

АРКАДИЙ БЕНЕДИКТОВИЧ МИГДАЛ (11 марта 1911 — 9 февраля 1991) — выдающийся советский физик-теоретик, академик, один из основоположников современной теории атомного ядра, создатель большой научной школы, человек многообразных дарований.

Аркадий Бенедиктович Мигдал — АБ, как звали его друзья и ученики, — был уникальным человеком и прожил уникальную жизнь. Блестящий ученый, один из ярких представителей Школы Ландау, он и сам был великолепным Учителем, воспитавшим несколько десятков первоклассных физиков, среди которых С.Т.Беляев, А.М.Будкер, В.М.Галицкий, А.И.Ларкин и многие другие.

А.Б.Мигдал был разносторонним человеком. Снял первый советский подводный фильм и получил удостоверение инструктора подводного спорта №1. Страстно любил горы и провел много счастливых часов на ледниках Кавказа и Памира. Гонял на одном из первых мотоциклов в послевоенной Москве, бесстрашно спускался с самых крутых горок на первых примитивных горных лыжах.

На рубеже своего сорокалетия АБ занялся скульптурой. Первым произведением была маленькая деревянная статуэтка его дога. В кабинете АБ стояли выполненные им из темных древесных корней прекрасные женские торсы. Многие его друзья и ученики получили в подарок искусно сделанные им маски Пушкина и Эйнштейна. Одна из таких масок Эйнштейна украшает Институт Нильса Бора в Копенгагене, другая — Институт физических проблем им. П.Л.Капицы в Москве. А знакомым женщинам АБ дарил изящные украшения собственного изготовления — он освоил ювелирное дело на почти профессиональном уровне.

АБ был одним из любимых учеников и близким другом великого Ландау. На вопрос уже больному Ландау, кто его

самый талантливый ученик, он сказал: «Померанчук. А, еще Мигдал, но он ведь ленится...», имея в виду его многочисленные увлечения. Но минута перед началом знаменитого семинара Ландау называлась мигдальской. «В последнюю минуту всегда может прийти Мигдал», — говорил Ландау. Представьте возмущение молодых теоретиков, когда в эту самую минуту в зал вдруг вваливается усатый пожарник в каске и спецкостюме со словами: «Выметайтесь, ребята, здесь сейчас пожарники заниматься будут». Это был, конечно, Мигдал, который обожал остроумные розыгрыши. Что стоит написанное от имени Паули в адрес семинара письмо, которое обсуждалось целый час и только потом обнаружилось, что первые буквы строчек образуют слово «дурак»! А гостей, собравшихся в ресторане на Новом Арбате на празднование его 75-летия, АБ встречал в ливрее швейцара и принимал чаевые.

Последнее десятилетие своей жизни А.Б.Мигдал увлеченно работал над пропагандой и популяризацией науки. Написал книги: «Поиски истины» (1983), «Квантовая физика для больших и маленьких» (1989), стал главным редактором «Энциклопедического словаря юного физика» (1984). Опубликовал несколько блестящих статей для школьников в журнале «Квант»: «Письмо школьникам, которые хотят стать физиками» (1975), «Вычисления без вычислений» (1979, 1991), «Судьба нейтронных звезд» (1982), «Как создавалась квантовая теория» (1984), «Как устроена пустота?» (1986). Он был непримиримым врагом и разоблачителем всяческой лженауки.

Если захотите больше узнать об Аркадии Бенедиктовиче, прочитайте сборник «Воспоминания об академике А.Б.Мигдале» (М.: Физматлит, 2003).

Как устроена пустота?

А.МИГДАЛ

РЕЧЬ ПОЙДЕТ О ТОМ, КАК ИЗМЕНИЛИСЬ НАШИ представления о самом распространенном во Вселенной и, быть может, самом важном объекте физических исследований — о пустоте.

Что такое пустота: абстрактное понятие, «ничто», вместилище для физических тел? Что останется, если идеальный насос удалит из замкнутого объема все частицы? Что находится в межзвездном пространстве, где почти нет вещества?

Развитие физики последних десятилетий показало, что наше физическое пространство — вакуум — не просто геометрический объект, не пространство, в котором ничего нет, а сложная система, обладающая интереснейшими свойствами, совершенно непохожими на свойства твердых сред, жидкостей или газов; его изучение касается самых глубоких понятий — таких, как причинность, связь геометрии с материей, симметрии пространства и времени, связь симметрии с законами сохранения...

Нельзя толкнуть, не прикасаясь

Мы знаем, что тела действуют друг на друга при соприкосновении. Бросим в воду камень — от него побежит волна и всколыхнет плавающие ветки. Это и понятно — воздействие передается от точки к точке. Звук распространяется потому, что давление передается от одного объема среды к соседнему и т.д. Если накрыть звучащий электрический звонок стеклянным колпаком и откачать воздух, то видно, как молоточек по-прежнему ударяет по колокольчику, но звук исчезает — в пустом пространстве звук не распространяется. В то же время период колебаний маятника, помещенного под колпак, не изменяется при удалении воздуха (если пренебречь трением); значит, не изменяется и сила тяжести.

В отличие от сил, возникающих при распространении звука, электрические и магнитные силы, так же как и гравитация, действуют и в пустоте, в ней рас-

пространяется свет, поэтому мы видим Солнце и звезды.

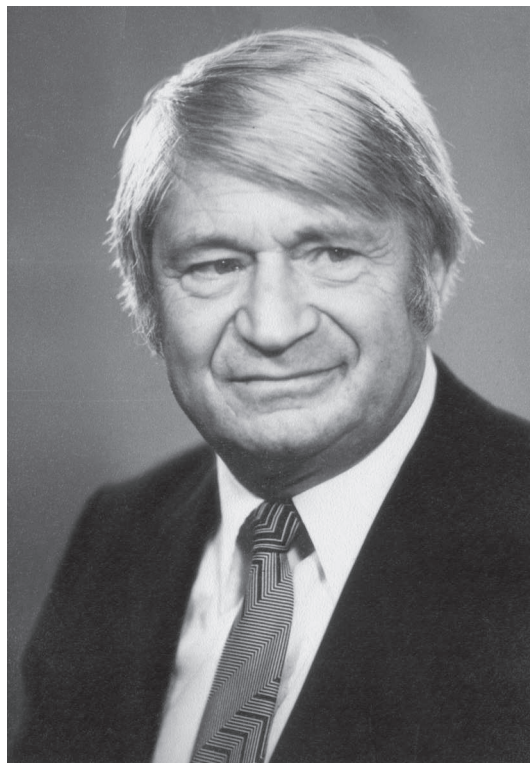
Естественно предположить, что в пространстве вблизи магнита, вблизи заряженного или массивного тела состояние пустоты изменяется. Пространство, окружающее эти тела, находится в «напряженном» состоянии, которое описывается словами: « в пространстве имеется поле». Заряды создают электрическое поле, магниты – магнитное, массивное тело вызывает гравитационное поле. Электрическое поле действует на заряженное тело, магнитное – на магнит, поле силы тяжести – например, на камень, заставляя их двигаться. Изменение скорости этих тел объясняется действием поля в той области пространства, где в данный момент времени они находятся. Сила передается через пустое пространство от точки к точке с помощью полей, как через невидимую жидкость. Такой механизм передачи воздействия называется близкодействием и принят современной физикой.

Но существовало и другое представление – «дальнодействие»: влияние одного тела на другое мгновенно передается на расстояние. На основе этого взгляда Исаак Ньютон построил свою теорию тяготения. Предположение о мгновенной передаче воздействия не помешало ему найти закономерности движения небесных тел, с огромной точностью совпадающие с данными наблюдений. Сейчас мы знаем, почему: небесные тела движутся со сравнительно малыми скоростями, а гравитационное взаимодействие распространяется со скоростью света и может считаться в этом случае мгновенным.

Идею дальнодействия трудно согласовать со свойствами света: было известно, что свет распространяется с конечной скоростью и проходит все промежуточные точки на линии светового луча. Особенно хорошо это видно, когда луч света проходит в тумане – он непрерывен. Ньютон предположил, что светящееся тело испускает частицы, передающие свет, – корпускулы. Тогда конечность скорости не противоречит идее дальнодействия, но остаются без объяснения волновые свойства света, доказанные опытами по интерференции и дифракции. Корпускулярная теория Ньютона так и не смогла справиться с объяснением этих явлений.

Через двести с лишним лет после Ньютона, в 1905 году, появилась замечательная работа Альберта Эйнштейна по квантовой природе света. Эйнштейн показал, что обнаруженные экспериментально закономерности фотоэффекта (вырывание электронов из атома при облучении) можно объяснить, только предположив, что свет представляет собой набор частиц – фотонов, которые взаимодействуют с электронами, выбрасывая их из атомов. (О фотонах мы подробнее поговорим позже.) Представление о свете как о волне не могло объяснить главную особенность фотоэффекта – энергия вылетающего электрона зависит не от интенсивности света, а только от его частоты.

В некотором смысле точка зрения Эйнштейна означала возврат к ньютоновской теории корпускул. И снова встал вопрос, на который не смог ответить Ньютон: как



Аркадий Бенедиктович Мигдал

объединить оба представления – о волновой и о корпускулярной природе света? Возник важный парадокс, который был разрешен квантовой теорией, доказавшей, что свет – и волна и частица, так же как электрон – и частица и волна! Это представление получило название «квантово-волнового дуализма».

Сейчас нам известно, что в пустоте все взаимодействия – электрическое, магнитное, гравитационное, ядерное – передаются от точки к точке со скоростью, не превышающей скорость света. Если одно тело передвинуть, должна измениться сила тяготения, действующая с его стороны на другое тело. Но если это другое тело находится далеко от первого, то пройдет заметное время, прежде чем оно получит воздействие. Где же находится возмущение, когда первое тело уже переместилось, а второе еще не имеет сведений о его новом положении?.. На этот вопрос теория дальнодействия не могла ответить, и многие физики отказались от нее еще в прошлом <сегодня – позапрошлом> веке.

Для объяснения процесса передачи воздействия на расстояние была придумана специальная среда – эфир, заполняющий все пространство между частицами вещества. Воздействие передается за счет того, что вокруг заряженных или намагниченных тел эфир деформируется, и возникает сила, действующая на другое заряженное или намагниченное тело. Деформация эфира передается последовательно – от точки к точке. Свет распространяется в нем так же, как звук в среде.

Вплоть до начала XX века физики пытались строить эфир по образу и подобию известных твердых и жидких тел, а его нужно было изучать самого по себе. Это – среда особого рода. Следствием неверного пред-



ставления о природе пустоты было возникновение интереснейших парадоксов, разрешение которых приводило к созданию новых физических теорий.

Электромагнитные свойства пустоты

Джеймс Максвелл своими удивительными уравнениями, найденными в 1865 году, объединил различные разделы физики: оптику, электричество, магнетизм.

Начало на этом пути было положено его могучим предшественником Майклом Фарадеем, открывшим в 1831 году закон электромагнитной индукции. Если изменять магнитное поле, пронизывающее проволочное кольцо, то в проводнике возникает электрический ток – заряды в нем начинают двигаться под действием образующегося в пространстве кольцевого электрического поля. Иными словами, переменное магнитное поле порождает в пустоте переменное электрическое поле.

Еще в 1820 году другой предшественник Максвелла Ханс Эрстед обнаружил, что ток, текущий по проводнику, создает вокруг себя кольцевое магнитное поле. Если периодически изменять напряженность электрического поля в проводнике, возникает переменный ток и переменное магнитное поле. Максвелл высказал гениальную догадку о том, что не только движущиеся заряды создают магнитное поле, его образует также само переменное электрическое поле.

Из этих двух замечательных свойств пустоты следовало третье, не менее важное – в пустоте распространяются электромагнитные волны. Когда вблизи антенны радиопередатчика возникает переменное электрическое поле, оно, согласно Максвеллу, образует

вокруг себя переменное магнитное поле, а магнитное – по закону Фарадея – создает уже в соседнем месте переменное электрическое... Так возмущение передается все дальше и дальше.

Из уравнений Максвелла следовало, что электромагнитные колебания должны распространяться со скоростью света. Существование электромагнитных волн было экспериментально доказано Генрихом Герцем в 1888 году. Естественно было прийти к заключению, что свет – тоже электромагнитная волна. Это предположение было проверено и подтверждено опытом.

Как абстрактно выглядели эти представления во времена Максвелла! И как быстро они стали основой почти всех благ современной цивилизации: от телефона и радио до современных средств космической связи – не перечислить всего того, что родилось из опытов в маленьких лабораториях прошлого <позапрошлого> века, из смутных догадок великих умов!

Теория Максвелла была триумфом близкодействия: все электромагнитные воздействия передаются через среду – эфир. И тут же возникли новые противоречия.

Когда в эфире движется тело, движется ли вместе с ним эфир? Эксперименты дали противоречивые результаты, некоторые опыты показали частичное или полное вовлечение эфира в движение, другие – что эфир вовсе не увлекается движущимся телом. В 1851 году французский физик Арман Физо измерил скорость света в текущей воде и показал, что эфир частично захватывается движущейся средой. Американский физик Альберт Майкельсон в 1881 году измерял скорость света вдоль и поперек направления орбитального движения Земли. Если бы эфир был неподвижен, то скорость света вдоль движения Земли складывалась бы из скорости света в эфире и скорости Земли относительно эфира. Оказалось, что скорость света одна и та же, т.е. она не зависит от скорости источника, и если свет действительно распространяется в эфире – значит, эфир полностью увлекается Землей...

Разрешить противоречия эфира предстояло теории относительности.

Эфир умер – да здравствует эфир!

В начале XX века идея близкодействия получила дальнейшее развитие и обоснование в теории относительности и теории тяготения Эйнштейна. Оказалось, что не только электромагнитные, но и гравитационные воздействия распространяются в пустоте со скоростью света. Скорость света вошла не только в электродинамику, но и в механику, и в теорию тяготения.

Противоречие между опытом Физо и опытом Майкельсона было снято новой формулой сложения скоростей, вытекавшей из теории относительности, свойства эфира здесь роли не играли. Отпала необходимость в самом понятии эфира, его заменил вакуум – новый непротиворечивый объект. Эфир умер.

Но в науке новое, как правило, не отменяет старого, старые и новые идеи переплетаются и проникают друг в друга. Даже коренная научная революция не отменяет, а только пересматривает, переосмысливает прежнее, устанавливает границы применимости найденных

ранее соотношений. Судьба эфира – убедительное подтверждение этому.

В начале XX века казалось, что все свойства пустоты объясняются гравитационными и электромагнитными взаимодействиями. Но изучение атомных ядер показало, что существуют силы, удерживающие нейтроны и протоны в ядре, – ядерные силы. И с точки зрения близкодействия их тоже нужно рассматривать как особое, напряженное состояние вакуума. Вакуум обогатился еще одним свойством.

Когда к электромагнитному полю и к полям, описываемым, например, паре частиц электрон – позитрон или протон – антипротон и так далее, применили квантовую механику, оказалось, что в пустоте происходят непрерывные колебания этих полей, рождаются и исчезают элементарные частицы... При столкновениях нуклонов (нейтронов и протонов) из пустоты возникает целый сноп различных частиц. Вакуум полон частицами!

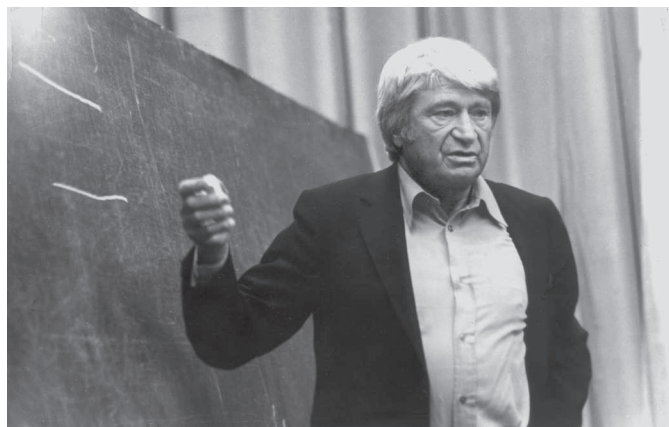
Удивительно сложную и интересную среду – вакуум – можно было бы снова назвать эфиром, если бы не боязнь путаницы с наивным понятием XIX века.

Квантовая механика вакуумных полей

Без некоторых минимальных сведений о квантовой механике нельзя составить даже грубую физическую картину явлений, происходящих в вакууме. Поэтому, прежде чем говорить об удивительных свойствах вакуумных полей, нам придется немного отвлечься и поговорить о том, к каким результатам приводит применение квантовой механики к системам, колеблющимся около положения равновесия. Такие системы часто встречаются в физике и называются осцилляторами. Как бы ни был конкретно устроен осциллятор – будь то математический маятник, грузик на пружинке, колебательный контур, – его энергия состоит из двух слагаемых: потенциальной энергии, пропорциональной квадрату некоторой величины, которую можно назвать «обобщенной координатой», и кинетической энергии, пропорциональной квадрату скорости изменения этой «координаты». Для грузика на пружинке «обобщенная координата» – смещение грузика от положения равновесия, для колебательного контура – заряд на обкладках конденсатора. Коэффициент пропорциональности в кинетической энергии определяет «обобщенную массу». Мы называем эти величины обобщенными потому, что они не зависят от реализации осциллятора – «координате», как вы видите, совсем не обязательно иметь размерность длины.

Остановим маятник – в положении равновесия его энергия минимальна: и кинетическая, и потенциальная энергии равны нулю. Так ведет себя классический осциллятор. Но вот что получилось, когда к осцилляторам применили квантовую механику.

Один из важнейших принципов квантовой механики – принцип неопределенности, сформулированный Вернером Гейзенбергом в 1927 году, – гласит: некоторые физические величины не могут одновременно принимать определенные значения. Именно такими величинами являются «обобщенная координата» и «обобщен-



ный импульс» – произведение «обобщенной массы» на «обобщенную скорость». Прodelывая мысленные эксперименты, Гейзенберг пришел к заключению, что чем точнее измерять координату электрона, тем менее определенным становится его импульс, и наоборот. Это – принципиальное ограничение, которое природа накладывает на понятия координаты и импульса.

Когда квантовая механика была применена к осцилляторам, сразу стало ясно, что кинетическая и потенциальная энергии квантового осциллятора не могут одновременно равняться нулю: если бы это было так, то должны были бы одновременно быть определены и равны нулю и координата, и импульс осциллятора, а это противоречит принципу неопределенности. Квантовый осциллятор, в отличие от классического, даже в состоянии с наименьшей энергией не покоится. Он совершает «нулевые колебания» около положения равновесия. Это замечательное свойство квантовых осцилляторов хорошо проверено на опыте и чрезвычайно важно для современной физики.

Упругие колебания твердого тела, так же как и колебания струны, описываются набором осцилляторов различных частот. Если учесть, что осцилляторы должны подчиняться квантовой механике, то получится, что при абсолютном нуле температуры происходят нулевые упругие колебания – атомы твердого тела не неподвижны, а участвуют в «нулевых колебаниях». Это подтвердили опыты по рассеянию света в твердых телах при низких температурах.

Электромагнитные волны в пустоте тоже можно рассматривать как результат колебаний набора осцилляторов. Представим себе, что между параллельными металлическими экранами, перпендикулярно им, образовалась стоячая электромагнитная волна – она получится, если между экранами укладывается целое число полувольт. Стоячая волна возникает в результате сложения бегущих волн, отражающихся от левого и правого экранов. Похожая волна возникнет в обычной струне – дернешь струну, по ней побегут волны, отразятся от мест закрепления, и установится стоячая волна. Подобное же происходит и в органной трубе.

Напряженность электрического поля в стоячей электромагнитной волне будет периодически колебаться – перед нами снова осциллятор. В качестве «обобщенной координаты» такого осциллятора можно взять напря-



женность электрического поля в какой-либо точке (например, в точке, где амплитуда колебаний напряженности максимальна). «Импульсом» должна быть величина, пропорциональная скорости изменения «координаты», именно такая величина – напряженность¹ магнитного поля. Но раз «координата» и «импульс» квантового осциллятора не имеют одновременно определенных значений, значит, энергии электрического («потенциальная» энергия) и магнитного («кинетическая» энергия) полей не могут одновременно равняться нулю.

Даже если в пространстве нет ни одной частицы, ни одного кванта, электрические и магнитные поля совершают нулевые колебания. Последовательное применение квантовой механики к электромагнитному полю, взаимодействующему с электронами, было начато в конце 20-х годов <прошлого века> в работах Поля Дирака и завершено через 20 лет физиками-теоретиками Р.Фейнманом, Ю.Швингером, С.Томоногой, Ф.Дайсоном. Возник новый раздел теоретической физики – квантовая электродинамика, которая позволила с большой точностью описывать все процессы взаимодействия электронов между собой и с электромагнитным полем.

Нулевые колебания электромагнитного поля заставляют дрожать электрон, движущийся в атоме, – он как бы превращается в шарик с радиусом, равным амплитуде дрожания. Но шарик слабее взаимодействует с ядром, чем точечный электрон. В результате энергетические уровни атома слегка сдвигаются по сравнению со значениями, вычисленными без учета дрожания. Это явление называется «лэмбовским сдвигом» – по имени впервые экспериментально наблюдавшего его У.Лэмба. Квантовая электродинамика позволяет рас-

считать лэмбовский сдвиг с огромной точностью. Получается удивительнейшее совпадение с данными, найденными на опыте.

Еще одно свойство квантового осциллятора – его энергия изменяется порциями величиной $h\nu$, где h – постоянная Планка, а ν – частота колебаний соответствующего классического осциллятора. В применении к электромагнитному полю это означает, что энергия электромагнитного осциллятора с определенной длиной волны λ и частотой $\nu = c/\lambda$ тоже изменяется порциями $h\nu$. Когда энергия волны изменяется на одну порцию, говорят, что «появился квант электромагнитного поля». В бегущей электромагнитной волне одновременно с увеличением энергии на величину $h\nu$ увеличивается и импульс на величину $h\nu/c$. Таким образом, в бегущей волне каждый квант имеет энергию $h\nu$ и импульс $p = h\nu/c$. Можно сказать, что квантовое поле описывает набор частиц – фотонов (так называются кванты бегущей электромагнитной волны) – с разными энергиями и импульсами. В этом и состояла гипотеза световых квантов, развитая Эйнштейном за 20 лет до того, как она была доказана квантовой электродинамикой.

В результате квантования поля само собой возникло понятие частицы как характеристики возбуждения электромагнитной волны с определенной длиной. Так была решена проблема «дуализма волн-частиц». Удивительная идея – воспринимать частицы как квантовые состояния осцилляторов некоего поля – оказалась на редкость плодотворной. Она пронизывает всю современную теоретическую физику. Поле оказалось первичным понятием. Элементарные частицы возникают в результате его квантования.

Применение квантовой механики к полям, описывающим не фотоны, а другие частицы, например электроны и позитроны или пи-мезоны, приводит к очень похожему результату. В пустоте существуют нулевые колебания электрон-позитронного или пионного поля и вообще полей всех возможных частиц. Эти нулевые колебания проявляются в том, что в вакууме возникают и исчезают пары «частица – античастица»: электрон – позитрон, нуклон – антинуклон... Вакуум наполнен такими не вполне родившимися, образующимися и исчезающими частицами – они называются виртуальными (возможными). Но стоит в вакууме столкнуться двум нуклонам или электрону с позитроном, как виртуальные частицы могут превратиться в реальные – при столкновениях рождаются новые частицы.

* * *

Мы рассказали лишь о малой части удивительных свойств пустоты. В последние годы стало известно, что в пустоте под влиянием внешних полей или высокой температуры могут происходить переходы в другие состояния, подобно плавлению твердых тел. Но самое замечательное – это «нулевые колебания» геометрических свойств пространства, которые, возможно, дадут ключ к пониманию связи сил тяготения с другими силами природы.

¹ Школьники знакомы с другой силовой характеристикой магнитного поля – магнитной индукцией. (Прим. ред.)