типа — оптические квантовые генераторы, или лазеры. Как ни парадоксально, но эти приборы, в названии которых фигурирует слово «квантовые», т. е. неклассические, вызвали буквально новый расцвет классической оптики. Классическая оптика благодаря лазерам переживает настоящую эпоху Ренессанса. Надо напомнить, что последние десятилетия как раз в оптике доминировали квантовые идеи и представления.

Оптический квантовый генератор представляет собой новый источник света, основные преимущества которого связаны с классическими свойствами света. Старые источники света, такие, как лампа накаливания или люминесцентная лампа, дают свет куда более квантового характера, чем оптический квантовый генератор.

Как устроен оптический квантовый генератор? Прежде всего это либо кристалл, либо баллон с газом, либо сосуд с жидкостью. В общем для работы в генераторе пригодна среда, находящаяся в любом из трех физических состояний — твердом, жидком или газообразном. Мы должны привести эту среду в специальное состояние, называемое активным. Для этого нужно к атомам или молекулам среды подвести энергию, т. е. их возбудить. Причем возбудить так, чтобы возбужденных частиц в среде было больше, чем невозбужденных. Такая перевозбужденная среда представляет собой как бы заряженную световую бомбу. Если один из возбужденных атомов разрядится и отдаст избыток своей энергии в виде света, то дальше, как это предсказал еще в 1917 году Эйнштейн, должно произойти следующее — этот свет, пролетая сквозь среду, может вынудить быстрее разряжаться и испускать свет другие возбужденные атомы. Это явление так и называется — вынужденное излучение. Важно подчеркнуть, что при вынужденном излучении атомы испускают свет абсолютно тождественный с вынуждающим светом. Этот свет имеет то же направление распространения, ту же частоту и ту же поляризацию.

В результате актов вынужденного испускания в среде будет нарастать световая лавина, и наружу выйдет гораздо более сильный световой поток, чем первоначальная затравочная порция света, испущенная одним из возбужденных атомов среды.

Представьте теперь, что активная среда помещена между двумя параллельными зеркалами. Одно из зеркал непрозрачное, а другое чуть-чуть пропускает свет. Пусть один из возбужденных атомов среды испустит свет, направленный пер-

пендикулярно поверхности зеркал. Благодаря вынужденному излучению этот свет будет усиливаться в среде, не меняя своего направления, и последовательно отражаться от обоих зеркал. Он будет метаться от зеркала к зеркалу, усиливаясь при каждом прохождении среды. С другой стороны, при каждом отражении от зеркала, пропускающего свет, часть света будет вырываться наружу. Все эти вырвавшиеся пучки сложатся в один мощный световой луч.

До сих пор я намеренно говорил нейтрально, я не пользовался при этом никакими представлениями о том, что такое свет, т. е. для этого рассказа можно было считать свет либо потоком световых частиц — фотонов, либо потоком электромагнитных волн.

Вместе с тем работа квантового генератора, эффективность этого нового метода получения мощных строго направленных световых пучков в значительной мере определяется волновыми свойствами света. В квантовом генераторе одновременно происходят два резонанса — квантовый и классический. Атомы среды работают как микрорезонаторы, и резонанс света с ними определяется квантовыми законами. С другой стороны, система двух зеркал представляет резонатор макроскопических размеров, и световая волна взаимодействует с этим резонатором по сугубо классическим законам.

Сильная световая волна получается в квантовом генераторе как результат сложения колеблющихся в такт отдельных волн, выходящих при каждом отражении. Это происходит при резонансе между световой волной и макрорезонатором. Чрезвычайно важно, что эти волны когерентны, т. е. фазы их колебаний жестко связаны между собой. Когерентность — это сугубо классическое свойство света. Ценность световой волны, даваемой квантовым генератором, кроме большой мощности, состоит в совершенстве ее формы, у нее чрезвычайно правильные закономерности изменения во времени и в пространстве электромагнитного поля. Графики изменения напряженностей электрического и магнитного полей представляют почти идеальные синусоиды. Вот это совершенство формы световой волны и является особенно важным для передачи всевозможной информации с помощью лучей, даваемых оптически-ми квантовыми генераторами.

Надо сказать, что оптика всегда отставала от радиотехники в смысле качества генерируемых волн. Любой незатухающий радиопередатчик дает волны высокого качества. Мы искусственно портим качество этих волн, модулируя их для передачи информации как звуковой, так и изобразительной.

Идеальная по форме волна сама по себе не может передать информацию из одной точки пространства в другую. Если вы хотите передать информацию о каком-то событии, про-

исшедшем в одном месте, надо сделать как бы «зарубку» на идеальной волне, тогда приход этой «зарубки» в другое место пространства явится сигналом об этом событии.

Для света такая «зарубка» получится, если в соответствующий момент времени чуть-чуть приглушить его интенсивность, тогда через некоторое время, необходимое для распространения света, сигнал о событии дойдет до соответствующего места. Чем выше качество волн, которые соединяют эти две точки пространства, тем меньшая «зарубка» на волне уже будет чувствоваться в месте приема информации.

Старые источники света, в отличие от радиопередатчиков, давали волны очень низкого качества. В их излучении царил полный хаос. На языке радистов можно сказать — шумящие источники излучения. Такие волны низкого качества мало пригодны для передачи и запасаения информации.

Создание квантовых генераторов принципиально изменило ситуацию.

Мы имеем световые волны высокого качества, и притом в диапазоне частот, в сотни тысяч раз превышающих частоты радиодиапазона. Повышение частоты чрезвычайно повышает информационную емкость луча, используемого для передачи.

Я расскажу об использовании излучения оптических квантовых генераторов для запасаения и воспроизведения информации. Речь идет о разработке нового двухступенчатого метода получения изображений предметов.

Впервые идея метода была высказана Д. Габором в 1948 году, но до прошлого года метод не позволял получать изображения хорошего качества. Американские физики Э. Лейт и Ю. Уратникс внесли принципиальное усовершенствование в метод Д. Габора и использовали лазеры для его реализации. Я сначала коротко скажу об их работе 1963 года, а затем изложу замечательные результаты, опубликованные в 1964 году.

Возьмем какой-либо предмет, например диапозитив. При обычном методе изображение диапозитива на экране получается сразу с помощью линзы, расположенной соответствующим образом. Согласно Габору, сначала получают так называемую голограмму диапозитива или любого другого предмета, а затем, просвечивая голограмму, получают изображение.

Для получения голограммы диапозитив или другой предмет просвечивают пучком света. На пути пучка без всяких линз ставится фотопластинка, фиксирующая по существу теневое изображение предмета, сильно осложненное явлением дифракции. Это и есть голограмма. В данном случае дифракция проявляется в размытии теней и в появлении своеобразных периодически расположенных полос. Дифракция объясняется волновыми свойствами света. При сильной дифракции голограмма почти ничего общего не имеет с теневым изображением предмета. Однако если голограмму просветить свето-

вым пучком, то на экране мы получим изображение, довольно похожее на предмет. Однако качество изображений, получившихся по этому методу до 1963 года, было крайне невысоким, хотя использовались очень примитивные объекты: простые геометрические фигуры и буквы. Это объяснялось тем, что при получении голограмм терялась, грубо говоря, половина информации о предмете, служившем объектом для изображения.

Всякая волна в данной точке пространства характеризуется двумя параметрами: во-первых, амплитудой колебаний, в ней происходящих, и, во-вторых, состоянием колебания, т. е.

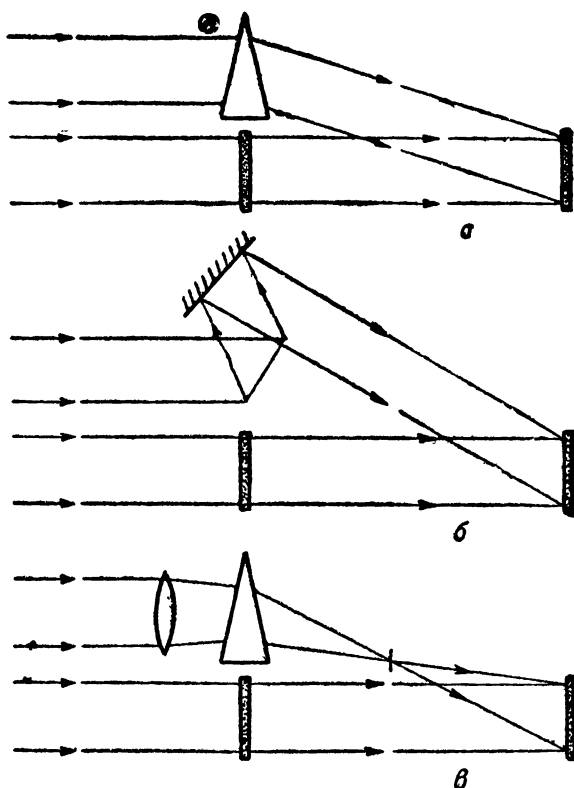


Рис. 1.

фазой. Фотопластинка, на которой получалась голограмма, фиксирует только амплитуду приходящей световой волны. Почернение данного места фотопластинки растет с ростом амплитуды падающей волны, фаза никак не влияет на почернение пластинки.

Э. Лейт и Ю. Уратникс придумали способ, как уничтожить этот недостаток голограмм. В работе 1963 года они применили схему, изображенную на рис. 1.

Широкий пучок света, который получается от неона-гелиевого лазера (дающего особо высококачественные волны) с помощью «светового рупора» (рис. 2), не только просвечивает предмет, но частично проходит через призму или систему зеркал, расположенную рядом с предметом. В каждую точку фотопластинки, фиксирующей голограмму, приходят две волны, одна — прошедшая сквозь предмет, и вторая — сквозь призму. Эти две волны когерентны между собой и дают интерференционную картину. Результат их сложения зависит от соотношения фаз. Если обе волны в одной фазе, то получается яркий свет, а если в противофазе — темнота. Фаза вспомога-

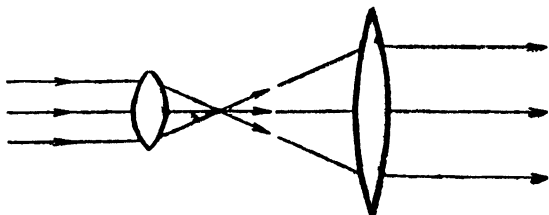


Рис. 2.

тельной второй волны линейно растет от одного края фотопластинки к другому. Разность фаз обеих волн в каждой точке фотопластинки будет, очевидно, зависеть и от фазы волны, прошедшей сквозь предмет. Таким образом, вспомогательная волна как бы проявляет по поверхности фотопластинки фазы волны, прошедшей сквозь предмет, и тем самым восстанавливается утерянная в обычной голограмме часть информации. Для просвечивания голограммы опять-таки использован пучок света от лазера. При этом достигается высокое качество воспроизведения.

В 1964 году было сделано чрезвычайно интересное усовершенствование. При получении голограммы на пути просвечивающего пучка до предмета было помещено рассеивающее стекло. Таким образом, предмет просвечивался уже не направленным пучком, а рассеянным светом. Авторы пишут, что читатель может удивиться, зачем вносится хаос в высококачественную волну, даваемую лазером. На первый взгляд может показаться, что мы уничтожаем все преимущества такой волны. Однако это не так. Матовое стекло не вносит хаотичность во временной закон протекания процессов в волне, здесь возникает только некоторая пространственная хаотичность. Зато оказалось, что рассеянное освещение предмета имеет огромные преимущества. Благодаря рассеянному освещению в каждую точку голограммы попадают волны от всех точек предмета. Благодаря этому исчезают дефекты, связанные с попаданием пылинок в аппаратуру. Это весьма существенно. Представьте, мы желаем получить изображение гео-

графической карты. Наличие дефектов может ввести нас в серьезное заблуждение. Затем, так как каждая точка голограммы получила информацию о всех точках предмета, можно разбить голограмму на мелкие куски, просвечивание каждого куска даст полное изображение предмета. Сама голограмма представляет настолько мелкую рябь, что не только ни о каком сходстве с предметом и речи быть не может, но даже, взяв ее в руки, не всякий догадается, что это голограмма.

Наконец, на одной фотопластинке можно зафиксировать несколько голограмм различных предметов и затем получить их отдельные изображения. Для этого необходимо только несколько изменять направление вспомогательного луча при фиксации голограммы каждого объекта.

Очень эффективен новый метод для получения объемных изображений.

На рис. 3 показана схема такой установки. В данном случае используется не проходящий, а отраженный от предметов свет. Рядом с предметами помещается зеркало, на которое попадает часть светового пучка лазера. Свет, отраженный от предметов и зеркала, создает на фотопластинке голограмму. При рассматривании голограммы мы сквозь нее видим мнимое объемное изображение предмета. Получаемые таким путем изображения благодаря параллаксу, т. е. кажущемуся смещению одного предмета по отношению к другому, создают полное ощущение объемной группы предметов.

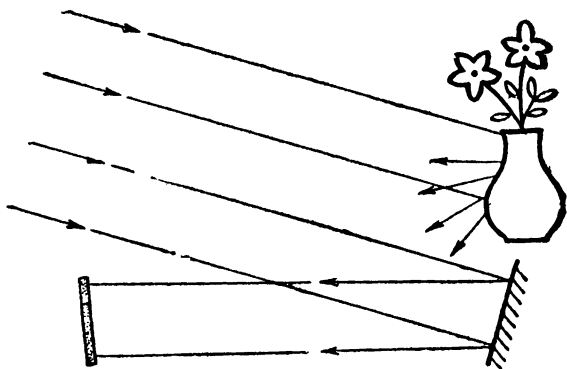


Рис. 3.

Используя три лазера, дающих три световых пучка разных цветов, можно получить объемное цветное изображение. Ясно, что таким методом могут быть сделаны объемные цветные кинофильмы.

Для получения объемных изображений группы предметов, далеко разнесенных по глубине, необходимы особо высококачественные волны, и надо принимать специальные меры для

выделения таких волн в пучках, даваемых лазерами. В настоящее время трудно полностью оценить практическое и принципиальное значение нового метода получения изображений.

Д. Габор предлагал метод голограмм для построения своеобразных микроскопов. Если получать голограмму в свете очень коротких волн (например, рентгеновских или электронных), а просвечивать ее более длинноволновым видимым светом, то изображение будет увеличенным в число раз, равное отношению длин волн. В самом конце 1964 года появилась работа, в которой получено качественное изображение мушиного крылышка с увеличением в 150 раз.

В заключение я хотел бы немного сказать о вещах, сделанных, строго говоря, не в 1964 году, а ранее, но в 1964 году уже вышедших на хороший технический уровень. Я имею в виду так называемую нелинейную оптику.

До появления квантовых генераторов мощность световых лучей была очень ограниченной.

Квантовые генераторы дают возможность получать световые пучки необычайно большой мощности. От генераторов с кристаллом рубина получены мощности порядка миллиардов ватт. Это мощности, превышающие мощности крупных электростанций. Правда, развиваются такие мощности только в течение миллиардных долей секунды, так что полная энергия такого светового импульса не слишком велика. Огромным мощностям соответствуют колоссальные напряженности электрического поля световой волны. В таких сверхсильных электрических полях возникают принципиально новые, очень интересные эффекты.

Со школьных времен мы все знаем знаменитый опыт Ньютона с разложением белого света в цветной спектр. Но мало кто знает, что Ньютон произвел еще серию опытов, доказывающих неизменность свойств отдельных цветных пучков, на которые распался белый световой пучок после прохождения призмы. Ньютон заставил эти одноцветные пучки преломляться и отражаться и установил, что при этом не происходит дальнейшего изменения их цвета. На современном языке это означает неизменность частоты колебаний одноцветного — монохроматического света.

В дальнейшем выяснилось, что частоту света можно менять. Небольшие изменения частоты происходят, например, при отражении света от движущегося зеркала. Большие изменения частоты возникают при люминесценции. Вещества, называемые люминофорами, поглощают свет одной частоты и испускают при этом свет другой частоты. Люминоформы представляют собой преобразователи световых частот, но у этих преобразователей есть очень крупный недостаток. Направленный световой пучок после поглощения люминоформ

превращается в рассеянное по всем направлениям излучение люминесценции. Теряется направленность первоначального пучка. В сверхмощных световых пучках лазеров можно преобразовывать частоту, не теряя их направленности. Если мы сквозь соответственно подобранный кристалл пропустим сверхмощную волну, то эта волна электрическим полем изменяет оптические свойства кристалла в такт своим колебаниям.

Изменения оптических свойств (показателя преломления) в свою очередь влияют на скорость распространения световой волны. В результате волна с помощью среды как бы сама себя модулирует. Частота модуляции, очевидно, равна частоте волны. В результате получаются, как обычно при модуляции, две частоты: одна равна сумме частот волны и модуляции, а вторая — разности. Первая частота в данном случае равна удвоенной частоте волны, а вторая нулю.

Первой частоте соответствует свет с удвоенной частотой или с укороченной в два раза длиной волны. Нулевой частоте соответствует постоянное электрическое поле, возникающее в кристалле. Таким методом преобразуется инфракрасное излучение в видимое, видимое — в ультрафиолетовое и т. д.

Любопытно, что в данном случае опять-таки находят важное практическое применение чисто классические свойства света, даваемого квантовыми генераторами.

НАПОМИНАЕМ ПОДПИСЧИКАМ

В 1966 году издательство «Знание» продолжит выпуск подписных брошюр, выходящих под девизом

«НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ».

14 серий этого цикла: «История», «Философия», «Экономика», «Техника», «Сельское хозяйство», «Литература и искусство», «Международная», «Биология и медицина», «Физика, математика, астрономия», «Молодежная», «Химия», «Естествознание и религия», «Наука о Земле», «Радиоэлектроника и связь» расскажут читателю о самом новом и самом интересном в важнейших областях знаний.

Брошюры написаны популярно и увлекательно. Они предназначены преподавателям вузов, техникумов, средних школ, специалистам с высшим и средним образованием, студентам, школьникам старших классов, агитаторам, лекторам, пропагандистам, а также всем любознательным читателям.

В 1966 году авторами брошюр будут академики Л. А. Арцимович, П. А. Капица, М. Д. Миллионщиков, В. И. Спирин, Д. И. Щербаков, члены-корреспонденты АН СССР А. Г. Аганбегян, В. А. Гинзбург, М. П. Иовчук, А. М. Прохоров, К. Н. Плотников, академики ВАСХНИЛ П. М. Жуковский, А. Н. Карпенко, Ф. Г. Кириченко, действительные члены АМН СССР А. А. Летавет, В. Д. Тильяков, Л. К. Ходянов, доктора и кандидаты филологии и искусствоведения Л. Каюмов, А. В. Караганов, Э. С. Кедрина, И. С. Куликова, Л. И. Новикова, писатели С. Антонов, Н. Бочин, Л. Озеров, журналисты, общественные и политические деятели.

Периодичность первых десяти серий — 2 брошюры в месяц, 24 в год.

Подписная цена на одну серию:

на год	— 1 руб. 80 коп.
на полугодие	— 90 коп.
на квартал	— 45 коп.

Последние четыре серии выходят по 1 брошюре в месяц, 12 в год.

Подписная цена на одну из этих серий:

на год	— 1 руб. 08 коп.
на полугодие	— 54 коп.
на квартал	— 27 коп.

Подписаться можно на одну или несколько серий без всяких ограничений в отделениях связи и почтамтах, а также у общественных распространителей печати по месту работы.

Индексы серий в каталоге «Союзпечати» на 1966 год с 70064 по 70075 и 70090.