

В. И. РЫДНИК

УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ



В. И. Рыдник

УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ



МОСКВА
ЭНЕРГОИЗДАТ. 1981

ББК 22.34
Р93
УДК 539.539.12:681.723

Рыдник В. И.

Р93 Увидеть невидимое. — М.: Энергоиздат, 1981. — 184 с., ил.

30 к.

Важнейшим инструментом для проникновения в невидимый мир молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц в течение последних трех веков служит метод рассеяния электромагнитных и корпускулярных волн. Для изучения рассеяния этих волн ученые используют огромный арсенал приборов — от микроскопа до современных трековых камер.

Популярно описаны метод рассеяния и приборы для изучения рассеяния волн и частиц, рассмотрены общетеоретические основы образования и восстановления изображений в рассеянных волнах, принципы расшифровки строения и свойств рассеивающих объектов по картинам рассеяния, конструкции и действие основных приборов для изучения рассеяния

Для читателей со средним образованием, интересующихся успехами физики.

Р 20405—048 55—81 (А). 1704050000
051 (01)—81

ББК 22.34
535



Scan AAW

© Энергоиздат, 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

История науки — это история человеческой любознательности: исследовать и познать неизведанное, увидеть и понять невиданное. Любознательность двигала отважными путешественниками, направляя их в дальнюю дорогу, на поиски неизвестных краев. Но еще в древности люди догадывались, что не всегда надо отправляться в далекие путешествия, чтобы открывать новые миры: можно было познавать их, и не трогаясь с места. На заре развития науки казалось, что познание таких миров — мира звезд и планет, широко открытого взорам всех людей, и мира малых частиц, сокрытого в глубине вещей, — достижимо лишь простым наблюдением и силой мысли. Истинное знание выглядело близким и доступным, надо было лишь правильно вести наблюдения и правильно мыслить, чтобы делать истинные выводы из наблюдений.

Только немногим более трех веков назад люди начали понимать, что одних лишь пассивных наблюдений над природой и одних, пусть даже замечательных по своей прозорливости, мыслей мало — природные явления редко протекают в чистом виде, не замутненном другими, сопутствующими явлениями. Природу надо было ставить в специальные условия, в которых «примесь» сопутствующих явлений была бы невелика, а основное явление выглядело бы достаточно отчетливо. Так возникло представление об эксперименте, т. е. наблюдении, производимом в специально подобранных условиях. Для проведения экспериментов потребовались объективные свидетели наблюдаемого — научные приборы.

Основными качествами, присущими любому прибору, обладает в сущности каждый живой организм, в том числе и организм человека. Точнее, живой организм — это целый комплекс приборов. Органы чувств сигнализируют о состоянии внешней среды, другие приборы следят за состоянием внутренней среды организма. В большинстве своем эти приборы узко специализированы, т. е. реагируют на какой-либо один параметр среды, скажем, глаз — на интенсивность электромагнитного излучения.

Однако приборы, «изобретенные» природой, по своему устройству весьма сложны, а сигналы от них сильно зависят от показаний других приборов в комплексе и, кроме того, состояния той главной «инстанции», куда поступают показания, — нервной системы и ее центра, мозга. В этом и заключается тот основной недостаток, который присущ живым приборам при использовании их для научного познания, — субъективность показаний. Субъективность является величайшим благом для каждого отдельного организма, находящегося в своих неповторимых и порой быстро меняющихся условиях, поскольку позволяет ему правильно реагировать на своеобразие и смену условий. Но она же служит помехой, когда надо познавать то, что является внешним, общим для всех организмов и независимым от их состояния. Это нечто называется природой. Для ее познания потребовались «объективные» научные приборы.

Есть еще одно важное обстоятельство, определяющее характер познания мира человеком, — это его «срединное» положение в мире. Геометрические размеры человека примерно во столько же раз больше масштабов мира фундаментальных частиц, во сколько раз они меньше масштабов наблюдаемой Вселенной. Перед учеными открываются примерно равной протяженности дороги в мегакосмос звезд и галактик и микрокосмос атомов и фундаментальных частиц, не говоря уже о мнимо простой, но столь же трудной и длинной дороге в макрокосмос вещей, непосредственно окружающих человека.

Однако, чтобы познавать мир — вне человека и в нем самом, — одного удобства срединного положения еще мало. Исходные возможности людей для познания природы невелики. Мы обладаем пятью чувствами, из которых одно лишь зрение несет основную нагрузку получения «информации к размышлению». Вместе с тем глаз обладает довольно ограниченными возможностями. Он может воспринимать очень мелкие предметы (т. е. либо близкие маленькие, либо большие, но далекие), даже очень слабо светящиеся или освещенные объекты, но не дает при этом никакого представления об их размерах. Глаз не позволяет различать два или большее число предметов, если их изображения расположены на сетчатке слишком близко друг к другу. Из всего колоссального

диапазона электромагнитных волн глаз в состоянии улавливать только видимый свет — узенькую полоску с длинами волн примерно от 0,4 до 0,8 мкм. Правда, наш организм в состоянии реагировать и на излучения с длинами волн вне этого диапазона — ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, радиоволны, рентгеновское и гамма-излучения. Но получить таким путем представление об источниках этих излучений практически невозможно.

Удобство познавать, находясь «посередине» мира, приобрело полный смысл, лишь когда человеческий гений изобрел приборы, позволяющие увидеть невидимое. Казалось бы, многократное приумножение знаний должно было вызвать лишь восторг первооткрывателей. Этот восторг знаком каждому, кто, впервые взглянув в микроскоп, увидел в нем замечательный мир микроорганизмов и бактерий. Но, как справедливо было замечено еще в древности, «во многа знания есть многая печаль». Наиболее проницательные ученые задались вопросом, а не искажают ли новоизобретенные инструменты познания действительную картину того, что увидено с их помощью. Не приводит ли их использование к новым иллюзиям в дополнение к тем, которые изначально присущи человеческому зрению?

Да, это действительно оказалось так. Впервые с искажениями изображений встретились микроскописты. Линзы, которые использовались в ранних микроскопах, обладали многочисленными несовершенствами. Впоследствии многие из вносимых ими искажений удалось свести к минимуму, но попутно выяснился и предел могущества микроскопа, определяемый длиной волны используемого света. Это были, однако, лишь предвестники той настоящей печали, которая охватила физиков полвека назад. Ее принесло осознание того фундаментального факта, имеющего и большую философскую глубину, что сторонних наблюдателей в мире не существует. Наблюдение — это всегда акт взаимодействия с наблюдаемым. Наблюдая, мы вольно или невольно вмешиваемся в ход событий и процессов в изучаемых объектах.

Подобная мысль даже не приходила в голову ученым, пока исследованию подвергались крупные и массивные объекты. При этом вмешательство наблюдателя было столь незначительным, что наблюдение можно было считать вполне пассивным. Когда же иссле-

дования перешагнули через рубежи микромира, когда объектами изучения стали чрезвычайно маленькие и легкие частицы, оказалось, что наблюдатель весьма активно вмешивается в происходящие с ними события.

Отзвуки этой печали и по сей день слышны в высказываниях некоторых физиков и философов. Но вместе с тем за последние десятилетия возникло и утвердилось правильное понимание взаимодействия приборов и объектов. Век назад, когда появилась теория, объясняющая несовершенства линз, и когда наметились пределы возможностей светового микроскопа, ученые нашли способы исправить линзы, а еще спустя полвека создали электронный микроскоп, который в сотни раз расширил пределы, доступные его оптическому собрату.

Да, прибор и объект, наблюдение и событие неотделимы друг от друга, что особенно ощутимо при исследовании микромира. Но в этом нет ничего страшного. Хотя непривычно и даже как-то неловко слышать ревнителю «чистой» науки, что стороннего, пассивного способа познавать мир не существует, все же наука от этого не страдает. Определив результаты взаимодействия прибора с изучаемым объектом в одних обстоятельствах, современная физика в состоянии предсказывать с достаточной точностью результаты такого же или других взаимодействий в иных обстоятельствах. Именно такое знание необходимо человеку в практической жизни, а в том, что многие предсказания достаточно точны, сомневаться не приходится. Слишком велики и убедительны успехи науки и техники наших дней, достигнутые на этом пути.

Какой смысл мы вкладываем в столь простое слово *увидеть*? На первый взгляд кажется, что ответ даже не требует размышления. Вы говорите кому-либо: «Сегодня я на улице увидел Ивана Ивановича», и этого достаточно, чтобы собеседник вас понял. Может показаться смешным раскладывать эту информацию на отдельные «внутренние» операции. Но тем не менее современная наука видит в таком разложении большой смысл и, более того, тратит на него значительные усилия. Прежде всего, почему вы решили, что это был Иван Иванович, хотя он мог и не поздороваться, а быстро пройти мимо вас? Между мною и вами может даже возникнуть диалог взаимонепонимания: «Ну как, почему я решил?

Это действительно был Иван Иванович! — «А как вы определили это?» — «А что тут определять? Я просто узнал его». — «А как вы его узнали?» — «Да, просто, вижу: лицо знакомое, и шляпа его, и пальто». — «А что значит: лицо знакомое?» — «Ну... ну... значит, что знакомое, а больше ничего и не надо».

Для повседневной жизни, действительно, большего часто и не надо. Человеческое зрение и его инструмент — глаз — родились и развились в процессе биологической эволюции. К самому глазу при этом предъявляются требования скорее количественного, чем качественного характера. Он должен быстро формировать изображения на своей сетчатке; быстро стирать их по миновании надобности, чтобы зафиксировать последующие изображения; уметь работать в широком диапазоне освещенности предметов, вплоть до почти полной темноты; при достаточной яркости формировать цветные изображения, при малой яркости хватит и одноцветных; глазу не обязательно передавать тонкие детали предметов, гораздо важнее фиксировать их контуры и лишь основные, наиболее контрастные подробности.

Немецкий ученый Гельмгольц как-то сказал, что если бы ему попытались продать оптический инструмент с теми недостатками, которые присущи глазу, он бы только выбрал его изготовителя за столь дурную работу. А все дело в том, что природа, создавая и развивая глаз, в том числе глаз человека, не гналась за качеством изображения. Главное, чтобы мозг мог опознать изображение предмета, особенно живого, движущегося, и разобраться в том, не представляет ли этот предмет опасности для обладателя глаза, или, напротив, не может ли предмет стать пищей для одного обладателя. Сам глаз при этом работает как партнер в паре с другим, главным органом — мозгом. Недаром иногда говорят, что глаз — это вынесенный вперед «отросток» мозга. Конечно, сказанное — преувеличение, и его можно оправдать лишь тем, что мы не до конца понимаем работу глаза и еще худшее представление имеем о том, как мозг перерабатывает информацию, которую поставляет ему глаз.

Можно полагать, что в мозгу хранится нечто вроде «видеотеки» различных образов, создаваемой и пополняемой в течение всей жизни живого организма. Такая видеотека, конечно, наиболее

обширна у человека. Для экономии места и быстроты поиска на отдельных ее «полочках» хранятся в закодированном виде только основные, наиболее характерные элементы изображений окружающих предметов, будь то квадрат, треугольник, полосатая шкура кошки, буквы алфавита или лица всех знакомых. Глаз предъявляет мозгу на какие-то доли секунды — обычно этого времени вполне достаточно — изображение знакомого лица, а затем с огромной по обыденным понятиям скоростью начинает работать «вычислительная машина» мозга. Она производит сравнение изображения с теми, что хранятся в видеотеке, убеждается в совпадении с одним из них, прочитывает под ним ярлычок «Иван Иванович» и включает целую систему двигателей, которая заставляет вас, может быть, улыбнуться и протянуть руку для приветствия. Более того, вам удастся зафиксировать всю эту сцену, запомнить ее в общих деталях и спустя какое-то время сообщить о ней вашему собеседнику. Несколько легкомысленный тон, которым все это рассказано, не должен вводить в заблуждение. На сегодняшнем уровне наших знаний четкая, согласованная работа великолепного «тандема» глаз — мозг выглядит ужасающе сложной и во многом еще загадочной.

И вот что важно для нас. Биологическая эволюция создала человеческие глаз и мозг, но усовершенствовала их эволюция социальная, и один из важнейших рычагов этой эволюции — развитие науки, в частности науки о невидимом. При наблюдении невидимого торопиться, как правило, нет нужды: невидимое «нейтрально» относится к наблюдателю, оно не охотится за ним и не является его жертвой. Пусть многие процессы протекают очень быстро, в миллионы раз быстрее, чем в «мгновенье ока». Сегодняшняя техника умеет останавливать мгновенья и растягивать их, на сколько необходимо.

Важнейшее значение приобретает качество изображения невидимого, поскольку сравнивать это невидимое не с чем: в видеотеке нет о нем никаких записей, накопленных в процессе обыденной жизни. Но в том и заключается сила развитого человеческого мозга, что он научился прекрасно работать даже с тем, что отсутствует в его видеотеке. С помощью сложных ненаглядных абстракций, в том числе и математических расчетов, он строит некую модель

происходящих явлений, на основе ее вырабатывает конечное наглядное изображение и его уже сопоставляет с тем, что увидел глаз на изображении, полученном с помощью приборов. И тогда физик может сказать своему собеседнику, что он сегодня увидел не Ивана Ивановича, а, допустим, сигма-гиперон.

Вот такой общий смысл вкладывается в слова *увидеть невидимое*: соединить силой логики и воображения в единую картину то, что часто не создает непосредственных зрительных впечатлений. Увидеть невидимое, таким образом, это нечто большее, чем создать прибор и с его помощью сделать видимым воочию какое-либо явление или событие. Главное — понять то, что означает увиденное, и если это необходимо, усовершенствовать или вовсе заменить прибор, улучшить или изменить понимание увиденного. Именно это надо иметь в виду при чтении нашей книги.

В значительной степени эту книгу еще можно было бы назвать историей развития метода рассеяния. Все видимые объекты в окружающем мире можно условно разделить на два больших класса — самосветящиеся и несамосветящиеся. Самосветящиеся объекты — это Солнце и звезды, лампочка и свеча, светлячок и гнилушка; список можно без труда расширить во много раз. Вместе с тем очень многие предметы, особенно в нашем непосредственном окружении, сами не светятся, они видны потому, что или рассеивают падающее на них излучение от самосветящихся источников, или выступают на фоне рассеивающих свет предметов, поглощая свет сильнее их.

Непроходимой пропасти между двумя этими классами тел нет. Несамосветящийся кусок металла или облако газа можно заставить ярко светиться, нагревая их до достаточно высокой температуры. Другие объекты относятся к обоим классам тел одновременно: например, люминесцентные лампы, в которых рассеиваются электроны и излучается свет. Само рассеяние излучения в конечном счете возможно лишь благодаря его переизлучению «затронутыми» им атомами и молекулами.

Мы уже говорили о том, что в процессе эволюции зрения природа ограничивалась скромными требованиями к глазу: дать представление об общей форме предметов, не вдаваясь в детали. Точно так же один из исторически первых классов задач о рассеянии

(но отнюдь не маловажный и по сей день!) преследовал цель получить сведения об общих свойствах рассеивающих предметов, особенно когда их много, все они одинаковы, слабо связаны друг с другом и в целом составляют рассеивающую среду, например туман. Затем задача усложнилась, когда метод рассеяния был применен к изучению сред, в которых отдельные рассеивающие частицы взаимно связаны и образуют, например, кристаллы. Параллельно с этим метод рассеяния начали применять для исследования строения уже не сред, а самих рассеивающих частиц — сначала атомов и молекул, затем атомных ядер и, наконец, в последние десятилетия, фундаментальных частиц. Метод рассеяния развивается в соответствии с развитием всей физики (и ряда других естественных наук) — от порой «очевидного» внешнего вида к «невероятному» внутреннему строению. Именно на этом пути достигнуты наиболее впечатляющие успехи естествознания и тех областей техники, в которых используются открытия микроскопической структуры макроскопических объектов.

Исследование рассеяния — не единственный способ изучать невидимое. Огромную помощь в этом оказывает также исследование спектров излучения или поглощения различных тел. Есть области науки, в которых метод анализа спектров излучения главенствует (например, астрономия и астрофизика). Есть и такие области, где царствует безраздельно метод анализа рассеяния (например, физика фундаментальных частиц). Но даже в том случае, когда строение объектов изучают в основном по их излучению, приходится принимать во внимание и рассеяние излучения — или в объекте, или на пути от него к наблюдателю, или, наконец, в самом приборе.

Что же такое *рассеяние*? В обыденном смысле этим словом обозначают, как правило, нарушение правильного порядка движения — людей, предметов и даже мыслей. Достаточно привести лишь несколько общих фраз: полиция рассеяла демонстрацию, снаряды рассеялись по некоторой площади, такой-то — рассеянный человек. В физике под рассеянием также понимают нарушение движения квантов излучения или частиц в исходном упорядоченном их потоке, т. е. перераспределение интенсивности в таком потоке. Но смысл в это понятие вкладывается более широкий: движение после

рассеяния необязательно должно быть полностью или частично хаотическим: оно может быть и регулярным, правильным, тоже упорядоченным, но по-другому. Впрочем, такое «правильное» рассеяние физики все же предпочитают называть иными словами: отражение, дифракция. Хочется подчеркнуть, что названными словами описываются разновидности рассеяния, соответствующие тем или иным условиям наблюдения. «Беззаконного», совершенно хаотического во всех отношениях рассеяния в физике, как, впрочем, и во всех природных явлениях, не бывает, рассеяние всегда подчиняется определенным законам, пусть даже они носят статистический характер. Открыть эти законы, перейти с их помощью от наблюдаемой картины рассеяния квантов излучения или частиц к представлению о строении рассеивающей среды или отдельных ее частиц — вот что значит решить задачу о рассеянии.

Из-за ограниченного объема книги автор не мог уделить большого внимания описанию того, что открыто благодаря использованию метода рассеяния (об этом подробно написано во множестве научно-популярных изданий). Основное место в книге занимает описание тех инструментов и приборов, с помощью которых были сделаны эти открытия.

Явления рассеяния многообразны. В них участвуют и кванты излучения, и частицы вещества. Математическое описание даже простых задач о рассеянии чрезвычайно сложно, и нам придется ограничиться лишь качественными соображениями. Различные виды рассеяния обычно рассматривают в разных разделах физики: рассеяние света — в оптике, рассеяние рентгеновского излучения — в физике твердого тела, рассеяние альфа-частиц — в физике атомного ядра, рассеяние, скажем, энергичных протонов — в физике фундаментальных частиц (или, как ее еще называют, физике высоких энергий).

Но физика едина, все ее разделы взаимосвязаны. Это проявляется и в единстве общих закономерностей рассеяния квантов излучения и частиц вещества. Можно надеяться, что описание главных особенностей метода рассеяния, применяющегося во многих областях современной физики, укрепит представление о ее единстве.



Оптические инструменты

Луна

Микроскоп и телескоп можно считать ближайшими потомками очков. Первые очки появились, вероятно, в XIII в., хотя и существуют исторические свидетельства, что принцип очков был известен людям еще в древности. Так, римский император Нерон, по-видимому, страдавший близорукостью, пользовался прозрачным и отшлифованным соответствующим образом кристаллом, чтобы разглядывать удаленные предметы. Конечно, в те времена достаточно крупные и отшлифованные, возможно, в виде линзы драгоценные камни были доступны только могущественным и богатым людям.

Открытие способа получения несравненно более дешевого стекла в раннем средневековье сделало очки гораздо более доступными, но все равно шлифовка стекла требовала определенного искусства (и сегодня точная шлифовка и полировка крупных стекол, например, для телескопов — очень сложный и трудоемкий процесс). Первые стекла имели по сегодняшним понятиям весьма невысокое качество: они были бутылочного цвета, а внутри содержали множество пузырьков воздуха. Постепенно очки становились все более распространенным инструментом для компенсации недостатков зрения, которые в те времена встречались, вероятно, не так уж редко (хотя многие склонны считать, что по мере развития цивилизации человеческое зрение ухудшается).

Очевидно, в те годы и были обнаружены увеличительные свойства очковых стекол — линз. Можно предполагать, что свою родословную *увеличительное стекло (луна)* ведет от линз, изготовленных из прозрачных минералов. Драгоценные камни, как правило, невелики по своим размерам, и это, как мы увидим, явля-

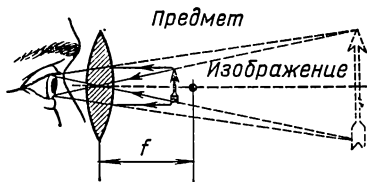


Рис. 1. Получение изображения с помощью лупы

лось одним из больших достоинств изготовленных из них линз. Другими несомненными преимуществами их перед стеклом того времени были бесцветность и хорошая прозрачность многих минералов.

Вспомним, как образуется изображение предмета в лупе (рис. 1). Если предмет поместить в фокальной плоскости линзы, то расходящиеся от каждой его точки лучи света выйдут после преломления в линзе параллельным пучком. Пройдя через хрусталик глаза, они соберутся на сетчатке (разумеется, если глаз нормальный), где и создадут изображение. При этом глаз можно расположить на любом расстоянии от лупы, например на ее фокусном расстоянии. Но уберем лупу, — и предмет удастся наилучшим образом разглядеть, лишь отодвинув глаз на расстояние наилучшего зрения, равное 0,25 м.

Это означает, что угловые размеры изображения предмета на сетчатке глаза α' , когда мы используем лупу, во столько раз больше угла, под которым предмет виден невооруженным глазом, α , во сколько раз расстояние наилучшего зрения больше фокусного расстояния лупы f . Отношение этих углов (обычно они малы, не более нескольких градусов; в противном случае вместо углов необходимо использовать их тангенсы) называют *поперечным увеличением лупы*. От углов можно перейти к линейным размерам предмета l и его изображения l' . Тогда увеличение

$$M = \alpha' / \alpha = l' / l = 25 / f. \quad (1)$$

Теперь становится понятным преимущество линз малых размеров. Увеличение, которого можно достигнуть с помощью лупы, тем больше, чем меньше ее фокусное расстояние. А фокусное рас-

стояние линзы пропорционально радиусу ее кривизны (и обратно пропорционально показателю преломления ее материала). Маленькому кристаллу легче придать малый радиус кривизны и тем самым добиться малого фокусного расстояния, а значит, и большого увеличения.

Основатель научной микроскопии, замечательный голландский микроскопист Левенгук был искуснейшим шлифовщиком минералов. Для изготовления луп он нередко использовал крошечные частички кварцевого песка. Шлифуя прозрачные песчинки в форме почти идеальных шариков, он смог с их помощью изготовить лупы с увеличением более чем в 100 раз, а одна из сохранившихся его луп имеет почти 300-кратное увеличение!

При наблюдении предмета в лупу световые лучи идут от линзы к глазу параллельным, а то и расходящимся (если предмет помещен к лупе ближе, чем на фокусном расстоянии) пучком. Другими словами, изображение предмета является мнимым, находится по ту же сторону от лупы, что и предмет. Если поместить на место глаза фотопластинку, то она не зафиксирует никакого изображения предмета. Это на первый взгляд выглядит парадоксально: что же в таком случае регистрируют светочувствительные клетки сетчатки глаза? Ответ прост: они фиксируют действительное изображение. При рассматривании предмета через лупу в наблюдении участвуют две линзы: лупа и хрусталик глаза. Благодаря хрусталику параллельный или даже расходящийся (но не слишком сильно!) пучок света от линзы становится сходящимся и создает в фокусе хрусталика действительное изображение. Чтобы получить такое изображение на фотопластинке, естественно, нужна дополнительная линза.

Важно понимать, что в действительности увеличенное мнимое изображение предмета, даваемое, например, лупой, есть иллюзия зрения: никакого предмета на месте изображения нет. Тандем глаз — мозг не решает трудную задачу о том, откуда в действительности пришли лучи света и какие преломления или отражения они испытали на своем пути. Он предпочитает простейшее решение: принимает, что лучи света шли только по прямым линиям, и «помещает» предмет там, где он должен быть при разглядывании его невооруженным глазом. Отлично известна и другая подобная

иллюзия, которая возникает, когда мы наблюдаем изображение предмета в зеркале. Если предмет имеет идеальную симметрию правой и левой сторон, а зеркало идеально плоское, то нельзя отличить, видим ли мы сами предмет или его изображение, особенно если зеркало не имеет дефектов и не видна его оправа.

Мозг почти всегда принимает на веру ту информацию, которую приносит ему глаз. И если на сетчатке возникают, например, два одинаковых изображения, даже если они получены с помощью совершенно различных оптических инструментов, мозг «отмечает» эти инструменты и свидетельствует: это один и тот же предмет и находится он там, где его видит невооруженный глаз.

Большинство иллюзий зрения при работе глаза в обычных условиях довольно безвредно, иначе эволюция давно уже выбраковала бы организмы, «склонные» к существенным иллюзиям. Тем не менее проблема образования изображения в оптических инструментах, даже если отвлечься от еще более сложных процессов фиксации изображения с помощью светочувствительных материалов, — вовсе не проста. И то построение хода лучей, которое делают в геометрической оптике, является в сущности лишь первым шагом в ее решении. Но вернемся к рассмотрению лупы.

Каждый, кто когда-либо рассматривал предмет в лупу, знает, что поле зрения не имеет резко очерченных краев: при удалении от центра поля зрения освещенность изображения на периферических участках сетчатки постепенно убывает до нуля. Условно поле зрения ограничивают лучами, которые заполняют не меньше, чем половину площади зрачка. Таким образом, линейные размеры поля зрения зависят от расстояния между лупой и глазом и увеличиваются по мере приближения глаза к лупе. В тот момент, когда расстояние между ними сравнивается с задним фокусным расстоянием лупы, линейные размеры поля зрения становятся равны диаметру лупы. Теперь ясно, какой ценой достигается большое увеличение лупы: при очень малом фокусном расстоянии и предмет, и глаз приходится располагать практически вплотную к лупе. О неудобстве таких условий наблюдения и говорить не приходится.

Но тут же надо сделать оговорку. Лупа — инструмент для получения отчетливого изображения. Глаз же, находящийся в покое,

фиксирует резкое изображение лишь в очень небольшой области поля зрения, с угловыми размерами $1\text{—}2^\circ$, т. е. в области, проецирующейся на центральную ямку сетчатки. Иллюзия одновременного получения резкого изображения намного более широкой области связана с тем, что глаз непрерывно вращается вокруг центра, отстоящего примерно на 15 мм от зрачка. Вследствие быстроты такого вращения зрительные образы, полученные в разных точках поля зрения, успевают благодаря инерционности зрения наложиться друг на друга. По этой причине при наблюдении в лупу область, в которой фиксируется резкое изображение, значительно расширяется.

Особо следует сказать о яркости изображения. Когда диаметр лупы больше диаметра зрачка (при этом фокусное расстояние лупы довольно велико, а увеличение мало), часть предмета, которая отображается лучами, заполняющими площадь зрачка, имеет такую же яркость, как и при наблюдении невооруженным глазом (конечно, если игнорировать малые потери света при отражении и рассеянии в лупе). Вне этих пределов яркость изображения постепенно уменьшается к краям поля зрения. В лупах же с малым фокусным расстоянием, диаметр которых меньше площади зрачка, даже в центре поля зрения яркость изображения меньше яркости предмета, наблюдаемого невооруженным глазом. Вместе с тем ярко осветить предмет, находящийся почти вплотную к лупе с большим увеличением, чрезвычайно трудно.

И все же, несмотря на эти недостатки, лупа сыграла огромную роль в развитии науки. Лупа была не только предшественницей микроскопа, но и полноправной его конкуренткой, по крайней мере, в течение всего XVII в., пока микроскоп переживал еще период младенчества. Английский естествоиспытатель Гук именовал лупу «простым микроскопом». (В те годы в лупу любили разглядывать мелких насекомых, поэтому ее часто называли также «блошиным стеклом».) Гук писал, что «при разглядывании в лупу предмет кажется намного более ясным и отчетливым и более крупным, чем в двойной микроскоп... ко всему еще при наблюдении в лупу легко избежать появления цветов, которые портят изображение в двойном микроскопе». Дело в том, что лупе не присуща хроматическая аберрация.

Искусство изготовления луп в XVII в. достигло высочайшего уровня. Уже упоминавшийся Левенгук собственноручно изготовил около 500 линз. Как правило, все эти лупы имели чрезвычайно малые размеры и отличались поразительно высоким качеством изготовления. Так, диаметр одной из луп, дававшей увеличение в 275 раз и имевшей поле зрения 5 см, был около 1 см. Интересно, что такие увеличение и поле зрения превышали те, которых смог достичь знаменитый оптик Цейсс два века спустя! Другая лупа Левенгука, дошедшая до нас, имеет толщину 1 мм и радиус кривизны 0,75 мм. При этом стоит учесть, что подобные лупы обрабатывались не под микроскопом, а «под» невооруженным глазом! Линзы устанавливали между двумя металлическими вертикальными пластинками, в которых были высверлены маленькие отверстия для пропускания света. Объект наблюдения закрепляли на кончике острия и выводили в фокус лупы специальными винтами. Инструмент был удивительно компактным и легко помещался в жилетном кармане.

Левенгук был первым, кому посчастливилось увидеть простейшие организмы и бактерии. Результаты своих наблюдений он сообщал в Лондонское королевское общество естествоиспытателей; первые его письма в это общество датированы 1674 г. Сделанные им открытия часто опережали успехи тех исследователей, которые пользовались «двойным микроскопом», а истинная сущность его открытий стала ясна ученым только более чем век спустя!

В последующие годы лупу совершенствовали. Как одиночной линзе лупе присуще множество аберраций, хотя нередко они и не портят существенно изображения. В XIX в. появились первые составные лупы, сначала из двух не соединенных друг с другом линз, а затем — из двух и большего числа склеенных линз, имеющих сложную форму. Но в конце концов лупа не выдержала соревнования с микроскопом. Сегодняшний ее удел — создавать изображения при сравнительно небольших увеличениях (очень большим считается увеличение в 40 раз), в основном она применяется при контроле промышленных изделий. В таких лупах устранены практически все виды аберраций. Наиболее же распространены лупы малого увеличения (до семи раз). Поскольку такие лупы имеют сравнительно большое фокусное расстояние, а диаметр зрачка гла-

за мал, в глаз попадают лишь узкие пучки лучей, проходящие вблизи оптической оси лупы. Аберрации, связанные с широкими пучками лучей, можно при этом не принимать во внимание, поэтому лупы малого увеличения обычно изготавливают из одной линзы.

Микроскоп и телескоп

XVII в. с полным основанием называют временем рождения новой науки, девизом которой стало беспристрастное наблюдение и непредвзятое заключение, не опирающееся на мнения никаких авторитетов. Развития такой науки требовала нарождающаяся промышленность, и практическим инструментом науки становились не схоластические богословские диспуты, а измерительные приборы. Именно эта причина обусловила появление *микроскопа* и *телескопа*. Конечно, наблюдения, для которых были предназначены эти инструменты, не вызывались в те годы непосредственными запросами промышленности: до этого и науке и производству предстояло пройти еще долгий путь. Но наука обладает замечательной способностью предвидения. Когда технике и медицине XIX столетия понадобилось глубже освоить окружающий живой и неживой мир, а технике нашего века — еще и космическое пространство, к их услугам оказались задолго до того созданные инструменты, а также огромный накопленный багаж сделанных с их помощью наблюдений.

Не удивительно, что микроскоп и телескоп появились почти одновременно. Оба они были созданы при совершенствовании лупы, когда добивались не только большего увеличения линз, но и более совершенного изображения и большего удобства в работе. Основная идея этого усовершенствования выглядит чрезвычайно просто. Если с помощью лупы мы наблюдаем увеличенное изображение предмета, то почему бы не заменить сам предмет его увеличенным изображением и не рассматривать «изображение изображения»? Другими словами, вместо одной использовать две линзы, расположив их одну за другой на некотором расстоянии по ходу световых лучей.

Однако сразу ясно, что первую из линз использовать в «режиме» лупы нельзя: по выходе из лупы пучок световых лучей оказывается параллельным или даже расходящимся, а нужно полу-

чить сходящийся пучок, который давал бы действительное, а не мнимое изображение. Это изображение уже можно будет рассматривать через вторую линзу, как через лупу. Ясно также, что между микроскопом и телескопом не должно быть принципиального различия: с помощью и того и другого мы получаем увеличенные изображения не больших или маленьких по своим размерам объектов, а предметов, занимающих небольшое поле на сетчатке глаза.

Микроскоп и телескоп различаются лишь картиной распределения света в исходном его потоке. От далекой звезды лучи попадают в инструмент практически параллельным пучком, поскольку размеры входного его отверстия во много раз меньше размеров звезды, а от близкого предмета, например бактерии, — широко расходящимся пучком, поскольку размер первой линзы намного превосходит размеры предмета. Это различие непринципиально (о чем можно судить хотя бы по тому, что невооруженный глаз сам работает в обоих «режимах»), и микроскоп можно легко превратить в телескоп (и наоборот) взаимным перемещением линз. Так, Галилей в свой телескоп мог разглядывать и спутники Юпитера, и комнатных мух; последние, как он писал, выглядели огромными, словно куры. Для этого достаточно было в телескопе лишь немного передвинуть линзы.

Галилея иногда называют изобретателем микроскопа, но это вряд ли правильно. Идея сочетания двух линз, можно сказать, носилась в воздухе Европы в конце XVI столетия. Есть исторические свидетельства, что эта идея впервые получила воплощение в Голландии на рубеже XVI и XVII вв. Некоторые историки науки считают первыми создателями микроскопа Ханса Янсена, его сына Захарию и Ханса Липперсхей из маленького городка Мидделбурга. Из описания созданных ими инструментов, которое в те годы сделал один любознательный дипломат, известно, что они имели примерно современные размеры и незначительно отличавшееся от нынешнего устройство. Микроскоп Янсенов имел длину 0,45 м, диаметр $5 \cdot 10^{-2}$ м и состоял из трех трубочек. В две из них были вставлены передняя линза — объектив и задняя — окуляр. Третья трубочка, в которую были вставлены две другие, служила как направляющая для взаимного перемещения линз. Прибор был уста-

новлен на изящной подставке, украшенной изображениями трех дельфинов.

Мастерам того времени не был свойствен тот глгий рационализм техники еще недавних дней, который набил оскомину ученым и потребовал введения в техническое конструирование эстетических критериев. Конечно, «дизайн» XVII столетия разительно отличался от современного художественного оформления научной аппаратуры, нередко он преследовал и развлекательные цели, особенно когда какой-нибудь простой научный прибор становился игрушкой в богатых домах. Но все же немногочисленные в ту пору исследователи-энтузиасты, да и мастера, изготовлявшие приборы для них, не были чужды восприятия красоты. И поиски соединения «сухой» науки с «живой» эстетикой, которые велись уже в те годы, не столько вызывают у нас снисходительную улыбку, сколько наводят на серьезные размышления о необходимости гармонии между наукой и искусством.

Но вернемся к первым микроскопам. Отец и сын Янсены изготовили свой прибор из двух выпуклых линз. Подобные микроскопы относятся к так называемому кеплеровскому типу: впервые его описал немецкий астроном Кеплер в своей книге «Диоптрика», вышедшей в 1611 г. Инструмент галилеевского типа (телескоп) состоял из выпуклого (собирающего) объектива и вогнутого (рассеивающего) окуляра, поскольку в основном был предназначен для астрономических наблюдений. Использование его в качестве микроскопа, конечно, не было затруднительным, но в этой роли он становился неудобным для работы. Расстояние между линзами оказалось чрезмерно большим: первый «микроскоп-телескоп» Галилея имел длину труб около 5 м. Правда, через некоторое время Галилей уменьшил его размеры, доведя их до «размеров обеденного стола». Все равно, даже при этом он проигрывал в сравнении с гораздо более компактными микроскопами кеплеровского типа. Кроме того, при изменении расстояния между линзами сильно уменьшалось поле зрения микроскопа, поэтому микроскоп галилеевского типа не получил дальнейшего развития, хотя еще и в XIX в. использовался в качестве «простого микроскопа» для небольших увеличений — в виде так называемой лупы Брюкке. Ее преимущество состоит в том, что благодаря сравнительно большо-

му расстоянию между предметом и объективом можно легко манипулировать предметом, например резать его на части, не выводя из установки для наблюдения.

Кстати, с размерами первых микроскопов связано забавное недоразумение. В старых книгах по оптике можно нередко встретить изображения огромных микроскопов, перед которыми на высокой подставке, заглядывая в окуляр, стоят или сидят наблюдатели. Такую иллюстрацию еще можно было бы отнести к первому инструменту Галилея, но уж никак не к компактным инструментам кеплеровского типа.

Это недоразумение, скорее всего, связано с тем, что иллюстраторы первых книг по оптике не имели представления о настоящих микроскопах, а ученых мало заботило такое искажение действительности. Рисуя эскизы для иллюстраторов, ученые вместо наблюдателя изображали условное обозначение человеческого глаза. Иллюстраторы же, полагая, что это условное обозначение самого наблюдателя, изображали по своему разумению вместо глаза человеческую фигуру такого же размера! Конечно, при этом искажение реальных размеров приборов было чудовищным.

Пока перед первыми любознательными исследователями все шире раскрывался невидимый дотоле поразительный мир малых существ и деталей строения привычных предметов, микроскоп понемногу совершенствовался. Усовершенствования имели разный характер, но преследовали одну цель: добиться большего удобства наблюдений. В XVIII в. был создан штатив, улучшилась механика перемещения трубочек с линзами для легкой, точной и вместе с тем стабильной наводки на фокус. Затем появились предметный столик, специальные устройства для освещения предмета, наконец, бинокулярный микроскоп с одним объективом. (Есть основания полагать, что бинокулярный микроскоп с двумя объективами, т. е. по существу микроскоп с полностью разделенными оптическими системами для каждого глаза, был изготовлен еще Липперсхеем.)

Предмет, будучи помещен в фокусе объектива или еще ближе к нему, не дает действительного изображения, значит, его нужно отодвинуть подальше и расположить на расстоянии, большем фокусного и меньшим двойного фокусного расстояния объектива. Тогда за удвоенным задним фокусным расстоянием объектива

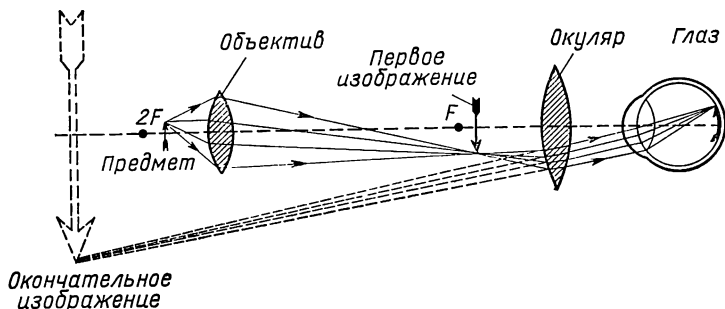


Рис. 2. Получение изображения с помощью микроскопа

возникнет действительное увеличенное перевернутое изображение предмета. В свою очередь, это изображение располагается ближе фокусного расстояния окуляра, который действует как лупа.

Общее увеличение, даваемое обеими линзами, равно произведению увеличений каждой из них:

$$M = M_1 M_2 = (\Delta / f_1) (25 / f_2), \quad (2)$$

где Δ — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра; f_1 и f_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно. Расстояние Δ часто называют оптической длиной тубуса (трубы) микроскопа.

Из рассмотрения хода лучей в микроскопе (рис. 2) видно, что для наблюдения промежуточного изображения, даваемого объективом, требуется окуляр довольно большого диаметра. Некоторые из первых микроскопов имели форму, напоминающую дамские шляпы-котелки, с утолщением на конце, обращенном к глазу, поскольку размеры окуляра существенно превосходили размеры объектива. Уменьшить размеры окулярной линзы позволила изобретенная голландским ученым Гюйгенсом в XVII в. тубусная линза.

Теперь предмет помещается в фокусе объектива, и из объектива выходит параллельный пучок лучей, который не создает изоб-

ражения. Оно появляется, только когда пучок пройдет через тубусную линзу, в ее задней фокальной плоскости. В этом случае, конечно, оптическая длина тубуса утрачивает свой смысл (она становится равной бесконечности). Вместо нее в формулу для увеличения вводят фокусное расстояние тубусной линзы.

В современных микроскопах оптическая длина тубуса обычно составляет 0,15—0,20 м (у нас в стране приняты две стандартные длины $\Delta=0,16$ и 0,19 м). Комбинированием различных объективов и окуляров добиваются разных увеличений. Так, при вполне доступных для изготовления объективе и окуляре с фокусными расстояниями соответственно $1,5 \cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} м можно получить увеличение микроскопа до 2500 раз. Именно раздельная, двухступенчатая система увеличения обусловила важнейшие преимущества микроскопа перед лупой. Один и тот же предмет можно наблюдать при различных увеличениях, не трогая объектива и меняя только окуляры. Это особенно важно при работе с так называемым *иммерсионным* объективом, когда между предметом и линзой объектива находится не воздух, а жидкая среда с большим показателем преломления, так что для замены линзы потребовалось бы менять и наблюдаемый препарат.

Микроскоп позволяет не только увидеть, но и измерить помещенный перед ним предмет. Для этого в плоскости, где располагается предмет, помещают объект-микрометр — стеклянную шкалу с делениями через каждые 10^{-5} м, а в фокальной плоскости окуляра — шкалу с делениями через каждые 10^{-4} м. Подсчитав, сколько делений m на изображении объективной шкалы соответствует n делениям окулярной шкалы, можно определить увеличение, даваемое объективом: $M_1=10 \ n/m$. Затем отмечают, сколько делений окулярной шкалы n' занимает изображение предмета или отдельных его частей, и отсюда находят истинный размер предмета $l=0,1n'/M_1$.

И это еще далеко не все преимущества микроскопа перед лупой. Для расширения возможностей наблюдения оптика микроскопа позволяет манипулировать световыми пучками, например поляризовать световые пучки, вводить так называемый фазовый контраст, о котором подробно рассказано ниже. Линзам, используемым в микроскопе, как и любым линзам, присущи aberrации. Распо-

лагая и объективом, и окуляром, можно взаимно компенсировать недостатки объектива недостатками окуляра. Это стало ясно в XIX в., когда появилась теория линзовых аберраций.

Однако проблема получения неискаженного и отчетливого изображения предметов в микроскопе возникла еще при его появлении. Лупу первое время предпочитали двойному микроскопу именно потому, что она давала более четкое изображение наблюдаемых предметов. Какой толк в большом увеличении, если при этом нельзя разобраться в том, что, собственно, увеличено! Другими словами, встал вопрос о том, как наряду с большим увеличением добиться хорошего разрешения микроскопа.

Постепенно накапливался опыт. Появились первые составные, или склеенные, линзы, в которых в значительной мере удалось устранить наиболее неприятные аберрации и тем самым повысить качество изображения. Было обнаружено, что изображения становятся более отчетливыми, если предмет освещают не вдоль оси микроскопа, а под углом к ней. Наконец, в середине XIX в. вспомнили, а вернее, «переоткрыли» старое открытие Гука, который еще за два века до того отметил, что предметы в микроскоп видны отчетливее, если они смочены жидкостью. Обнаружили, что боковое освещение предмета расширяет диапазон углов, под которыми свет входит в объектив, или, говоря современным языком, повышает апертуру объектива. Но когда объектив был «сухим», т. е. между покровным стеклом для предмета и передней линзой объектива находился воздух, преимущества увеличенной апертуры почти целиком сводило на нет усиление отражения света от периферических участков линз. Преимущество заполнения этого воздушного промежутка жидкостью (было перепробовано великое множество жидкостей, пока, наконец, не остановились на немногих, не портящих объектива, — обычно маслах) и состояло в том, что жидкость сильно ослабляла отражение света. Такие иммерсионные («погруженные в жидкость») объективы впервые продемонстрировал итальянский ученый Амичи в 1855 г. на Парижской промышленной выставке, после чего они начали завоевывать признание. Серьезного успеха добился англичанин Хартнак в 1859 г., когда ему удалось создать иммерсионные объективы с апертурным углом $87,5^\circ$. Ясно, что достижение такого угла, когда почти

весь свет от несамосветящегося или пропускающего свет предмета входит в объектив, было непростой задачей. Ведь нельзя же увеличивать диаметр объектива чуть ли не до бесконечности, сохраняя при этом кривизну его поверхности, соответствующую малому фокусному расстоянию.

Таким образом, эмпирическим путем было найдено много интересных конструкторских решений. Однако находки в конструировании объективов не имели твердой теоретической основы. Такая теория была нужна, и она вскоре появилась.

О теории микроскопа

Камни для постройки теоретического здания уже имелись: это была волновая теория света, созданная в начале XIX столетия Юнгом и Френелем, а также разработанная Швердом теория действия дифракционной решетки Фраунгофера. Оставалось только из этих камней сложить теорию действия оптических приборов. Важнейший шаг на этом пути сделал немецкий физик Аббе — технический консультант известной уже в XIX в. оптической фирмы «Карл Цейсс». Основную работу — построение теории и многочисленные эксперименты по ее проверке — Аббе провел в 1866—1870 гг., а спустя еще три года опубликовал свою теорию образования изображения в микроскопе.

Любой самосветящийся или освещаемый предмет является источником световых волн. Нас сейчас не будет интересовать их природа — достаточно того, что они подчиняются законам, общим для всех видов волн. Волны испытывают дифракцию, если на их пути встречаются препятствия, и благодаря ей в той или иной степени заходят в область волновой тени. Такими препятствиями в оптических системах являются оправы линз и специальные ограничивающие диафрагмы, вырезающие отдельные участки из всего светового пучка, идущего от предмета. Рассчитать распределение светового потока за препятствием позволяет известный принцип Гюйгенса — Френеля.

Гюйгенс, чтобы определить, как распространяется световая волна от ее источника, принял, что в каждый момент своего распространения фронт волны доходит до ряда точек среды, которые

в свою очередь становятся источниками вторичных волн. Линия, огибающая фронты вторичных сферических волн, и дает положение фронта распространяющейся волны в следующий момент времени. Френель объяснил и дополнил такой способ построения фронта волны. Огибающая вторичных волн дает положение фронта волны потому, что только на ней вторичные волны в результате взаимной интерференции имеют отличную от нуля амплитуду. Метод получения волновой картины и состоит в том, чтобы просуммировать амплитуды волн от всех вторичных источников, возбужденных первичной волной, с учетом различия в расстоянии от них до точки наблюдения. Это различие ведет к разнице в фазах отдельных волн, приходящих в точку наблюдения, что при интерференции волн приводит к различной степени их взаимного усиления или ослабления.

Именно таким образом можно вычислить распределение светового потока от точечного источника света («светящейся точки») после того, как свет прошел через линзу. Для простоты считают, что линза представляет собой любую сферическую поверхность, отделяющую одно пространство от другого. Пространство, где находится точечный источник света, принято называть пространством предметов, а второе, за линзой, — пространством изображений. В нашем случае оба пространства отличаются друг от друга только своим показателем преломления.

Плоская волна от бесконечно удаленного предмета (опять же, взятая для простоты: можно рассматривать падающую волну и более сложной формы), преломившись на выпуклой сферической поверхности раздела двух сред, превращается в пространстве изображений в сходящуюся сферическую волну и в фокальной плоскости дает изображение точки. Будем считать, что самой поверхности раздела не присуща сферическая аберрация. Видно, что даже в этом случае из-за дифракции световых волн на краях оправы, в которую заключена поверхность, изображение точки не будет точечным.

Расчет по методу Гюйгенса — Френеля, хорошо подтверждаемый и экспериментальными наблюдениями, показывает, что изображение будет иметь вид кружка конечных размеров, окруженного темными и светлыми кольцами (рис. 3, а). Интенсивность колец

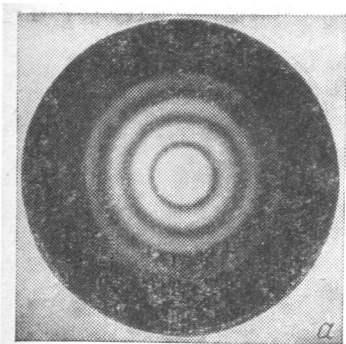
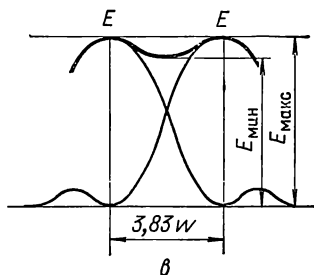
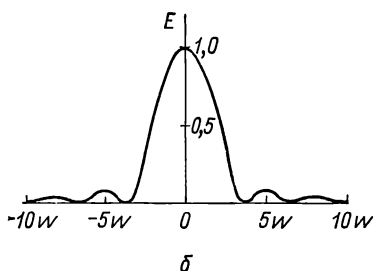


Рис. 3. Дифракционные явления в изображениях светящихся точек:

a — дифракционные кольца на изображении точки; *б* — распределение освещенности на изображении точки; *в* — распределение освещенности на изображении двух точек, расположенных на расстоянии, соответствующем критерию Рэлея



быстро уменьшается по мере удаления от центра кружка, соответствующего идеальному изображению точки. В качестве единицы расстояния по радиусу выбрана величина $w = \pi n' (r'/\lambda) D/R$, где n' — показатель преломления в пространстве изображений; λ — длина световой волны; r' — расстояние от центра кружка; R — радиус кривизны поверхности раздела; D — диаметр оправы, в которую она заключена. Единицей измерения по оси ординат считается освещенность в центре кружка. Численный расчет распределения освещенности был выполнен в 30-х годах прошлого века ирландским ученым Эйри; он показал, что радиус центрального светлого кружка составляет $3,83 w$. На него приходится почти 84% всего светового потока (рис. 3, б).

Поместим в пространстве предметов возле первой светящейся точки вторую. При каких условиях мы увидим изображения обеих точек порознь, т. е. разрешим их? Оказывается, эта задача решается по-разному в зависимости от того, являются ли эти точки самосветящимися или же они видны лишь при постороннем освещении, и от того, какой характер имеет само освещение. Ясно, что первый случай имеет значение для телескопа, а второй — для микроскопа.

Поскольку в результате дифракции изображение светящихся точек получается в виде кружков, общее их изображение будет иметь довольно сложный вид. Две светлые области при очень близких изображениях точек сольются практически в одну, и лишь при постепенном раздвигании точек посередине между ними начнет вырисовываться несколько более темный участок. Вопрос заключается в том, каким должен быть контраст этого более темного участка с более светлыми, чтобы можно было разделить изображения точек.

Минимальный ощутимый контраст зависит от освещенности изображения, его размеров, цвета, длительности разглядывания изображения и индивидуальных качеств наблюдателя. Век назад эти данные еще никому не были известны, но уже тогда было ясно, что нужен некий объективный критерий, не зависящий от наблюдателя и в равной мере подходящий для разных условий наблюдения, в том числе и для любых абсолютных яркостей или освещенностей объекта. В качестве такого критерия английский физик Рэлей принял, что две точки будут видны раздельно, когда центральный максимум освещенности изображения одной из точек совпадет с первым минимумом освещенности (первым темным кольцом) изображения другой (рис. 3, в). Тогда можно подсчитать, что освещенность в середине темной «перемычки», на расстоянии $3,83 \lambda$, между светлыми участками составит 77,5% максимальной, т. е. контраст будет равен 22,5%. Отсюда и находят значение r' — наименьшего разрешимого расстояния (или *предельного разрешения*) в пространстве изображений:

$$r' = 1,22\lambda R/n'D. \quad (3)$$

Введем важную для дальнейшего рассмотрения величину

$A' = n'D/2R$. Легко сообразить, что $D/2R = \sin u'$ есть синус апертурного угла, т. е. угла охвата светового пучка линзой или сферической поверхностью (в пространстве изображений). Величина $A' = n'\sin u'$ была названа *числовой апертурой* с тем, чтобы подчеркнуть ее безразмерный характер. От числовой апертуры в пространстве изображений можно перейти к числовой апертуре в пространстве предметов. Для этого, в сущности, нужно лишь, чтобы сферическая поверхность раздела была лишена сферической аберрации. Тогда апертуры связаны очень простым соотношением — условием синусов Аббе: $A = M_1 A'$, где M_1 — увеличение, даваемое поверхностью. А отсюда уже получается важная формула для предельного разрешения двух светящихся точек:

$$r = 0,61\lambda/A = 0,61\lambda/n \sin u. \quad (4)$$

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Даже если в качестве минимального контраста взять не упомянутые выше 22,5%, а только, скажем, 5%, то это будет соответствовать радиусу центрального кружка не 3,83 ω , а 3,3 ω , и r изменится лишь примерно на 15%. Важно, что «субъективная» оценка разрешения не намного отличается от «объективной». А поскольку $\sin u$ не может превышать 1 и показатель преломления обычно не бывает больше примерно 1,5 (для стекол), A в наиболее благоприятном случае не больше 1,4 и тогда $r \approx 0,4\lambda$. Именно это подразумевают, когда говорят, что предельное разрешение оптической системы имеет порядок длины волны падающего или испускаемого света.

Из формулы (4) можно оценить также (при контрасте 5%) предельное угловое разрешение, даваемое объективом телескопа:

$$\alpha = 0,12/D. \quad (5)$$

Здесь α выражается в угловых секундах; D — диаметр оправы объектива, м. Например, для линзового телескопа (телескопа-рефрактора) с диаметром объектива 1 м предельное угловое разрешение $\alpha = 0,12''$.

Формулы (4), (5) для разрешения справедливы, когда точки светятся независимо одна от другой. Это могут быть звезды или детали предмета, освещаемые световыми волнами от разных участ-

ков источника света. Но когда на обе точки попадают лишь разные участки фронта одной и той же волны, положение меняется.

Теперь мы уже не имеем права складывать освещенности или интенсивности света непосредственно, как это делалось выше. Теперь световые пучки от каждой из точек интерферируют друг с другом так, что складывать сначала нужно амплитуды волн с учетом соотношений между их фазами. Только после этого полученную сумму можно будет возводить в квадрат, чтобы получить распределение интенсивности света или освещенности на изображении.

Если построить новое распределение в соответствии с тем, как это было сделано выше, то мы увидим, что при расстоянии $3,83 \lambda$ между изображениями двух точек еще нет контраста; они сливаются. Чтобы этот контраст появился и точки удалось разрешить, их нужно раздвинуть еще на 30—40%. Иными словами, освещение «общей волной», или, как его называют физики, когерентное освещение, ухудшает разрешение микроскопа.

О чрезвычайно важном понятии когерентности нам предстоит еще большой разговор. Когерентное освещение широко применяется в так называемом интерференционном микроскопе и его современной разновидности — голографическом микроскопе. А пока вернемся к формуле для разрешения в случае двух независимо излучающих свет точек (несущественно — самосветящихся или освещаемых). Этими точками могут быть и две близко расположенные в поле зрения звезды, и два участка микроскопического объекта. Из формулы (4) сразу видно, почему увеличение размеров объектива или введение иммерсионной жидкости между предметом и объективом делает изображение более отчетливым. Ведь при одном и том же фокусном расстоянии объектива и неизменном расстоянии предмета от него увеличение размеров «зрачка» объектива (открытой свету его части) приводит к возрастанию апертурного угла u , значит, и его синуса. А введение жидкости (с показателем преломления $n > 1$) вместо воздуха ($n = 1$) еще более уменьшает r .

Осталось понять, почему разрешение улучшается при косом освещении предметов в микроскопе. Для этого сначала поговорим о самой осветительной системе микроскопа. В подавляющем боль-

шинстве случаев через микроскоп рассматривают несамосветящиеся предметы. Естественные условия освещения непостоянны, зависят от времени суток, погоды и других факторов. Нужны искусственные источники освещения, но обычно они невелики по своим размерам, а светом требуется заполнить всю апертуру объектива. Источник света вместе с тем должен обладать достаточной яркостью. Необходимо как можно более равномерное освещение поля зрения микроскопа. Надо также учитывать, что источник света (обычно лампочка накаливания) выделяет много тепловой энергии, поэтому его нельзя располагать близко к предмету или объективу. Кроме перечисленных, существует множество других требований.

В связи с этим источник освещения помещают в стороне от микроскопа, свет от него собирают в почти параллельный пучок с помощью специальной коллекторной линзы, а размеры светового пучка ограничивают с помощью специальной полевой диафрагмы осветителя. Этот пучок идет горизонтально, и чтобы повернуть его в направлении, соответствующем установке тубуса микроскопа, пользуются зеркалом. За зеркалом следует апертурная диафрагма регулируемого диаметра, которая позволяет менять поперечные размеры светового пучка, а за этой диафрагмой располагается конденсор. Именно благодаря конденсорной линзе можно получить пучок света, заполняющий всю открытую часть объектива; но для этого апертура конденсора должна быть не меньше апертуры объектива. Если используется иммерсионный объектив, то между конденсором и предметом тоже надо вводить иммерсионную жидкость.

В этом случае свет проходит через прозрачный предмет в объектив. Для непрозрачных предметов такая система, очевидно, не подходит, и предмет освещают через объектив, причем сам он и выполняет роль конденсора. Подобная система называется опак-иллюминатором (от французского слова *opaque* — непрозрачный). При этом лучи света отражаются от предмета и возвращаются в объектив. После прохождения через конденсор свет падает на освещаемый предмет широким параллельным пучком, причем ось пучка для равномерного освещения поля зрения должна совпадать с оптической осью микроскопа.

Дифрагированный свет в микроскопе

Чтобы лучше разобраться в действии микроскопа, не будем ограничиваться рассмотрением падения на предмет пучка, параллельного оптической оси. Структура предмета нередко имеет периодический вид (например, так выглядят отдельные клетки пробки или высушенных растений, поперечно-полосатая мускулатура и т. п.). Выше мы говорили о разрешении двух смежных точек, а сейчас уместно поставить вопрос о предельном разрешении периодической структуры из отдельных линейных элементов, которые поочередно то сильнее, то слабее поглощают свет. Такой вопрос и поставил перед собой Аббе и для ответа на него использовал то, что было уже известно о физическом аналоге подобных структур — *дифракционной решетке*.

Дифракционная решетка, как и любое препятствие для света, разделяет падающий на нее пучок света на отдельные пучки. Один из них — центральный — проходит через решетку по тому же направлению, что и исходный пучок, а по обе стороны от него симметрично располагаются пучки первого, второго и т. д. порядков (они соответствуют пучкам, которые в случае светящихся точек образуют дифракционные светлые кольца разных порядков). Если исходный луч образует с перпендикуляром к решетке угол α_0 , а дифрагированный луч некоторого m -го порядка — угол α_m , то между углами существует следующее соотношение (рис. 4):

$$\sin \alpha_0 - \sin \alpha_m = m\lambda/nd, \quad (6)$$

где λ — длина волны света; n — показатель преломления; d — период решетки, т. е. кратчайшее расстояние между двумя ее линейными элементами (например, если решетка нарезана на стекле, то d — расстояние между соседними царапинами).

Рассмотрим изображение этой решетки через микроскоп. При каком условии можно определить очень малый период этой решетки, т. е. разрешить расстояние d ? Лучи света от источника испытывают дифракцию на предмете, в результате чего возникнут дифрагированные пучки нулевого, первого, второго и т. д. порядков (нулевой порядок соответствует неотклоненному лучу). Пройдя объектив, все эти пучки сойдутся в его фокальной плоскости,

каждый в своем фокусе, где возникнет центральное изображение предмета, окруженное дифракционными его изображениями. (Картина напоминает ту, что наблюдалась для двух светящихся точек, только теперь дифракция происходит не на оправе объектива, а на предмете, и поэтому дифракционные изображения, естественно, зависят от его структуры.) Эти изображения, кстати, можно наблюдать непосредственно глазом, если вывернуть окуляр из микроскопа. Окончательное же изображение (в плоскости сетчатки или фотопластинки) возникает благодаря интерференции всех попавших в объектив дифрагированных и центрального пучков, идущих в каждую точку этой плоскости.

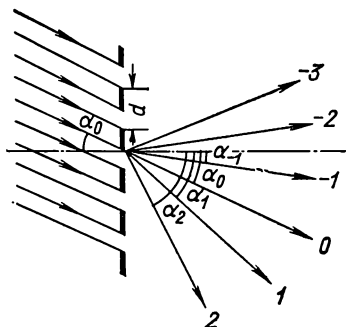


Рис. 4. Дифракция света на одномерной решетке:

α_0 — угол падения параллельного пучка света на решетку; $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ — углы для дифрагированных пучков; d — период решетки

Полное подобие между предметом и его изображением будет, если оптическая система охватит весь световой поток, идущий от предмета (считаем, что сама она искажений не вносит). Только в таком потоке заключена вся информация о связанных с рассеянием характеристиках предмета, по которым мы и судим о его строении. В данном случае эти характеристики связаны с распределением поглощательной способности предмета, имеющим периодический характер. Но ни одна оптическая система не в состоянии охватить весь поток, апертурный угол объектива никогда не может достичь точно 90° . Правда, сейчас нам этого и не надо. Мы интересуемся только одной характеристикой решетки — ее периодом. Для проявления ее в изображении достаточно, чтобы в объектив попал дифрагированный пучок хотя бы первого порядка. Если угол, который составляет направление падения пучка с плоскостью решетки, равен нулю, то для угла между исходным и

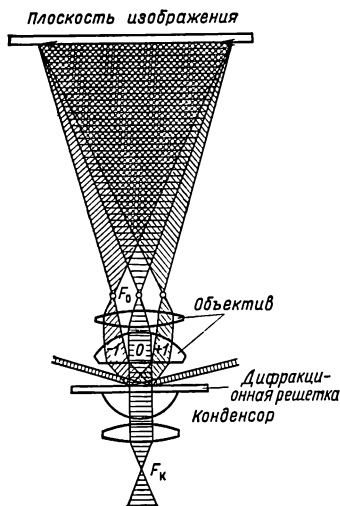


Рис. 5. Образование изображения в микроскопе:

0 — неотклоненный пучок; $-1, +1$ — дифрагированные в первом порядке пучки; F_k — передний фокус конденсора; F_0 — задний фокус объектива

дифрагированным в первом порядке пучками согласно формуле (6) находим: $\sin \alpha_1 = \lambda/nd$, и этот угол не должен превышать апертурного угла объектива. Другими словами, должно выполняться соотношение $\sin u \geq \lambda/nd$.

Если значение α очень мало, то даже при большой апертуре это условие может не выполняться. Для того и нужно косое освещение. При этом, естественно, оба дифрагированных пучка первого порядка в объектив не попадут, попадет лишь один, но достаточно и его (рис. 5). Поскольку несущественно, «левый» это или «правый» дифрагированный пучок, т. е. имеет он «положительный» или «отрицательный» порядок дифракции, из формулы (6) можно получить для «отрицательного пучка первого порядка»:

$$d = \lambda / (n \sin \alpha_0 + n \sin \alpha_{-1}) . \quad (7)$$

Но величина $n \sin \alpha_0 = A_k$ — числовая апертура конденсора, а $n \sin \alpha_{-1} = A_{об}$ — числовая апертура объектива, и, таким образом, $d \geq \lambda / (A_k + A_{об})$.

Практически, как уже говорилось, апертура конденсора не превышает апертуру объектива, и вместе с тем желательно, чтобы апертура конденсора была не меньше апертуры объектива. При их равенстве получаем вдвое меньшее предельное разрешение, чем для одного объектива:

$$d_{мин} = \lambda / 2A_{об} . \quad (8)$$

Теперь становится понятной роль косого освещения. В принципе вообще можно исключить неотклоненный пучок света и использовать для наблюдения одни лишь дифрагированные пучки (это делают в так называемом *темнопольном микроскопе — ультрамикроскопе*). Однако большого выигрыша в разрешении это уже не может дать. Сколько ни увеличивай апертуру конденсора, все равно свет, не попадающий в объектив, не несет полезной информации о предмете наблюдения, потому-то апертуру конденсора нет смысла делать больше, чем апертуру объектива. Если же пользоваться одними дифрагированными пучками, как в ультрамикроскопе, то, не говоря уже об их сравнительно малой интенсивности, угловое расстояние между ними все равно определяется формулой (6), а меньшее число пучков, чем пучки двух порядков, брать нельзя, иначе не произойдет интерференции и не возникнет изображения, несущего нужную информацию о предмете.

Таким образом, в итоге мы вновь приходим к формуле того же вида, что и соотношение (4):

$$d_{\text{мин}} = k\lambda / A, \quad (9)$$

где $k \approx 0,5 \div 0,6$ — множитель, и вновь убеждаемся в том, что предельное разрешение ограничивается из-за дифракции — той самой дифракции, без которой нельзя создать изображения ни одного физического объекта ни при каких условиях.

Единственным радикальным средством повышения разрешения является уменьшение длины волны излучения, освещающего предметы. При этом под освещением надо понимать не только волновое облучение, но и облучение потоками частиц. В этом направлении и пошла физика последующих десятилетий.

Формула (9) накладывает предел и на полезное увеличение микроскопа. В принципе, в микроскопе, используя дополнительные линзы, можно добиться увеличения, скажем, в миллион раз, — но это было бы бесполезным увеличением. Изображение предмета все равно не выявило бы никаких новых подробностей по сравнению с теми, что видны и при тысячекратном увеличении.

Предельное разрешение глаза в благоприятных условиях составляет около $1'$. Однако при наблюдении в микроскоп условия нередко менее благоприятны. Структура наблюдаемых предметов

часто малоконтрастна, т. е. поглощение света ими изменяется в узких пределах, и выходной зрачок микроскопа существенно меньше зрачка глаза (обычно его диаметр составляет от $5 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-3} м). Эти, а также некоторые другие факторы заставляют принимать разрешение глаза при микроскопических наблюдениях $\varepsilon = 2 \div 4'$. Тогда при общем увеличении микроскопа M размеры предмета или отдельных его элементов $d = 25\varepsilon/M$. Учитывая же формулу (9) и зная, что длина волны $\lambda = (4-8) 10^{-7}$ м, получаем пределы полезного увеличения микроскопа $\bar{M} : 500 A < \bar{M} < 1000 A$.

При $\bar{M} < 500 A$ нельзя различать такие детали строения наблюдаемого объекта, которые еще может дать объектив с данной апертурой A , так как предельное разрешение глаза при этом хуже, чем у микроскопа. При $\bar{M} > 1000 A$, что можно получить, например, применением окуляра с меньшим фокусным расстоянием, предельное разрешение глаза оказывается больше, чем у микроскопа, но это бесполезно, поскольку не обнаруживается новых деталей по сравнению с теми, что выявляются при полезном увеличении.

Следует заметить, что современный микроскоп предназначен не только для непосредственного разглядывания изображений глазом. Изображение можно зафиксировать на фотопластинке в виде микрофотографии или спроецировать на большой экран, чтобы его могли одновременно видеть несколько наблюдателей. Не будем описывать видоизмененные оптические системы, предназначенные для этих целей. Отметим лишь, что при таком использовании микроскопа нужно добиваться большего увеличения. Так, если изображение проецируется на экран, отстоящий от наблюдателя на расстоянии L , то приведенные выше оценки увеличения надо умножить на L/D , где $D = 0,25$ м — расстояние наилучшего зрения.

Фазово-контрастный микроскоп

До сих пор мы говорили, в сущности, лишь о предметах, которые изменяют амплитуду падающего на них света, — прозрачных предметах с участками, по-разному поглощающими свет, и непрозрачных предметах с элементами, по-разному отражающими свет. Мы не касались других характеристик световой волны — частоты, фазы и поляризации.

Исторически сложилось так, что исследователи пользовались естественными, а потом искусственными источниками света, которые дают свет со многими длинами волн, т. е. в широком диапазоне частот. Фазы этих волн, излучаемых многими атомами и распространяющихся в сравнительно больших областях пространства, нерегулярно и быстро изменяются. Наконец, в обычных условиях эти волны слабо поляризованы. И хотя при определенных условиях имеет место некоторая когерентность световых пучков, т. е. взаимное постоянство фаз в узких областях распространения волн (например, при образовании дифракционных изображений смежных участков объектов в микроскопе), в целом, когерентность, — скорее, редкое явление. В результате в окончательном изображении, созданном некогерентным светом, теряется важная информация о фазах рассеянных предметом световых волн. Этот недостаток стал особенно заметен, когда начались исследования тонких срезов биологических объектов, например тканей организмов. Поскольку поглощательная способность разных участков таких тканей часто почти одинакова, амплитудный контраст оказывался незначительным и различить разные участки на изображении было очень трудно.

Сначала для улучшения положения попытались использовать такую характеристику, как зависимость поглощательной способности от длины волны света, окрашивая биологические препараты. Одни клетки сильнее «усваивали» красящее вещество, чем другие, и благодаря этому на определенных длинах волн амплитудный контраст повышался. Но универсальным средством, пригодным для всех биологических препаратов, этот метод не мог стать. Оставалось попробовать «зацепиться» еще за одну характеристику волн — фазу.

Отдельные участки биологических препаратов часто имеют разные показатели преломления. Разумеется, на освещенности изображения это никак не сказывается, но вызывает взаимные изменения фаз в световых волнах, прошедших через отдельные участки предмета. Так, если два участка имеют показатели преломления n_1 и n_2 и толщину h , а через них проходит световая волна с длиной λ , то разность фаз $\delta = (2\pi/\lambda)(n_1 - n_2)h$. Глаз и фотопластинка на такой «фазовый контраст» не реагируют. Но ока-

залось, что с помощью специальных приспособлений его можно превратить в амплитудный контраст, который уже отчетливо виден.

Рассмотрим дифракционную решетку подобно тому, как это делал в свое время Аббе, но только не амплитудную, в которой прозрачные участки чередуются с непрозрачными, а фазовую, в которой чередуются участки с разными показателями преломления. Рассмотрение показывает, что после прохождения света через такую *фазовую решетку* возникают, кроме неотклоненного, также дифрагированные пучки, причем они сдвинуты по фазе на 90° относительно неотклоненного пучка.

В 1934 г. голландский физик Цернике высказал остроумную идею добавить к этому сдвигу фаз еще 90° , так, чтобы он стал равным 180° , и тогда, будучи сведенными вместе, центральный и дифрагированные пучки проинтерferируют, гася друг друга. А степень их взаимного гашения будет зависеть от того, насколько разность фаз отличается от 180° из-за тех изменений фазы, которые вносят разные участки препарата, наблюдаемого в микроскоп.

В большинстве случаев опережение по фазе дают неотклоненному свету. Тогда получается положительный фазовый контраст, и участки с бóльшим показателем преломления, чем у окружающей среды (например, у иммерсионной жидкости, в которой плавают клетки), будут выглядеть более темными на светлом фоне. Но не забудем, что дифрагированные пучки имеют намного меньшую интенсивность, чем неотклоненный пучок. Так, если разность фаз $\delta = 30^\circ$, то интенсивность первого дифракционного максимума составляет лишь около 3% интенсивности центрального максимума, второго — 0,3%, а остальных — и того меньше. Значит, чтобы интерференционная картина оказалась достаточно контрастной по освещенности, надо примерно уравнивать интенсивности пучков. Как показывает расчет, для сравнительно небольших сдвигов фаз между отдельными участками препарата (не более 20°) контраст освещенностей участков изображения составляет $K \approx 2\delta/\tau$, где τ — коэффициент пропускания неотклоненного света.

Из сказанного уже примерно ясно, как выглядит устройство для превращения фазового контраста в амплитудный. Дифрагиро-

ванный свет должен проходить через него без помех. А на пути центрального пучка надо установить «помеху», которая «вычла» бы из его фазы 90° (другими словами, поскольку фаза 360° соответствует целой длине волны, — вычла бы из пройденного им расстояния четверть длины волны) и ослабила бы его интенсивность, скажем, в тридцать раз, сравнивая ее с интенсивностью первого дифрагированного пучка. Такое приспособление называется *фазовой пластинкой* и представляет собой стеклянную шайбу, в которой вышлифована кольцевая канавка глубиной четверть длины волны, а на дно канавки осаждена тонкая металлическая пленка, поглощающая свет (рис. 6). Через эту канавку и проходит неотклоненный пучок.

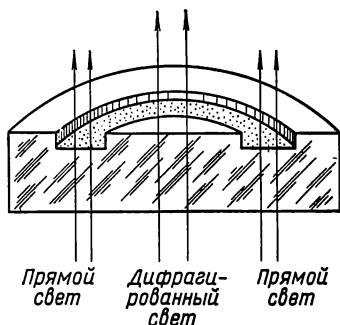


Рис. 6. Фазовая пластинка в фазово-контрастном микроскопе

Однако глубина канавки фазовой пластинки не обязательно должна составлять четверть длины волны и вносить дополнительную разность фаз 90° . Такая пластинка дает наибольший контраст освещенности, в сущности, только для малого сдвига фаз δ . Но если сдвиг фаз волн от разных участков наблюдаемых прозрачных препаратов возрастает, то целесообразно использовать пластинки, вносящие меньшие дополнительные разности фаз.

Теория показывает, что предельный, равный 1, контраст в изображении предмета, вносящего разность фаз δ , будет достигнут, если фазовая пластинка имеет коэффициент пропускания $\tau = 4\sin^2(\delta/2)$ и дает сдвиг фаз $\theta = 90^\circ - \delta/2$. Например, для рассмотренного выше значения $\delta = 30^\circ$ получается $\tau = 4\sin^2 15^\circ \approx 0,27$ и $\theta \approx 75^\circ$, т. е. канавка в фазовой пластинке должна пропускать примерно четверть неотклоненного света и иметь глубину примерно $\lambda/5 \approx 1 \cdot 10^{-7}$ м, если в качестве λ принять среднее значение длины волны в диапазоне видимого света.

Описанный принцип можно использовать и для создания отрицательного фазового контраста, в котором неотклоненный свет будет получать не опережение, а отставание по фазе от дифрагированного света. Тогда на фазовой пластинке вместо канавки нанесут тонкое выступающее кольцо. При этом предметы с показателем преломления большим, чем у среды, будут выглядеть более светлыми на окружающем фоне.

Фазовую пластинку необходимо встраивать внутрь сложных объективов современных микроскопов. При этом получается так называемый *фазово-контрастный микроскоп*. Можно установить пластинку и между объективом и окуляром, но тогда приходится переделывать всю оптическую систему микроскопа. Однако такое усложнение искупается тем, что можно менять фазовые пластинки, не трогая объектива, что очень удобно при исследовании препаратов, дающих сдвиг фаз в широком диапазоне.

Главным преимуществом метода фазового контраста является огромная его чувствительность. Если считать, что минимальный приемлемый контраст составляет 10%, то для пластинки с $\theta = 90^\circ$ и $\tau = 0,25$ находим $\delta_{\min} = 0,025$, что соответствует разности хода в контрастирующих участках, равной $\lambda/250 \approx 2 \cdot 10^{-9}$ м. Иными словами, если два участка препарата отличаются не показателями преломления, а толщиной, то можно обнаружить разницу в толщине, равную толщине всего лишь десятка атомных слоев!

Однако методу фазового контраста присущи и некоторые недостатки. Прежде всего, то, о чем здесь рассказано, имеет, строго говоря, отношение лишь к фазовой решетке, в которой участки с разными показателями преломления или разной толщиной резко отграничены друг от друга. Реальные объекты сложнее, часто резких границ в них нет, а отдельные участки плавно переходят друг в друга. При таких плавных переходах угол дифракции невелик и хорошо разделить неотклоненный и дифрагированные пучки не удастся. В результате часть неотклоненного света попадает в неположенные ему области фазовой пластинки. Поэтому на изображении, полученном в фазово-контрастном микроскопе, четко выделяются лишь тонкие детали структуры, а крупные детали хорошо видны только на периферии изображения.

Не забудем и то, что фазовая пластинка в сущности лишь

перераспределяет энергию освещения предмета между различными участками изображения. То, что она поглощает недифрагированный свет (а предмет и вовсе не поглощает свет, поскольку не дает амплитудного контраста), роли не играет: ведь она в равной мере ослабляет освещенность для всех точек поля зрения. Значит, появление темных участков изображения должно сопровождаться увеличением освещенности на соседних им участках.

При положительном фазовом контрасте все темные участки изображения оказываются окруженными светлыми ореолами, при отрицательном контрасте, напротив, светлые участки окружены темными ободками. Избавиться от ореолов нельзя, можно только увеличить их размеры и соответственно уменьшить их яркость, сужая канавку или кольцо на фазовой пластинке. Но при этом одновременно уменьшается и освещенность изображения, что часто неудобно.

Интерференционный микроскоп

От указанных недостатков в значительной мере свободны *интерференционные микроскопы*, первый из которых был создан советским ученым А. А. Лебедевым в 1931 г. В отличие от фазово-контрастного микроскопа, в котором интерферируют не отклоненный и дифрагированный пучки света, прошедшие через предмет, в интерференционном микроскопе интерферируют два пучка света, один из которых прошел мимо объекта, а другой через объект (соответственно их можно называть опорным и рабочим пучками). Конечно, для получения стабильной интерференционной картины волны должны быть когерентными, т. е. иметь постоянную во времени разность фаз. Распределение этой разности в пространстве, создаваемое наблюдаемым предметом, и проявляется в интерференционном контрасте изображения.

Интерференционный контраст имеет то преимущество перед фазовым, что отчетливо проявляется не только при резких, но и при плавных изменениях показателя преломления и толщины отдельных участков предмета. В результате распределение освещенности на изображении зависит только от сдвига фаз, вносимого этими участками, но не от их формы или размеров, и на изображе-

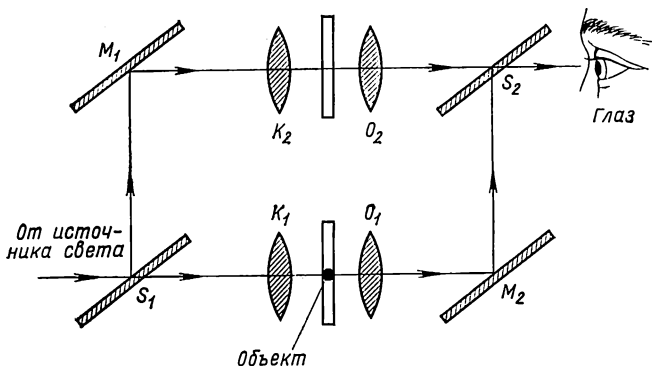


Рис. 7. Ход лучей в интерференционном микроскопе:

М — зеркала; *S* — полупрозрачные зеркала; *К* — конденсоры; *О* — объективы

нии нет ореолов, присущих фазово-контрастным изображениям. Далее, интерференционный микроскоп может давать как черно-белые, так и цветные изображения при работе в белом свете. Дело в том, что в результате интерференции волны некоторых длин могут гасить друг друга, и тогда изображение окрашивается в дополняющие цвета. Поскольку глаз очень чувствителен к цветовому контрасту, это дает большое преимущество перед фазово-контрастным микроскопом, в котором наблюдается контраст лишь между оттенками одного и того же цвета.

Но главное достоинство интерференционного микроскопа состоит в том, что он позволяет не только отмечать разности фаз от различных участков предмета, но и измерять соответствующие им разности хода световых лучей, т. е. или разности показателей преломления при одной толщине, или разности толщин при одном показателе преломления. Измеренные же разности хода можно пересчитать в концентрацию, массу сухого вещества в препарате и получать другую ценную количественную информацию. По этой причине интерференционный микроскоп используют главным образом для количественных исследований, тогда как фазово-контраст-

нии — для визуального наблюдения предметов, не вносящих амплитудного контраста, т. е. практически не поглощающих света.

Реализовать интерференционный микроскоп (рис. 7) значительно сложнее, чем фазово-контрастный. Прежде всего, поскольку луч света еще до того, как он упадет на предмет, надо разделить на два, вообще говоря, нужны две оптические системы — по одной для каждого из лучей, — причем в весьма высокой степени идентичные друг другу. Только тогда, после сведения лучей, можно будет гарантировать, что интерференционная картина целиком обусловлена лишь предметом, поставленным на пути одного из лучей.

Поскольку интерферировать должны когерентные волны, любая разность хода лучей в обоих ветвях микроскопа не должна заметно превышать так называемой длины когерентности. Эта длина для белого света составляет лишь около $2 \cdot 10^{-6}$ м и увеличивается при сужении диапазона длин волн используемого света, т. е. при повышении степени его монохроматичности. Разные элементы предмета вносят разные сдвиги фаз, и они проявляются в изображении с неодинаковым контрастом. Обычно сдвиг фаз очень мал по сравнению с 180° (другими словами, разность хода между рабочим и опорным пучками много меньше длины полуволны), и когда длины обеих ветвей интерференционного микроскопа одинаковы или различаются на целое число длин волн, изображение предмета выглядит темным на светлом фоне. Если же длины ветвей интерферометра различаются на нечетное число полуволн, то изображение, напротив, выглядит светлым на темном фоне. Здесь не случайно использовано слово «интерферометр». Интерференционный микроскоп представляет собой, в сущности, микроинтерферометр — прибор для измерения малых разностей хода, позволяющий наблюдать детали микроскопических объектов.

В одном из микроскопов с разделенными оптическими системами пучок света по выходе из конденсора расщепляется на два пучка с помощью специальной призмы. Опорный пучок затем проходит через стеклянную пластину, имитирующую предметное и покрывное стекла для препарата, через свой объектив и сводящую призму, после чего соединяется с рабочим пучком, прошедшим через препарат, свой объектив и призму. На пути каждого из пучков установлены тонкие прозрачные пластинки — компенсаторы. Один из

них позволяет выравнивать небольшие несоответствия между оптическими деталями в обеих ветвях. Другой служит для измерения разности хода, вносимой предметом. Интерференционное изображение рассматривают через общий окуляр. Некоторым недостатком такого микроскопа является большое расстояние конденсора от предмета, необходимое для введения светоделительной призмы. Это не позволяет освещать предмет широким пучком света с большой апертурой и тем самым ухудшает разрешение. Вместе с тем изготовить очень точно совпадающие оптические элементы в обеих ветвях чрезвычайно сложно, особенно если предстоит работа со сменными объективами.

Поэтому не удивительно, что родилась идея пропустить оба интерферирующих пучка света через одни и те же оптические элементы. Но этого мало: оба пучка должны идти через оптическую систему примерно одинаковыми путями, только тогда можно надеяться, что опорный пучок испытает почти такие же искажения, как и рабочий пучок. Конечно, при этом нечего и думать, чтобы опорная волна обошла предмет стороной. Важно лишь, чтобы мелкие детали предмета (однородная среда, в которую он помещен, не в счет) занимали малую площадь опорного пучка, т. е. нужен как можно более широкий опорный пучок.

В зависимости от того, как разводятся интерферирующие пучки, различают два вида микроскопов: *двухфокусный*, в котором пучки разведены вдоль оптической оси, и *ширинг-микроскоп*, где пучки сдвинуты друг относительно друга перпендикулярно оптической оси. Для разделения пучка на два используют известное явление двулучепреломления света некоторыми кристаллами, в результате чего возникают так называемые обыкновенный и необыкновенный лучи (пучки) с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации света.

В двухфокусном микроскопе это осуществляется так. Между источником света и конденсором устанавливают поляризатор, расщепляющий пучок света на два. Для уравнивания их интенсивностей служит еще одна очень тонкая кристаллическая пластинка, наклеенная прямо на конденсор. Фокусы обоих пучков приходятся на точки *A* и *B*, сдвинутые друг относительно друга по оптической оси (поэтому микроскоп и называют двухфокусным). Оба пучка

снова соединяются кристаллической пластинкой, наклеенной на объектив, который и проецирует изображение объекта в плоскость окуляра. Пока что оба луча соединены только в пространстве, а для того, чтобы они могли проинтерферировать, надо еще свести их плоскости поляризации. Это достигается с помощью анализатора, действие которого «гасит» действие поляризатора. В общем случае пути, пройденные обыкновенным и необыкновенным пучками, в такой системе даже в отсутствие предмета несколько различаются. Чтобы их уравнять, между поляризатором и конденсором устанавливают небольшую линзу. Разность хода пучков, вносимую предметом, измеряют поляризационным компенсатором, располагаемым перед анализатором.

При скрещенных поляризаторе и анализаторе, т. е. когда оптические оси их кристаллов составляют угол 90° , поле зрения в микроскопе выглядит темным. Обыкновенная волна, сфокусированная в точке *A*, проходит через предмет, тогда как необыкновенная, фокус для которой находится дальше (в точке *B*), в основном минует предмет. Необыкновенная (опорная) волна благодаря тому, что фокусируется раньше обыкновенной (рабочей) волны, проходя через предмет, имеет в его плоскости уже довольно большое сечение, и поэтому мелкие детали предмета существенно не искажают ее. С помощью компенсатора изображение в микроскопе делают светлым на темном фоне.

В ширинг-микроскопе после поляризатора в фокусе конденсора устанавливают так называемую призму Волластона, которая уравнивает интенсивности обыкновенного и необыкновенного пучков. Пройдя конденсор, пучки становятся параллельными друг другу, но смещенными в пространстве: если один пучок проходит через предмет в точке *A*, то другой — в некоторой сравнительно неблизкой точке *B*, т. е. минуя данный участок предмета. Та разность фаз, которая возникает между ними, обусловлена лишь различием участка *A* и окружающей его среды *B*. После выхода из объектива лучи сводятся второй призмой Волластона, проходят компенсатор для измерения разности фаз, затем окуляр и, наконец анализатор. Благодаря такой оптической системе в ширинг-микроскопе получается раздвоенное изображение. Чем сильнее это раздвоение, тем легче измерить разность хода: расхождение изобра-

жений должно превысить размеры участка предмета, внесшего разность хода. Погрешность измерения разности хода ширинг-микроскопом в особо благоприятных условиях не превышает $\lambda/300$.

Звездный интерферометр

Естественно, что принцип интерференции можно применить при наблюдении не только бактерий, но и звезд. Это настолько очевидно, что идея интерференционного телескопа возникла за полвека до появления интерференционного микроскопа. Но одно и то же явление в этих двух применениях послужило совершенно различным целям. Если в микроскопе интерференция используется для наблюдения непосредственно невидимой структуры объектов, не дающих амплитудного контраста, то в телескопе с ее помощью как бы попытались выйти за предел разрешения, который диктуется дифракционной формулой (5).

Потребность в повышении разрешения телескопа диктовалась тем, что надо было получить представление о размерах звезд. Одна из самых крупных звезд — альфа созвездия Орион, известная под названием Бетельгейзе, имеет угловой диаметр всего лишь $0,047''$. Чтобы определять такие ничтожные угловые размеры, вначале использовали принцип параллакса: сопоставляли результаты, полученные из двух наблюдений в точках, расположенных, скажем, на противоположных концах диаметра земной орбиты, т. е. результаты зимнего и летнего измерений положения звезд на небе. Затем стали строить более крупные телескопы. Но даже самый большой современный телескоп (он установлен на Северном Кавказе) с диаметром зеркала 6 м обладает разрешением $0,02''$, тогда как подавляющее большинство астрономических объектов имеет в десятки и сотни раз меньшие угловые размеры.

В последней трети прошлого столетия француз Физо и американец Майкельсон предложили улучшить это положение с помощью простого на вид приема. Закроем объектив телескопа диафрагмой, в которой проделаны два небольших отверстия. Рассмотрим, что получится при наблюдении двух точечных источников на небе. Каждый из них создаст в телескопе свою интерференцион-

ную картину, образованную сложением волн от двух маленьких отверстий в диафрагме, и картины будут сдвинуты друг относительно друга на величину, определяемую разностью хода световых волн от источников к телескопу. Если эта разность хода равна четному числу полуволн, то картины совпадут и общая картина станет наиболее четкой. Если же разность хода равна нечетному числу полуволн, то максимумы одной интерференционной картины придутся на минимумы другой и общая картина окажется наиболее сильно смазанной. Можно варьировать эту разность хода, изменяя расстояние d между отверстиями в диафрагме, и при этом наблюдать, как интерференционные полосы (отверстия в диафрагме имеют вид узких щелей) будут становиться то более, то менее отчетливыми. Первый минимум отчетливости полос наступит при

$$d = \lambda/2\theta, \quad (10)$$

где θ — угловое расстояние между источниками на небе. Отсюда, зная λ и d , можно определить θ . Аналогично, если вместо двух источников рассмотрим один протяженный источник с угловыми размерами θ , то найдем

$$d = k\lambda/\theta, \quad (11)$$

где $k=1,22$ для круглого источника с равномерной яркостью и $k>1,22$ для такого же источника, у которого яркость убывает от центра диска к его краям.

Но получается ли при этом какой-либо выигрыш в разрешении? Сравним, например, формулы (5) и (11). Положим $D=1$ м, тогда по формуле (5) $\alpha \approx 0,12''$. Пусть расстояние между щелями в диафрагме телескопа тоже предельное — 1 м. Беря для λ значение $5 \cdot 10^{-7}$ м в середине видимого диапазона, получаем $\theta = 6 \times 10^{-7}$ рад $= 0,12''$. Выходит, что никакого выигрыша нет? Конечно. Его и не может быть, так же как и в интерференционном микроскопе. Зато само значение θ теперь можно измерить. Это очень важное преимущество.

Но дело на этом не кончается, а только начинается. Майкельсон додумался «раздвинуть» отверстия в диафрагме далеко за пределы объектива телескопа. Это, конечно, не надо понимать буквально: сами отверстия остались на своих прежних местах, но вот

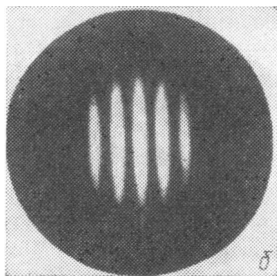
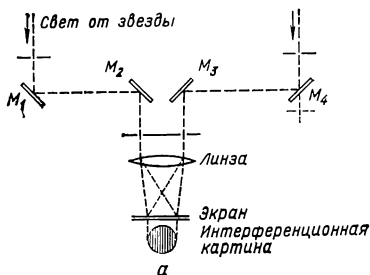


Рис. 8. Схема звездного интерферометра Майкельсона (а) и интерференционное изображение (б)

свет от звезд падал на них не непосредственно, а сначала на два неподвижных удаленных зеркала (рис. 8, а), от которых уже двумя другими зеркалами отражался на отверстия в диафрагме. И это оказалось эквивалентным тому, как если бы диаметр объектива телескопа вырос до расстояния между удаленными друг от друга зеркалами, и соответственно во столько же раз увеличивалось разрешение. С помощью такого звездного интерферометра Майкельсон и его сотрудник Пиз провели первые надежные измерения диаметров гигантских звезд.

Однако даже расстояние 6 м между зеркалами в первом звездном интерферометре оказалось явно недостаточным. Из формулы (5) можно видеть, что при $D=6$ м $\alpha=0,02''$. Между тем подавляющее большинство звезд имеет не гигантские, а примерно солнечные размеры. Солнце же, если его поместить на расстоянии ближайшей звезды, было бы видно как диск с угловыми размерами $0,007''$ и потребовало бы для измерения его размеров телескопа с зеркалами, разнесенными на добрых 20 м. Постройка такого телескопа чрезвычайно трудна, поскольку нужна очень жесткая механическая конструкция.

В процессе наблюдения расстояния между зеркалами и окуляром могут изменяться лишь на доли длины световой волны, между тем как сами эти расстояния чуть ли не в миллиард раз больше длины световой волны! Однако даже первый интерферен-

ционный телескоп Майкельсона имел еще одно заметное преимущество перед обычным, недифрагмированным телескопом. Наблюдения звезд ведутся, как правило, с поверхности Земли (космическая астрономия только зарождается). На пути к телескопам звездный свет проходит через беспокойную атмосферу, в которой постоянно присутствуют турбулентные потоки воздуха. Вследствие хаотических изменений плотности и показателя преломления воздуха наблюдаются мерцания звезд, а их изображения в недифрагмированном телескопе сильно искажены. В интерференционном же телескопе влияние атмосферных возмущений значительно слабее благодаря малым отверстиям в диафрагме. Небыстрые флуктуации показателя преломления воздуха приводят к тому, что интерференционная картина «ползает» по полю зрения, но почти не меняет своего вида, т. е. не изменяются взаимное положение и контрастность полос интерференции (рис. 8, б).

Радиointерферометр

В 40-е годы XIX в. для астрономических исследований начали использовать новый диапазон электромагнитных волн — радиоизлучение космических объектов. Появились *радиотелескопы* и *радиointерферометры*. Самые крупные радиотелескопы имеют диаметр зеркала антенны около 100 м. Это намного больше, чем диаметр зеркала крупнейшего оптического телескопа, но не забудем, что длины радиоволн в десятки тысяч раз больше длин волн света, поэтому разрешение радиотелескопа в тысячи раз хуже, чем у его оптического собрата. Так, у 6-метрового оптического телескопа, как уже говорилось, оно составляет примерно $0,02''$, тогда как у 100-метрового радиотелескопа, работающего, скажем, на длине волны 0,1 м, — всего лишь около $4'$.

Для достижения лучшего разрешения отдельные радиотелескопы стали «объединять» в радиointерферометры, рассматривая их антенны как зеркала в звездном интерферометре Майкельсона. Теперь уже в качестве базы интерферометров можно было взять чуть ли не диаметр земного шара. Легко подсчитать, что разрешение при этом улучшилось на несколько порядков. В настоящее

время оно достигает примерно $0,001''$, т. е., по крайней мере, в 20 раз выше, чем у крупнейшего оптического телескопа.

Но такие *радиоинтерферометры со сверхдлинными базами* создают свои большие проблемы. В оптическом телескопе интерферирующие пучки сводятся воедино с помощью зеркал и объектива. А как свести воедино радиоволны, принятые двумя очень удаленными радиотелескопами, чтобы заставить их проинтерферировать? Сразу возникает множество практических осложнений, большинство которых упирается в главную физическую проблему: как сохранить когерентность радиоволн, принятых двумя радиотелескопами. Даже если считать, что радиоволна от одного космического источника, не испытав никаких искажений в атмосфере, пришла к двум радиотелескопам и в них полностью сохранила когерентность, то дальше эта когерентность легко может утратиться. Тянуть от радиотелескопов кабели в единый центр, в котором будут складываться высокочастотные токи от приемников, отвечающие принятым радиоволнам, нереально. Мы не говорим уже о шумах в самих приемниках и кабелях, которые приводят к хаотическому изменению фаз в сигналах и нарушают их когерентность.

В результате приходится регистрировать сигналы от радиоволн каждый на своем радиотелескопе и вместо радиоволн «сводить» их записи на магнитных лентах. Для сличения двух или большего числа сделанных на них записей (в наблюдении могут участвовать более двух радиотелескопов, в оптике также существуют многолучевые интерферометры) надо на первый взгляд немалое: привязать друг к другу моменты начала этих записей, т. е. использовать единые часы. Однако это отнюдь не просто. На антенны поступают волны не одной частоты, а в целом диапазоне частот, определяемом шириной полосы пропускания. Пусть, скажем, радиотелескоп работает на длине волны 1 м, т. е. на частоте 300 МГц, и пусть избирательность его приема 0,003, т. е. полоса частот, воспринимаемая антенной, составляет 1 МГц. Требуемая точность синхронизации равна обратной ширине полосы частот радиосигнала, т. е. в данном случае 1 мкс. Иначе говоря, такую точность должны иметь метки единого времени при записях на магнитной ленте. Ясно, что из одного центра это сделать трудно. При каждом радиотелескопе надо иметь свои часы, в какой-то

момент сверенные с часами при других радиотелескопах и идущие с точностью не хуже указанной.

И этого мало. Ни на бумаге, ни на магнитной ленте записи токов, вызванных радиоволной в приемнике, непосредственно зафиксировать нельзя: слишком велика частота волны для таких инерционных регистраторов. Приходится поступать, как при обычном радиовещательном приеме: смешивать, гетеродинировать приходящий сигнал с сигналом местного генератора постоянной частоты (при работе на радиочастоте 300 МГц частота местного генератора должна быть близка к ней), а уже разностную частоту порядка 1 МГц можно записывать на магнитную ленту. Но это означает, что нужно синхронизировать и местные генераторы частоты, другими словами, вырабатываемые ими колебания в разных радиотелескопах должны быть взаимно когерентными в течение времени регистрации радиоволн. При записи сигнала, например, на частоте 300 МГц в течение нескольких минут стабильность частоты местного генератора должна быть не ниже миллиардной доли процента!

Синхронизация часов и стабилизация частоты генераторов, требующие такой фантастической точности, немыслимы без использования атомных стандартов частоты — квантовых генераторов. В области радиочастот квантовые генераторы часто называют *мазерами*, в области частот видимого света и близких к ней — *лазерами*. Именно использование таких приборов сделало осуществимыми сложнейшие интерферометрические эксперименты и потребовало разработки теории когерентности излучения, которая, впрочем, начала развиваться еще до появления новой оптической техники и радиотехники. Поговорим о когерентности подробнее.

Уже указывалось, что степень когерентности двух волн определяет возможность их интерференции друг с другом: для этого между фазами волн должны существовать достаточно постоянные или медленно меняющиеся в пространстве и времени соотношения. Если эти соотношения изменяются во времени быстро, то никакой детектор волн не будет в состоянии поспевать за ними из-за своей инерционности, и он просто усреднит интенсивности обеих волн за время наблюдения, так что интерференционная картина исчезнет. То же произойдет, если фазовые соотношения быстро

изменяются в пространстве: интерференционная картина станет слишком мелкой, чтобы ее можно было наблюдать. Из этого следует, что надо ввести понятия о *степени временной и пространственной когерентности*.

Обычно источники света имеют конечные размеры, во много раз превышающие длину световых волн, а интерференцию наблюдают в течение времени, во много раз превышающего длительность акта испускания световой волны отдельным атомом или молекулой. Таким образом, есть две причины некогерентности: во-первых, каждый атом испускает цуги волн конечной длительности (или протяженности в пространстве) и, во-вторых, все атомы в их «коллективе», входящем в обычный источник света, делают это случайным образом, вразнобой, так что в каждый момент фазы отдельных световых волн никак не связаны друг с другом.

Конечная длительность цуга волн, по существу, означает, что испускается свет не с одной частотой, а с целым набором частот, причем этот набор тем шире, чем короче цуг. Между длительностью испускания цуга и шириной полосы представленных в нем частот существует простое соотношение

$$\Delta\nu\Delta t \sim 1. \quad (12)$$

В соответствии с этим можно ввести длину цуга волн, испущенных атомом в одном акте излучения:

$$l_1 = c\Delta t \approx c/\Delta\nu = \bar{\lambda}^2/\Delta\lambda, \quad (13)$$

где $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны; c — скорость распространения волн, и назвать ее *длиной временной когерентности*. Ясно, что в пределах самого цуга между волнами сохраняются постоянные фазовые соотношения.

Оценим значение l_1 . Для отдельного атома, свободного от внешних влияний (в том числе и влияний соседних атомов в источнике света), $\Delta t \sim 10^{-9}$ с и $\Delta\nu \sim 10^9$ Гц, так что l_1 имеет порядок десятых долей метра. Это немало, но, к сожалению, в действительности так не бывает. Один цуг — это один-единственный фотон, он несет слишком малую энергию, а для образования непосредственно наблюдаемой интерференционной картины нужны миллионы фотонов. Поэтому используют или яркие спектральные линии атомных

источников, или целые участки теплового спектра обычных источников света. В первом случае спектральная линия тем ярче, чем чаще испускаются фотоны, а значит, при фиксированном числе атомов, — чем меньше длительность их испускания. В результате Δt может уменьшиться, а $\Delta \lambda$ — возрасти на несколько порядков. При использовании тепловых источников света (например, белого солнечного света) $\bar{\lambda}$ и $\Delta \lambda$ вообще оказываются одного порядка. Это приводит к тому, что согласно формуле (13) длина временной когерентности имеет тот же порядок, что и сама длина волны (средняя в используемом диапазоне длин волн), или же ненамного превышает ее.

Если волну от одного атома расщепить на две, например, расположив под этим атомом зеркало, а затем эти волны свести вместе, то они, конечно, будут интерферировать, но в пределах одного цуга. Отсюда сразу ясно, что разность хода, т. е. разность путей, проходимых светом до точки наблюдения из действительного и из мнимого источников, не должна значительно превышать длину временной когерентности, поэтому на интерференционной картине будут отчетливо наблюдаться лишь несколько центральных полос (максимумов освещенности), а дальше, на периферии, картина постепенно размывается.

Однако в реальном источнике света — множество атомов, излучающих вразнобой. При этом также можно разделить общую волну от всех них на две, а потом свести их вместе, чтобы они могли проинтерферировать. Конечно, каждая «половинка» волны тогда встретит свою «половинку» от того же атома, но число встреч таких «близнецов», естественно, будет намного меньше, чем число встреч с «чужими» волнами. Казалось бы, ни о какой когерентности при этом не может быть и речи, но это не так: если волну от протяженного источника разделить с помощью диафрагмы, в которой проделаны два крошечных круглых отверстия или две узеньких щели, то интерференция возникает.

Можно сказать, что с уменьшением размеров источника света встречи половинок-близнецов начинают давать заметный вклад по сравнению со встречами случайных половинок волн. Опыт показывает, что картина становится достаточно отчетливой, когда расстояния между двумя отверстиями d , между экраном для наблю-

дения (или глазом) и диафрагмой f , между соседними интерференционными полосами Λ и длина волны λ удовлетворяют соотношению $\Lambda = f\lambda/d$. Половину Λ ,

$$l_2 = (1/2) \lambda f/d, \quad (14)$$

принимают за длину пространственной когерентности. Конечно, по мере того как разность хода между половинками волн начинает превышать l_2 , степень когерентности все более уменьшается. И на интерференционной картине остаются отчетливо видными лишь несколько центральных полос, образованных волнами, разности хода которых меньше l_2 , а на периферии картина постепенно размывается.

Распределение освещенности на интерференционной картине описывается довольно сложной формулой. Качественно, как мы уже знаем, оно отличается следующими особенностями: полосы расположены регулярно, периодически; в центре картины контраст наибольший, а к ее краям, т. е. при увеличении разности хода, он снижается; даже наибольший контраст не стопроцентен, а зависит от степени когерентности интерферирующих волн. Сказанное можно выразить общей формулой для распределения интенсивности двух частично когерентных пучков с интенсивностями I_1 и I_2 :

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1} \sqrt{I_2} \gamma_{12} f(\Delta). \quad (15)$$

Здесь Δ — разность хода для интерферирующих волн; γ_{12} — степень их когерентности. Когда $\gamma_{12} = 0$, т. е. волны полностью некогерентны, в соответствии с результатами наблюдений экран равномерно освещен ($I = I_1 + I_2$) и никаких следов интерференции нет. Напротив, при $\gamma_{12} = 1$ должна иметь место наиболее отчетливая интерференция. Выражение для функции $f(\Delta)$ выписывать не будем. Эта функция периодична и описывает размывание интерференционной картины по мере удаления от ее центра. Она и содержит информацию об источнике света и тех препятствиях, которые встретил свет на пути от источника к глазу или экрану для наблюдения.

Один из видов такой информации — это сведения о размерах источника света или о расстоянии между двумя источниками (реальными, а не искусственными — отверстиями в диафрагме). Но при изменении расстояния между отверстиями в диафрагме в ко-

нечном итоге меняется упомянутая функция $f(\Delta)$, что и дает нужные сведения об источниках света. В сущности, на этом принципе основана работа звездного интерферометра Майкельсона.

Большой интерферометр Майкельсона изготовить практически невозможно из-за недостижимой жесткости крепления его элементов. Гораздо более приемлемым оказался радиоинтерферометр, но в нем радиоволны приходится регистрировать независимо на разных радиотелескопах и лишь затем сравнивать их записи. При этом необходимо заметить, что поток космических радиоволн чрезвычайно слаб, а сигналы сильно забиты шумами. Интерференционное «изображение» в таких условиях сильно флуктуирует. Собственно говоря, такое положение имело место и для звездного интерферометра. При диафрагмировании объектива телескопа, естественно, интенсивности I_1 и I_2 сильно уменьшаются. В радиоастрономии тоже приходится поступаться интенсивностью при сооружении радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, ведь не строить же радиотелескопы с диаметрами зеркал несколько тысяч километров! Формула (15), конечно, справедлива при любых значениях I_1 и I_2 , но для подобных телескопов приходится применять ее к случаю, когда регистрацию интенсивностей ведут, чуть ли не пересчитывая отдельные кванты при очень слабых источниках.

Сличать отдельные записи сильно флуктуирующих токов тогда можно, не только используя естественную разность хода лучей для обоих телескопов, но и вводя искусственную разность хода — временную — путем создания задержки времени регистрации волн в одном телескопе относительно другого или внесения этой задержки при сличении записей. Разумеется, задержка не должна существенно превышать пределы временной когерентности, которая, как мы уже видели, определяется шириной полосы принимаемого сигнала. Затем обе записи пропускают через коррелятор, который устраняет из них слагаемое, соответствующее постоянно-му некогерентному фону, $I_1 + I_2$, и оставляет только флуктуирующую часть сигнала $2\sqrt{I_1 I_2} \gamma_{12} f(\Delta)$, связанную с геометрическими характеристиками источников излучения, степенью когерентности и разностью хода лучей для обоих телескопов. Иными словами, при сличении записей устанавливают степень корреляции обоих сигналов, интенсивность которых флуктуирует из-за случайного харак-

тера радиоизлучения, атмосферных помех и шумов в самих приемниках фотонов.

Именно такое сличение независимо сделанных записей (но, конечно, синхронизированных) и сделало возможной современную интерферометрию космического радиоизлучения, позволило разрешить и измерить такие космические источники, которые недоступны оптической астрономии. Этот метод исследования (впервые предложенный американскими физиками Брауном и Твиссом) получил название *интерферометрии интенсивности*, ибо в нем непосредственно считают корреляции чисел фотонов (интенсивностей света), а не рассматривают контраст интерференционной картины.

Голографический микроскоп

Эксперименты по интерференции света проводятся уже почти два века. В свое время они послужили для обоснования самой волновой теории света. Но до недавнего времени их проведение было ограничено малыми длинами временной и пространственной когерентности (последняя для обычных источников света имеет порядок длины волны света или незначительно превышает ее). Существенно увеличить длину когерентности позволило использование спектральных («холодных») источников излучения, но это сопровождается большой потерей в интенсивности света. Настоящий расцвет интерференционной оптики наступил только после появления лазеров.

Известно, что, в отличие от обычных источников света, атомы в лазерах излучают не вразнобой, а строго синхронно, в результате чего излучение лазера оказывается в высшей степени когерентным и, кроме того, очень монохроматичным и интенсивным. Лазер и позволил проводить эксперименты при длине когерентности порядка десятков сантиметров и даже больше, а также получать в этих пределах интерференционные картины, образованные лучами с разностью хода порядка миллионов длин световых волн. Такие интерференционные картины, зафиксированные на фотопластинке или другом светочувствительном материале, называют *голограммами*.

Собственно говоря, голографию изобрел английский физик Габор еще за 12 лет до появления лазера с довольно скромной целью: улучшить разрешение электронного микроскопа. В следующей главе будет показано, что в принципе у электронного микроскопа разрешение в тысячи раз лучше, чем у его оптического собрата, но из-за больших аберраций электронных линз такое разрешение в течение ряда лет оставалось недостижимым.

Габор решил вообще устранить линзы, формирующие изображение. Линзы ведь нужны для сведения дифрагированных пучков, идущих от предмета, как показал еще Аббе, и для рассматривания глазом или проецирования этого изображения на экран. Формирование и наблюдение изображения при этом происходят как бы в одну стадию. Габор предложил разделить этот процесс на два. На первой стадии регистрируется дифракционное изображение предмета на фотопластинке вместе с некоторым когерентным фоном, т. е. получается интерференционная картина. На второй стадии эта интерференционная картина освещается источником, дававшим на первой стадии когерентный фон, — и в результате получается изображение предмета.

По существу, Габор предложил первый безлинзовый микроскоп. Если изображение, сформированное электронами (с подсветкой от источника когерентного света), затем осветить с помощью этого источника, то получается увеличение только за счет различия в длинах волн, равное отношению длины волны света к длине волны электронов. Это нетрудно понять. Пусть электроны с длиной волны $\lambda_э$ падают на дифракционную решетку с периодом d . Тогда, скажем, первый дифракционный максимум образуется под углом $\alpha_э$, определяемым из формулы (6) (поскольку здесь не используются оптические линзы, $n=1$): $\sin \alpha_э = \lambda_э/d$. Получающееся после проявления фотопластинки изображение представляет собой дифракционную решетку с периодом d , которую освещают видимым светом с длиной волны $\lambda_с$. Теперь первый дифракционный максимум отвечает уже углу $\alpha_с$: $\sin \alpha_с = \lambda_с/d$. Но увеличение есть отношение углов (или их синусов, если углы велики), под которыми идут дифрагированные пучки от предмета:

$$M = \sin \alpha_с / \sin \alpha_э = \lambda_с / \lambda_э. \quad (16)$$

Когда Габор начинал опыты по реализации своей идеи, хороших источников когерентного света еще не существовало. Между тем, понятно, что если рассматриваемый в микроскоп предмет не мал, то и длина когерентности тоже должна быть большой, равной нескольким λ_c . В общем, метод Габора в электронной микроскопии не привился, и в ней пошли другими путями улучшения разрешения. Зато в оптике он получил широчайшее развитие. На эту тему написано много популярных книг и статей, и мы коснемся ее только в связи с созданием голографических микроскопов.

Можно построить безлинзовый *голографический микроскоп*, используя и для записи голограмм, и для восстановления «закодированных» на них интерференционных изображений световые пучки. Собственно говоря, такой микроскоп почти безлинзовый: в нем нет объектива и окуляра, но есть нечто вроде конденсорной линзы для освещения предмета и второй линзы с диафрагмой для опорного освещающего пучка (идущего мимо предмета, как в интерференционном микроскопе). Если при записи голограммы использовать свет с одной, а при восстановлении изображения — с другой длиной волны и варьировать расстояние от голограммы до предмета и до диафрагмы для опорного пучка при записи и восстановлении, то можно добиться определенного увеличения.

Очень большого увеличения с помощью такого микроскопа достичь нельзя: существующие лазеры охватывают не слишком широкий диапазон длин волн (отношения длин волн при записи и восстановлении голограмм не превышают 10). Кроме того, несмотря на отсутствие линз, этот микроскоп обладает аберрациями. В основном они связаны с разным увеличением в продольном и поперечном направлениях. Это — своеобразная расплата за то огромное преимущество, которое имеет голография: большую глубину резкости изображения.

В самом деле, невозможность регистрации фаз волн при использовании обычных оптических систем оборачивается утратой трехмерности, объемности изображения. Так, в обычном микроскопе глубина резкости изображения составляет всего лишь около 1 мкм. (Она возрастает при меньших увеличениях, но какая польза от этого!) В голографическом микроскопе глубина резкости может достигать чуть ли не 1 мм и позволяет легко наблю-

дать движение живых довольно крупных организмов в жидком препарате.

Голографическую технику используют сегодня в микроскопии главным образом для усовершенствования интерференционных микроскопов. Это сильно упростило конструкцию и работу приборов и значительно расширило их возможности.

Дальнейшее развитие оптического микроскопа

Микроскопия развивалась и в других направлениях. После того как в конце прошлого века Аббе создал апохроматические объективы, была, наконец, решена проблема устранения хроматической аберрации линз в микроскопе. Аббе добился того, что в фокусе объектива сходились лучи трех первичных цветов: красный, зеленый и синий, тем самым давая естественную белую окраску изображениям бесцветных предметов. Это был решающий шаг вперед от созданных за полвека до того ахроматических линз, которые сводили в общий фокус только красный и синий лучи, так что изображения предметов всегда имели зеленую окраску. После изобретения такого практически безаберрационного объектива разрешение микроскопа достигло предела, определяемого лишь неизбежным дифракционным размытием изображений.

В те же годы немецкие ученые Келер и Рор сделали попытку хотя бы немного повысить разрешение микроскопа, уменьшив длину используемых электромагнитных волн. В 1904 г. они построили *ультрафиолетовый микроскоп*. Судите сами, чего это стоило. В качестве источника освещения обычные электролампы не годились, и пришлось использовать искровой разряд в парах металла кадмия, который давал довольно яркую спектральную линию с длиной волны около $2,75 \cdot 10^{-7}$ м, т. е. вдвое меньше, чем у зеленого света. Поскольку свет с такой длиной волны глазом не воспринимается, для наводки изображения на фокус надо было ставить флуоресцирующий экран. Полученное изображение регистрировали на фотопластинке. Обычное стекло для ультрафиолетового света непрозрачно, поэтому оптику микроскопа, а также

предметное и покровное стекла изготовили из минералов — флюорита и кварца. Пришлось подбирать другие иммерсионные жидкости, и все равно удалось достичь числовой апертуры объектива лишь 1,25, т. е. почти на 20% ниже предельного значения, достигнутого в диапазоне видимого света.

Сегодня это можно назвать последней героической попыткой повысить предельное разрешение инструментов, использующих свет и излучения в диапазоне, близком к видимому спектру. К существенному успеху она не привела, но в последующем из нее извлекли кое-что ценное. Так, в случае прозрачных для видимого света биологических объектов удалось внести амплитудный контраст, используя то обстоятельство, что некоторые элементы клеток сильно поглощают ультрафиолетовое излучение. Еще в 30-х годах нашего века это наблюдение было использовано для определения того, в каких участках клетки находятся нуклеиновые кислоты и что с ними происходит при делении и других процессах в живой клетке. Эти исследования имели важнейшее значение для молекулярной биологии, которая открыла столь значительную роль нуклеиновых кислот.

Ультрафиолетовую микроскопию обычно называют *флуоресцентной*. Под действием ультрафиолетового излучения многие вещества органического и неорганического происхождения испускают видимый свет. Спектр свечения зависит как от спектра освещения, так и от свойств вещества. Анализируя это свечение от различных участков предметов, наблюдаемых в микроскоп, можно делать заключения не только о строении, но и о химическом составе участков препарата, что в очень многих задачах имеет чрезвычайно важное значение. Так микроскоп становится приставкой к спектрометру (или — дело вкуса — спектрометр становится приставкой к микроскопу; последнее звучит, наверное, лучше, хотя спектрометр не требует, чтобы ему «предъявляли» изображение: дифрагированные пучки света с разными длинами волн уже несут информацию о спектральном составе света).

Еще одной приставкой к микроскопу стала вычислительная машина. При рассматривании микроскопического изображения глазом или при разглядывании изображения, зафиксированного на фотопластинке, оценивают освещенность отдельных его участ-

ков лишь качественно. Тандему глаз — мозг в обычных условиях, видимо, большего и не требуется. Конечно, в приведенных словах есть некоторая неточность, оценка эта количественная в том смысле, что мы прекрасно ориентируемся в мире полутонов и улавливаем даже небольшой контраст смежных участков изображения. Но это количество мозг не выражает числом: для ориентировки в привычном мире числа далеко не всегда нужны. Не обязательны они и в микроскопии, но существует широкий круг исследовательских и практических задач, в которых надо знать относительные числовые значения освещенности отдельных участков микроскопического изображения. Для этого изображение, полученное в микроскопе, сканируют приемником света — фотометром, ток которого в зависимости от освещенности имеет, скажем, десять градаций. Ток подается на ЭВМ, которая быстро оценивает его значение, присваивает ему номер градации и эту информацию передает на экран телевизора.

Интересно, что, по крайней мере в принципе, электронная приставка к микроскопу, перерабатывая по специальной методике сигналы от смежных участков изображения, в состоянии дать представление о таких участках, размеры которых лежат за пределами разрешения самого микроскопа. Реализация этой возможности только начинается. Аналогичные исследования проводят и в телевизионной микроскопии. Изучение изображений в микроскопе или телескопе часто является нелегким трудом, и не удивительно, что многие этапы этого процесса, особенно те, которые находятся за пределами человеческих возможностей или изнурительно однообразны, исследователи стремятся поручить автоматам.



Изображения с помощью волн

Что такое прозрачность

Осветить, чтобы увидеть. Какой же смысл стоит за этими словами? Кажется даже странным доискиваться здесь скрытого смысла. Солнце, например, освещает предмет, он отражает солнечное излучение по разным направлениям, в том числе и в глаз. Хрусталик фокусирует отраженное различными участками предмета излучение на сетчатке, и на ней получается изображение предмета. Все это общеизвестно, — но что значит *отражает*? Предмет отражает падающую на него световую волну так же, как, скажем, отражается от берега морская волна, или иначе? Каков механизм отражения?

Ответ на эти вопросы непрост. Существует общая, феноменологическая теория волн, которая описывает закономерности их поведения при встрече с различными препятствиями, не интересуясь конкретными механизмами взаимодействия волн и препятствий. Но разработаны и более тонкие, так называемые микроскопические теории, которые по результатам взаимодействия позволяют судить не только о форме и размере препятствий, но даже о внутреннем их строении.

За таким простым с виду явлением, как отражение света, стоит сложное взаимодействие электромагнитной волны с электронами, входящими в состав рассеивающих тел. Отражение — это только частный случай рассеяния, а именно, — упорядоченное рассеяние назад. Впрочем, из повседневного опыта известно, что такое рассеяние бывает не только зеркальным, но и неупорядоченным, диффузным, как его называют. В сущности мы видим окружающие предметы именно благодаря диффузному отражению: при зеркальном отражении пучки света от обычных источ-

ников занимают столь малые области в пространстве, что глаз может «наткнуться» на них только случайно. Аналогично осуществляется и рассеяние вперед, причем такое рассеяние, если оно происходит упорядоченно, предпочитают называть дифракцией. Даже если мы видим предмет, как в обычном микроскопе, благодаря неравномерному поглощению света его участками, здесь все равно присутствует рассеяние. Оно поистине вездесуще.

При наблюдении в микроскоп, как и в реальной жизни, нас интересуют в первую очередь изображения предметов «на фоне» среды, т. е. изображения чего-то такого, что резко выделяется из окружения. Теперь остановимся на «изображении» самой среды. Из интуитивного понятия о среде как о чем-то однородном, лишенном характерных элементов, уже явствует, что выделение, распознавание таких элементов похоже на вызов здравому смыслу. Это и так, и не так. Здравый смысл говорит, например, о том, что вода, как и любая жидкость, — сплошная среда. Вместе с тем мы легко примирились с научным выводом, что она — несплошная, состоит из отдельных молекул. Молекул мы непосредственно не видим и в данном случае элементы среды понимаем как что-то неощутимо маленькое, достаточно однородно распределенное, подобно фигуркам на обоях или горошку на ткани. Физики же очень интересуются тем, как выглядят «фигурки», как они расположены, ибо это самым непосредственным образом определяет свойства крупных окружающих нас тел. Другими словами, речь идет о познании строения вещества, и нашим сегодняшним техническим могуществом мы во многом обязаны открытиям, сделанным в этой области. Многие из таких открытий и стали возможны благодаря изучению рассеяния волн, в первую очередь, конечно, электромагнитных.

В природе существуют волны и другого происхождения, например, волны на воде, звуковые волны. Но их длина, как правило, слишком велика, чтобы они позволяли разрешать отдельные элементы сред, которые интересуют ученых. Впрочем, в последние десятилетия удалось получить звуковые волны высокой частоты — так называемые *ультразвук* и *гиперзвук* (последнее название закреплено за волнами с частотой более миллиарда герц). Но даже у гиперзвуковых волн с частотой порядка 10^{10} Гц, рас-

пространяющихся в твердых телах, длина волны все еще имеет порядок длины световых волн. Правда, у них есть существенное преимущество: они могут проникать в тела, непрозрачные для света. Это открыло новую интересную главу в истории попыток увидеть невидимое. Разговор о ней уместно начать с вопроса: в чем сущность *прозрачности* и *непрозрачности* среды? Воздух довольно прозрачен для света, но стоит появиться туману — и видимость существенно ограничивается. Спокойная вода тоже достаточно прозрачна, но сквозь взвихренный поток воды или даже сквозь спокойную воду, добавив в нее лишь несколько капель молока, мы перестаем что-либо видеть. Жидкости и газы, как правило, в значительной мере прозрачны, твердые тела чаще всего непрозрачны. Исключения можно пересчитать по пальцам: стекло, некоторые минералы, немногие пластмассы. Металлы, даже очень тонкие их слои, почти непрозрачны.

Прозрачность тел определяется долей пропускаемого ими света по сравнению с долями рассеянного (в частности, отраженного, т. е. рассеянного назад) и поглощенного излучения. Но от чего зависят сами эти доли? Прежде всего — от свойств «элементов» среды и степени однородности их распределения. Падающее излучение уже на поверхности раздела начинает взаимодействовать с частицами среды. Для электромагнитного излучения это взаимодействие, если говорить на языке волновой теории, приводит частицы среды — электроны — в колебания, в результате которых они переизлучают волну, причем в общем случае — по всем направлениям. На языке квантовой теории такое взаимодействие описывается как рассеяние фотонов электронами в среде и поглощение их атомами и молекулами. Естественно, что оба описания эквивалентны, но квантовое описание позволяет анализировать и предсказывать такие явления, которые «не по зубам» волновой теории.

Отметим, что электроны в средах, в которых они движутся почти свободно, чувствительны к электромагнитным волнам практически любых частот, или, другими словами, к фотонам любых энергий. К таким средам относятся металлы и плазма, т. е. сильно ионизованный газ, в котором находится много освободившихся из атомов электронов. Среда же, в которых почти нет свободных

электронов, реагируют на электромагнитное излучение совсем иначе. Электроны в атомах, как это следует из квантовой механики, могут иметь только некоторый определенный набор энергий. Взаимодействие электронов с фотонами заключается в том, что электрон либо, не меняя своей энергии, рассеивает фотон, либо переходит из состояния с одной энергией в состояние с другой, заимствуя энергию перехода у фотона. Соответственно говорят об *упругом* и *неупругом* рассеянии фотонов на атомах, или на атомных электронах.

Поскольку набор энергий электрона в атомах фиксирован (существует лестница энергетических уровней), ступеньки такой лестницы имеют определенную высоту и фотон взаимодействует с электроном не при любых, а только при некоторых энергиях, равных высоте энергетических ступенек. По мере уменьшения энергии электрона в атоме ступеньки энергетической лестницы становятся все ниже, располагаются теснее, и в этой области энергий взаимодействие фотона с электроном все более начинает походить на рассеяние фотона почти свободным электроном.

Сказанное позволяет объяснить отличие рассеяния света металлами от рассеяния неметаллическими кристаллами. В металлах много свободных электронов, они благодаря своей большой подвижности и обеспечивают высокую электропроводность металлов. Вместе с тем эти электроны сильно рассеивают свет, практически не пропуская его внутрь металла: электромагнитная волна ослабляется в сотни раз уже на пути, равном всего лишь одной длине волны. И такое рассеяние наблюдается в широчайшем диапазоне электромагнитных волн — от самых длинных радиоволн до ультрафиолетового излучения. Лишь в области рентгеновского излучения и тем более гамма-излучения металлы становятся отчасти прозрачными для электромагнитных волн, но даже чрезвычайно энергичное гамма-излучение поглощается в нескольких метрах металла практически полностью. Здесь, однако, действуют другие механизмы рассеяния и поглощения, нежели в области видимого света.

Что касается неметаллических кристаллов, то, как уже сказано, свободных электронов в них почти нет. Область энергий, в которой фотоны взаимодействуют с электронами, довольно узка.

Это область, где происходит поглощение фотонов. А в остальных областях электроны нечувствительны к фотонам и кристаллы довольно прозрачны. Точнее: упругое рассеяние фотонов на атомных электронах происходит, но поскольку атомы в кристаллах расположены регулярно, рассеянные ими волны, интерферируя, гасят друг друга во всех направлениях, кроме направления распространения падающего на кристалл пучка фотонов. В твердых прозрачных кристаллах электромагнитные волны испытывают рассеяние только на неоднородностях структуры кристаллов.

Интроскопия

А сейчас обратимся к наблюдению объектов в непрозрачных для света средах, или *интроскопии*. Понятно, что радиоволны, видимый свет и близкое к ним по длинам волн электромагнитное излучение для этой цели непригодны. Даже если непрозрачная среда — всего лишь тонкая стенка, отделяющая одну прозрачную среду от другой, причем в одной находится наблюдатель, а в другой — наблюдаемый объект, то отражение или поглощение волн в стенке не позволит изучать объект.

Можно попытаться использовать звуковые волны. Конечно, они тоже отражаются средой и поглощаются в ней, но для них механизм этих явлений совсем иной: звуковые волны приводят элементы среды — атомы и молекулы — в механические колебания, которые сопровождаются более медленными потерями энергии при распространении волн. Отражение происходит главным образом на границе раздела между средой и воздухом и характеризуется коэффициентом, зависящим от отношения так называемых удельных акустических сопротивлений воздуха и среды, равных произведению их плотности на скорость распространения звуковых волн в них. Если это отношение обозначить γ , то коэффициент отражения

$$R_{зв} = (1 - \gamma)^2 / (1 + \gamma)^2. \quad (17)$$

Чтобы получить представление о порядке R , возьмем типичные для среды значения $\rho_{ср} \approx 5 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_{ср} \approx 5 \cdot 10^3$ м/с, так что $(\rho c)_{ср} \approx 2,5 \cdot 10^7$ кг/(м²·с), а $(\rho c)_{возд} \approx 4,3 \cdot 10^2$ кг/(м²·с), откуда

$\gamma \approx 1,7 \cdot 10^{-5}$. Из формулы (17) тогда видно, что значение R очень близко к единице, и лучше использовать коэффициент пропускания $T = 1 - R = 4\gamma / (1 + \gamma)^2 \approx 7 \cdot 10^{-5}$. Иными словами, при падении звуковой волны на границу твердой среды и воздуха более чем 99,99% ее энергии отражается и только 0,01% проходит внутрь.

Поэтому излучатель звука приходится погружать в промежуточную жидкость или в саму среду, если она жидкая. Отражение звука на границе жидкости с излучателем и с твердой средой тоже ослабляет звуковую волну, но уже далеко не в такой степени. Если промежуточной средой является вода, то в твердую среду проходит обычно около 10% звуковой энергии. Разумеется, отраженный звук, приходящий из среды, испытывает на пути к его приемнику такое же ослабление. Однако, применяя соответствующие преобразователи и усилители, можно получить достаточную интенсивность сигнала.

Поговорим о важнейшем для всех попыток увидеть невидимое вопросе — о разрешении. Приведенные в предыдущей главе формулы для разрешения сохраняют свою силу применительно к любым видам волн, в том числе и звуковым. Из них следует, что для обнаружения в среде неоднородности размером d длину волны звука надо выбирать меньше или порядка d . Саму неоднородность можно найти разными способами. Поскольку значение удельного акустического сопротивления для нее отличается от такового для среды, неоднородность будет отражать звук. Регистрация возникшего отраженного сигнала составляет сущность эхолокации. Неоднородность можно обнаружить и на просвет, как невооруженным глазом, так и с помощью микроскопа. Акустический микроскоп по принципу своего действия ничем не отличается от светового микроскопа.

Допустим, мы хотим, чтобы разрешение акустического микроскопа было таким же, как у оптического, т. е. чтобы $\lambda_{зв} \approx \lambda_{св} \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м. Если принять скорость звука в среде равной $5 \cdot 10^3$ м/с, то частота звука составит 10^{10} Гц. Как уже говорилось, до недавнего времени звук такой чрезвычайно высокой частоты не умели получать. Но дело не только в этом. Звук в твердых телах, как и в любой среде, поглощается, его энергия идет на раскачку атомов и молекул и в конечном итоге переходит в тепло. При этом

на высоких частотах коэффициент поглощения звука пропорционален квадрату его частоты. Обычно ограничиваются частотами звука в пределах от нескольких десятков килогерц до нескольких мегагерц, что соответствует ультразвуку. А значит, и разрешение имеет порядок миллиметров и даже больше.

Особенностью эхо-локации является то, что в ней на изучаемую среду посылают не непрерывную волну, а короткий импульс, и затем регистрируют короткий отраженный импульс. По времени Δt , прошедшему между моментами послышки и приема импульса, легко определить расстояние до неоднородности в среде:

$$l = c\Delta t/2, \quad (18)$$

где c — скорость звука в среде (тонким слоем промежуточной среды при этом пренебрегают).

Размеры неоднородности в направлении, перпендикулярном направлению распространения импульса, оценивают по интенсивности отраженного сигнала: чем больше эти размеры, тем сильнее эхо. О форме неоднородности можно судить, регистрируя сигналы, отраженные по разным направлениям (если среда допускает «озвучивание» с разных сторон). С помощью эхо-локации определяют наличие, глубину залегания, а в некоторых случаях — размеры и форму дефектов в сплошных материалах, расположение внутренних частей в непрозрачных для света объектах и искажения их формы (например, диагностируют различные заболевания внутренних органов человека, в том числе опухоли), производят локацию посторонних предметов в жидкостях (например, косяков рыбы, подводных лодок и затонувших кораблей в море).

Когда это возможно, ультразвуковое зондирование применяют и на просвет (теневой метод). В нем импульсные звуковые сигналы не нужны, что позволяет воспользоваться ультразвуковой микроскопией, причем можно видеть не только непрозрачные, но и прозрачные для звука предметы. На резко разграниченных неоднородностях среды звук сильно отражается, и поэтому в проходящем звуке возникает тень от них. Разумеется, на неоднородности имеет место дифракция звука, которая и определяет разрешение теневого микроскопа. В других случаях, когда акустическое сопротивление изменяется плавно между средой и неоднородностью в

ней, происходит постепенное изгибание звуковых волн (рефракция). При этом различные участки волны проходят разные пути, а значит, между ними возникает разность фаз, и становится возможным применение интерференционной акустической микроскопии. Поскольку нетрудно получить ультразвуковые волны с большими длинами временной и пространственной когерентности, такая возможность привела к быстрому развитию *акустической голографии* и появлению голографических ультразвуковых микроскопов.

Аналогичное зондирование осуществляют также с помощью рентгеновского и гамма-излучений, имеющих очень малые длины волн. Так как энергия этих излучений в большинстве случаев существенно превышает энергию электронов в атомах, молекулах и кристаллах, эффекты их переизлучения электронами играют сравнительно малую роль и такие явления, как преломление и отражение, перестают быть заметными. Фотоны этих излучений* рассеиваются преимущественно вперед, поэтому использовать такие излучения в интроскопии можно практически только при работе на просвет.

Поскольку размеры дефектов и других неоднородностей в этом случае намного превышают длины волн, изображения неоднородностей, сильнее или слабее поглощающих излучения, нежели окружающая среда, получаются довольно резкими. Правда, для этого необходимо, чтобы размеры источников излучения в направлении, перпендикулярном направлению наблюдения (участки анода рентгеновской трубки, отверстия в контейнере с гамма-радиоактивным препаратом и т. п.), были меньше размеров неоднородностей. Более детально эти вопросы рассмотрены в разделе, посвященном рентгеновским микроскопам.

Рассеяние света

Рассмотрим рассеяние света в газах и жидкостях. Без сомнения, одно из этих явлений всем хорошо известно: благодаря ему можно, например, видеть лучи света, падающие сбоку

* Фотон в этой книге понимается широко — как квант не только света, но и любого излучения. Поэтому далее используют такие термины, как радиофотон и рентгеновский фотон.

в темное помещение. И, как мы узнаем дальше, оно вообще позволяет видеть с большими подробностями непосредственно окружающий нас мир предметов.

Первый вопрос на этом пути, который предстояло решить физикам, собственно говоря, очень стар: почему небо голубое? К нему можно присоединить еще такие вопросы: почему при восходе и закате солнце красное; почему малиновый закат предвещает ветреную погоду? В прошлом веке к ним добавился еще один, возникший в результате исследований: почему свет неба в направлении, перпендикулярном направлению на Солнце, почти полностью поляризован?

Вопросом о причинах яркости дневного неба задавались еще ученые, жившие много веков назад. Арабский физик Альхазен еще в XI в. высказал мысль, что свечение дневного неба вызвано отражением солнечного света от находящихся в воздухе частиц. Леонардо да Винчи около 1500 г. писал: «Я говорю, что синева воздуха не есть его собственный цвет, а вызвана теплыми испарениями маленьких и нечувствительных атомов, на которые падают солнечные лучи, вызывая их свечение на фоне бесконечной тьмы той небесной сферы, которая окружает их и заключает в себе... Если получить негустой дым от сухого дерева и бросить на него солнечные лучи, то мы увидим, как черная ткань помещенного позади него куска бархата окрасится в великолепный голубой цвет... Голубые лучи также появляются, если воду тонкой струйкой впрыскивать в ящик, в который проникают лучи Солнца... Из этого я заключаю, что воздух в небе имеет голубой цвет потому, что частицы влаги в нем захватывают солнечные лучи».

Но прошло еще три века эпизодических наблюдений рассеяния света, пока, наконец, не появилось первое теоретическое объяснение явления. Серьезные эксперименты начались с того, что можно назвать «моделированием неба». Такое «искусственное небо» в начале 50-х годов прошлого столетия уже упоминавшийся Брюкке изготовил из взвеси тонко размолотой мастики в спирте. Через несколько лет вместо мастики был взят табачный порошок. Наконец, в 1869 г. английский физик Тиндаль провел серию точных количественных экспериментов с мельчайшими взвешенными в воздухе частицами различных дымов. Теперь уже не оставалось сомне-

ний в том, что синева папиросного дымка и синева дневного неба имеют в каком-то смысле общее происхождение.

Может быть, и в воздухе присутствуют мельчайшие частицы пыли, поднятые ветром или занесенные в атмосферу при извержениях вулканов? Но тогда почему при подъеме в горы наблюдается более густая синева неба? Многие из нас путешествовали на современных самолетах выше самых высоких гор и знают, что на такой высоте небо имеет гораздо более насыщенную сине-фиолетовую окраску и вместе с тем меньшую яркость свечения, чем при взгляде с равнины. Запыленность же атмосферы, естественно, с высотой должна уменьшаться. Так что мысль об общем происхождении синевы папиросного дыма и неба относится, скорее, к сходному физическому механизму, нежели к одинаковым источникам окраски.

Надо сказать, что параллельно с правильным в принципе объяснением существовало и неверное объяснение синевы неба, восходящее еще к Ньютону. Ньютон, как известно, много занимался интерференционными цветами тонких слоев вещества. Он предположил, что небо окрашивается в синий цвет в результате интерференции солнечных лучей, отраженных от передней и задней поверхностей мелких водяных капелек, находящихся в воздухе. При таком отражении полная поляризация света должна была бы наступать при угле 74° — значении угла Брюстера для воды, — а не при наблюдаемом угле отражения 45° (т. е. при угле 90° с направлением на Солнце). Впоследствии Брюкке отметил, что оттенки синевы неба и интерференционных цветов резко различаются. Были и другие доводы против ньютоновского объяснения, так что в середине прошлого века физики практически от него отказались.

Итак, чем вызывается рассеяние света? Тиндаль считал — мелкодисперсными капельками воды в верхних слоях атмосферы. Поскольку вода может быть туда занесена только испарением с земли, он заключил, что синева неба и поляризация рассеянного солнечного света являются «двумя великими загадками метеорологии». Самое интересное, что объяснить, хотя бы в основных чертах, механизм рассеяния света на мелких частичках, т. е. голубой цвет неба, и поляризацию рассеянных лучей удалось и без знания

природы рассеивающих частиц. Это сделал английский физик Рэлей в 1871 г., через два года после экспериментов Тиндала.

Рассуждения Рэля выглядят чрезвычайно просто и элегантно. Начнем с объяснения поляризации рассеянного света. Предположим, что на маленькую сферическую частицу (маленькую по сравнению с длиной волны, чтобы электромагнитное поле в пределах частицы можно было считать постоянным) падает неполяризованная световая волна. Под действием электрической составляющей поля волны произойдет поляризация частицы, заряды обоих знаков в ней разойдутся в противоположные стороны, и она станет похожей на гантель. Такое гантелеобразное распределение зарядов называют диполем. Наш диполь будет колебаться в такт с падающей на него световой волной.

Колеблющийся диполь всегда испускает электромагнитное излучение — в данном случае оно представляет собой просто рассеянный свет. Рассмотрим ту его часть, которая испущена диполем в направлениях, перпендикулярных направлению распространения падающей волны (все эти направления лежат в одной плоскости). Неполяризованную световую волну можно разложить на две компоненты, полностью поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях. Выберем любое из этих направлений в качестве направления распространения рассеянного под углом 90° света. Но тогда, попытавшись представить и рассеянную волну в виде двух поляризованных компонент, как раньше падающую волну, мы увидим, что одно из этих направлений поляризации совпадает с направлением распространения исходной волны, а она, будучи поперечной, в этом направлении поляризации не имела. Следовательно, возможна только вторая поляризованная компонента, а это означает, что рассеянная под углом 90° волна полностью поляризована.

Голубой цвет рассеянного излучения объясняется так. Ясно, что интенсивность рассеянного света зависит от интенсивности света, падающего на частицу, и их отношение выражается некоей безразмерной функцией. Что может входить в эту функцию? Объем рассеивающей частицы, расстояние от нее до точки наблюдения, длина волны света и показатели преломления частицы и среды (две последние величины безразмерны). Поскольку частица-диполь излучает по всем направлениям, интенсивность уменьшается

обратно пропорционально квадрату расстояния. Напряженность поля диполя пропорциональна объему частицы, интенсивность же излучения пропорциональна квадрату напряженности поля, т. е. квадрату объема частицы. Чтобы комбинация объема V , расстояния r и длины волны λ не имела размерности, приходится принять, что длина волны входит в отношение интенсивностей в четвертой степени. Таким образом, интенсивность рассеянного света

$$I_p \propto (V^2/r^2\lambda^4) f(n_1, n_2) I_0, \quad (19)$$

где I_0 — интенсивность падающего света; f — некоторая функция показателей преломления, вид которой несуществен для нас. Это означает, что интенсивность рассеянного света чрезвычайно быстро растет с уменьшением длины волны. Поэтому, хотя в собственном излучении Солнца синий участок спектра представлен сравнительно слабо, энергия рассеянного небом излучения в значительной степени сосредоточивается именно в этой области.

Еще раз напомним, что речь идет о рассеянном солнечном свете. Наблюдать падающий свет Солнца невооруженным глазом невозможно, но специальные измерения с помощью спектральных приборов показывают, что Солнце при наблюдении из космоса немного «зеленее», чем при взгляде на него с поверхности Земли. Описанное явление, конечно, связано с тем, что при взаимодействии с атмосферой из солнечного света отсеялась часть коротковолнового излучения. Это особенно заметно, когда Солнце находится низко над горизонтом и его излучение проходит в воздухе намного больший путь, чем днем. Тогда Солнце становится почти красным — из его спектра значительно отсеяны уже не только синие, но и зеленые и желтые лучи. Если в нижних слоях атмосферы, через которые в этом случае преимущественно идет солнечное излучение, много пыли, что бывает при ветреной погоде, Солнце еще более «багровеет», так как частицы пыли вносят свой вклад в рассеяние света.

Когда Рэлей опубликовал свою первую теорию рассеяния света на атмосферных частицах, природа этих частиц еще оставалась неизвестной. (Ясно было лишь, что их размеры должны быть много меньше длины световых волн, чтобы поле волны в их пределах можно было бы считать постоянным.) Но спустя два года

Рэлей получил письмо от своего коллеги Максвелла, который в те годы уделял много внимания обоснованию молекулярной теории газов. Поэтому естественно, что он предложил Рэлею на роль кандидатов в рассеивающие частицы молекулы воздуха. Однако Рэлей не торопился с ответом. После своей первой работы по рассеянию света он надолго отошел от этой проблемы и молекулярную теорию света опубликовал только в 1899 г. Окончательный результат ее получился, однако, неудовлетворительным: интенсивность рассеяния оказалась слишком малой, при такой интенсивности небо должно было выглядеть намного более темным, чем в действительности. Корень неудачи, как выяснилось несколько лет спустя, заключался в том, что Рэлей считал атмосферный воздух слишком однородным и полагал, что единственными рассеивающими центрами являются сами молекулы. Но идеально однородных сред в природе не существует. Даже абсолютно чистый воздух, из которого полностью удалены все посторонние твердые и жидкие частицы, совершенно неподвижный, можно считать однородным только условно.

Более глубоко рассмотрели эту проблему Эйнштейн и польский физик Смолуховский. Они установили, что при хаотическом тепловом движении молекул газа всегда существуют флуктуации их числа в некотором объеме газа. Эти флуктуации тем больше, чем меньше выбранный объем газа. Естественно, что вследствие флуктуаций воздух становится менее однородным. В объемах воздуха размерами существенно меньше длины световой волны содержится так мало молекул, что флуктуации их числа уже вполне заметны. Можно поэтому говорить, что свет рассеивается преимущественно не на самих молекулах, а на несколько более крупных неоднородностях — флуктуациях плотности молекул в малых объемах. Зная распределение флуктуаций по величине, Эйнштейн и Смолуховский смогли повторить расчет Рэрея. Теперь он привел к хорошему совпадению с наблюдаемой яркостью свечения дневного неба.

Легко понять, что рассеяние света в атмосфере — в самом прямом смысле нечистое явление. Кроме молекул атмосферных газов, в воздухе всегда присутствуют пыль, водяные капельки; атмосфера неспокойна. Помимо однократного рассеяния на пути от

Солнца к наблюдателю, свет претерпевает и многократное рассеяние. Показатели преломления воздуха и частиц в нем в общем случае зависят от длины волны. Правда, все эти поправки практически не изменяют основную зависимость $I_p \propto 1/\lambda^4$.

В 1914 г. расчеты Рэлея были уточнены с учетом молекулярных флуктуаций, поглощения солнечного света находящейся в воздухе пылью и еще некоторых факторов. После этого можно было найти число молекул на пути солнечного света через атмосферу, учитывая при этом уменьшение ее плотности с высотой по барометрической формуле, а это позволило вычислить число молекул в объеме воздуха, соответствующее молю, — число Авогадро. Так из измерений рассеяния света было получено значение числа Авогадро, которое оказалось очень близким к найденному химиками. Гипотеза о молекулярном строении газов получила еще одно, на этот раз оптическое, обоснование.

Эффективное сечение рассеяния

Прежде чем рассматривать рассеяние более подробно, нужно ввести количественные определения. Начнем с *угла рассеяния*, который образуют между собой направления рассеянного и падающего фотонов. Далее, учтем, что рассеяние обычно происходит в объеме, т. е. его надо рассматривать в трех измерениях. Для этого рассеивающую частицу окружают воображаемой сферой достаточно большого радиуса, центр которой совпадает с частицей. В отличие от окружности, которая охватывает плоский угол 2π , такая сфера охватывает телесный угол 4π (он равен площади сферы, деленной на квадрат ее радиуса).

Вырежем на поверхности сферы квадратную площадку со стороной d и соединим ее вершины с центром сферы по радиусам (рис. 9). Получится пирамидка с «продавленным» основанием, которая, очевидно, стягивает телесный угол $4\pi d^2/R^2$. В центр этого квадрата направим из центра сферы прямую под углом рассеяния θ . Число фотонов, попавших в эту пирамидку и в конечном счете на ее основание, характеризует степень рассеяния под данным углом θ . Разумеется, это число зависит от размеров квадратной площадки. Малый телесный угол можно обозначить $\Delta\Omega$,

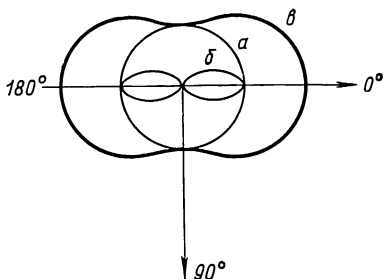
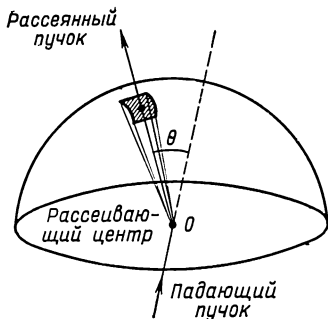


Рис. 9. К определению сечения рассеяния

Рис. 10. Индикатрисы рассеяния света:

a — свет поляризован перпендикулярно плоскости рассеяния; b — свет поляризован в плоскости рассеяния; δ — свет неполяризован

число попавших в единицу времени в него частиц ΔN . Отношение $\Delta N/\Delta\Omega$ по мере уменьшения $\Delta\Omega$ стремится к пределу, зависящему, конечно, и от числа фотонов в исходном пучке, падающем на рассеивающую частицу в единицу времени, N_0 . Чтобы устранить и эту зависимость, поделим отношение $\Delta N/\Delta\Omega$ на N_0 . Тогда получим определение очень важной величины, которую называют *дифференциальным сечением рассеяния*:

$$\sigma(\theta) = (1/N_0) \Delta N/\Delta\Omega. \quad (20)$$

Естественно, что в общем случае $\sigma(\theta)$ зависит от угла рассеяния. Просуммировав эти сечения по всем углам рассеяния, получим полную долю рассеянных фотонов N_p :

$$\sum \sigma(\theta) \Delta\Omega = N_p/N_0 = \bar{\sigma}. \quad (21)$$

Величину $\bar{\sigma}$ называют *интегральным сечением рассеяния* (в оптике это — относительная интенсивность всего рассеянного света), а зависимость $\sigma(\theta)$ — *индикатрисой рассеяния*. Эта зависимость показана на рис. 10 для рассеяния, рассчитанного Рэлеем. Чтобы получить объемный вид зависимости, ее надо поворачивать вокруг направления падающего света.

Рассказывая о рэлеевском рассеянии света, мы имели в виду частицы с размерами, существенно меньшими длины волны света. Казалось бы, если на такие частицы падает единая световая волна, то фазы всех переизлученных волн должны быть постоянны, а рассеянный свет — когерентен. Однако так было бы при неподвижных рассеивающих молекулах. Но при отличной от абсолютного нуля температуре они совершают тепловое движение, и путь, проходимый ими между последовательными столкновениями друг с другом, при атмосферных условиях может оказаться во много раз больше длины световой волны (или длины когерентности). Тогда, конечно, при расчете интенсивности света, рассеянного некоторым объемом, нужно суммировать не амплитуды, а интенсивности света, рассеянного отдельными молекулами, чего не делал Рэлей. Такой вывод не изменило и последующее уточнение представлений Рэля, в котором за рассеивающие центры принимаются уже не сами молекулы, а флуктуации их числа в малых объемах.

Сделаем еще одно замечание. Даже когда размеры рассеивающих частиц малы по сравнению с длиной волны света, частицы нельзя считать точками. Это видно хотя бы из формулы (19), в которой фигурирует объем частиц V . Образно говоря, волна, падающая на частицу радиусом a , «видит» перед собой кружок, диск радиусом a и площадью πa^2 . Эта величина есть сечение частицы. Интенсивность рассеяния только пропорциональна, а не равна πa^2 : в выражении (19) фигурирует множитель $V^2/\lambda^4 = (4\pi/3)^2 a^6/\lambda^4 = \pi a^2 (16\pi/9) a^4/\lambda^4$. Если отвлечься от числового множителя, то интегральное сечение рассеяния можно записать в виде $\overline{\sigma} = s\alpha^4$, где s — площадь диска; α — отношение его размеров к длине волны. Наличие этого множителя и делает понятным, почему говорят не о *геометрическом*, а об *эффективном* сечении рассеяния. Различие этих величин обусловлено тем, что рассеивающая частица для падающей на нее волны — не просто непрозрачный диск, при рассеянии происходит сложное взаимодействие волны и частицы, зависящее и от отношения ее размеров к длине волны, и от формы частицы, и даже от некоторых свойств частицы. Зная дифференциальное и интегральное эффективные сечения рассеяния, можно находить размеры рассеивающих частиц и даже механизм их взаимодействия с рассеиваемыми волнами. Это и определяет большое

значение эффективных сечений при исследовании строения различных рассеивающих сред и составляющих их элементов.

До сих пор говорилось о теоретическом объяснении таких «видимых» явлений, как синева дневного неба или краски заката. Но рассеяние света позволяет получить представление и о невидимом. Разумеется, речь идет не о наблюдении изображений в оптических приборах, а о косвенном методе изучения. При исследовании рассеивающих объектов решают задачи двух видов. Первый нам уже понятен: задаются формой частицы, ее размерами (по отношению к длине волны излучения), ее свойствами (металл или диэлектрик) и рассчитывают распределение интенсивности (или дифференциальное эффективное сечение) рассеянного ею света в пространстве. Затем задачу усложняют: много рассеивающих частиц «располагают» на разных средних расстояниях друг от друга так, чтобы эти расстояния находились в разном отношении к длине волны. Математически это очень сложные задачи, решение их было получено только в начале нашего века.

Но исследователей невидимого интересует вторая (обратная) задача: как по измерениям интенсивности рассеянного излучения сделать заключение о распределении, размерах и форме рассеивающих частиц в среде? В распоряжении исследователей имеется много материала: пространственное распределение рассеянного излучения, его относительная интенсивность, поляризация, спектральное распределение. Но уж очень сложен математически, а главное, неоднозначен этот обратный подход. Поэтому поступают так: результат решения прямой задачи «примеривают» к имеющимся данным, строят одну за другой модели рассеивающей среды и отдельных ее частиц и смотрят, какая из моделей лучше описывает все многообразие данных. По существу это означает построить из зримых образов образ невидимого.

Именно так «работает» наука в микромире. И если принятая в конечном итоге модель незримого верна, то она должна давать правильные ответы и в широком круге других явлений, может быть, вовсе не связанных с рассеянием света и других видов волн. Иногда благодаря развитию техники наблюдения кое-что из невидимого удается сделать непосредственно видимым. Тогда нередко глаз подтверждает правильность тех моделей, которые были

положены в основу «умозрительных» представлений. Так было с представлениями о форме и размерах молекул полимеров, которые сначала определяли по рассеянию света, а затем уже наблюдали в электронный микроскоп.

Из зависимости $\bar{\sigma}$ от α видно, что интенсивность рассеяния света стремительно возрастает по мере того, как размеры рассеивающих центров приближаются к длине волны излучения. (Строго говоря, теория рэлеевского рассеяния при этом неприменима, поскольку поле в пределах частиц перестает быть постоянным, но некоторые качественные выводы теории остаются по-прежнему в силе.) При $a \approx \lambda$ мы имеем дело, как говорят физики, с *мутной средой*. Примеров подобных сред известно великое множество: так, в атмосфере это туман или облака, состоящие из мелких капелек воды, размеры которых сравнимы с длиной волны света. В таких средах частицы имеют самые разнообразные размеры, но если эти размеры приблизительно равны длине волны света, то спектральная зависимость рассеяния существенно ослабляется. Туман и облака выглядят серыми, т. е. примерно одинаково переизлучают солнечный свет на всех длинах волн.

Небо в радиоволнах

Для радиоволн туман и облака в значительной мере прозрачны, поскольку даже крупные капли воды или кристаллы льда в воздухе намного меньше, чем длина даже коротких радиоволн. Правда, и здесь порой приходится считаться, например, с рассеянием радиоволн на частицах снега и града, капельках дождя, и не только считаться, но и использовать это явление для метеорологических наблюдений.

Использование радиоволн для наблюдения невидимого превратилось сегодня в важную область техники. Прежде всего, конечно, мы имеем в виду радиолокацию. Точно так же, как отражение звука от дефекта в металлической отливке позволяет эхолокацией определить местоположение дефекта и даже судить о его размерах, отражение радиоволн от неоднородностей в воздухе, имеющих любое — естественное или искусственное — происхождение, позволяет обнаруживать гроззовые облака, самолеты,

ракеты и даже плазменные следы от влетающих в атмосферу метеоров и заканчивающих свое существование искусственных спутников. Более того, рассеяние радиоволн от окружающего Землю плазменного слоя — ионосферы — позволяет осуществлять земную радиосвязь.

На коротких радиоволнах ионосфера, однако, становится довольно прозрачной. Поэтому таким способом не удастся осуществлять телевизионную связь, но зато появляется возможность принимать на Земле радиоизлучение космических объектов. Из этого в последние тридцать лет выросла важнейшая область науки — радиоастрономия. Многие космические объекты, испускающие радиоизлучение, не видны даже в самые сильные оптические телескопы или выглядят в них как очень слабые и порой вовсе не примечательные пятнышки. Однако нередко такой контраст между видимым изображением и радиоизображением связан не столько с различием мощностей соответствующих излучений, сколько с разным их поглощением и рассеянием на пути от источников к приемникам, в том числе с рассеянием в атмосфере Земли, и с различием в чувствительности самих приемников.

Чувствительность приемника в первую очередь связана с его площадью. Самый крупный в мире оптический телескоп имеет диаметр собирающего свет зеркала 6 м, а диаметр антенны самого крупного поворотного радиотелескопа составляет около 100 м, т. е. площади их различаются более, чем в 250 раз. Существуют и более крупные неподвижные, вернее, поворачивающиеся вместе с нашей планетой радиотелескопы. Но поворотные телескопы имеют важное преимущество, их можно «нацелить» на одну точку небосвода и собирать излучение от определенного космического источника в течение достаточно длительного времени. Для сверхслабых источников, фотоны от которых приходят в телескоп чуть ли не поштучно, это приобретает важное значение.

О замечательных открытиях радиоастрономии, сделанных в последние годы, в первую очередь квазарах и пульсарах, написано много статей и научно-популярных книг. Детальное исследование этих космических объектов стало возможным лишь благодаря рекордным чувствительности и разрешению радиоастрономических инструментов. Радиоастрономия развивалась в неблаго-

приятных условиях по сравнению со своей «старшей сестрой» — оптической астрономией: радиифотон несет в миллионы раз меньшую энергию, чем световой фотон, и длина его волны во столько же раз больше. Но несмотря на это, «младшая сестра» обогнала старшую и раздвинула рамки наблюдаемой Вселенной, пожалуй, в добрый десяток раз.

Сегодня эти рамки находятся на расстоянии примерно 10 млрд световых лет от Земли. Само по себе это число, кроме того, что оно значительно превышает земные и даже межпланетные расстояния, мало о чем говорит. Но оно приобретает важное значение в связи с гипотезой, согласно которой вся наблюдаемая Вселенная возникла около 20 млрд лет назад в результате гигантского взрыва некоего сравнительно небольшого, но чудовищно плотного и горячего сгустка вещества. Чем дальше от нас находится космический объект, тем более раннюю стадию его развития мы наблюдаем. И если верить этой теории «происхождения» Вселенной (а ее сегодня поддерживает большинство астрономов), то, повысив еще сравнительно немного чувствительность астрономических инструментов, мы смогли бы наблюдать чуть ли не сам этот гигантский взрыв. К некоторому разочарованию читателя нужно отметить, что самая интересная начальная стадия взрыва, видимо, длилась лишь считанные доли секунды, хотя «осколки» от него разлетаются уже миллиарды лет. Можно задать даже такой интригующий вопрос: а что мы увидим, если удастся заглянуть еще дальше? Вопрос задать, конечно, можно, но вот ответа на него в этой, да и в других книгах не найти: он просто неизвестен. Трудно рассуждать о таких вещах, как время существования начального сгустка вещества, или о том, как вообще понимать ход времени в этом сгустке, если считать его неизменяющимся: само время теряет смысл, если ничто не меняется.

В последние годы в астрономии стали использовать и другие электромагнитные излучения, которые невозможно принимать на Земле, поскольку на пути от космических объектов они сильнее всего поглощаются в земной атмосфере. Речь идет о рентгеновском и гамма-излучениях. Исследования теперь охватывают практически весь диапазон длин волн электромагнитных излучений — от кратчайших, порядка 10^{-15} м, до чрезвычайно длинных,

порядка 10^5 м. Изучение характера электромагнитного излучения космических объектов в таком фантастически широком диапазоне позволяет делать весьма интересные выводы о строении самих объектов — пульсаров, черных дыр, галактик и целых систем галактик, о свойствах межзвездной среды и о процессах эволюции Вселенной.

Но, как известно, великое и малое сходятся. Те же рентгеновское и гамма-излучения помогают изучать строение вещества в масштабе кристаллов, молекул, атомов и атомных ядер. Начало таких исследований датируется первыми годами нашего столетия.

Рентгеновское излучение и кристаллы

Открытие «икс-лучей» Рентгеном в 1895 г. произвело сенсацию и было сразу признано всем научным миром, но еще долго оставалась неясной их природа (выражаясь современным языком, не известно было, поток фотонов или же частиц они собой представляют). Доказать волновую природу рентгеновского излучения с помощью дифракции или интерференции в те годы не удавалось. Сегодня нас уже не удивляют неудачи этих первых попыток. Показатель преломления всех веществ для рентгеновского излучения практически равен 1 ($n < 1$ и отличается от 1 на миллионные доли в связи с тем, что энергия рентгеновских фотонов значительно больше энергии почти всех переизлучающих их электронов). Поэтому фокусировать такие фотоны обычными способами, с помощью линз и зеркал, чрезвычайно трудно. Дифракцию рентгеновского излучения на краях препятствий также практически не удавалось наблюдать, поскольку размеры препятствий слишком велики по сравнению с длиной волны (сегодня известно, что она имеет порядок 10^{-10} м, но в те годы этого точно не знали).

Впрочем, какие-то слабые намеки на то, что рентгеновское излучение имеет волновую природу, все же были. Сам Рентген обнаружил, что его икс-лучи немного рассеиваются, главным образом вперед. Однако это еще мало о чем говорило: как будет показано дальше, подобным образом могут рассеиваться и частицы. Но вот в 1905 г. английский физик Баркла провел более тща-

тельные измерения рассеянного излучения. Он попытался рассеянное на угол 90° излучение рассеять еще раз на такой же угол в той же плоскости, и у него ничего не получилось. Физики того времени знали уже, что это может означать. Согласно теории Рэлея, как мы помним, свет, рассеянный под углом 90° от мелких частиц, становится полностью поляризованным. Второй раз рассеять его на 90° нельзя: он не имеет компоненты в этом направлении, поскольку световая волна поперечная. Значит, икс-лучи — тоже поперечные волны? Ведь вывод Рэлея справедлив для электромагнитных волн всех видов.

Но далеко не все физики соглашались с этим доводом. Английский физик Вильям Генри Брэгг (или, как его называют, Брэгг-отец) имел, как ему казалось, не меньше оснований утверждать, что икс-лучи — это частицы. Они энергично выбивали электроны из атомов, и путь их в воздухе был усеян многочисленными ионами. До той поры физики полагали, что ионизовать воздух могут только частицы. Конец сомнениям относительно природы икс-лучей положил один замечательный эксперимент. Но к нему нужна краткая предыстория.

Еще в древности было известно, что многие кристаллы имеют правильную, симметричную форму. Правда, для кристаллов правильная естественная огранка, — скорее, исключение, такие кристаллы попадаются сравнительно нечасто, именно поэтому некоторые из них, наиболее редкие и красивые, стали цениться как драгоценные камни. В XVII в. сделали первые попытки выращивать кристаллы из растворов, наподобие того как из воды образуются кристаллики льда. Одним из первых открытий стало обнаружение того, что углы между гранями кристаллов при их росте не изменяются, каким бы большим ни выросал кристалл. В те же годы заметили, что при ударах кристаллы раскалываются не как попало, а по определенным плоскостям — плоскостям спайности. Французский ученый Аюи, исходя из этих наблюдений, на рубеже XVIII и XIX столетий высказал предположение, что все кристаллы состоят из мелких блоков, причем каждый блок имеет ту же форму, что и крупный кристалл.

Этих двух положений — о постоянстве углов между гранями кристаллов и о блочной их структуре, т. е. о том, что кристаллы

составлены из повторяющихся элементов, — оказалось достаточно, чтобы построить вполне современную математическую теорию кристаллов. Такова сила научной логики: ведь в те годы еще почти ничего не было известно о частицах, образующих кристаллы. Но, каковы бы ни были эти частицы, они должны располагаться в кристалле по параллельным направлениям, поскольку вдоль таких направлений свойства кристаллов одинаковы и отличаются от свойств вдоль других направлений (в противном случае растущие кристаллы всегда принимали бы форму шаров). Таких направлений в трехмерном кристалле может быть три. Пересекаясь, ряды образуют *пространственную*, трехмерную, *решетку*. В целом подобная решетка должна выглядеть как набор плотно пригнанных друг к другу параллелепипедов. Оставалось, исходя из геометрических характеристик параллелепипедов, математически «сконструировать» все возможные внешние формы образованных из них кристаллов. Эти внешние формы на основе различных элементов их симметрии определил в 1867 г. русский ученый А. В. Гадолин — их оказалось 32 класса. А еще 22 года спустя русский кристаллограф Е. С. Федоров рассчитал все возможные сочетания элементов симметрии в пространственных решетках, приводящие к этим классам, — 230 пространственных групп.

Таким триумфом закончилась эпоха математической кристаллографии. Вслед за ней настал черед эпохи кристаллографии физической, которая в первую очередь должна была ответить на следующие вопросы. Что находится в узлах кристаллической пространственной решетки? На каких расстояниях отстоят друг от друга ряды узлов по каждому из направлений и какие углы составляют эти направления друг с другом в реальных кристаллах? Огранка кристаллов не всегда идеально совершенна — существуют ли дефекты и во внутреннем строении кристаллов, какова их природа?

Эпоха физической кристаллографии началась в 1912 г. с малозначительного на первый взгляд вопроса, который был задан немецкому физику-теоретику Лауэ его коллегой Эвальдом. Эвальд поинтересовался, как будут проходить электромагнитные волны через правильную решетку из электрических диполей, например через кристаллическую решетку, в которой диполями являются

атомы, поляризованные электромагнитной волной. Эвальд и не догадывался, на какую мысль он навел своего собеседника. Если рассматривать кристаллическую решетку как дифракционную, то с ее помощью можно попытаться выяснить природу рентгеновского излучения. Это уже будет не еле заметная дифракция на краях отверстий, дающая не очень определенные экспериментальные результаты, а дифракция на структуре самого объекта, та самая, которую рассчитывал Аббе в своей теории образования оптического изображения, — намного более ясная. Только разве что дифракционная решетка необычна: не одномерная, которой привыкли пользоваться оптики, а трехмерная, образованная в пространстве наложением трех одномерных решеток — атомных рядов. Сами же атомы, переизлучающие икс-лучи, можно будет при этом рассматривать как щели в решетке, пропускающие излучение.

Лауэ спросил Эвальда, какие размеры могут иметь отдельные ячейки, параллелепипеды в кристаллической решетке, — другими словами, *периоды* дифракционной решетки. Эвальд этого не знал, но, по его мнению, они должны были составлять тысячные доли длины световых волн (примерно 10^{-9} — 10^{-10} м), значит, иметь тот же порядок, что предполагавшиеся длины волн икс-лучей, если они действительно волны. Стоило провести опыт по дифракции рентгеновского излучения на кристалле.

Лауэ решил обратиться за помощью к признанному авторитету среди немецких физиков-теоретиков Зоммерфельду, но тот не поддержал его. В кристаллах при обычных температурах атомы сильно колеблются в узлах кристаллической решетки, а как экспериментировать с дифракционной решеткой, период которой быстро и хаотически изменяется? Все же Лауэ, несмотря на это казавшееся очень убедительным возражение, не отказался от своей идеи и заразил ею экспериментаторов, одним из которых был ассистент Зоммерфельда.

Действительно, Лауэ высказал лишь гипотезу, а не обоснованную теорию, никто еще не знал, как будет выглядеть дифракционная картина. Вначале экспериментаторы полагали, что кристалл отразит назад рентгеновское излучение, и поэтому фотопластинку поместили между кристаллом и рентгеновской трубкой. После проявления на ней обнаружили только след от первичного нерассеян-

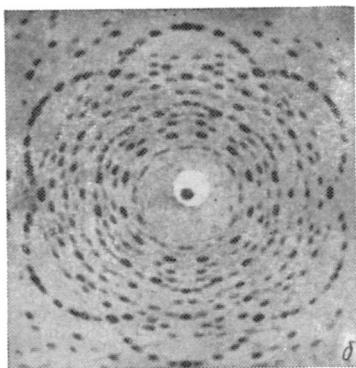
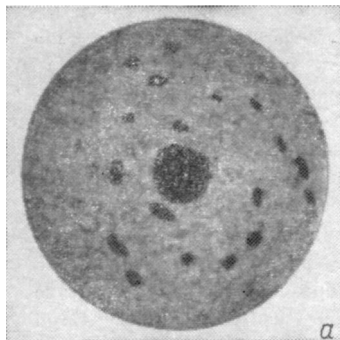


Рис. 11. Одна из первых рентгенограмм, снятая Лауэ с кристалла медного купороса (а) и современная рентгенограмма монокристалла (б)

ного пучка. (Это уже потом научились делать такие «обратные» снимки, названные, словно в насмешку над неудачей первого опыта, эпиграммами.) Неудача не обескуражила исследователей, во втором опыте пластинку поставили не перед кристаллом, а за ним. И на ней получили, пусть и не очень отчетливую (рис. 11), но все же совершенно очевидную картину дифракции рентгеновского излучения.

Однако даже этот решающий эксперимент не убедил всех сомневающихся. Вскоре были получены более четкие снимки, но их из-за отсутствия теории тогда нельзя было расшифровать. Сторонники корпускулярной природы рентгеновского излучения доказывали, что эти снимки говорят о проникновении рентгеновских «частиц» через каналы между стройными рядами атомов в кристалле. (Интересно, что такое представление было затем забыто почти на полвека, и каналы в кристаллических решетках открыли в эксперименте заново лишь совсем недавно, но уже с помощью «настоящих» частиц.) Тем не менее, когда через небольшое время была разработана теория дифракции на трехмерных решетках и

ее предсказания начали все чаще оправдываться на опыте, победу одержало представление об икс-лучах как об особом, очень коротковолновом виде электромагнитного излучения.

Рентгеноструктурный анализ

Если кристаллы можно использовать для доказательства волновой природы рентгеновского излучения, то почему бы, коль скоро это доказано, не применить рентгеновское излучение для исследования структуры самих кристаллов? В сущности, именно это осуществили Брэгг-отец и его сын Вильям Лоуренс Брэгг на следующий год после эксперимента Лауэ (хотя, как это ни парадоксально, они продолжали считать икс-лучи потоком частиц, отклоняемых атомами кристалла от первоначального пути).

Основная идея, высказанная Брэггом-сыном, была очень проста. Отдельные атомы рассеивают рентгеновское излучение очень слабо: это явствовало еще из старых снимков и опытов Рентгена и Брэгга-отца. Число атомов на одной площадке двухмерной дифракционной решетки, освещаемой нешироким пучком рентгеновского излучения, тоже довольно невелико. Но таких площадок, располагающихся на пути излучения параллельными рядами одна за другой, в кристалле очень много. Если в результате интерференции амплитуды рассеянных ими волн сложатся так, что волны взаимно усилятся, то возникнет соответствующий дифракционный максимум достаточно большой интенсивности, который даст заметное пятно на рентгенограмме. Каковы же условия осуществления такой интерференции?

Так как рентгеновское излучение имеет волновой характер, для него справедлива дифракционная формула (6). Только теперь в ней надо положить показатель преломления n равным единице и написать три уравнения, поскольку кристалл представляет собой три «скрещенные» одномерные дифракционные решетки, и каждая из них в общем случае имеет свой период d . Однако ниоткуда не следует, что система из трех уравнений будет иметь решение при любой наперед заданной длине волны излучения. Собственно говоря, задуманный Лауэ опыт удался лишь потому, что в нем использовалось полихроматическое излучение с широ-

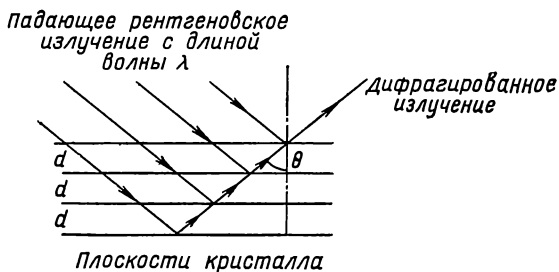


Рис. 12. К соотношению Брэгга—Вульфа

ким набором длин волн, и какая-то из них удовлетворила сразу всем уравнениям.

Брэгги (и независимо за полгода до них русский ученый Ю. В. Вульф) нашли более элегантное решение задачи о дифракции рентгеновского излучения на кристаллах. Отклонение дифрагированного луча на угол φ можно истолковывать как отражение падающего луча от некоего зеркала, на которое он брошен под углом $\theta = \varphi/2$ (рис. 12). Это зеркало должно представлять собой атомную плоскость, т. е. геометрическую плоскость, проведенную в кристалле так, чтобы на ней оказался хотя бы один атом. Тогда вследствие регулярности расположения атомов в решетке на таких плоскостях через определенные промежутки окажутся и другие атомы. Мало того, параллельно каждой атомной плоскости можно провести и другие плоскости. Конечно, в зависимости от того, как проведены атомные плоскости в кристалле, они могут быть усеяны разным числом атомов. Но если расстояние между плоскостями d и угол отражения θ таковы, что волны, отраженные соседними плоскостями, сдвинуты по фазе на 360° , то эти волны при сложении будут усиливать друг друга. В результате, если на атомную плоскость под углом θ падает рентгеновское излучение в виде плоской волны (параллельным пучком), то излучение, рассеянное атомами в одной атомной плоскости, усилится излучением атомов в соседних плоскостях. На фотопластинке в направ-

лении отражения появится пятно, соответствующее дифракционному максимуму.

Чтобы это произошло, длина волны λ , кратчайшее расстояние между соседними атомными плоскостями d и угол падения излучения на атомную плоскость θ должны удовлетворять простому соотношению, называемому условием Брэгга — Вульфа:

$$k\lambda = 2d \sin \theta, \quad (22)$$

где k — любое целое число, включая нуль (последнее значение относится к недифрагированному пучку).

Хотя в кристалле содержится огромное число атомов, провести атомные плоскости в нем как попало нельзя. Об этом свидетельствует и то, что на рентгенограмме мы видим лишь ограниченное число пятен, каждое из которых соответствует одному семейству атомных плоскостей. Но, зная расположение атомных плоскостей и степень их усеянности атомами, о чем говорит интенсивность пятен, т. е. степень почернения фотопластинки в этих местах, можно получить представление о расположении параллелепипедов и, в конечном итоге, — о строении самого кристалла. Однако переход от наблюдаемой картины дифракции к определению положения атомных плоскостей, а особенно переход от атомных плоскостей к параметрам самой кристаллической решетки, чрезвычайно труден. Он непрост даже тогда, когда решетка кристалла построена из атомов одного вида (атомов одного химического элемента) и еще более усложняется, когда решетка построена из атомов двух и более химических элементов.

Схематически проведение этого перехода, который в сущности является одной из обратных задач рассеяния, а в данном случае называется рентгеноструктурным анализом, можно изобразить так. Зная углы, которые образованы с падающим пучком направлениями на пятна рентгенограммы (сами пятна принято называть *рефлексами* в соответствии с понятием о брэгговском отражении), определяют положение различных семейств атомных плоскостей в пространстве. Пересечения всех этих семейств плоскостей дают в конечном итоге положения всех атомов.

Но расстояния между атомными плоскостями еще не определены; если известны длина волны λ и углы θ , то все равно оста-

ется еще произвольный множитель k . Можно показать, что даже для простейшей решетки, параллелепипеда в которой имеют вид кубиков со стороной a , расстояние между атомными плоскостями d связано с «действительным» периодом, т. е. расстоянием между атомами a , непростым соотношением $a/d = (1/k) (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2)^{1/2}$, где m — порядки дифракции по трем направлениям в пространстве (в рентгеноструктурном анализе их называют *миллеровскими индексами*). В конечном итоге, после нахождения точного положения атомных плоскостей, удастся построить искомые параллелепипеды, называемые *элементарными ячейками кристалла*.

Затем определяют интенсивность отдельных рефлексов. Грубо можно считать, что каждый электрон в атоме рассеивает рентгеновское излучение так же, как другие атомные электроны, и независимо от них. Тогда интенсивность рефлекса пропорциональна числу электронов в атоме, или порядковому номеру химического элемента. Осуществив такую «привязку» пятен к атомам, можно в принципе выяснить, в каких местах элементарной ячейки находятся атомы тех химических элементов, из которых построена решетка кристалла.

Разовьем описанную упрощенную схему анализа, и тогда станут отчетливее видны преимущества и ограничения этого замечательного метода. Как уже говорилось, если использовать лишь сведения о расположении дифракционных пятен на рентгенограммах, то можно установить только геометрию элементарной ячейки. Этот наименьший геометрический рисунок, повторяясь множество раз по всем трем направлениям в пространстве, в конце концов создаст общий рисунок всей решетки кристалла. Но это — математический рисунок, он не наполнен физическим содержанием — атомами. Вернее сказать так: точки в узлах такой решетки рассматриваются пока как независимо рассеивающие расположенные в вершинах элементарной ячейки отдельные электроны, излучение которых усиливается благодаря интерференции с волнами от других электронов, находящихся в эквивалентных положениях в решетке. Конечно, это уже «кое-какая» физика, но она дает слишком обедненное описание строения кристалла. Для полноты картины нужно учесть еще интенсивности отдельных рефлексов на рентгенограмме.

Раз имеет место интерференция, ее результат должен зависеть от соотношения фаз в складываемых волнах. Рассеянные электронами, которые находятся в разных местах элементарной ячейки, волны в общем имеют различные фазы. Это влияет на интенсивность, возникает так называемый *структурный фактор*, связанный с распределением рассеивающих электронов в пределах ячейки. К нему надо добавить еще *атомный фактор*, который характеризует амплитуду когерентного рентгеновского излучения, рассеянного изолированными атомами. Атомный фактор, естественно, зависит от строения электронных оболочек атома. Наконец, надо учесть еще факторы, которые зависят от размеров всего кристалла (они определяют число рассеивающих и число поглощающих излучение атомов), от поляризации излучения при его отражениях, от степени неидеальности отражения от атомных плоскостей (из-за того, что зеркальность отражения все время нарушается «шероховатостью» плоскостей, возникающей в результате тепловых колебаний атомов в решетке). Эти факторы можно рассчитать. Можно также вычислить интенсивность некогерентного рассеянного излучения, образующего фон на фотопластинке, и вычесть ее из интенсивности когерентных рефлексов. Исправленную с учетом фона интенсивность можно поделить на перечисленные факторы и, наконец, заняться важнейшим из них — структурным фактором.

На этом этапе обратная задача рассеяния формулируется следующим образом: располагая значениями квадрата амплитуды (интенсивностью) рассеянного излучения, найти сами амплитуды. Однако, как известно, решение такой задачи неоднозначно, поскольку фазы неизвестны. Но рентгеноструктурное исследование — не эксперимент по интерференции и информации о фазах не дает. А рентгеновской голографии пока что не существует, хотя работы последних лет показывают, что в принципе она возможна.

Как можно обойти возникшую трудность? Прежде всего, конечно, решая прямую задачу, т. е. с помощью моделей. Можно взять несколько альтернативных вариантов предполагаемых структур кристалла и, последовательно действуя методом проб и ошибок, рассчитывать характеристики рассеяния для них до тех пор, пока не получится достаточно хорошего соответствия с кар-

тиной, наблюдаемой на рентгенограмме. Интересно, однако, что даже такое совпадение картин нельзя считать окончательным критерием истинности модели структуры, так как, строго говоря, существует множество периодических распределений рассеивающих частиц, которые могут дать наблюдаемую совокупность рефлексов, — и по расположению, и по интенсивности. Практически, однако, если получается такое расположение атомов или молекул в структуре, которое выглядит разумным с точки зрения физики или химии, то оно, скорее всего, и будет единственным истинным.

Для построения пробных структур элементарной ячейки нередко используют квадраты значений структурного фактора (т. е. интенсивности рефлексов), а фазы отдельных волн, естественно, не учитывают, иными словами, как бы считают некогерентным все рассеяние. При таком построении пробной структуры, называемом *синтезом Паттерсона*, получают грубое представление о распределении электронов в элементарной ячейке. Резкие максимумы паттерсоновской картины словно указывают на то, что в соответствующих местах могут находиться атомы, но какие это атомы, в общем нельзя решить.

Картина становится намного определеннее, когда в элементарной ячейке присутствует малое число тяжелых многоэлектронных атомов. Тогда синтез Паттерсона дает направления и длины «перемычек» между этими атомами. Иногда такие атомы даже искусственно вводят в решетку рентгенографируемого кристалла и, конечно, следят за тем, чтобы введенные атомы оказались в тех же положениях в элементарной ячейке, в которых были замещенные ими атомы. Естественно, что уверенность в этом можно иметь, лишь если замещающий и замещаемый атомы химически эквивалентны. Описанный метод анализа называют *изоморфным замещением*: при нем несколько изменяются размеры элементарной ячейки, но остаются постоянными характерные для нее элементы симметрии.

Располагая пробной структурой, можно пытаться вычислить фазы отдельных рассеянных волн и затем произвести «полноценный» их синтез. В результате получают распределения электронной плотности в элементарной ячейке, причем сильные ее сгущения соответствуют, очевидно, атомам. Результатом такого син-

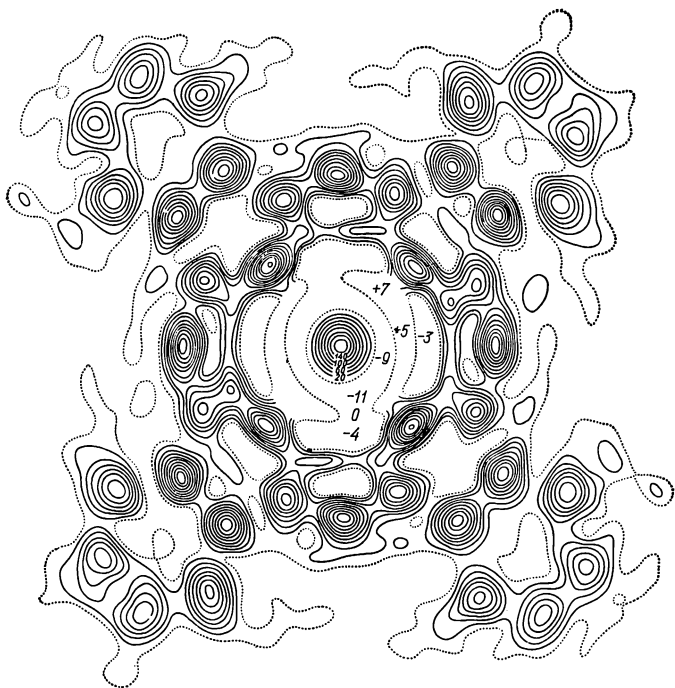


Рис. 13. Пример математического синтеза рентгеновского изображения структуры кристалла органического соединения фталоцианина (с включением в элементарную ячейку тяжелым атомом платины)

теза, называемого *синтезом Фурье*, является рентгеновское изображение структуры кристалла. Оно напоминает топографическую карту горного района, но отличается от нее своей четкой периодичностью (рис. 13).

Слово «изображение» здесь надо понимать в буквальном смысле. По существу, то, о чем мы говорили, представляет собой «математический рентгеновский микроскоп», в котором дифракционное разложение излучения производит сам кристалл, а све-

дение дифрагированных волн, поскольку линз для рентгеновского излучения нет, — расчетчик или, как это делается почти повсеместно сегодня, электронная вычислительная машина: объем расчетов даже для не очень сложных структур поистине огромен.

Особенно большую роль этот метод синтеза структур, предложенный Брэггом-сыном еще полвека назад, ныне играет при исследовании строения белковых кристаллов; он позволяет определять не только характеристики их решеток, но и расположение атомов в сложнейших белковых молекулах, насчитывающих тысячи атомов. Разумеется, при этом резко усложняется дифракционная картина, насчитывающая порой десятки тысяч рефлексов. Для облегчения и ускорения снятия и измерения рентгенограмм кристаллов используют специальные ионизационные детекторы излучения — *дифрактометры*, которые перемещаются по полю рассеянного излучения и автоматически регистрируют интенсивности и углы рассеяния для дифрагированных пучков. Затем с помощью ЭВМ автоматически рассчитывают квадраты структурных факторов, очень часто проводят паттерсоновский синтез, вслед за чем осуществляют уточненный синтез структуры.

Однако не следует думать, что определение структуры молекул сложнейших биологических соединений стало рутинной операцией. И в наши дни поиск подходящих пробных структур, сопоставление их с данными других, не рентгеновских методов исследования, отбор из первоначального множества структур лишь немногих «перспективных», которые предстоит уточнить прямым расчетом, — глубоко творческий процесс, а расшифровка структуры молекулы какого-либо сложного соединения иногда является итогом многолетней работы целого коллектива исследователей. Не случайно в списке лауреатов Нобелевской премии встречаются имена выдающихся специалистов по рентгеноструктурному анализу. Ими и другими исследователями получены замечательные результаты: определены структуры почти всех неорганических и множества органических кристаллов, т. е. установлено, как расположены атомы и молекулы в их решетках. Погрешность этого определения чрезвычайно мала, порядка 10^{-12} м, а порой бывает еще меньше. В последние годы выяснены структуры важнейших биологических кристаллов и молекул. (Кристаллическая структура

этих соединений важна не только сама по себе, но и как средство регулярно расположить молекулы, чтобы можно было установить их строение.) Благодаря этому во многом прояснилось, как «работают» эти молекулы, а установление связи между структурой и функцией дает ключ ко многим загадкам биологии.

Надо подчеркнуть одно важное обстоятельство. «Математический микроскоп» Брэгга, действительно, позволяет определять строение кристаллов и даже находить распределение плотности электронов в молекулах и атомах с очень хорошим разрешением. Но получаемые изображения — это не «портреты» отдельных атомов, находящихся в таком-то месте такой-то элементарной ячейки кристалла. Это — «групповые портреты» всех атомов, расположенных в эквивалентных местах всех тех элементарных ячеек, которые попали под пучок рентгеновского излучения. Таких атомов в обычном эксперименте насчитываются многие миллиарды.

Конечно, это не должно вызывать у нас ни малейшего огорчения: «портреты» отдельных атомов совершенно одинаковы, и «групповой портрет» вполне представительен. Но вот обнаружить на подобных дифракционных изображениях дефект строения кристаллической решетки или отдельный посторонний атом невозможно. Рассеянное ими излучение слишком слабо, чтобы оставить заметный след на рентгенограмме. И даже если посторонних атомов и дефектов в решетке кристалла немало, то все равно нечего и говорить об их групповых портретах, поскольку они располагаются в кристалле нерегулярно. Для получения изображений таких дефектов структуры (а посторонний атом — это тоже дефект) разработаны другие методы рентгеновского анализа, которые можно объединить под общим названием рентгеновской интерференционной микроскопии. Но прежде чем рассказать о ней, попытаемся выяснить, нельзя ли обнаружить дефекты атомных масштабов с помощью «амплитудной» рентгеновской микроскопии.

Рентгеновский микроскоп

В начале этой главы говорилось о том, что можно без особого труда создать рентгеновский *теневого* микроскоп, поднося объект исследования близко к маленькому источнику излу-

чения и наблюдая тень от него на удаленном экране. Если используется достаточно длинноволновое рентгеновское излучение, то его проникающая способность существенно снижается, т. е. повышается амплитудный контраст изображения. Этот метод исследования получил название *микрорадиография*.

Для его реализации нужно немного: очень маленький (практически точечный) источник излучения, достаточно тонкий образец и достаточно мелкозернистая фотопластинка, поскольку размер зерна определяет достижимое разрешение фотоэмульсии. Современные фотоэмульсии для исследований такого рода имеют зерна размером меньше 10^{-6} м. Проблему «точечного» источника излучения удалось решить, сузив пучок электронов, возбуждающих излучение в рентгеновской трубке, до очень малого сечения, также порядка 10^{-6} м, и используя в качестве анода очень тонкую (порядка 10^{-7} м) металлическую фольгу. В результате в таком теневом микроскопе было получено разрешение порядка 10^{-7} м, т. е. лучше, чем в хороших оптических инструментах.

Не надо, однако, забывать, что речь идет о разрешении деталей в непрозрачных для света предметах и что эти детали имеют размеры, во много раз превышающие длины волн рентгеновского излучения, поэтому дифракция на них слаба, она соответствует дифракции на краях линз или других крупных препятствий для света в оптике. Если характеризовать нерезкость изображения расстоянием от края предмета до первого дифракционного максимума, то разрешение $d \approx (p\lambda)^{1/2}$, где p — расстояние от источника излучения до предмета; λ — длина волны. Принимая $\lambda \sim 10^{-10}$ м и располагая источник почти вплотную к очень тонкому предмету (на расстоянии, скажем, 10^{-4} м), можно получить $d \sim 10^{-7}$ м.

Нерезкость же изображения, связанная с конечными поперечными размерами источника излучения (например, в виде диска диаметром D) составляет DM , где $M \gg 1$ — увеличение. Отсюда видно, что, как правило, при обычных источниках дифракционные эффекты не наблюдаются: они полностью маскируются полутенью на краях предмета. Это вполне отвечает и повседневному наблюдению в диапазоне видимого света. При дневном освещении дифракцию света на краях предмета заметить невозможно, предметы в рассеянном небом свете не имеют резких теней. Дифракцию

света можно наблюдать только в затемненном помещении, используя практически точечный источник света.

В начале этой главы уже шла речь о том, что для рентгеновского излучения показатель преломления очень близок к единице (и даже меньше), поэтому преломление этого излучения нелегко осуществить. Тем не менее были попытки построить *фокусирующий* рентгеновский микроскоп, в котором использовалось бы преломление лучей линзами. Разумеется, оптическая сила такой линзы должна быть очень мала, а соответствующее фокусное расстояние составило бы несколько километров! О практической ценности такого микроскопа не приходится и говорить.

Принципиально можно получить и короткофокусную линзу, направляя на нее пучок рентгеновского излучения под чрезвычайно малым углом, т. е. создавая скольльзящее падение излучения на поверхность линзы. Однако тогда фокусировка будет обеспечена лишь в плоскости падения пучка, поэтому приходится использовать плоские пучки и линзы с цилиндрической поверхностью, которые, конечно, обладают огромным астигматизмом.

Несколько лучших результатов можно добиться, используя зеркала для рентгеновского излучения. Коэффициент отражения рентгеновского излучения веществами очень мал (это отражение не надо путать с брэгговским отражением от атомных плоскостей, которое в сущности есть не отражение, а дифракция), но возрастает по мере все более наклонного падения пучков. Максимума он достигает при так называемом угле полного внешнего отражения излучения. (Это явление аналогично полному внутреннему отражению световых лучей в оптически более плотной, т. е. с большим коэффициентом преломления, среде. В случае рентгеновского излучения оптически более плотной средой является воздух, поэтому отражение происходит на границе воздуха и вещества при падении излучения из воздуха.)

Угол полного внешнего отражения очень мал, излучение приходится направлять на поверхность зеркала под малым углом; конечно, зеркало и здесь должно иметь цилиндрическую форму, значит, будет сильный астигматизм. Оказывается, однако, что его можно почти целиком компенсировать, если пучок, отраженный от первого зеркала, направить на второе такое же зеркало, установ-

ленное перпендикулярно первому. (Конечно, это в принципе возможно и для цилиндрических линз, но практика показала, что тогда астигматизм оказывается еще сильнее, чем для одиночной линзы.) Разрешение $d \approx (R\lambda^2)^{1/3}$ и, например, при радиусе кривизны зеркала $R \approx 2$ м и длине волны $\lambda \sim 10^{-10}$ м $d \sim 10^{-7}$ м, т. е. имеет тот же порядок, что и у оптического микроскопа. К этому можно добавить, что поле зрения рентгеновского микроскопа очень мало, не более 10^{-5} м.

Усилия, затраченные на построение фокусирующего рентгеновского микроскопа, преследуют, в сущности, одну цель: получить достаточно яркое изображение структуры предметов, непрозрачных для видимого света. В теновом микроскопе, где рентгеновские фотоны распределяются по большой площади изображения, а число их невелико (по необходимости малый источник излучения имеет и небольшую мощность), яркость изображения, естественно, довольно мала. Фокусирующий микроскоп позволяет получать намного более яркие изображения.

Разрешение тенового и фокусирующего рентгеновских микроскопов в лучшем случае на порядок выше, чем у оптических микроскопов, и определяется в основном не дифракцией на объекте, а условиями его освещения. Поэтому можно заключить, что с помощью «обычных» рентгеновских микроскопов, в которых используется поглощение излучения, т. е. амплитудный контраст, обнаружить дефекты кристаллической решетки, имеющие атомные размеры, нельзя. В образовании изображения в таких микроскопах дифракция на структуре объектов практически не участвует.

Рентгеновская интерференционная микроскопия

Напротив, в рентгеноструктурном анализе изображение на фотопластинке имеет дифракционное происхождение, но представляет собой микроскопическую картину не отдельных атомов, а многочисленных атомов в исследованном объеме кристалла, полученную с чрезвычайно хорошим разрешением. Первичный пучок излучения в образовании этого изображения непосредственно

не участвует: картина формируется, как в темнопольном микроскопе.

Что же мешает сделать изображение «светлопольным»? Как ни странно, — сами кристаллы. Дело в том, что совершенно идеальной в математическом смысле решеткой не обладает ни один реальный кристалл. Когда кристаллы растут в природных условиях, даже маленькие колебания поступления атомов на грани кристалла приводят к тому, что вместо единой структуры, четко повторяющейся через весь кристалл, образуется мозаика из отдельных блоков, слегка повернутых друг относительно друга. Эти блоки не имеют ничего общего с теми, которые кристаллографы в старину считали кирпичами здания кристалла. Размеры их имеют порядок 10^{-7} — 10^{-6} м, т. е. находятся как бы посередине между размерами элементарных ячеек и всего кристаллического образца. Грубо говоря, в каждом блоке триллионы ячеек, а в каждом образце триллионы блоков. Углы разориентировки между соседними блоками очень невелики (порядка $10''$ или $1'$). Но даже такая небольшая разориентировка имеет принципиальное значение. Она является одной из причин того, что дифрагированные пучки в целом имеют малую интенсивность по сравнению с первичным пучком излучения.

Брэгговское отражение рентгеновского излучения от атомных плоскостей, в котором участвуют многие тысячи таких плоскостей, — очень «острое», дифрагированный пучок должен иметь малую угловую ширину: оттого и рефлексы на рентгенограмме выглядят небольшими пятнышками. В идеале, при отражении от кристалла, имеющего абсолютно совершенную решетку на всем своем протяжении, рефлексы должны были бы быть точками. Поэтому по форме и размерам рефлексов можно судить о степени несовершенства решетки, — но только в среднем.

Пятна на рентгенограмме размываются из-за теплового движения атомов. Пятна перестают быть кружками, когда решетка каким-либо образом систематически искажена, например, из-за появления в ней внутренних напряжений, вызванных механической обработкой кристалла, его изгибом, растяжением и т. п. Размытие рефлексов тем сильнее, чем больше беспорядка вносится в расположение атомов кристалла, в повторяемость этого расположения

на протяжении многих тысяч межатомных расстояний. Ибо дифракционное пятно — это результат сложения когерентных волн, рассеянных тысячами атомов. Чем сильнее нарушен такой дальний порядок в решетке кристалла, тем меньше степень когерентности рассеянного излучения, тем менее интенсивны отдельные рефлексы. И, наконец, когда кристалл плавится, т. е. его кристаллическая решетка разрушается, дальний порядок исчезает, а с ним исчезает и характерная картина пятен на рентгенограмме. Рентгенограммы всех жидкостей и тем более газов качественно очень похожи друг на друга.

И, наоборот, чем совершеннее кристалл, тем выше степень когерентности волн, рассеянных отдельными атомами в его решетке, тем более отчетливы дифракционные рефлексы. Но, как уже не раз говорилось, хотя в идеальной решетке единичные дефекты ее строения должны «бросаться в глаза», обнаружить их на обычной рентгенограмме невозможно: слишком мал амплитудный контраст, слишком ничтожна дефектная область по сравнению с мириадами правильных ячеек кристалла. Однако, кроме амплитудного контраста, существует фазовый. Излучение, рассеянное дефектными ячейками, имеет определенный сдвиг фаз по сравнению с тем, которое рассеяно правильными ячейками, так что их можно обнаружить в эксперименте по интерференции. Но для постановки такого эксперимента необходимо иметь кристалл с очень совершенной решеткой, иначе отдельные дефектные ячейки будут замаскированы многочисленными, пусть даже лишь слегка разориентированными блоками кристалла. Такие совершенные и притом достаточно крупные кристаллы научились выращивать искусственно только в последние десятилетия. В первую очередь, это кристаллы кремния, необходимость совершенства которых диктуется запросами полупроводниковой техники. Напомним, что размеры кристаллов здесь имеют принципиальное значение: идеальная решетка, как и идеально периодическая волна, должна быть, строго говоря, безграничной.

Используя крупные совершенные кристаллы, удалось добиться того, что область углов брэгговского отражения, окружающая центральное значение этого угла, которое отвечает идеальному отражению, оказалась порядка угловой секунды. Волновое поле

в кристалле стало весьма когерентным, что позволило проводить исследования с помощью интерференции.

Однако интерференционная картина получается намного более сложной, чем в интерференционном микроскопе. Одной из причин усложнения является то, что при сложении неотклоненной и дифрагированной волн последняя как бы промодулирована, несет на себе отпечаток периодической структуры решетки кристалла. При их сложении возникают волны двух видов. Волны одного вида бегут как бы по атомным плоскостям, на атомы в этих плоскостях приходятся минимумы электромагнитного поля волны. У волн другого вида минимумы оказываются посередине между соседними атомными плоскостями, и на атомы в этих плоскостях приходятся максимумы поля волны. Конечно, обе волны, выбивая электроны из атомов и тратя на это свою энергию, по-разному поглощаются: волна первого вида — намного слабее волны второго вида, поскольку первая волна наиболее сильна там, где атомов нет.

Далее, поскольку кристаллы по разным направлениям имеют разные свойства, пучок световых волн, проникая в кристалл, обычно расщепляется на два — обыкновенный и необыкновенный. Плоскости поляризации световых волн в обоих пучках перпендикулярны друг другу. Такое же двойное лучепреломление происходит и при проникновении в кристалл рентгеновского излучения. В результате по кристаллу распространяются уже четыре волны (по два типа волн для каждого направления поляризации), и волны с параллельной поляризацией интерферируют друг с другом.

В оптике двойное лучепреломление связано с разницей показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн. В случае рентгеновского излучения показатель преломления близок к единице, но все равно малые различия его для волн с разными направлениями поляризации сохраняются. В конечном итоге для неотклоненного и дифрагированного пучков, даже распространяющихся параллельно друг другу, разность фаз медленно изменяется, т. е. возникают своего рода пространственные биения между обеими волнами. В результате таких биений спустя половину их периода вся энергия неотклоненной волны переходит к дифрагированной волне, а еще спустя половину периода вся энер-

гия перекачивается в обратном направлении, к неотклоненной волне. Эта картина напоминает ту, что наблюдается при колебаниях двух маятников, связанных пружиной. Если толкнуть один маятник, то его колебания, постепенно затухая, вызовут колебания другого маятника, тот раскачается до предела, а потом начнет раскачивать первый маятник. Каждые полпериода один маятник увеличивает свою амплитуду до максимума, а второй в это время останавливается. Можно говорить, что колебания маятников «модулируются» пружиной.

Такого же рода модуляция — только не во времени, а в пространстве — осуществляется кристаллической решеткой по отношению к неотклоненной и дифрагированной волнам. Результатом ее, естественно, является интерференция волн. Интерференционную картину из-за аналогии ее возникновения с возникновением связанных колебаний маятников называют *маятниковыми полосами*. В зависимости от формы кристалла эти полосы соответствуют интерференционным полосам равной толщины или равного наклона в оптике. Полосы равной толщины возникают, например, при «освещении» кристалла, имеющего пирамидальную форму, параллельным пучком рентгеновского излучения, а полосы равного наклона — при «освещении» плоскопараллельной кристаллической пластинки расходящимся пучком.

Рентгеновская интерференционная микроскопия чрезвычайно совершенных кристаллов и позволяет увидеть отдельные дефекты строения кристаллической решетки. Разумеется, это стало возможным потому, что интенсивности неотклоненного и дифрагированного пучков теперь стали вполне сравнимыми.

Одним из наиболее распространенных видов дефектов в кристаллах является *дислокация*. Доказано, что число и форма дислокаций определяют многие механические свойства кристаллов: их прочность, пластичность, ползучесть и т. п. Все виды дислокаций можно свести к двум, называемым *краевой* и *винтовой* (рис. 14).

Первая из них — это «оборванная» в процессе роста кристалла атомная плоскость. Поскольку природа не терпит пустоты, за местом обрыва соседние атомные плоскости сближаются, и на некотором расстоянии обрыв становится незаметным. В результате

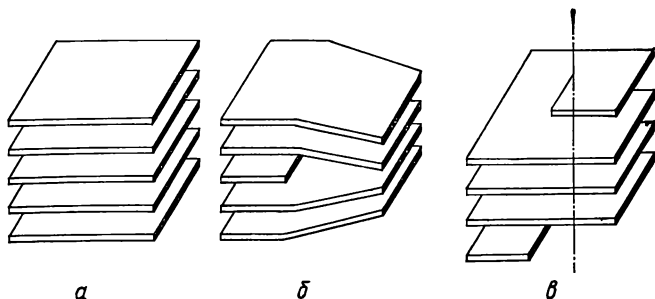


Рис. 14. Бездефектная решетка (а), решетки с краевой (б) и винтовой (в) дислокациями

кристалл состоит как бы из двух половинок, в одной из которых на одну атомную плоскость больше.

Винтовая дислокация часто возникает при весьма распространенном спиральном росте кристаллов, когда застройка атомами какой-либо грани происходит как бы путем обхода вокруг одного центра. Если по каким-то причинам застройка грани в одном месте приостанавливается, то возникает «ступенька», и при дальнейшем росте кристалла она превращается в нечто похожее на винтовую лестницу. Именно винтовая дислокация часто обуславливает разориентировку соседних блоков в кристалле.

Центр винтовой или краевой дислокации — это место наибольшего искажения кристаллической решетки. По мере удаления от него искажения постепенно сглаживаются, но все равно они сказываются даже на расстоянии, равном многим периодам кристаллической решетки. На интерференционной картине, естественно, наибольшая разность фаз соответствует центру дислокации, и такой дефект отчетливо виден на рентгенограмме (рис. 15).

Рентгеновская интерференционная микроскопия находится еще в самом начале своего развития. Но уже сегодня она позволяет увидеть многое из того, что недоступно ее оптической предшественнице, — в первую очередь, отдельные дефекты строения почти идеальных решеток кристаллов, имеющие размеры порядка размеров самих элементарных ячеек, т. е. 10^{-10} м.

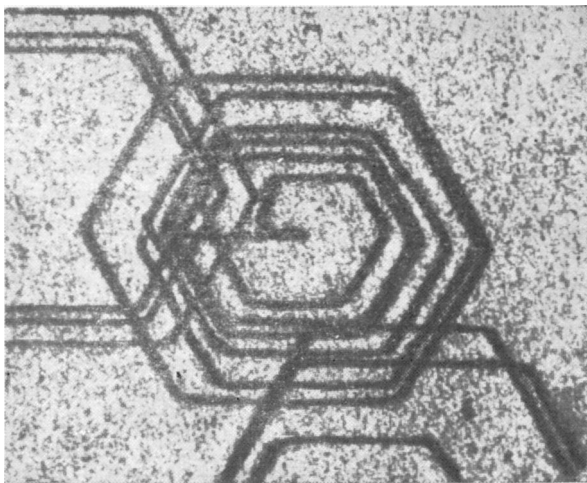


Рис. 15. Рентгеновское интерференционное изображение винтовой дислокации в кристалле кремния

Пожалуй, единственным существенным недостатком рентгеноструктурного анализа является то, что он слабо чувствителен к малоэлектронным атомам и поэтому с трудом позволяет установить их положения в кристаллической решетке. В основном это относится к атомам водорода. В области неорганической химии с таким положением еще можно мириться, поскольку соединения с водородом (гидриды) не столь уж многочисленны и в целом играют не слишком большую роль, хотя отдельные соединения чрезвычайно важны для техники. Но вот в органической и особенно биологической химии, где атомы водорода почти обязательные и притом чуть ли не самые многочисленные компоненты молекул, «необнаружимость» водорода является неблагоприятным фактом. Положения атомов водорода часто определяют с помощью *нейтронографии* — структурного анализа, основанного на дифракции пучков нейтронов.



Изображения с помощью частиц

Частицы и волны

Истории *электронного микроскопа* уже полвека. Еще век насчитывает его предыстория, когда были сделаны открытия и высказаны идеи, которым предстояло соединиться в конце 20-х годов нашего столетия.

Первая идея носит название *оптико-механической аналогии*. Она была установлена в 1834 г. английским математиком Гамильтоном и состоит в том, что уравнения механики для движущихся частиц и уравнения геометрической оптики для световых лучей имеют математическое сходство. Траектория движущейся частицы в отсутствие действующих на нее сил — прямая линия. Траектория луча света в однородной среде с постоянным показателем преломления — тоже прямая линия. При столкновении частицы со стенкой она отскакивает от нее по тому же закону, по которому световой луч отражается от зеркала. Частица под действием силы, зависящей от координат (например, гравитационной силы), описывает ту же траекторию, что и луч света в среде, показатель преломления которой так же зависит от координат.

Наиболее простые черты сходства поведения частиц и световых лучей были подмечены физиками еще за два столетия до Гамильтона, и тогда не случайно возник великий спор в физике: свет — это волны или частицы? К тому времени, когда появилась работа Гамильтона, восторжествовало представление о свете как о волнах, и Гамильтон писал уже именно о математическом сходстве уравнений механики и геометрической оптики. Однако это сходство ни ему, ни кому-либо другому ни о чем не говорило, казалось своего рода математическим курьезом и затем было надолго забыто.

В те годы, когда Аббе создавал свою теорию оптического микроскопа, полным ходом шли исследования электрического разряда в газах. В этих исследованиях, в частности, были открыты потоки каких-то заряженных частиц, выходявших наружу из области разряда. Изучая их свойства, немецкий ученый Плюккер в 1859 г. открыл, что частицы движутся по прямым линиям, а его коллега Гитторф десятилетие спустя доказал, что они отклоняются в магнитном поле. Пропустив частицы через магнитный соленоид, Гитторф сконцентрировал их, или, как говорят, сфокусировал пучок частиц. Наконец, на исходе века англичанин Дж. Томсон определил отношение заряда к массе у этих частиц, а Стони дал им название электронов.

Собственно говоря, всего этого было достаточно, чтобы построить электронный микроскоп еще в XIX в. Нехватало лишь одного, зато самого главного: понимания того, что движение электрона является вместе с тем распространением волны. Путь к этой идее был двуступенчатым. Первую ступеньку одолел Эйнштейн: в 1905 г. он ввел представление о световом кванте (названном в 1929 г. фотоном) — «пакете» электромагнитных волн конечной длины — в связи с необходимостью объяснить закономерности фотоэффекта. Второй ступенькой явилась идея французского физика де Бройля, высказанная им в 1924 г. в связи...

Нет, никакого эксперимента, нуждающегося в таком объяснении, еще не было проведено. Побудительной причиной, которая привела де Бройля к его идее, было, скорее всего, стремление к своеобразной симметрии. Эйнштейновский фотон — это, по существу, кентавр, гибрид волны и частицы. В явлении фотоэффекта фотон проявляет вполне корпускулярное свойство: выбивает электроны из освещаемого вещества. Может быть, и движущийся электрон в свою очередь обладает некими волновыми свойствами и, стало быть, оптико-механическая аналогия Гамильтона — не математический курьез, а нечто гораздо более серьезное, описывающее, скажем, движение электронной волны? Впоследствии выяснилось, что представление де Бройля о сущности электронной волны не вполне верно. Это доказала появившаяся в течение последующих четырех лет квантовая механика. Но еще до появления такого доказательства физики-экспериментаторы усвоили

главное: какую бы сущность ни имела электронная волна, она — волна, а значит, ее можно заставить дифрагировать, можно ее фокусировать и получать с ее помощью изображения предметов. Де Бройль предложил для определения длины электронных волн ту же формулу, которая была ранее найдена для фотонов:

$$\lambda = h/p, \quad (23)$$

где $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; p — количество движения (импульс) электрона, равное произведению массы электрона на его скорость.

Для не слишком быстро движущихся электронов (имеющих скорость, скажем, не более $1/3$ скорости света) масса электрона практически равна его массе покоя и $p = m_0 v$. Используя для v формулу кинетической энергии $mv^2/2 = eU$ электрона, прошедшего разность потенциалов $U, В$, находим значение λ в метрах:

$$\lambda = h/\sqrt{2meU} = \sqrt{1,5/U} \cdot 10^{-9}. \quad (24)$$

Отсюда, например, получается, что при напряжении 1,5 МВ, почти наивысшем, используемом в современных электронных микроскопах, $\lambda = 10^{-12}$ м, т. е. на два порядка меньше, чем у коротковолнового рентгеновского излучения. Столько же может составить возможный выигрыш в разрешении. Но главное даже не в этом: с помощью электронных волн можно было пытаться получить не дифракционные картины рассеяния регулярными сплошными средами, а «полноценные» изображения деталей предметов размерами чуть ли не 10^{-12} м!

То, что с помощью электронов можно получать дифракционные картины, было доказано уже в 1927 г., когда американские исследователи Дэвиссон и Джермер и советский ученый П. С. Тартаковский сняли первые *электронограммы*, бомбардируя электронами монокристаллы металлов. Сделанные ими снимки в принципе ничем не отличались от описанных выше рентгенограмм и послужили не столько доказательством возможности *электронографии* — электроноструктурного анализа, сколько куда более важным подтверждением правильности идеи де Бройля о «волнах частиц» (или, как назвал их де Бройль, волнах материи).

А тем временем, с использованием аналогии Гамильтона, началась разработка оптики электронных пучков. Экспериментальные начатки ее были заложены еще первооткрывателем электрона Дж. Томсоном, который детально изучал движение электронов в электрических магнитных полях. Следующий крупный шаг сделал будущий изобретатель голографии Габор. В 1926 г. он построил катодный осциллограф (своего рода кинескоп), в трубку которого ввел фокусирующее магнитное кольцо для электронного пучка, имевшее форму короткого соленоида.

Это был шаг принципиальной важности: до Габора исследователи, чтобы сводить наблюдавшиеся в электрическом разряде потоки заряженных частиц на флуоресцирующие экраны в виде небольших пятен, пользовались длинными соленоидами. Габор показал, что короткий соленоид по своему действию на электроны вполне эквивалентен сильной оптической линзе. А теоретически эквивалентность соленоида и линзы в том же году доказал американец Буш. Сложность доказательства состояла в том, что поле соленоида не постоянно вдоль его оси, а максимально в центре и плавно уменьшается почти до нуля на торцах соленоида, так что он не похож на оптическую линзу, которая резко преломляет световые лучи на своих поверхностях, а внутри достаточно однородна. В соленоиде траектория электронов плавно изгибается наподобие того, как это происходит при рефракции света в среде с плавно меняющимся показателем преломления. Траектория электрона в соленоиде несколько не похожа на прямолинейный путь светового луча в линзе. Она представляет собой спираль, электрон «навивается» на силовые линии магнитного поля и в результате описывает довольно сложную кривую (рис. 16). Важнейшим свойством таких кривых, выходящих из одной точки, является то, что после прохождения через соленоид они снова собираются в одной точке, т. е. происходит фокусировка расходящегося пучка электронов (при условии, что все электроны в пучке имеют одинаковую скорость, т. е. одну и ту же длину волны).

Аналогичное действие на траектории электронов оказывают и электрические поля специальной формы, создаваемые электростатической линзой. Схема линий равной напряженности поля (эквипотенциальных линий), соответствующих такой одиночной лин-

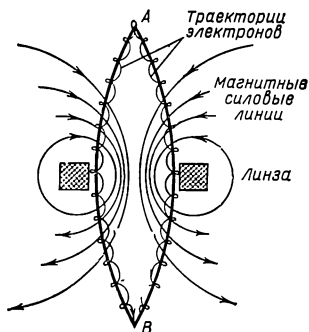
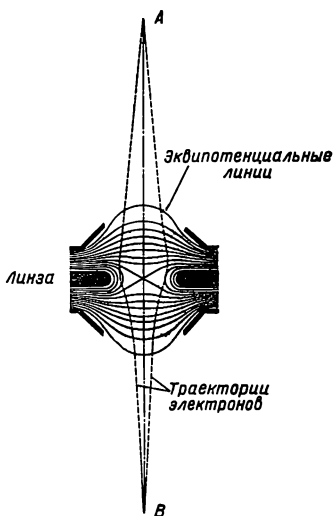


Рис. 16. Траектории электронов в магнитной линзе

Рис. 17. Траектории электронов в электростатической линзе



зе, и отвечающие ей траектории электронов (которые везде должны быть перпендикулярны этим линиям, а в объеме — поверхностям равного потенциала), показаны на рис. 17. Видно, что электростатическая линза тоже действует, как собирающая линза, и пучок электронов в ней испытывает рефракцию, как и в магнитной линзе.

Заметим еще, что в магнитной линзе вследствие того, что электроны совершают винтообразное движение, должен происходить поворот изображения. Такой же поворот происходит и в оптических линзах, но там он всегда равен 180° (т. е. изображение в одиночной линзе перевернутое). В магнитной же линзе поворот зависит от скорости электрона и напряженности магнитного поля. В общем, конечно, этот эффект не более существен, чем в оптике, лишь бы все точки изображения поворачивались на один и тот же угол. Но как раз такой равномерности поворота не всегда удается достичь, и возникает искажение изображения.

Просвечивающий электронный микроскоп

После доказательства фокусирующего действия электронных линз и тем более после их создания постройка электронного микроскопа, казалось бы, должна была осуществляться быстрыми темпами. Между тем, в течение доброго десятка лет электронная микроскопия развивалась словно с неохотой. Задержка была вызвана не столько техническими трудностями, сколько сомнениями в том, нужны ли вообще такие микроскопы.

Для сомнений были веские основания. Электроны, в отличие от фотонов той же энергии, чрезвычайно сильно поглощаются даже в очень тонких слоях вещества. Поэтому на всем пути электронов от их источника до экрана для наблюдений следует поддерживать высокий вакуум. Сильное поглощение говорит о том, что многие объекты практически непрозрачны для электронов. Считалось, что поглощение пучка электронов уже на самых первых порах их движения в веществе приведет к сильнейшему разогреву объектов наблюдения: они должны буквально гореть под электронным лучом, а биологические препараты — мгновенно обугливаться. Цена, которую предстояло платить за большое увеличение и хорошее разрешение в новом методе исследования, казалась чрезмерно большой. В таких условиях можно наблюдать не освещаемые объекты, а самосветящиеся источники электронов, но это представляло бы немногим больше интереса, чем наблюдение нити лампочки осветителя в оптическом микроскопе.

И все же два энтузиаста — Кноль и Руска, работавшие в Берлинском высшем техническом училище, — в 1928 г. начали постройку первого электронного микроскопа. Спустя три года, в начале июня 1931 г., Кноль сделал доклад о завершении работы и продемонстрировал действие прибора. Первый микроскоп Кноля и Руски давал «луповое» увеличение — всего лишь в 17 (!) раз. Но, как говорится, лиха беда начало. В том же году в Германии был построен первый микроскоп с электростатическими линзами; он тоже давал изображения лишь «самосветящихся» объектов.

Кноль после постройки микроскопа отошел от работы над ним, и Руска продолжал совершенствовать микроскоп в одиночку.

В 1933 г. он создал микроскоп, который впервые по своему разрешению превзошел оптического собрата: достигнутое разрешение составило $5 \cdot 10^{-8}$ м. Усовершенствование заключалось в том, что для увеличения оптической силы магнитной линзы силовые линии в ней были сконцентрированы с помощью полюсных наконечников магнита. Однако в согласии с предсказаниями скептиков биологические образцы в этом микроскопе очень быстро сгорали. Впрочем, в 1934 г. в нем удалось сфотографировать ножки и крылышки мухи. Было ясно, что биологические препараты удастся исследовать, только если они очень тонкие и слабо поглощают электроны. Предлагалось также подвергать их специальной минерализующей пропитке. Тогда даже после выгорания органического материала под электронным пучком должен был сохраниться минеральный «скелет», изучение которого тоже представляет большой интерес для биологов. Но примерно к 1935 г. стало ясно, что никакие специальные меры защиты толстых образцов от испепеляющего действия электронного пучка не могут привести к желаемому успеху. Оставалось только одно: поскольку прозрачность образцов для электронов растет при уменьшении интенсивности взаимодействий электронов с атомами образца, надо было работать с чрезвычайно тонкими образцами и облучать их электронами как можно более высокой энергии, ибо чем слабее взаимодействие электронов с веществом образцов, тем меньше они нагреваются под пучком.

К этому времени преимущества электронного микроскопа были осознаны настолько отчетливо, что в Англии началось его опытное заводское производство. Три года спустя благодаря энергичным усилиям Руски серийное производство микроскопа было налажено и в Германии. Одновременно выявились узкие места нового прибора и обрисовались направления дальнейшего его усовершенствования. Рассмотрим более детально конструкцию и принцип действия электронного микроскопа.

Поскольку электронные пучки не воспринимаются непосредственно глазом, ясно, что в электронном микроскопе вместо окуляра необходимо использовать проекционную линзу и либо вести наблюдение на флуоресцирующем экране, либо получать изображение на фотопластинках. Принципиальная схема такого просвечивающего электронного микроскопа ничем не отличается от схемы

его оптического собрата. Как минимум, нужны источник электронов для «освещения» предмета, конденсорная линза для регулировки освещения, объективная линза для формирования изображения и проекционная линза для переноса изображения на экран или фотопластинку. Но, кроме этой аналогии, основанной, конечно, на общих свойствах, присущих всем волнам, никакого другого сходства между приборами нет.

Начнем с источника электронов. В электронном микроскопе, как мы увидим далее, необходимо иметь тонкие пучки электронов, движущихся с почти одинаковыми скоростями. Источниками электронов обычно бывают твердые тела, и освобождать из них электроны можно разными методами. Наиболее распространенными из них являются использование высоких температур (термоэмиссия) и сильных электрических полей (автоэмиссия, или холодная эмиссия). Необходимость использования таких средств вызвана тем, что электроны в твердых телах, например в металлах, не вполне свободны, а связаны с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Чтобы разорвать эти связи и освободить электроны, нужно затратить некоторую энергию, обычно порядка 10^{-19} Дж, или несколько электронвольт (сокращенное обозначение эВ, $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

По выходе из металла (катода) электроны имеют совсем небольшую энергию, порядка 10^{-19} Дж, так что их надо затем ускорять. Это ускорение и одновременно формирование пучка электронов, обладающего требуемыми характеристиками, производят с помощью двух электродов — управляющего электрода, называемого еще цилиндром Венельта по имени его изобретателя, и анода. Между катодом и анодом создается необходимое ускоряющее напряжение, например 100 кВ. Это очень высокое напряжение, и если катод будет находиться при нулевом потенциале, а анод — при столь высоком положительном потенциале относительно земли (схема с заземленным катодом), то электронный микроскоп станет весьма опасным для жизни тех, кто на нем работает. Поэтому схему «переворачивают»: катод поддерживают при отрицательном потенциале 100 кВ, а анод заземляют. Конечно, до катода дотрагиваться нельзя; его тщательно изолируют и электровводы устанавливают так, чтобы их нельзя было случайно коснуться.

Схема силовых линий электрического поля и траектории нескольких электронов показаны на рис. 18. Это устройство называют *электронной пушкой*, или *электронным прожектором*.

Электронная пушка позволяет формировать пучки, разброс энергий в которых при энергии электронов 100 кэВ не превышает 1—2 эВ, т. е. моноэнергетичность $\Delta E/E$ достигает 10^{-5} . Это сравнимо с наилучшими значениями монохроматичности пучков света. Естественно, что достижение такой моноэнергетичности требует соответствующей стабилизации питания всех элементов схемы электронного микроскопа.

На пути к объекту тонкий расходящийся пучок электронов проходит через конденсорную линзу. В современных приборах вместо одной используют две магнитные конденсорные линзы. Это важное усовершенствование было введено в 1940 г. немецким инженером Арденне. Вторая линза позволяет легче управлять электронным пучком, а самое главное, — фокусировать его на очень маленькой площадке изучаемого предмета. Благодаря этому даже при очень большом увеличении изображение предмета остается достаточно ярким. (В самом деле, если увеличение прибора равно, например, 20 000, а размеры изображения на экране или фотопластинке составляют 0,2 м, то пучок электронов должен освещать на предмете площадку с размерами всего лишь $1 \cdot 10^{-5}$ м. Арденне свел электронный пучок на образце в пятно с диаметром еще в десять раз меньше.)

За конденсорной линзой располагается объект. Обычно для поддержки его служит очень тонкая металлическая сетка. Сами объекты представляют собой очень тонкие срезы биологических препаратов, тончайшие металлические фольги или так называемые

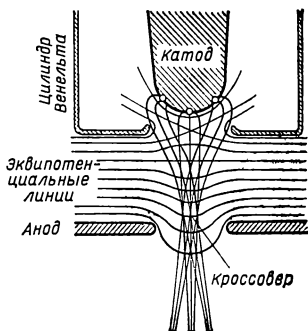


Рис. 18. Схема электронной пушки

реплики. Реплики представляют собой слепки с поверхности объектов, сделанные на тонких пластмассовых пленках или полученные с помощью очень тонких осажденных на объект слоев металлов (объект затем «отдирают», а чаще растворяют). Если объект нужно сохранить, то после нанесения на него первого слоя наносят еще второй слой, который легко отделяется от первого.

При помещении объекта под электронный пучок необходимо решать проблему с его загрязнением. Поскольку электронным линзам присущи значительные aberrации, приходится пользоваться лишь небольшими участками пучков непосредственно возле оси микроскопа и вырезать эти участки с помощью апертурных диафрагм. Падая на диафрагмы, пучок нагревает их, что приводит к испарению посторонних молекул с поверхности диафрагм. Испаренные молекулы обычно положительно ионизируются, пучок увлекает их за собой и осаждает на образец. Поэтому необходимо, чтобы все внутренние поверхности в колонне микроскопа, открытые воздействию электронного пучка, всегда были как можно более чистыми.

Далее, в колонне поддерживают высокий вакуум, порядка 10^{-4} Па (10^{-6} мм рт. ст.), т. е. порядка миллиардных долей атмосферного давления. В создании такого вакуума участвуют и масляные насосы, так что в колонну попадают пары масла. Конечно, их количество ничтожно, но столь же невелика и «освещаемая» пучком площадка на предмете. Под пучком молекулы паров разлагаются, и на объект оседают атомы углерода и его соединения. Чтобы исключить такие загрязнения, пары масла раньше, чем они осядут на поверхности объекта, вымораживают с помощью специальных охлаждаемых до очень низкой температуры ловушек, на поверхности которых они и конденсируются.

Образование изображения в электронном микроскопе

Рассмотрим детально, как электронный пучок взаимодействует с веществом объекта. Изучением такого рода взаимодействия уже вот скоро век занимается обширная область физики, ему посвящены, без преувеличения, сотни книг. Естественно, здесь

можно рассказать только о немногих результатах, которые нужны для понимания работы электронного микроскопа.

С одной стороны, это взаимодействие можно рассматривать как рассеяние электронов на атомах вещества, а с другой — как многочисленные процессы возбуждения и ионизации атомов, развала молекул вещества и пр. Рассеяние электронов имеет несколько разновидностей. Прежде всего оно может происходить без потери энергии электронами и тогда называется *упругим*; это имеет место, когда электрон взаимодействует с атомным ядром. Если рассеяние электрона сопровождается потерей им энергии, то его называют *неупругим*; происходит оно при взаимодействии с электронными оболочками атома. Далее, в зависимости от энергии электрона, заряда атомного ядра, плотности и толщины объекта может иметь место *однократное, кратное и многократное рассеяния* электронов. При однократном рассеянии, как явствует из названия, электрон проходит через атомное электрическое поле только один раз. При кратном рассеянии траектория электрона определяется уже совместным действием полей нескольких атомов. При многократном рассеянии результаты отдельных актов взаимодействия электронов с атомами настолько усредняются, что для их описания уже можно пользоваться статистикой.

Наконец, рассеяние электронов может происходить в ту же сторону, куда движется электронный пучок, и в обратную сторону. В первом случае его называют *прямым рассеянием*, или *рассеянием вперед*, во втором — *обратным рассеянием*, или *рассеянием назад*.

Интегральное эффективное сечение рассеяния электронов на атомах пропорционально квадрату заряда ядра и обратно пропорционально квадрату их энергии, — по крайней мере, для упругого рассеяния быстрых электронов, т.е. таких, энергия которых намного больше энергии связи большинства электронов в атомах. Более точные оценки эффективного сечения получаются, если учитывают распределение атомных электронов по энергиям, т.е. рассчитывают атомный фактор (его еще называют *форм-фактором*), о котором мы говорили в связи с рассеянием рентгеновских фотонов на атомах кристалла.

Дифференциальное эффективное сечение однократного упругого рассеяния зависит от угла рассеяния θ по соотношению

$\sigma(\theta) \propto 1/\sin^4(\theta/2)$. (Конечно, при $\theta=0$ эта зависимость перестает быть справедливой и заменяется другой, более сложной: нулевой угол рассеяния отвечает невозможной траектории электрона через атомное ядро.) При однократном рассеянии большая часть электронов может отклоняться на значительные углы от исходного направления своего движения, а значит, не попадает в узкое отверстие диафрагмы перед объективной линзой. При многократном же рассеянии, отдельные акты которого следуют друг за другом по закону случая, электрон в каком-либо акте может отклониться в обратную сторону по сравнению с предыдущим актом рассеяния, и в результате такого усреднения основная часть пучка отклонится на небольшие углы.

Отсюда следует, что должно существовать оптимальное соотношение между толщиной объекта (точнее, произведением его плотности, или числа атомных ядер в единице объема, на толщину, — это произведение называют *массовой толщиной*) и энергией электронов. При слишком малой массовой толщине будет преобладать однократное рассеяние в объекте, при слишком большой — многократное рассеяние, так что контраст изображения соседних участков объекта окажется слишком низким. Он будет наибольшим при некоторой промежуточной толщине образца.

В этом и заключается принципиальное отличие электронного микроскопа от обычного оптического. В оптическом микроскопе амплитудный контраст возникает из-за разного поглощения света в соседних участках объекта. В электронном микроскопе контраст создается за счет разного рассеяния электронов от соседних участков. Электронный микроскоп работает в такой области энергий электронов и толщин образцов, где поглощение электронов играет малую роль, и поэтому образцы сильно не нагреваются.

Еще в 1935 г. было доказано, что образование изображения в электронном микроскопе происходит точно так же, как в оптическом, в соответствии с теорией Аббе. Рассеянные объектом электроны сначала создают дифракционную картину в задней фокальной плоскости объективной линзы, а эта картина уже фокусируется на экран или фотопластинку. Поэтому необходимо, чтобы и в электронном микроскопе апертура линзы охватывала как можно больше дифрагированных электронов, среди которых многие летят

под большим углом к оси линзы. Это означает, что объективная линза должна обнаруживать сильную сферическую аберрацию. Вместе с тем, поскольку в таком пучке электронов вместе с упругорассеянными летят и неупругорассеянные электроны (в общем, чем больше энергии теряет электрон, тем на больший угол он рассеивается), в объективной линзе должна возникать и достаточно заметная хроматическая аберрация.

В оптике хроматические аберрации невелики, так как показатели преломления линз даже на границах диапазона видимого света различаются лишь на 1%. Сферическую аберрацию можно существенно уменьшить, соединяя вместе несколько линз. В электронной микроскопии все намного труднее. Естественно, что сферическая аберрация зависит от распределения электрического или магнитного поля по оси линзы (если, как обычно, линза имеет вращательную симметрию). Но еще в 30-х годах было показано, что никаким выбором распределения полей в электронной линзе ее сферическую аберрацию не удастся свести к нулю.

Тогда решили поступиться вращательной симметрией и сделать так называемую квадрупольную электростатическую линзу (к ней можно добавить еще четыре полюса магнита и получить комбинированную линзу). В такой линзе электроны притягиваются к двум положительным электродам и отталкиваются от двух отрицательных. Это означает, что в одной из плоскостей, проведенных между парами электродов, квадруполь ведет себя как собирающая, а в другой — как рассеивающая линза. В промежуточных между ними плоскостях оба эти действия в значительной степени компенсируют друг друга. Конечно, один квадруполь не переведет точку предмета в точку изображения, для этого нужны как минимум два квадруполя. Но они по своему общему действию будут подобны обычной линзе с вращательной симметрией, теперь уже с небольшой сферической аберрацией.

В последние годы для дальнейшего уменьшения этой аберрации стали использовать не только четырехполюсные, но и восьмиполюсные электрические и магнитные системы. Но следует заметить, что работать с ними сложно: системы сами по себе не имеют вращательной симметрии, настраивать их, подбирая токи в обмотках магнитов и взаимное расположение полюсов, очень долго и

трудно, а любая несоосность в паре квадрупольных линз может своим вредным действием намного перекрыть полезный эффект от уменьшения сферической аберрации. Пока что все эти попытки не вышли из стен лабораторий.

Существуют и другие возможности уменьшения сферической аберрации, в частности автоматический учет ее с помощью вычислительных машин. Поскольку дифрагированные пучки содержат информацию об объекте, а оптическая система вносит в нее сильные искажения, исправление в информацию пытаются ввести с помощью специальных зонных пластинок, отфильтровывающих наиболее искаженные участки изображения, а соответствующие им пучки как бы восстанавливают математическим расчетом. По существу, здесь мы имеем дело с одним из вариантов «математического микроскопа».

Значительно снизить сферическую и вместе с ней хроматическую аберрацию можно, если предмет разместить в самой линзе возле ее центра, где напряженность поля наиболее велика. На этой основе создана линза, одна половина которой работает как дополнительная линза конденсора, а другая — как объективная линза. Такой конденсор-объектив чрезвычайно сложен в изготовлении и настройке, он требует предельно точной соосности его половин и тщательной выверки формы электронного пучка. Но овчинка стоит выделки: в начале 70-х годов советские конструкторы смогли с помощью такой линзы настолько уменьшить аберрации, что удалось достигнуть разрешения $1,5 \cdot 10^{-10}$ м.

За объективной линзой (можно сказать — ниже ее, поскольку электронная пушка и электровводы находятся наверху прибора, иногда даже на высоте нескольких метров, а наблюдение производится в нижней части колонны микроскопа, на уровне глаз оператора) в микроскопе расположены промежуточная и проекционная линзы. Их назначение — увеличение изображения, даваемого объективной линзой, и проектирование его на экран или фотопластинку. Увеличение может меняться от нескольких сот до нескольких сот тысяч раз, причем, как и в оптическом микроскопе, предельное полезное увеличение определяется разрешением прибора. Иногда для достижения наибольшего полезного увеличения в микроскопе устанавливают вторую промежуточную линзу.

Электроннография

Важным преимуществом электронного микроскопа является то, что он может работать в режиме *электроннографа*, т. е. позволяет вести съемку дифракционных картин. Эти картины создаются рассеянием электронов от объектов с периодической структурой и вполне эквивалентны рентгенограммам. При таком режиме работы промежуточная и проекционная линзы перестраиваются таким образом, что переносят на экран или фотопластинку сильно увеличенное изображение самой дифракционной картины. Наводка на резкость в электронном микроскопе осуществляется совсем не так, как это делается в оптическом микроскопе. В последнем линзы имеют постоянное фокусное расстояние и наводка производится перемещением держателя объекта, тогда как в первом объект неподвижен и изменяются фокусные расстояния линз регулированием проходящего через них электрического тока.

Электроннография обладает рядом существенных преимуществ перед рентгенографией. Во-первых, электроны рассеиваются атомами в тысячи раз сильнее, чем рентгеновские фотоны, и это позволяет исследовать на просвет чрезвычайно тонкие (миллионные доли сантиметра) объекты. Во-вторых, поскольку рассеяние электронов очень сильно зависит от заряда ядра, с их помощью нетрудно определять положения легких атомов в присутствии тяжелых. В-третьих, малость длин электронных волн позволяет изучать очень мелкодисперсные объекты. В-четвертых, можно достичь большой яркости дифракционных картин, формируя остро сфокусированные пучки электронов, что дает возможность получать дифракционные изображения с очень малых, поистине микроскопических, участков объекта.

Если работать на отражение, то глубина проникновения электронов в вещество при тех напряжениях, которые используются в современных электроннографах, обычно не превышает 10^{-8} м. Поэтому электроннография оказывается отличным методом исследования структуры поверхностных слоев материалов, образующейся под действием как естественных, так и искусственных факторов — окисления, коррозии, различной технологической обработки. Чтобы уяснить особенности этой структуры по сравнению со строением

глубинных областей материала, сопоставляют электронограмму с рентгенограммой того же материала.

Электронография существенно расширяет возможности изучения мелкокристаллических веществ и коллоидных растворов. Мы уже говорили, что конечные размеры кристалла являются своего рода дефектом решетки; чем меньше кристалл, тем сильнее размываются дифракционные пятна. Для образцов, состоящих из множества мелких кристалликов, случайным образом ориентированных по отношению к пучку, дифракционные пятна превращаются в дифракционные кольца наподобие тех, которые видны, если глядеть на уличный фонарь через запыленное или покрытое изморозью оконное стекло.

Чем ближе размеры кристалликов к длине волны излучения, тем сильнее размываются кольца, соседние кольца все более перекрываются и дифракционная картина становится плохо различимой. Например, для рентгеновского излучения с длиной волны $1,5 \cdot 10^{-10}$ м кольцо, отвечающее рассеянию под углом 45° , само имеет угловую ширину 12° , т. е. совершенно размыто, при размерах кристалликов, еще в семь раз больших длины волны, а на электронограмме, снятой с того же образца при напряжении 40 кВ, это кольцо расширено только на полградуса, т. е. прекрасно заметно. Разумеется, это связано с существенно меньшей длиной электронной волны, составляющей в данном случае около $6 \cdot 10^{-12}$ м.

Преимущества электронографии еще более возрастают, когда с помощью остро сфокусированного пучка электронов изучают дифракцию от отдельных крошечных участков образца (этот метод называют микродифракцией). Переводя электронный микроскоп попеременно в режим дифракции и микроскопии, можно получить уникальную возможность одновременно исследовать вид и строение объекта с чрезвычайно высоким увеличением и хорошим разрешением.

Разрешение современного электронного микроскопа ограничено главным образом аберрациями объективной линзы. В результате оно примерно на порядок хуже того, что требуется для разрешения отдельных атомов. (Напоминаем, что речь идет о микроскопии, а не о дифракционной картине — «коллективном портре-

те».) Если пытаться рассматривать в микроскоп не единственный атом (что вообще невозможно) и не единственную атомную плоскость (это тоже, по-видимому, невозможно, потому что «свеже-приготовленные» атомные слои очень легко рвутся на отдельные изолированные островки), а образцы, состоящие хотя бы из нескольких атомных слоев (например, тончайшую металлическую пленку), то мы увидим не пространственное изображение, а как бы проекцию всех атомов образца на одну плоскость, перпендикулярную пучку электронов.

Если атомы одного слоя не находятся под атомами другого (такое возможно лишь для простых структур с кубической симметрией при идеальной решетке и при ориентации пучка электронов точно вдоль ребра ячейки кристалла), то на проекции атомы расположатся гораздо гуще, чем в случае одной плоскости, перпендикулярной пучку. Чтобы увидеть атомы порознь, понадобится, конечно, еще лучшее разрешение. Но можно наблюдать с торца множество атомных плоскостей, а зная увеличение микроскопа, даже определять расстояние между ними.

Уже говорилось, что в электронном микроскопе для формирования изображения используются не прямые, а рассеянные пучки. Иногда для повышения контрастности изображения полезно вообще устранить прямой пучок электронов и вести наблюдение методом темного поля. Для этой цели за второй линзой конденсора устанавливают кольцевую диафрагму, так что на объект падает «полый» конический пучок. Угол раствора этого конуса подбирают таким, чтобы в отсутствие рассеивающего объекта пучок целиком задерживался апертурной диафрагмой объективной линзы. Если прибор работает в режиме электронографа, то с помощью таких диафрагм можно выделить часть пучка, которая образует одно интересное исследователя дифракционное кольцо. Поскольку электроны сильно рассеиваются веществом, темнопольное изображение получается достаточно ярким.

Последние годы отмечены появлением сверхвысоковольтных просвечивающих электронных микроскопов (рис. 19). В них применяется рекордное на сегодняшний день ускоряющее напряжение — до 3 МВ. На рис. 20 показаны две из снятых на таком микроскопе микрофотографий. Нужда в подобных микроскопах связа-

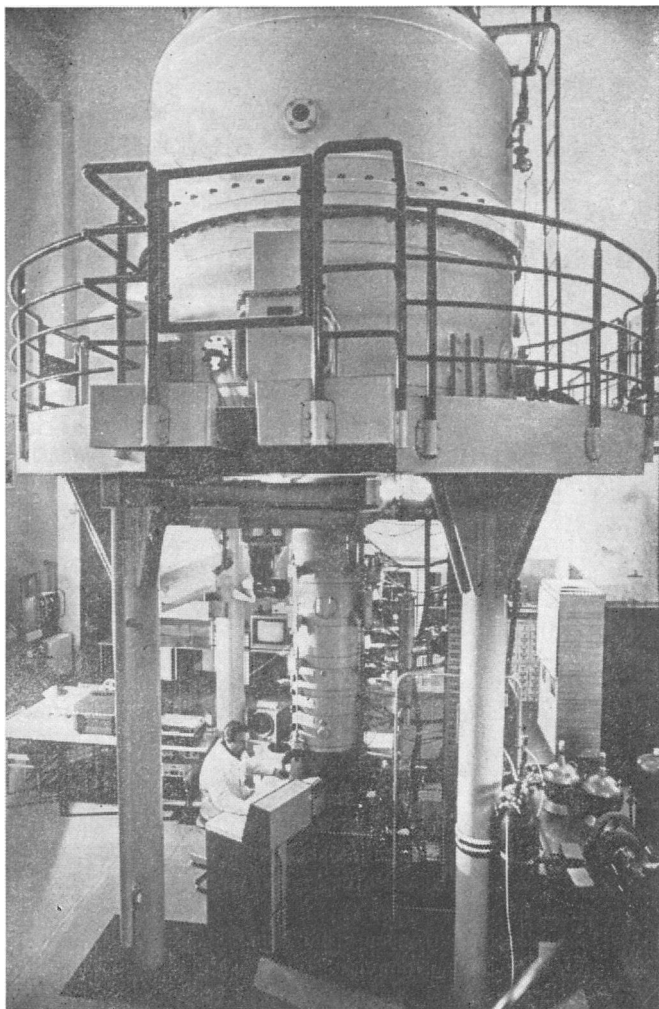


Рис. 19. Электронный микроскоп на 1 МВ

на в первую очередь не с улучшением разрешения, а с необходимостью исследования более толстых объектов. С помощью современных ультрамикротомов можно получать чрезвычайно тонкие срезы биологических тканей и некоторых других материалов, но во многих случаях интересно исследовать объекты, не разрезая их на тонкие пластинки. Поглощение электронов быстро ослабевает с увеличением их энергии: пробег электронов вдоль направления их падения пропорционален квадрату их начальной энергии. Так что, повысив ускоряющее напряжение, например, с 100 кВ до 3 МВ, можно изучать почти в тысячу раз более толстые объекты. К их числу относятся многие важные образцы металлов, стекол, полимеров и других материалов.

Но этот выигрыш так просто не дается. Хотя принцип действия сверхвысоковольтного электронного микроскопа ничем не отличается от такового для обычного высоковольтного прибора, дальнейшее повышение напряжения выдвигает ряд сложных технических проблем. Генераторы напряжения берут сейчас из ускорительной техники — полвека назад они использовались в установках для исследования атомного ядра и были уникальными сооружениями. Подробнее речь о них пойдет в разделе об ускорителях частиц. Далее, при таких напряжениях вырастает в проблему защита от мощного рентгеновского излучения, возникающего при падении электронного пучка на металлические поверхности в микроскопе, причем это излучение обладает тем большей проникающей способностью, чем выше напряжение. Защищать от излучения приходится не только персонал, но и детекторы интенсивности электронных пучков внутри микроскопа.

Казалось бы, использование сверхэнергичных электронов, слабо поглощаемых веществом и практически не нагревающих его, может позволить изучать не только срезы биологических тканей, но и целые довольно толстые биологические препараты. Однако в этом до сих пор существуют большие сомнения: то, что могло бы «выжить» под электронным пучком, почти наверняка погибнет в потоке коротковолнового рентгеновского излучения.

Чем выше энергия электронов, тем более сильные магнитные линзы нужны, чтобы управлять движением электронного пучка. Это понятно: чем быстрее движется какое-либо тело, тем труднее

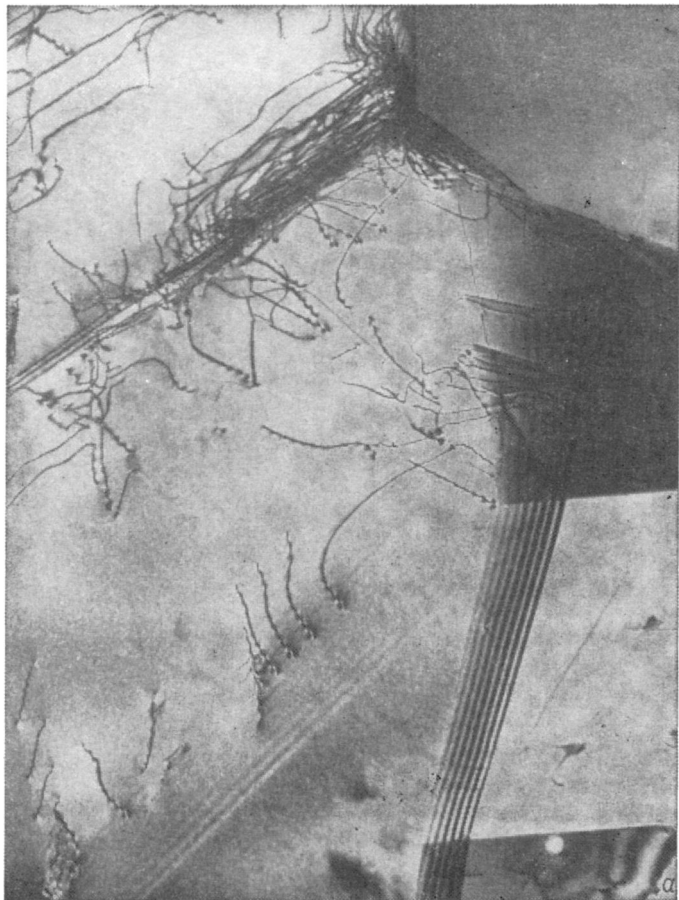


Рис. 20а

отклонить его в сторону со своего пути. Но существуют пределы напряженности магнитного поля, достижимые с помощью обычных электромагнитов. Ко всему еще линзы становятся слишком громоздкими, поэтому сверхвысоковольтный микроскоп даже без



Рис. 20б

Рис. 20. Микрофотографии дислокаций в нержавеющей стали (а) и рядов кристаллических атомных плоскостей в решетке золота (б), снятые в электронном микроскопе. Расстояние между кристаллическими плоскостями менее $1,5 \cdot 10^{-10}$ м

большого источника высокого напряжения достигает высоты 5 м и больше. (Размеры магнитных линз можно, правда, уменьшить, используя соленоиды со сверхпроводящими обмотками, поддерживаемыми при чрезвычайно низкой температуре.) Возникающие при этом сложные инженерные проблемы довольно успешно решаются, и в последние годы уже началось серийное производство электронных микроскопов с напряжением 1 МВ и даже выше.

Растровый электронный микроскоп

В описанных выше просвечивающих электронных микроскопах объект наблюдения освещается неподвижным в поперечной плоскости пучком электронов. Однако возможен и даже имеет большие преимущества другой способ освещения объектов, используемый главным образом при исследовании непрозрачных для

электронов объектов. При этом, естественно, получаются изображения только тонких приповерхностных слоев объекта.

В этом способе специально сформированный сверхтонкий электронный пучок «обегают», сканирует поверхность объекта, выбивая из нее так называемые вторичные электроны, обладающие малой энергией (примерно до 100 эВ). Вторичные электроны улавливаются коллектором, преобразуются в электрический ток и подаются на телевизионную трубку, в которой развертка другого электронного пучка осуществляется синхронно с разверткой сканирующего пучка в электронном микроскопе. Ток вторичных электронов используют для модуляции интенсивности пучка в телевизионной трубке или напряжения на электродах, отклоняющих пучок в этой трубке в вертикальном направлении. Модулированная яркость или вертикальное положение пучка и дают изображение наблюдаемой поверхности объекта.

Ясно, что такой *сканирующий* электронный микроскоп (называемый также *растровым*, поскольку электронное пятно, двигаясь по поверхности объекта, образует на ней систему строк — растр) действует по совсем другому принципу, чем обычный просвечивающий микроскоп. В последнем изображение образуется в основном упругорассеянными быстрыми первичными электронами. В растровом микроскопе, который работает на отражение (только в самое последнее время появились просвечивающие растровые микроскопы), изображение создается медленными вторичными электронами, так как быстрые первичные электроны назад отражаются довольно слабо. Никаких объективной, промежуточной и проекционной линз здесь не надо: это не увеличительный, а «уменьшительный» микроскоп!

В самом деле, для того чтобы получить мельчайшее электронное пятно — от его размеров зависит разрешение микроскопа, нужно на поверхности образца сфокусировать изображение самого узкого места пучка (кроссовера) с очень большим уменьшением. Обычно диаметр кроссовера составляет порядка 10^{-4} м, оптимальный же размер пятна в растровом микроскопе имеет порядок 10^{-9} м, так что необходимо уменьшение в 100 000 раз. Такое уменьшение осуществляют специальной системой из трех линз, причем последняя из них создает сходящийся к объекту под ши-

роким углом конусообразный пучок. Поэтому основное значение сферическая аберрация имеет именно для последней линзы, которую называют *зондоформирующей*. действительно, электронное пятно можно рассматривать как сверхтонкий зонд, слегка «погружаемый» в объект. Развертка пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях по поверхности объекта осуществляется двумя парами отклоняющих катушек.

Создание растрового микроскопа потребовало разработки очень «ярких» электронных прожекторов с большой плотностью тока в пучке электронов. (Не забудем, что и тут есть свои пределы. Электроны в пучке расталкивают друг друга, пучок расширяется, что, конечно, весьма нежелательно. Ослабить этот эффект можно или чрезвычайно сильными фокусирующими полями линз, или повышением энергии электронов.) Необходимость в таких «светосильных» электронных пучках связана с тем, что первичные электроны очень неэффективно преобразуются во вторичные. Например, при токе первичных электронов в микроскопе порядка 10^{-6} А ток вторичных электронов имеет порядок 10^{-12} А. Это очень слабый ток, и если пытаться его усиливать обычной электронной схемой, то сигнал полностью утонет в шумах схемы. В современных растровых микроскопах вторичные электроны направляют сначала на специальный кристалл-сцинтиллятор, отвечающий на приход электронов вспышками света. Свет вспышек поступает на светочувствительный катод фотоэлектронного умножителя, а поток электронов, выбитых светом из катода, затем усиливается электронной схемой.

При таком методе усиления сигнала проблема шумов становится менее существенной, но не снимается полностью, так как она связана с вопросом о том контрасте изображения, который еще может быть воспринят окончательным приемником — глазом наблюдателя. Одновременно удовлетворить требованиям хорошего разрешения и достаточного контраста (т. е. отношения интенсивностей сигнала и шума) можно, лишь используя высокосветосильную электронную пушку, достаточно сильные линзы с малой сферической аберрацией, увеличивая угол раствора электронного конусообразного зонда и, разумеется, увеличивая время сканирования. Для визуального наблюдения надо использовать флуоресцирующий экран с достаточно длительным свечением, большим, чем в

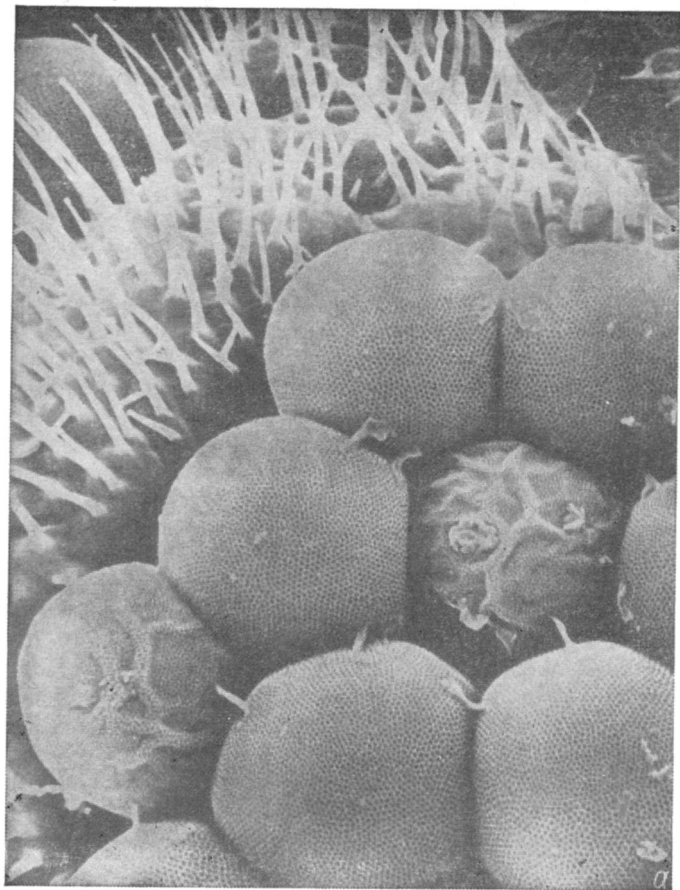


Рис. 21а

обычном кинескопе, поскольку здесь объект неподвижен и неизменен (в той мере, в какой он не разрушается под пучком).

Пожалуй, одно из самых больших преимуществ растрового микроскопа перед обычным электронным микроскопом состоит в

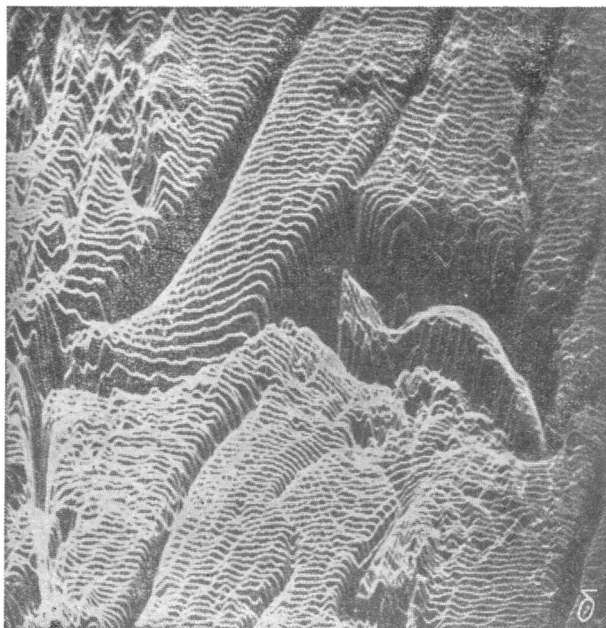


Рис. 21б

Рис. 21. Микрофотография части глаза мухи, полученная на растровом микроскопе с модуляцией тока электронной пушки (а), и снимок шероховатой поверхности металла, полученный на растровом микроскопе с модуляцией отклонения луча (б)

том, что он дает *объемное изображение* поверхности предмета (рис. 21). Это связано с тем, что число выходящих из образца вторичных электронов при прочих равных условиях сильно зависит от наклона участка поверхности относительно направления освещающего первичного пучка. При определенных условиях объемный эффект точно такой же, каким его мог бы увидеть воображаемый наблюдатель, если бы он находился на месте электронной пушки, а поверхность объекта освещалась бы испущенным из коллектора электронов пучком света.

Как уже говорилось, ток вторичных электронов можно использовать для получения объемного эффекта двумя способами. Первый из них состоит в том, что этот ток после соответствующего усиления подается на катод телевизионной трубки, на экране которой формируется изображение. Участкам объекта, из которых вылетает больше вторичных электронов, отвечают более яркие участки изображения. Второй способ состоит в том, что ток вторичных электронов подается в цепь катушек, осуществляющих отклонение луча в телевизионной трубке по вертикали. При этом, чем сильнее ток вторичных электронов, тем сильнее отклоняется луч по вертикали. Абсолютно ровная поверхность образца (правда, такой никогда в микроскопических масштабах не бывает) даст совершенно ровные строки на экране, а любым ее неровностям будут соответствовать изломы строк, которые при взгляде на растр в целом воспринимаются как рельеф поверхности образца.

Разрешение растрового микроскопа определяется рядом факторов: диаметром сканирующего электронного пятна, аберрациями зондоформирующей линзы, а также яркостью электронного прожектора, причем последний фактор имеет доминирующее значение. С помощью термоэмиссионного механизма «извлечения» электронов из катода практически невозможно добиться очень высокой плотности тока в пучке

Достижение такой плотности важно и для создания *просвечивающего* растрового электронного микроскопа. В отличие от растрового отражательного микроскопа, в нем в образовании изображения участвуют не вторичные, а первичные электроны. В отличие же от обычного просвечивающего микроскопа, в котором электроны падают на объект сравнительно узким пучком, а от него разлетаются широким веером, здесь электроны падают на объект широким конусом, а детектор отбирает из них довольно узкий пучок.

Существенного повышения яркости электронного прожектора удалось добиться, используя вместо термоэмиссии автоэмиссию, при которой электроны вытягиваются из катода чрезвычайно сильным электрическим полем. Такое поле достигается при высоком отношении разности потенциалов к характерным размерам катода; для катода в виде острия характерным размером служит радиус кривизны острия. Чтобы извлечь электроны из металла, нужна

напряженность поля несколько киловольт на сантиметр; отсюда видно, что для острия микронных размеров достаточно уже небольшого напряжения. С помощью автоэмиссионной пушки удается добиться яркости пучка, по крайней мере, в миллион раз превышающей яркость пучка из термоэмиссионной пушки.

Дальнейшая схема формирования зонда сравнительно мало отличается от той, что принята в отражательном растровом микроскопе. Объект часто располагают возле центра зондоформирующей линзы, чтобы свести к минимуму влияние аберраций линзы на размеры электронного зонда. Детектирование пучка осуществляется так же, как в отражательном микроскопе. Разрешение просвечивающего растрового микроскопа в настоящее время достигает примерно $5 \cdot 10^{-10}$ м.

Похвала электронному микроскопу

Сколь странным может показаться еще совсем недавнее сомнение в возможностях электронного микроскопа! Эти приборы произвели в современной науке, особенно в биологии и физике твердого тела, не меньшую революцию, чем оптические микроскопы в науке предшествующих трех столетий. С помощью электронного микроскопа удалось увидеть отдельные молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты, являющиеся носителями наследственной информации, молекулы различных рибонуклеиновых кислот, переносящие эту информацию к «химическим заводам» в клетках живых организмов, где производится выработка важнейших химических веществ; получить представление о том, как выглядят мельчайшие живые существа — вирусы, в том числе открыть тот поразительный факт, что они могут иметь «застывшую» кристаллическую структуру — замечательное образование на грани живой и неживой материи; детально установить строение клеток и во многом понять, как они работают.

В разделе, посвященном фазово-контрастному микроскопу, рассказывалось, что для повышения качества изображений мало-контрастных предметов эти объекты нередко окрашивают специальными химическими красителями, избирательно поглощаемыми различными участками объекта. Аналогичной цели служит «окра-

шивание» объектов в электронном микроскопе, особенно когда наблюдаемые объекты или их детали находятся на пределе разрешения прибора. Поскольку контраст в электронном микроскопе создается не цветом (т. е. избирательным поглощением отдельных участков видимого спектра), а рассеянными первичными или выбитыми вторичными электронами, конечно, сам термин «окрашивание» приобретает условный смысл, и его часто заменяют другим, впрочем, столь же мало удачным термином «декорирование».

Наиболее близкой к оптическому окрашиванию аналогией является введение в биологический препарат, который состоит из легких атомов, солей тяжелых металлов, например вольфрама, свинца или урана. Объект погружают в раствор какой-либо из этих солей, пропитывают, а затем высушивают. Соли (как и обычные красители) закрепляются только в отдельных участках препарата, и эти участки выглядят при наблюдении в электронный микроскоп весьма контрастными, поскольку рассеяние электронов сильно увеличивается с повышением заряда атомного ядра (или атомного номера элемента).

Другой метод декорирования, пригодный для намного более широкого круга объектов, называют оттенением. При этом на объект под очень косым углом напыляют слой какого-нибудь непрозрачного для электронов вещества, так что при наблюдении в микроскоп все выступы на поверхности объекта сопровождаются тенью с одной стороны от них. Измерив ширину тени и зная угол, под которым производилось оттенение, можно легко определить высоту выступа. Если «выступом» на сетке, поддерживающей объект, является длинная молекула, например развернутая в нить молекула полимера, то таким образом можно оценить ее диаметр.

Электронный микроскоп дает уникальную возможность наблюдать не только отдельные элементы структуры твердых тел, например дислокации или атомные плоскости, но и отдельные участки с различающимися магнитными или электрическими свойствами. Так, известны ферромагнетики и сегнетоэлектрики — вещества, состоящие из множества маленьких областей (доменов), в каждом из доменов соответственно намагниченность или электрическая поляризация имеют свое направление, отличное от тех, которые наблюдаются в соседних доменах. Вещество в объеме в целом может

быть и нейтральным, но в отдельных доменах существуют сильные поля, которые действуют на первичные или же вторичные электроны. Благодаря этому домены отлично видны на электронно-микроскопических изображениях. Картина доменов статична, но с помощью электронов можно наблюдать и динамические процессы в твердых телах, например изменение электрического поля в транзисторе при подаче на него переменного сигнала. Такой сигнал обычно имеет весьма большую частоту, так что изображение на экране микроскопа слишком быстро меняется, чтобы его колебания можно было уловить глазом. Но если вместо непрерывного освещения объекта электронным пучком использовать импульсные «вспышки» и частоту их синхронизировать с частотой подаваемого на транзистор сигнала, то изображение распределения поля удастся остановить в точности так же, как останавливают изображение вращающегося или колеблющегося предмета с помощью стробоскопического освещения.

Здесь перечислена лишь ничтожная доля исследований, выполненных с помощью электронного микроскопа. В общем, можно сказать, что сегодня его разрешение на три порядка лучше разрешения оптического микроскопа. Для неспециалистов электронно-микроскопическое изображение — такое же чудо, каким три века назад людям казалось то, что они видели в оптический микроскоп. Да и специалисты подчас не могут сдерживать восторга, наблюдая в электронный микроскоп удивительно причудливое, но такое рациональное строение мельчайших живых организмов или отдельных элементов живых органов.

Однако, восторгаясь увиденным, наблюдатели нередко задают тот же вопрос, который задавали и три века назад: а насколько достоверно то, что мы наблюдаем в электронный микроскоп? Не содержат ли изображения ложной информации? Оптике уже давно ответили на этот вопрос, и ответ звучит так. В обычном оптическом микроскопе источниками погрешностей изображения при не слишком больших увеличениях являются главным образом аберрации линз. Если свести их к минимуму, то изображение будет весьма близким к оригиналу. Когда же увеличение приближается к значению, соответствующему предельному разрешению, основные погрешности вносят в изображение дифракционные явления, кото-

рые принципиально неустранимы. Поэтому, чтобы быть уверенными в истинности наблюдаемого изображения, лучше работать не при максимально возможном увеличении и тем более не за пределами разрешения.

Примерно такой же ответ можно услышать и от специалистов по электронной оптике, с тем лишь отличием, что они предупреждают о большой сложности электронного микроскопа по сравнению с его оптическим собратом. Необходимы тщательная и точная его настройка и высочайшая стабилизация питающего тока и напряжения. В процессе подготовки объектов к наблюдению, при изготовлении тонких срезов, окрашивании и оттенении в объекты не должны вноситься такие детали, которых в них нет — так называемые артефакты. Тогда наблюдаемым изображениям вполне можно доверять.

Однако для расшифровки того, что предстает взгляду наблюдателя, подчас нужна еще большая работа, учитывающая все те физические явления, благодаря которым формируется изображение в микроскопе. Развитие и совершенствование электронного микроскопа вызвало необходимость разработки достаточно полной теории взаимодействия падающего пучка электронов с веществом, выяснения соотношений между процессами однократного и многократного, упругого и неупругого рассеяний, установления закономерностей образования и выхода вторичных электронов. Потребовалось заниматься и таким вопросом, как радиационные повреждения структуры материалов, вызываемые электронным облучением при высоких энергиях частиц.

Многие исследования с помощью электронного микроскопа, проводимые как в режиме изображений, так и в режиме дифракции электронов, осуществляются комплексно, т. е. объект изучают и другими методами. Наблюдение признается достоверным лишь тогда, когда данные всех методов наблюдения хорошо согласуются друг с другом. Конечно, перефразируя известную поговорку, можно сказать, что лучше один раз увидеть, чем сто раз рассчитать. Но все же следует понимать, что получение изображения невидимого предмета — это часто не конец, а напротив, только начало исследования, концом которого является понимание сущности объекта и его места в ряду других.

Электронный и ионный проекторы

Электронный микроскоп явился родоначальником большого семейства приборов, в которых используются не только электроны, но и тяжелые заряженные частицы — ионы, и не только для изучения строения объектов, но и для химического анализа вещества в микроскопических объемах образцов. Однако прежде чем рассказать о них, остановимся на электронном микроскопе... без линз. Речь идет об *электронном проекторе*, который впервые построил немецкий физик Мюллер в 1936 г. Электроны в этом приборе, как явствует из его названия, вытягиваются очень сильным электрическим полем из металлического образца, являющегося катодом. Затем они движутся в этом поле по прямым линиям к изогнутому по сфере флуоресцирующему экрану. Катод (он же образец) изготавливают в виде острия с чрезвычайно малым радиусом закругления. Увеличение, даваемое проектором, если поле в нем имеет точно сферическую симметрию, равно отношению радиуса экрана к радиусу острия. Оно может достигать примерно 200 000!

Казалось бы, сферически симметричное поле должно вытягивать электроны из сферического острия совершенно равномерно по всем направлениям, но тогда было бы непонятно, как появляется изображение острия. Однако на самом деле все значительно сложнее. Острие после изготовления отжигают, и атомы вещества перераспределяются по его поверхности так, чтобы поверхностная энергия острия оказалась минимальной. При этом на поверхность образца выходят почти идеально гладкие атомные плоскости, обычно с низкими миллеровскими индексами, т. е. наиболее густо усеянные атомами.

Дальнейшее зависит от плотности расположения атомов на вышедших наружу гранях кристаллов, поскольку она определяет легкость выхода электронов из металла (так называемую работу выхода). Чем легче выходят электроны из грани, тем большее их число движется в данном направлении к флуоресцирующему экрану, тем более ярким пятном изобразится грань. При этом, казалось бы, разрешение должно ограничиваться лишь длиной дебройлевской волны электронов. Однако это не так. Выходящие электроны

имеют составляющую скорости не только в направлении приложенного электрического поля, но и в перпендикулярных направлениях вдоль поверхности острия. Последняя не очень велика, но ее существование служит главным ограничением разрешения электронного проектора. Предельное разрешение составляет около $2,5 \cdot 10^{-9}$ м.

В 1951 г. Мюллер построил *ионный проектор*, который по своим возможностям совершенно затмил своего электронного предшественника. В нем вместо электронов для создания изображения используются ионы газа, специально введенного под небольшим давлением в колбу проектора (поэтому газ называют изображающим). Обычно в качестве такого газа берут водород или гелий (по причинам, о которых сказано ниже). Поскольку при этом образуются положительно заряженные ионы, острие становится анодом, а экран для наблюдения — катодом. Давление газа выбирают из тех соображений, чтобы ток газовых ионов был достаточен для образования контрастного изображения на экране; вместе с тем надо, чтобы ионов было не слишком много: в противном случае они будут часто сталкиваться друг с другом при движении к экрану и, сбиваясь при этом с прямолинейных траекторий, будут портить изображение.

Радиус острия в ионном проекторе еще меньше, чем в электронном, подают на него еще более высокое напряжение, так что напряженность поля в нем достигает примерно 50 ТВ/м (для сравнения в электронном проекторе напряженность составляет 3—5 ТВ/м). В результате возле поверхности острия атомы изображающего газа самопроизвольно ионизируются; обычно это происходит на расстоянии примерно $(3—5) \cdot 10^{-10}$ м от острия. Само острие изготовляют из тонкой проволоки, обработанной на токарном станке, или из нитевидного кристалла (так называемого «уса»), а затем протравливают. При этом поверхность острия еще довольно шероховата. Но при помещении его в проектор начинается стремительное исчезновение шероховатостей благодаря тому, что электрическое поле на крупных неровностях имеет особенно высокую напряженность и буквально испаряет атомы с выступов. В конце концов образуется атомно-гладкая поверхность (неровности на ней имеют размеры атомных масштабов), все выступы на

которой обусловлены одной лишь структурой кристалла, часто такой же совершенной, как и в объеме материала острия. Теперь характер ионизации атомов изображающего газа определяется локальными вариациями электрического поля возле выступивших наружу атомных плоскостей. Направляясь к экрану, ионы газа несут информацию об этих вариациях, т. е. об атомном строении поверхности острия.

Теория говорит о том, что разрешение ионного проектора зависит в основном от четырех факторов — напряжения, радиуса и температуры острия, а также потенциала ионизации изображающего газа. Строгой теории разрешения наподобие существующей для микроскопов здесь еще нет из-за чрезвычайной сложности процессов, происходящих с изображающим газом в непосредственной близости к острию. Большая масса иона по сравнению с массой электрона должна при той же скорости иона приводить к длине дебройлевской волны, в тысячи раз меньшей, чем у электрона. Поскольку для автоионизации атомов газа требуется большее напряжение, чем для автоэлектронной эмиссии, скорость ионов может достигать заметной доли скорости электронов. Но этот выигрыш в большой степени «съедается» действием других факторов. Один из них — это уже известная нам составляющая скорости ионов, перпендикулярная направлению их движения от острия к экрану. Она зависит не только от температуры газа, но и от температуры острия. Атомы на поверхности острия совершают тепловые колебания, а также могут «перепрыгивать» с места на место, мигрируя по поверхности и сообщая тем самым ионам газа движение параллельно поверхности. Это заставляет охлаждать острие до сверхнизких температур.

Уменьшение радиуса острия, естественно, повышает увеличение, но на разрешении сказывается не столь сильно. И, наконец, чем труднее ионизуются атомы изображающего газа, тем ближе они должны подойти к поверхности острия, чтобы испытать ионизацию, тем к более тонким деталям атомного поля вокруг острия они будут чувствительны и тем точнее передадут эти местные вариации. Условию трудной ионизации наилучшим образом удовлетворяют атомы гелия. С использованием гелия при температуре острия 22 К (охлаждение жидким водородом) и радиусе кривиз-

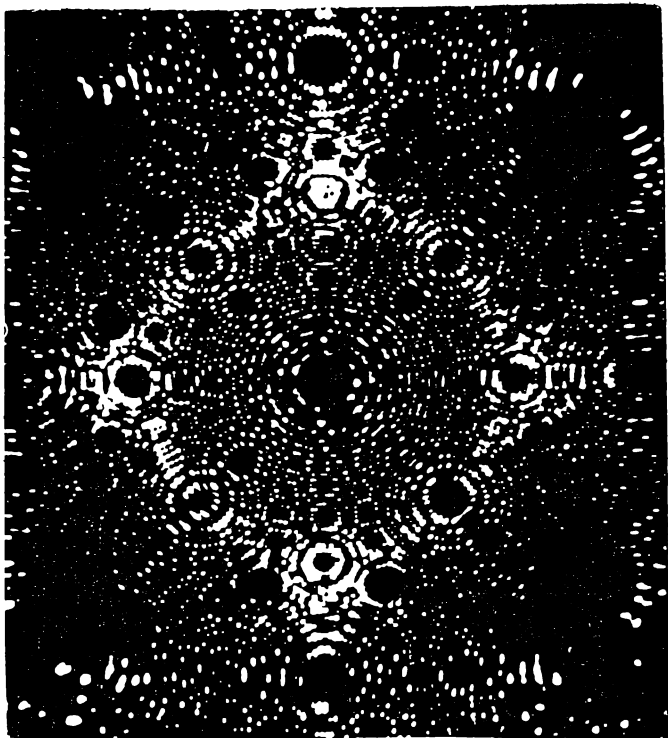


Рис. 22. Изображение платинового острия в ионном проекторе

ны острия около $1 \cdot 10^{-7}$ м было достигнуто разрешение атомных цепочек, имеющих период всего лишь $2,7 \cdot 10^{-10}$ м.

Изображение острия, изготовленного из монокристалла платины, в ионном проекторе показано на рис. 22. Как можно истолковать такое необычное изображение? Что это за регулярные и удивительно симметричные цепочки из ярких точек? Отдельные атомы? Ответ несколько неопределенен: и да, и нет. Вспомним, что про-

исходит возле поверхности острия. Оно представляет собой атомно-гладкую поверхность, состоящую из ровных площадок, окруженных с разных сторон ступеньками, т. е. при детальном рассмотрении оно имеет отнюдь не плавную форму. Испаряющее поле сгладило все лишние, искусственные выступы, но выступы атомных размеров обязательно останутся. Они-то и обуславливают появление изображения, именно над ними поле имеет максимальную напряженность и наиболее эффективно ионизует атомы изображающего газа. Напротив, ровные площадки отвечают минимальной напряженности поля, здесь ионы возникают в наименьшем числе.

Образовавшиеся ионы оттягиваются полем в колбе проектора к экрану, и возникающие на нем светлые пятна тем ярче, чем большим числом ионов они созданы, поэтому ровным площадкам — выступившим наружу «микрограням» кристалла — должны отвечать темные участки изображения, а ступенькам на их краях — цепочки светлых пятен, каждое из которых «обозначает» один, два, а, может быть, и несколько атомов. На размер и яркость пятен влияет много факторов, поэтому определить, какому числу атомов и даже, что нередко требуется для сложных веществ, какому сорту (принадлежности определенному химическому элементу) атомов оно отвечает, довольно трудно. Но если исходить из данных рентгеноструктурного анализа и соображений о разрешении проектора, то часто можно утверждать, что отдельные светлые пятна на экране ионного проектора действительно отвечают отдельным атомам, и уж во всяком случае симметрия всего изображения отражает симметрию кристаллической решетки образца.

Отдельные атомы можно в самом деле наблюдать и даже устанавливать их химическую природу с помощью особой приставки к ионному проектору, называемой *атомным зондом*. Для этого выбранный для наблюдения атом на образце, перемещая образец, выводят в центр небольшого отверстия в экране, подают на образец импульс высокого напряжения и срывают атом с его места на острие. Пролетев по прямой сквозь отверстие в экране, атом попадает в масс-спектрометр, а затем в электронный умножитель, где создает импульс тока. Зная время, прошедшее между подачей

импульса высокого напряжения на образец и приходом сорванного атома в детектор, напряжение и пройденное атомом расстояние, можно определить отношение его массы к заряду. Это отношение и представляет собой характеристику сорта иона.

Современный ионный проектор, как уже сказано, работает при напряженности электрического поля около 50 ТВ/м. Столь колоссальную напряженность в состоянии выдерживать в течение времени наблюдения только тугоплавкие металлы, например вольфрам или молибден, и то при глубоком их охлаждении. Дело в том, что в таком поле от поверхности острия отрываются даже гладкие атомные слои, причем испарение идет со скоростью порядка одного слоя в секунду. Испарение или перемещение атомов по поверхности острия может вызываться не только действием поля, но и бомбардировкой острия самими ионами изображающего газа. Бомбардировка, естественно, вызывает повреждение поверхности острия, появление на ней разнообразных дефектов. Но этот недостаток может обернуться и крупным достоинством. Изучение дефектов кристаллической структуры, определяющих важнейшие механические и электрические свойства кристаллов, стало сегодня крупной отраслью физики твердого тела. Проявляются эти дефекты (например, дислокации или *вакансии* — пустые узлы в решетке, где ранее находились выбитые атомы) обычно как светлые точки в «нормально» темных местах. Иногда таких пятен много, они группируются в скопления и хорошо заметны. В других случаях пятна, отвечающие единичным удаленным или смещенным из нормальных положений атомам, очень трудно обнаружить на фоне тысяч пятен от правильно расположенных атомов. Тогда чрезвычайно помогает техника наложения цветных негативов с изображений в проекторе. Например, делают два фотоснимка с экрана проектора до и после какого-либо воздействия на острие. Затем один негатив освещают, скажем, красным, а другой — зеленым светом и оба изображения (конечно, при точном совмещении положений неповрежденных участков) переносят на цветную фотопластинку. На комбинированном изображении легко заметить любые изменения, которые произошли на поверхности кристалла.

Микроанализаторы

А теперь обратимся к более близкому родственнику, можно сказать, — потомку электронного микроскопа: *рентгеновскому микроанализатору*. В большом числе задач материаловедения важно знать не только структуру объектов, но и их химический состав, причем не столько образцов в целом, сколько отдельных их участков. Располагая такими сведениями, можно проследить за распределением тех или иных химических элементов по образцу.

Естественно, наибольший интерес представляет закономерное распределение химических элементов, вызванное как естественными, так и искусственными факторами, например введением в металл легирующей примеси. Мысль о том, что такой анализ можно проводить в электронном микроскопе, возникла в конце 40-х годов у французского кристаллофизика Гинье и независимо от него у советского физика И. Б. Боровского. Соображения были очень просты. Уже более сотни лет для химического анализа веществ служат спектры. Спектр каждого химического элемента неповторим и является как бы визитной карточкой элемента. Присутствие определенных спектральных линий в общем спектре образца говорит о его качественном химическом составе, а яркость спектральных линий позволяет в известной мере судить о количественном содержании химических элементов в образце.

Для получения первых спектров излучение от образцов разлагали с помощью призм, а затем выяснилось, что сложные, состоящие из многих отдельных монохроматических линий, излучения еще более эффективно можно разлагать в спектры с помощью дифракционных решеток. В разделе, посвященном теории Аббе, было показано, что угол отклонения дифрагированных пучков зависит от длины волны [см. формулу (6)]. Пучки излучений с разными длинами волн разойдутся в пространстве и каждый даст свое изображение. Если дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных щелей, то каждое такое изображение будет иметь вид цветной полоски, которая и называется спектральной линией.

Вскоре после открытия дифракции рентгеновского излучения отцу и сыну Брэггам пришла в голову мысль: если кристалличес-

кая структура действует на проходящее через нее излучение как дифракционная решетка, то почему бы не использовать ее для разложения рентгеновского излучения в спектр? Идея оказалась правильной, и в последующие годы рентгеновская спектроскопия получила широкое развитие. Рентгеновские спектры обладают рядом преимуществ перед оптическими. Они намного менее сложны, т. е. состоят из меньшего числа линий, и положение линий в них, как правило, гораздо слабее зависит от «химического окружения» излучающих атомов, т. е. от вида соединений, в которые входит атом. Положение линий в спектре подчиняется более простым закономерностям, в частности, оно почти точно пропорционально заряду ядра атома, что существенно упрощает отождествление линий и тем самым — химический анализ. Далее, для того чтобы получить оптические спектры непрозрачных веществ, эти вещества нужно разогревать до высокой температуры (целиком или в отдельных анализируемых участках), что, конечно, повреждает образцы. Рентгеновский же спектр испускания возбуждается сравнительно «холодной» бомбардировкой электронами (естественно, для этого необходимо, чтобы плотность тока была невелика и тепло отводилось от образца). В обычных рентгеновских трубках пучок электронов, падающий на анод, в который вмонтирован изучаемый образец, довольно широк, так что спектр возбуждается сразу во всем образце. Гинье и предложил вместо рентгеновской трубки использовать электронный микроскоп, чтобы пучок электронов возбуждал рентгеновское излучение только на тех участках, изображение которых создает тот же пучок. В результате пучок электронов становится как бы химическим «микронзондом».

Изучать распределение химического элемента в различных участках образца можно, перемещая образец под пучком. Пространственное разрешение при анализе по спектрам в общем случае намного хуже, чем при структурном анализе. Если, скажем, вторичные электроны выходят из области, размер которой в основном определяется диаметром электронного пучка, то при рентгеноспектральном анализе размер излучающей области зависит главным образом от энергии электронов. Чтобы характерные линии рентгеновского спектра имели достаточную интенсивность (а имен-

но она определяет чувствительность анализа), энергия электронов, возбуждающих спектр, должна быть в несколько раз больше энергии связи соответствующих электронов в атомах изучаемых химических элементов. Последняя обычно имеет порядок десятка килоэлектронвольт, и соответственно напряжение, приложенное к электронному пучку, должно составлять 30—40 кВ. При таких напряжениях область образца, испускающая характеристический рентгеновский спектр, имеет диаметр (и глубину) порядка 10^{-6} м.

Разрешение рентгеновского микроанализатора можно улучшить, уменьшая энергию пучка электронов так, чтобы она лишь незначительно превышала энергию возбуждения рентгеновского спектра анализируемого химического элемента, или же используя чрезвычайно тонкие образцы. Тогда излучение будет выходить из совсем маленькой области, размеры которой определяются только диаметром электронного пучка в том месте, где располагается образец. Но при этом, естественно, в значительной мере потеряется крупное преимущество метода — его огромная чувствительность. В современных приборах она чрезвычайно велика: в благоприятных случаях рентгеноспектральный микроанализ позволяет обнаруживать содержание химического элемента в миллионные доли процента!

Чувствительность рентгеноспектрального анализа уменьшается и при переходе к более легким атомам. Это связано уже с самой природой возбуждения рентгеновских спектров. Как известно, характеристический рентгеновский спектр возникает в результате того, что из внутренней электронной оболочки атома выбивается электрон, атом ионизуется. Освободившееся место занимает другой электрон с большей энергией, освобожденное им место — следующий электрон и т. д., в результате чего возникает спектр, состоящий из ряда линий, «высвеченных» электронами при смене ими положений в атоме. Однако в легких атомах, имеющих малый заряд ядра, с этим процессом успешно конкурирует другой. На первой стадии все происходит так, как при возникновении рентгеновского фотона: из ближайшей к ядру электронной оболочки выбивается электрон, а его место занимает электрон из соседней оболочки, но фотон не появляется. Энергия, выделившаяся при заполнении пустовавшего места в оболочке, перераспределяет-

ся в атоме и концентрируется на другом электроны, что приводит к его вылету из атома. Это явление называют *безызлучательным переходом*, или *эффектом Оже*, в честь открывшего его французского ученого, а вылетевший электрон — *оже-электроном*.

Оже-электроны обычно имеют малую энергию по сравнению с энергией электронов возбуждающего пучка и в этом отношении сходны со вторичными электронами, но отличаются от них тем, что их энергия характерна для атома данного сорта. Настроивая прибор на регистрацию электронов с этой характерной энергией и модулируя током таких электронов развертку на экране, синхронизированную с разверткой возбуждающего пучка, как в растровом микроскопе, можно получать картину распределения того или иного химического элемента на наблюдаемом участке образца. Совмещение этой картины с изображением того же участка, снятым, например, с помощью вторичных электронов, позволяет связать распределение химических элементов с теми или иными деталями структуры образца, что часто имеет очень важное значение.

Настройка такого *оже-анализатора* осуществляется встроенным в него анализатором электронов по энергиям. В сущности, по тому же физическому принципу работает и анализатор ионов по массам (точнее, по отношениям массы к заряду), о котором мы говорили выше. Этот общий принцип основан на том, что траектории движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях зависят от их энергии, а при заданной энергии — от отношения массы к заряду частиц. Детально вникать в конструкцию анализаторов здесь нет возможности. Укажем лишь, что анализаторы масс широко применяют в *ионных микроскопах-микроанализаторах*. Устройство ионного микроскопа не отличается от его электронных аналогов, но он имеет худшее разрешение. Зато ионный микроскоп может «самоочищать» анализируемую поверхность, распыляя верхний, загрязненный ее слой ионной бомбардировкой, может вести анализ не только «вширь», но и «вглубь» от поверхности, последовательно удаляя с нее атомные слои. Анализ проводят по вторичным ионам, выбитым первичными и характеризующим не только химический, но и изотопный состав вещества, что практически неосуществимо при анализе с помощью рентгеновского излучения и электронов.

В последние годы наметилось стремление к объединению всех перечисленных устройств в единый агрегат, что позволяет проводить в комплексе подготовку образцов, анализ их структуры и состава. В такие установки встраивают специальные приспособления для нагрева и глубокого охлаждения образцов, перемещения и поворота их под пучками частиц, очистки и постоянного обновления поверхности образцов в самом приборе без нарушения вакуума, анализа одной и той же площадки с помощью разных частиц и излучений. По существу, в каждой подобной установке размещена целая физико-химическая лаборатория!

Результаты комплексного анализа материалов трудно переоценить, если учесть, что в основе многих замечательных успехов электроники, вычислительной, реакторной, авиационной и космической техники лежит применение новых материалов, создание которых стало в значительной степени возможным лишь благодаря детальнейшему изучению их структуры и состава на атомном уровне.

Нейтроннография

Рассказывая о рентгеноструктурном анализе, мы отмечали, что рассеивающая способность атомов для рентгеновских фотонов сильно зависит от числа электронов в атоме, и поэтому фотоны плохо «чувствуют» атомы водорода, равно как и легкие атомы среди тяжелых. Создаваемый фотонами фазовый контраст также мал, когда различные атомы в решетке обладают близкой рассеивающей способностью (например, атомы соседних элементов в периодической системе). От этих недостатков свободен метод анализа структуры с помощью нейтронов — *нейтроннография*.

Основным «поставщиком» нейтронов для структурных исследований служат ядерные реакторы на тепловых нейтронах. Быстрые нейтроны, образующиеся в актах деления тяжелых атомных ядер, замедляются до тепловой энергии. При этом каждая частица имеет энергию kT , где $k=1,3 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Определяя отсюда скорость и импульс нейтронов, по формуле (23) находим длину волны нейтронов $\lambda = h/\sqrt{2mkT}$, где $m \approx 1,6 \cdot 10^{-27}$ кг — масса нейтрона. При $T=300$ К (27°C) $\lambda \approx 7 \cdot 10^{-11}$ м, т. е. порядка атомных масш-

табов. Благодаря этому становится возможной отчетливая дифракция нейтронов на кристаллических решетках.

В отличие от электронов и рентгеновских фотонов нейтроны рассеиваются только на атомных ядрах (об одном важном исключении будет сказано дальше). Интенсивность рассеяния меняется не в зависимости от заряда ядра, а в соответствии с совершенно другими закономерностями, которые определяются не электрическими, а ядерными силами, действующими между нейтронами и частицами в составе ядер.

Эффективное сечение упругого рассеяния тепловых нейтронов ядром атома водорода не намного отличается от такового для ядра атома свинца, в котором, не считая нейтронов, содержится 82 протона. Подчас интенсивность рассеяния нейтронов изотопами одного элемента может различаться сильнее, чем для ядер далеких друг от друга в периодической системе элементов. Разумеется, для структурных исследований это обстоятельство весьма благоприятно. Оно позволяет не рассматривать такой «неоднородный» рассеиватель, как электронная оболочка атома, и при анализе не учитывать атомный фактор рассеяния, ограничиваясь практически только структурным фактором.

Нейтроны из реактора выпускают через специальные каналы в его защите. Эти нейтроны имеют, конечно, разные скорости. Нужный для структурного анализа монохроматический пучок получают, устанавливая на пути частиц кристалл-монокроматор в положении брэгговского отражения для выбранной длины волны (22). Кристалл, разумеется, пропускает нейтроны не только с длиной волны λ , но и с набором длин волн, отвечающих разным целым значениям k в формуле (22). Ширина полосы длин волн, вырезаемой монокроматором, определяется узостью пика брэгговского отражения.

В результате происходит наложение дифракционных картин, создаваемых нейтронами с длинами волн λ , $\lambda/2$, $\lambda/3$ и т. д. Но, как показывает опыт, таким наложением можно пренебречь, поскольку интенсивность очень быстро уменьшается с ростом k . Например, интенсивность пучка нейтронов с длиной волны $\lambda/2$ обычно составляет лишь около 1% интенсивности пучка с длиной волны λ .

Нейтронографические исследования проводятся уже почти тридцать лет. Они дали чрезвычайно богатую информацию о строении кристаллов. В первую очередь это относится к кристаллам, в состав которых входят легкие атомы, например атомы водорода. Так, изучая кристаллы льда, ученые определили положения атомов водорода в элементарных ячейках, а поскольку положения атомов кислорода уже были известны из рентгеноструктурного анализа, удалось полностью расшифровать структуру воды.

Нейтроны, несмотря на то что они электрически не заряжены, имеют отличный от нуля магнитный момент. Это свойство позволяет использовать их для изучения магнитных структур. В предыдущей главе говорилось, что для анализа магнитных доменов можно применять электроны. Но магнитные взаимодействия электронов намного слабее электрических и подчас совершенно маскируются ими. Магнитные взаимодействия нейтронов с электронными оболочками атомов тоже проявляются не в чистом виде, а на фоне взаимодействия нейтронов с ядрами, но здесь появляется возможность разделить эффекты обоих взаимодействий.

Если магнитные моменты атомов в веществе ориентированы совершенно хаотически (а это имеет место в парамагнетиках), то, естественно, магнитное рассеяние нейтронов будет полностью некогерентным и на нейтронограммах не появится никаких рефлексов. Однако существует много веществ, в которых магнитные моменты атомов (или ионов) в кристаллической решетке имеют упорядоченное расположение. Такое расположение называют магнитной структурой, и в соответствии с ней магнитные вещества делятся на три класса — широко известные ферромагнетики и менее известные ферримангнетики и антиферромагнетики. К ферримангнетикам, в частности, относятся соединения окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов, обладающие одновременно свойствами полупроводников и получившие большое распространение в современной электронной технике.

В ферримангнетике магнитные моменты соседних атомов в кристаллической решетке имеют противоположные направления, и это можно рассматривать так, словно вся решетка разбилась на две подрешетки. Магнитная нейтронография впервые позволила

обнаружить эти подрешетки непосредственно и определить, какой вид имеют их элементарные ячейки. В антиферромагнетиках такая противоположная ориентация магнитных моментов соседних атомов устанавливается самопроизвольно, в отсутствие внешнего магнитного поля. Магнитная элементарная ячейка в них, как правило, больше обычной «химической» ячейки, и это приводит к появлению на нейтронограмме дополнительных, «магнитных», рефлексов по сравнению с рефлексами на рентгенограмме.

Отделить дифракционные максимумы, вызванные когерентным магнитным рассеянием нейтронов, от тех, что обусловлены когерентным ядерным рассеянием, можно несколькими способами. Один из них — сравнение нейтронограммы с рентгенограммой. Поскольку ядра находятся «там же», где и электронные оболочки атомов, на обоих дифракционных изображениях рефлексы немагнитного происхождения должны совпадать, и те рефлексы, которые остаются после «вычитания» одного изображения из другого, имеют явно магнитное происхождение.

Другой способ состоит в съемке нейтронограмм при двух температурах — выше и ниже температуры, при которой исчезает магнитная упорядоченность. При более высокой из этих температур магнитные рефлексы пропадают, тогда как ядерные рефлексы сохраняются; можно добавить, что обычно магнитная упорядоченность исчезает задолго до плавления кристалла.

Еще один способ, применимый к ферромагнетикам, заключается в том, чтобы сильно намагнитить их вдоль направления рассеяния нейтронов или в противоположном направлении. При этом все домены выстроятся «в затылок» друг другу и в сумме не вызовут отклонения нейтронного пучка, так что магнитное рассеяние исчезнет. На нейтронограмме тогда останутся только дифракционные рефлексы от ядерного рассеяния.

В заключение ответим на вопрос, можно ли построить нейтронный микроскоп. Проекционный нейтронный микроскоп вполне возможен и, более того, давно существует. Действие его основано на разном поглощении нейтронов ядрами различных химических элементов. Захватывая нейтроны, ядра становятся радиоактивными и их излучение можно регистрировать фотопластинкой. Взяв маленький источник нейтронов и тонкий образец с плотно

прижатой к нему фотопластинкой, можно получить хорошие увеличение и разрешение, близкие к тем, что достигаются с проекционным рентгеновским микроскопом. Нейтронный микроскоп служит, однако, не для определения структуры образцов, а для установления распределения в них химических элементов, сильно поглощающих нейтроны.

Фокусирующий нейтронный микроскоп создать намного сложнее, и в сущности по тем же причинам, которые мы называли, описывая рентгеновский микроскоп. «Холодные» нейтроны, длина волны которых заметно больше межатомных расстояний в веществе, могут преломляться на ядрах наподобие того, как рентгеновские фотоны преломляются на атомах. Показатель преломления определяется плотностью вещества и сечением когерентного рассеяния нейтронов на ядрах. Он чрезвычайно мало отличается от 1, как в случае рентгеновских фотонов. Так, даже для «ультрахолодных» нейтронов с температурой, всего лишь на десяток градусов большей абсолютного нуля, это отличие меньше одной тысячной!

Поэтому о сколько-нибудь сильных линзах для нейтронов говорить не приходится. Остаются лишь зеркала, основанные, во-первых, на брэгговском отражении от изогнутых кристаллов, что эквивалентно фокусирующему вогнутому зеркалу в оптике; во-вторых, на явлении полного внешнего отражения нейтронов, сходном с тем, что используют в фокусирующих рентгеновских микроскопах; в-третьих, на магнитном отражении нейтронов (такие зеркала изготавливают из сильно намагниченных тонких слоев ферромагнитных веществ). Но и зеркала не позволяют полностью решить проблему: попытка построить зеркальный нейтронный микроскоп встретила бы, в сущности, те же принципиальные трудности, что и постройка рентгеновского микроскопа.

Трудно предсказать дальнейшее развитие описанных приборов или появление приборов, основанных на других принципах действия. Но можно ожидать, что уже имеющиеся приборы для изучения объектов атомного масштаба будут и далее совершенствоваться. Множество открытий сделано с помощью этих приборов. Но, вероятно, не менее впечатляющие открытия в мире таких масштабов ожидают нас уже в недалеком будущем.



К пределам невидимого

Измерения в микромире

В 1911 г., изучая рассеяние незадолго до того открытых альфа-частиц атомами тяжелых элементов, английский физик Резерфорд обнаружил атомное ядро. С этого времени начался новый этап путешествия в мир невидимого, который продолжается и по сей день.

Коротко говоря, Резерфорд и его коллеги обнаружили, что при бомбардировке тонкой золотой фольги некоторые из альфа-частиц отражались, т. е. рассеивались под углом более 90° . В свете существовавших в то время представлений о строении атома понять это было невозможно. Согласно модели Дж. Томсона, атом выглядел как кусочек положительно заряженного «пудинга», в который были вкраплены «изюминки» — отрицательно заряженные электроны, нейтрализующие положительный заряд. Такая однородная смесь не могла столь сильно воздействовать на очень быстрые массивные альфа-частицы, чтобы они заворачивали назад. Возможно, Резерфорд знал уже опубликованные к тому времени работы, в которых чисто умозрительно предполагалось, что атом может быть похож на солнечную систему, где электроны-планеты вращаются вокруг ядра-Солнца. Но, скорее всего, он пришел к этой мысли самостоятельно, ибо только такое представление могло объяснить неожиданное явление. Отражать альфа-частицы могло только некое чрезвычайно компактное образование, в котором сосредоточен весь положительный заряд и, более того, почти вся масса атома.

Планетарная модель атома помогла разрешить трудности с обратным рассеянием альфа-частиц, но возник вопрос об устойчивости такой модели. В то время уже было известно, что уско-

ренные электрические заряды, а именно так движутся атомные электроны вокруг ядра, непрерывно испускают электромагнитные волны. Но, излучая, они должны расходовать энергию своего движения и в конце концов падать на ядро.

Планетарная модель атома была «спасена» два года спустя датским физиком Бором, который просто «запретил» электронам излучать при движении по орбитам, хотя обосновать этот запрет строго не смог. Обоснование появилось только после того, как де Бройль высказал идею о волнах материи. Оказалось, что в атоме возможны только те орбиты электронов, на которых укладывается целое число длин дебройлевских электронных волн. Иными словами, каждая такая орбита — это стоячая волна, из которой, как известно, энергия не уходит. Но при этом пришлось пожертвовать представлением о самой электронной орбите в атоме. Место ее, в соответствии с новым пониманием электронной волны, заняло «облако вероятностей».

Электронная волна, как и любая волна, характеризуется амплитудой, частотой (или длиной) и фазой. Квадрат амплитуды, как обычно, является мерой интенсивности волны в различных точках пространства. Для электромагнитной волны интенсивность — это число фотонов в какой-либо точке поля. Аналогично и интенсивность электронной волны можно рассматривать как число электронов в данном месте. Принципиально новый взгляд на вещи состоял в следующем: стали считать, что это число может быть не только целым, но и дробным. Если суммарную интенсивность принять за единицу (например, интересуясь одним-единственным электроном, как, скажем, в атоме водорода), то интенсивность электронной волны в различных точках атомного пространства, естественно, будет меньше единицы.

Распределение этой интенсивности в пространстве и есть облако вероятностей: в каждой точке вероятность встретить электрон меньше единицы, но во всем облаке она, конечно, равна единице, т. е. событие достоверно. В атоме облако сильно сгущается вокруг некоторых линий — «бывших» орбит. В промежутке между ними облако вероятностей в значительной мере «прозрачно», т. е. вероятность найти там электрон очень мала. Мы говорим: «встретить электрон». А как его можно обнаружить? Общий способ

известен, этому посвящена большая часть нашей книги. Электрон надо осветить, т. е. бросить на него пучок фотонов, тогда рассеянное им излучение даст сведения о его местоположении. Но как понимать это очевидное утверждение, когда с электроном неразрывно связана электронная волна? Ведь бессмысленно ставить вопрос, в каком месте своей волны находится электрон. Все, о чем можно говорить, это — сколь плотны и где находятся сгущения и разрежения электронного облака вероятностей. В самом деле, зачем знать точное положение электрона в атоме? Электрон в атоме находится в непрерывном движении. Интерес могут представлять лишь «орбиты», по которым он движется, т. е. сгущения облака вероятностей. Если каким-либо «структурным» методом установить, как распределены сгущения и разрежения облака в атомном пространстве, то будет получена вся нужная информация.

В ряде задач и этого не нужно знать: достаточно лишь сведений о тех энергиях, которые соответствуют движениям электрона. Из самого существования сгущений и разрежений явствует, что в атомном пространстве есть предпочтительные области пребывания электрона. Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром и кинетическая энергия его движения вокруг ядра зависят от того, как расположены такие области в окрестности атомного ядра. Отсюда вытекает важнейшее заключение, что эти энергии могут иметь не любые, а лишь определенные значения. Сумма их, называемая полной энергией электрона, имеет вполне определенные значения (энергетические уровни) для каждого вида атома.

В этом и состоит тот новый смысл, который вложила квантовая механика в понятие структуры объектов на атомном уровне. Однако сразу же встает вопрос: с какой детальностью можно установить распределение облака вероятностей?

В 1927 г. немецкий физик Гейзенберг высказал утверждение, которое можно записать в виде так называемого соотношения неопределенностей:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h. \quad (25)$$

Оно означает, что при одновременном определении координаты x и проекции импульса p_x электрона на данное направление неопределенности Δx и Δp_x таковы, что их произведение ни при каких

обстоятельствах не может быть меньше, чем h — постоянная Планка. (Более точное выражение вместо h включает $h/2\pi$, но для нас сейчас числовой множитель несуществен.) Формула (25) написана для одномерного движения, поэтому здесь фигурирует не полный импульс, а его проекция на данное направление.

Как это понимать? А так, что одновременно измерить с абсолютной точностью положение и импульс электрона, т. е. в конечном счете установить его траекторию, невозможно. Причем сказанное относится не только к электрону, но и вообще к любой частице. Утверждение, что любые неопределенности измерения имеют не принципиальный, а так сказать, технический характер и связаны лишь с неучитываемыми факторами, вмешивающимися в измерения (которые в принципе по мере развития техники измерений можно уловить и учесть), неправильно.

Впрочем, читатель отчасти уже подготовлен к этой неожиданности. Рассмотрим, например, частицу, которую освещают фотонами с длиной волны λ или электронами и другими частицами с такой же длиной волны, и допустим, что мы хотим узнать ее положение с предельно малой неопределенностью Δx . Это, очевидно, возможно [см. формулу (25)], когда частице передан предельно большой импульс Δp_x , равный импульсу p освещающей частицы. Вместе с тем согласно формуле (23) для освещающих частиц любого сорта $p = h/\lambda$. Подставив это выражение в (25), получим удивительно знакомое соотношение

$$\Delta x_{\min} p = \Delta x_{\min} h/\lambda \geq h, \text{ т. е. } \Delta x_{\min} \geq \lambda. \quad (26)$$

Другими словами, неопределенность измерения, или минимальное разрешимое расстояние (неважно, какой оно имеет смысл — размера частицы или детали ее структуры, ее положения и т. п.) должно быть не меньше примерно длины волны освещения. Мы вновь убеждаемся в универсальности предела разрешения, который ставится дифракцией! Почему же в таком случае появление соотношения (25) вызвало бурную дискуссию? Да, в сущности, потому, что до той поры измерения в основном касались довольно массивных объектов, для которых даже полный переданный падающими фотонами импульс очень мал по сравнению с их собственным импульсом.

Рассмотрим простой пример. Допустим, что мы определяем положение пылинки под микроскопом и освещаем ее видимым светом с длиной волны $5 \cdot 10^{-7}$ м, так что импульс фотонов $p_{\text{ф}} \approx 6 \cdot 10^{-34} / 5 \cdot 10^{-7} \sim 10^{-27}$ кг·м/с. Сама пылинка имеет размер, скажем, 10^{-6} м, массу $3,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^3 \sim 10^{-15}$ кг и совершает тепловое движение с энергией $E = kT$, так что ее импульс $p_{\text{п}} = \sqrt{2mkT} \approx \sqrt{2 \cdot 10^{-15} \cdot 1,3 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2} \approx 3 \cdot 10^{-18}$ кг·м/с. Легко видеть, что $p_{\text{п}}$ в миллиарды раз больше, чем $p_{\text{ф}}$, т. е. практически никакой неопределенности фотоны в импульс пылинки не вносят.

А вот другой пример. Предположим, что мы измеряем распределение облака вероятностей электрона в атоме. Поскольку размеры атома имеют порядок 10^{-10} м, его надо освещать рентгеновскими фотонами с длиной волны также порядка 10^{-10} м, так что импульс фотона составляет $6 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с. Электрон в легком атоме имеет энергию порядка десятка электронвольт и импульс, как легко подсчитать, около $2 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с. Уже совсем иное соотношение импульсов! Теперь фотон, даже не полностью «израсходовав» свой импульс, может передать электрону такое количество движения, что тот вообще покинет атом. Действительно, хорошо известно, что рентгеновское излучение ионизует атомы вещества, через которое оно проходит. Кроме того, сталкиваясь с электронами, рентгеновские фотоны могут передавать им любую часть своего импульса.

Что же получается? При рассмотрении массивных объектов наблюдатель не оказывает практически никакого влияния на объект, а при изучении таких легких объектов, как, например, электроны, он очень энергично вмешивается в их движение, причем даже не контролируемым образом? Да, это действительно так. Но сказанное не дает повода для уныния.

Уже говорилось, что знание точного положения микроскопических объектов, в сущности, не несет полезной информации о микромире. Важно знать их движение, но само это движение имеет вероятностный характер. Поэтому, например, можно говорить лишь о том, сколько времени (в относительных единицах) электрон в среднем проводит в данном сгущении облака вероятностей для конкретного атома или в каком числе атомов (опять же относительно) электрон находится на энергетическом уровне, отвечающем рассматриваемому движению. Предсказания квантовой меха-

ники, таким образом, всегда вероятностны. Взаимодействие электронов с фотонами добавляет к этим предсказаниям еще одну вероятность, связанную с передаваемым электронам импульсом.

Важно, что эти вероятности физики умеют довольно точно рассчитывать. И тогда, изучая рассеяние частиц или фотонов объектами атомных размеров, ученые получают исходный материал для определения структуры рассеивающих объектов. Здесь нет ничего принципиально нового по сравнению с тем, о чем уже говорилось в предыдущей главе. Но важно подчеркнуть вот что: хотя метод рассеяния не претерпевает радикальных изменений при переходе в мир атомных ядер и фундаментальных частиц, принципиально изменяется истолкование получаемых результатов. В первую очередь, сказанное относится к самому понятию структуры частиц. Этот вопрос будет рассмотрен ниже, а сейчас обратимся к тем «микроскопам», с помощью которых исследуют глубоко скрытый мир.

Электростатические ускорители частиц

Автор не случайно использовал слово «микроскоп» и взял его в кавычки. Будучи микроскопами по своему назначению, эти установки вместе с тем формируют изображение наблюдаемых объектов совсем иными методами, да и сами изображения не похожи на те, о которых говорилось ранее. Первое такое изображение увидел Резерфорд, обстреливая альфа-частицами золотую фольгу. Подавляющее большинство альфа-частиц, конечно, проходило сквозь фольгу, и появление отраженных частиц было очень неожиданным, как если бы, по словам самого Резерфорда, увидеть летящий назад снаряд, ударивший в папиросную бумагу. Но подсчитаем длину волны альфа-частиц, которыми пользовался Резерфорд. Они испускались препаратом радия и имели наибольшую энергию около 5 МэВ; пересчитав эту энергию в длину волны по формуле (23), получим $\lambda_\alpha \approx 6,6 \cdot 10^{-15}$ м. Радиус атомного ядра можно определить по приближенной формуле $R_\pi \approx 1,2 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$ м, где A — число частиц в ядре (массовое число). Для ядра золота с $A \approx 200$ получается $R_\pi \approx 7 \cdot 10^{-15}$ м. Видно, что значения R_π практически совпадают. Собственно, этим все сказано: разрешение, полученное с использованием альфа-частиц, которые испускаются

природным радиоактивным нуклидом*, оказалось таким, что позволило обнаружить важнейшую «деталь» строения атома — его ядро.

Спустя еще примерно десять лет Резерфорд открыл первую ядерную реакцию — превращение ядра одного химического элемента в ядро другого (азота в кислород) под действием бомбардировки альфа-частицами. Это открытие явилось главной побудительной причиной разработки ускорителей частиц. Физиками двигало желание освободиться от «принудительного ассортимента» источников ионизирующих излучений, который им навязывала природа. Такими источниками в те годы были радиоактивные нуклиды естественного происхождения; интенсивность их излучения невелика, излучение имеет энергию, заключенную в довольно узких пределах. А главное, сами альфа-частицы были составными частицами (ядрами гелия, состоящими из двух протонов и двух нейтронов), тогда как изучать ядерные реакции, конечно, легче и проще, бомбардируя ядра протонами. Протон одновременно — простейшая частица и имеет минимальный электрический заряд, т. е. менее других отталкивается ядрами.

Первый ускоритель протонов (вполне пригодный, впрочем, и для ускорения других заряженных частиц) был построен в 1931 г. голландским физиком ван де Граафом. В нем использовался принцип разгона заряженных частиц в сильном электрическом поле, которое создается так. Электрический заряд переносится на ленту со специальных острий, с которых он стекает при довольно низком напряжении. Лента подобно транспортеру переносит заряд на внутреннюю поверхность полой сферы, с которой он, как во всяком металлическом проводнике, переходит на внешнюю поверхность. Сфера выбрана потому, что с нее заряды стекают хуже, а значит, на нее можно перенести наибольший возможный заряд. Верхний предел заряда определяется только емкостью сферы и тем напряжением, при котором окружающая сферу среда еще не

* Нуклиды — это разновидности атомов, характеризующиеся определенным массовым числом и атомным номером. Нуклиды с одинаковым атомным номером, т. е. относящиеся к одному химическому элементу, называют изотопами данного элемента.

пробивается электрическим разрядом. В свою очередь, это напряжение пропорционально диаметру сферы.

Воздух при атмосферном давлении выдерживает напряженность электрического поля около 30 МВ/м, так что первый *генератор ван де Граафа* с диаметром сферы 1 м должен был давать напряжение 1,5 МВ. Но из-за различных неоднородностей и влияния окружающих предметов удалось дотянуть только до половины этого значения. Для того же чтобы получать напряжения 3—4 МВ, необходимые для изучения ядерных реакций на средних и тяжелых ядрах, при работе генератора в воздухе требовались сферы диаметром до 10 м, установленные на электроизолирующих колоннах на такой же высоте от пола и, естественно, на таком же расстоянии от потолка и стен помещения.

Сегодня нас не удивляют километровые ускорители, но физики с великой радостью уменьшили бы их. С генератором ван де Граафа это оказалось сравнительно несложно. Поместив высоковольтную сферу в сильно сжатый газ и устранив другие возможные источники утечки заряда, удалось довести напряжение до 4 МВ при диаметре сферы около 2 м (а сегодня его доводят до 10 МВ). Преимуществами такого генератора являются сравнительная простота его обслуживания, хорошее постоянство напряжения (значит, и энергии ускоряемых частиц) и тока частиц, а также возможность плавно менять напряжение. Благодаря этому «предок» современных ускорителей сейчас часто используется наравне со своими куда более могущественными «потомками», но, конечно, для других, не столь масштабных задач.

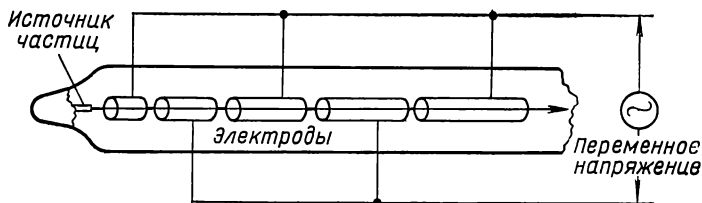
Год спустя после ван де Граафа напряжение 700 кВ получили на своем *каскадном генераторе* англичане Кокрофт и Уолтон. Принцип действия этого генератора прост и основан на том, что если собрать схему из повышающего трансформатора, выпрямителя и конденсатора, то при изменении переменного напряжения на трансформаторе от $-U$ до $+U$ потенциал на выпрямителе увеличится от 0 до $+2U$, а конденсатор будет «удерживать» этот потенциал при значении $2U$. Если к такой схеме присоединить вторую, подобную ей, то нулем потенциала для нее будет $2U$, и она в свою очередь повысит потенциал до $4U$, еще одна такая же схема — до $6U$ и т. д. Обычно генератор Кокрофта — Уолтона соби-

рают из нескольких описанных схем-каскадов (до 10), и каждый каскад рассчитывают для повышения напряжения на несколько сот киловольт, так что суммарное напряжение может достигать 3 МВ. Главная проблема, стоявшая перед создателями такого устройства, заключалась в разработке надежных высоковольтных выпрямителей. В последние годы в связи с развитием техники мощных полупроводниковых устройств ее удалось в значительной мере решить.

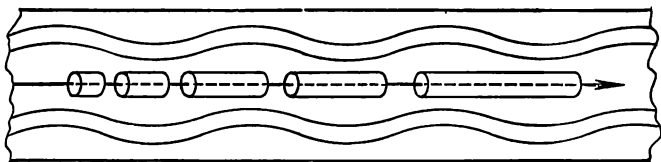
Оба генератора можно назвать ускорителями «однократного» действия: ускоряющее напряжение прикладывается к разгоняемым частицам только один раз. Следующий шаг состоял в том, чтобы использовать одно и то же высокое напряжение хотя бы два раза. Это достигается в так называемых *перезарядных генераторах*. В описанных генераторах разгоняют положительные ионы. Их получают обычно «обдиркой» электронных оболочек в атомах газа с помощью электрического разряда. Например, источник наполняют водородом, который в разряде сначала распадается на отдельные атомы, а затем ионизуется, и появившиеся протоны вытягивают специальным полем в ускорительную камеру. Источник ионов при этом находится под высоким потенциалом, а анод связан с корпусом камеры и заземлен. Но в источнике можно создать и отрицательные ионы. В конце ускоряющего промежутка на их пути устанавливают тонкую металлическую фольгу. Часть «продирающихся» сквозь нее ионов теряет по два электрона, превращаясь из отрицательных ионов в положительные. Последние продолжают ускоряться на пути от фольги к началу ускорительного промежутка. В результате одно и то же напряжение удастся использовать дважды.

Линейные ускорители частиц

Отсюда, казалось бы, естественно перейти к ускорителям «многократного» действия, в которых частицы разгоняются многократным приложением к ним даже невысокого поля. Однако исторически перезарядные генераторы появились недавно, тогда как идея многократного ускорения и ее реализация насчитывают



а



б

Рис. 23. Схемы устройства линейного ускорителя с ускорительными электродами (а) и с дрейфовыми трубками и высокочастотным полем (б)

уже полвека. Первым ее высказал в 1928 г. швейцарский физик Видероз.

Допустим, что частица находится в переменном электрическом поле. Тогда в среднем за период колебания она никуда не сместится и дополнительной энергии не приобретет: половину периода поле будет разгонять ее в одну сторону, а вторую половину — тормозить, разгоняя в противоположную сторону. Остроумная идея Видероз состояла в том, чтобы на вторую половину периода «укрыть» частицы от тормозящего действия поля. Известно, что поле не проникает в объем, ограниченный оболочкой из проводящего материала, поэтому Видероз изготовил электроды в своем ускорителе в виде полых металлических цилиндров. Частица разгоняется в течение полупериода, когда поле имеет благоприятное направление, затем «ныряет» в электрод (рис. 23, а), где движется по инерции, переживая неблагоприятный полупериод.

од, и «выпрыгивает» в следующий ускоряющий промежуток между электродами, когда поле снова приобретает благоприятное направление. Поскольку частота электрического поля постоянна, а частица постепенно наращивает скорость, каждую следующую трубку электрода приходится делать длиннее предыдущей, чтобы синхронизировать моменты изменения направления поля и выхода частицы из электрода в ускоряющий промежуток, т. е. обеспечить своеобразный резонанс между полем и движением частицы (поэтому ускоритель Видероэ также называют *линейным резонансным ускорителем*).

В последние годы поле в таких ускорителях стали создавать другим, более эффективным способом (рис. 23, б). Весь канал ускорителя рассматривают как единый резонатор и образуют в нем стоячую или бегущую электромагнитную волну с помощью специальных генераторов мощных (порядка киловатт) высокочастотных (100 МГц) колебаний. Полые электроды служат уже не для создания поля, а лишь для укрытия частиц при прохождении ими тормозящих областей поля и поэтому называются дрейфовыми трубками (поскольку частицы в них «дрейфуют», т. е. движутся по инерции). Легко сообразить, что длина дрейфовых трубок в направлении движения частиц должна изменяться по закону $\lambda\beta$, где λ — длина волны ускоряющего поля; $\beta = v/c$ — отношение скорости частицы к скорости света. Обычно выбирают частоту генератора высокочастотного поля 150—300 МГц, что дает $\lambda = 1 \div 2$ м и позволяет получать удобные размеры трубок дрейфа на всем протяжении ускорителя.

В отличие от электростатических ускорителей, в которых пучок частиц разгоняется целиком, в резонансном ускорителе он, естественно, разбивается на сгустки частиц, которые своевременно попадают в ускоряющие промежутки и вовремя исчезают в укрытиях. Даже в сгустке частицы вначале находятся не в одинаковых условиях: одни попадают к началу цикла ускорения, другие — к середине, третьи — к его концу. В точной фазе с полем находится лишь некоторая «средняя» частица в сгустке. Но, оказывается, сгусток можно концентрировать, используя явление, называемое *автофазировкой*. Оно было открыто советским физиком В. И. Векслером и американским ученым Макмилланом в 40-х годах.

Допустим, что частица, находящаяся точно в фазе с полем (ее называют *синхронной*, или *равновесной*), попадает в середину ускорительного промежутка в тот момент, когда поле в нем увеличивается. Частицы, более быстрые, чем равновесная, придут в эту точку раньше, и действующее на них поле будет меньше. Более медленные частицы придут позже и испытают действие большего поля. Скорости частиц в сгустке начнут выравниваться, подтягиваться к скорости равновесной частицы. Но вследствие инерции частиц их скорость «проскочит» значение для равновесной частицы: отстававшие частицы уйдут вперед, опережавшие отстанут. Затем все повторится в обратном порядке. Другими словами, в сгустке будут происходить фазовые колебания, уменьшающиеся с ростом энергии частиц, т. е. с приближением их скорости к скорости света.

Чтобы увеличить число частиц в каждом сгустке, явление автофазировки используют намеренно. Непрерывный пучок частиц из источника сначала выпускают в *группирователь* — резонатор, работающий на частоте ускорителя. Фазу колебаний в нем подбирают так, чтобы равновесная частица пролетала группирователь в тот момент, когда поле в нем равно нулю. Естественно, при этом частицы, опережавшие равновесную или отстававшие от нее, попадут соответственно в замедляющее или ускоряющее поле. Затем частицы пролетают свободный промежуток, на котором их скорости заметно выравниваются, и образовавшийся компактный сгусток впускается в ускоритель.

Сейчас построены линейные ускорители электронов на энергии несколько миллиардов электронвольт и линейные ускорители протонов на энергии сотни миллионов электронвольт, в которых протоны подвергаются предварительному ускорению перед «впрыскиванием» в гигантские циклические ускорители. Самые крупные линейные ускорители электронов имеют длину ускорительной камеры несколько километров. Связано это с тем, что расход мощности на питание ускорителя снижается, если строить длинный ускоритель с невысокой напряженностью поля; прирост энергии частиц в таких машинах составляет несколько миллионов электронвольт на 1 м длины ускорителя.

Циклические ускорители частиц

На ином принципе основаны так называемые циклические ускорители частиц, первый из которых — *циклотрон* — был построен американским физиком Лоуренсом в 30-х годах. В сущности, это — принцип более экономного использования пространства, в котором производится ускорение. Траектория ускоряемых частиц сворачивается в спираль или окружность, частица многократно проходит ускоряющий промежуток, набирая энергию на каждом витке, как камень, раскручиваемый пращей. Полного подобия, однако, нет: в праше камень раскручивается непрерывно, а в циклических ускорителях частицу «подталкивают» время от времени, что напоминает этапы ее движения в линейном резонансном ускорителе. В циклотроне на два полукруглых электрода (рис. 24, а) — *дуанты* — подают переменное напряжение, и частица «прячется» в полые электроды на время неблагоприятного направления поля.

Может показаться, что, раскручиваясь по спирали по мере накопления энергии, частицы будут описывать все более длинные витки и все позже приходить в ускоряющий промежуток между дуантами. На самом же деле с ростом длины витка увеличивается и скорость частиц, так что они вращаются с постоянной частотой, но только до определенного предела. По мере приближения к скорости света скорость частиц меняется все медленнее, но зато, как известно из теории относительности, все быстрее увеличивается их масса. В циклотроне частота обращения частицы зависит только от отношения ее заряда к массе и от напряженности магнитного поля. Пока масса практически постоянна, частица находится в резонансе с ускоряющим переменным напряжением, но как только начинается заметное увеличение ее массы, она выпадает из резонанса.

С одной стороны, это явление положительное, так как позволяет осуществлять автофазировку. Если какая-либо частица в сгустке будет вращаться с большей скоростью, чем равновесная частица, она «отяжелеет» в большей степени, начнет сближаться с равновесной, затем отстанет от нее, но теперь она станет «легче» равновесной и начнет нагонять ее. Частицы соберутся в сгус-

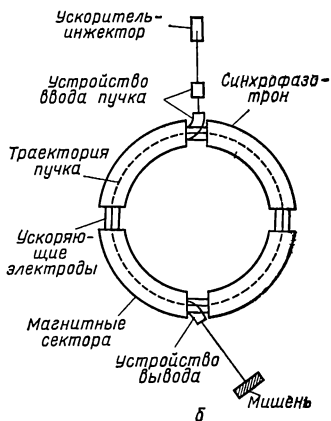
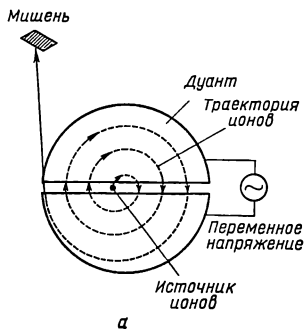


Рис. 24. Схемы устройства циклотрона (а) и синхротрона (б)

ток около равновесной. С другой стороны, «отяжеление» частиц ограничивает энергию ускоренных в циклотроне частиц.

Можно, правда, преодолеть и это затруднение, увеличивая напряженность магнитного поля, чтобы при возрастании энергии частицы попадали во все более сильное магнитное поле. Именно так делают в изохронном циклотроне. Однако здесь все не столь просто. Конструируя ускорители, приходится все время иметь в виду, что движение пучков или сгустков частиц в них не вполне устойчиво. В пучке летят частицы с одним знаком электрического заряда, которые отталкиваются друг от друга, и пучок стремится «расползтись» по разным направлениям. С расползанием вдоль своей орбиты пучок справляется сам благодаря явлению автофазировки. Расползанию по радиусу ускорительной камеры и в вертикальном направлении в обычном циклотроне препятствует магнитное поле, которое слегка уменьшается от центра к периферии ускорителя; важную роль при этом играет и вертикальная фокусировка частиц между дуантами, где они испытывают ускорение: здесь электрическое поле имеет такую конфигурацию, что поле в зазоре действует подобно собирающей линзе.

В *изохронном циклотроне* магнитное поле по радиусу не убы-

вает, а возрастает. Такое поле не в состоянии обеспечить вертикальную фокусировку частиц, если ему не придать специальную конфигурацию. Поле делают «гребенчатым», и чередование максимумов и минимумов его по азимуту, если смотреть на дуанты циклотрона сверху, напоминает детскую вертушку или лопасти вентилятора. Ситуация при этом, однако, напоминает поговорку «нос вытащил — хвост увяз». Попеременно сужаясь и расширяясь в таком магнитном поле, пучок приходит в колебания по радиусу ускорительной камеры, и эти колебания в конце концов вызывают полную потерю устойчивости пучка. Когда отношение энергии частиц к их энергии покоя $E_0 = m_0 c^2$ становится примерно равным половине числа «лопастей» магнитного поля, пучок разваливается.

Для протонов предельная энергия ускорения в изохронном циклотроне составляет несколько сот мегаэлектронвольт, а об ускорении намного более легких электронов в нем и говорить не приходится: на циклотроне их можно ускорить лишь до нескольких сот килоэлектронвольт. Но для таких энергий вполне пригодны и электростатические ускорители, скажем, генератор Кокрофта — Уолтона. Циклотрон применяют в основном для изучения ядерных реакций при энергиях ускоренных частиц десятки мегаэлектронвольт и рассеяния фундаментальных частиц при энергиях сотни мегаэлектронвольт.

Циклотрон стал родоначальником целого семейства существующих в настоящее время циклических ускорителей электронов и протонов. Рассмотрим вкратце только двух представителей этого семейства — *синхротрон* и *синхрофазотрон*. Первый из них применяют для ускорения электронов, второй — для ускорения протонов. Принципиальной разницы между ними нет, а существующее различие обусловлено в основном тем, что при движении частиц по круговым орбитам электроны испускают намного более сильное электромагнитное излучение. (Кольцо ускорителя — это не орбита, на которой электрону запрещено излучать во имя устойчивости атома: здесь стоячая дебройлевская волна не образуется.) Возникающее излучение называют синхротронным. Интенсивность синхротронного излучения при прочих равных условиях зависит от массы частиц — обратно пропорциональна квадрату массы, по-

этому электрон излучает в миллионы раз сильнее, чем протон, и тем самым «бесполезно» растрчивает накопленную энергию. Именно синхротронное излучение делает невыгодным ускорение электронов в циклических ускорителях до энергий выше нескольких гигаэлектронвольт; в этой области энергий преимущество приобретают линейные резонансные ускорители, в которых такого излучения нет.

Основной причиной, обусловившей переход от циклотрона к синхротронам, явилась необходимость удержания очень энергичных частиц на орбитах в ускорителе. Поскольку радиус орбиты обратно пропорционален напряженности магнитного поля, чтобы орбиты имели не слишком огромные размеры, нужны довольно сильные магнитные поля. Вместе с тем магнит, который охватывал бы всю площадь дуантов при энергии частицы десятки и сотни гигаэлектронвольт, когда радиус орбиты частицы достигает почти километра, должен был бы иметь совершенно чудовищную массу. Кроме того, как уже говорилось, оказался неприемлемым сам циклотронный режим ускорения, при котором частица по мере ускорения все более отстает от изменения поля.

Поэтому целесообразнее оказалось убрать дуанты, из ускорительного «круга» вырезать одно лишь внешнее кольцо и только в нем поддерживать магнитное поле. При этом круг, естественно, превратился в «баранку» небольшого внутреннего сечения. Изменился и порядок ускорения: он стал двухстадийным. В циклотроне источник частиц располагается в центре круга, и частицы раскручиваются от него по спирали. В синхротроне же частицы приходится сначала «впрыскивать» с такой энергией, которая соответствует внешним виткам орбиты в циклотроне, для этого их подвергают предварительному ускорению в линейном ускорителе (рис. 24, б). Электрическое поле, ускоряющее частицы, «подталкивает» их только на некоторых участках камеры, а на остальном ее протяжении частицы летят по инерции.

В синхротронах электрическое поле имеет постоянную частоту, которая, естественно, синхронизирована с моментами «проскока» электронов через ускоряющие промежутки. Удержание частиц, энергия которых быстро увеличивается, обеспечивает магнитное поле, напряженность которого чрезвычайно быстро (за тысячные

доли секунды) нарастает до максимума. Изменять частоту электрического поля нет нужды, поскольку скорость электронов при сверхвысоких энергиях практически постоянна. В синхрофазотронах, однако, протоны при наборе энергии еще заметно увеличивают свою скорость, поэтому в них приходится менять и частоту ускоряющего электрического поля. Естественно, для того чтобы протоны двигались по орбите постоянного радиуса и вместе с тем находились в фазе с ускоряющим напряжением, напряженность магнитного поля и частоту электрического поля надо увеличивать в строгом соответствии со скоростью протонов.

Протоны, как и электроны в синхротрон, вводят в ускоритель после предварительного ускорения в линейном ускорителе-инжекторе. Максимальная энергия протонов, достигнутая сегодня с помощью синхрофазотрона, составляет около 500 ГэВ. Это соответствует длине дебройлевской волны протона примерно $2,5 \cdot 10^{-18}$ м. Такая длина волны во много тысяч раз меньше размеров атомных ядер (а энергия соответственно в десятки и сотни тысяч раз больше энергии ядерных реакций). Протоны, ускоренные в подобных протонных «микроскопах», предназначены для изучения «деталей» собственного строения и строения других фундаментальных частиц. Что под этим понимается, будет рассказано дальше.

Встречные пучки частиц

Чтобы закончить краткий обзор ускорителей, опишем *метод встречных пучков*. Радиус ускорителя при прочих равных условиях пропорционален предельной энергии частиц в ускорителе. Его можно уменьшить, заменив обычные электромагниты сверхпроводящими магнитами, которые имеют меньшую массу, более компактны и позволяют получать значительно более сильные магнитные поля. Но все равно продвижение к еще большим энергиям сопряжено с увеличением размеров ускорителей.

Ускорители в наше время являются сложнейшими инженерными сооружениями. Для защиты от возникающего в них излучения, да и для самой защиты ускорителей от внешних воздействий их сооружают под землей. Чтобы пучки частиц не «выплескивались» на стенки ускорительной камеры, ее приходится монтировать бук-

вально с микронной точностью — и это при километровом диаметре! Несмотря на то что магниты охватывают узкое кольцо ускорительной камеры, при таком ее диаметре их общая масса уже достигает десятков тысяч тонн. Очевидно, нужен какой-то радикальный выход из сложившегося положения. Одним из выходов и является использование встречных пучков частиц.

В обычной схеме эксперимента ускоренные частицы после их вывода из ускорителя (вывод частиц — это самостоятельная и сложная задача) попадают на неподвижную мишень, где сталкиваются с частицами, входящими в состав мишени. Естественно, при этом энергия столкновения равна энергии E ускоренных частиц. Какой будет эта энергия, если сама мишень летит навстречу ускоренным частицам с такой же скоростью? (Скорости частиц и мишени близки к скорости света и, конечно, определены по отношению к стенам лаборатории, в которой проводится эксперимент.)

Допустим, что мишень составлена из частиц той же массы, что и ускоренный пучок. Классическая физика говорит, что энергия столкновения частицы-«снаряда» и частицы-«мишени» должна составить $2E$. Однако, поскольку скорости обеих частиц близки к скорости света, за получением правильного ответа надо обратиться к теории относительности, а она утверждает, что энергия столкновения частиц в таком случае равна $2E^2/m_0c^2$, где m_0 — масса покоящейся частицы; c — скорость света. Например, если сталкиваются два летящих навстречу друг другу электрона (или же летящие навстречу друг другу электрон и позитрон) с энергиями по 6 ГэВ, то энергия их столкновения составит не 12, а 150 000 ГэВ! Если же сталкиваются два протона с энергиями по 500 ГэВ, то энергия их столкновения будет примерно равна 500 000 ГэВ, т. е. в тысячу раз больше энергии самих частиц. Получается огромный выигрыш в энергии столкновения, а именно она в конечном счете интересует физиков.

Разумеется, об ускорении массивных мишеней до такой энергии нет и речи (о нем могут рассуждать только фантасты, имеющие дело с фотонными ракетами). Да это и не нужно, так как происходят лишь парные столкновения ускоренной частицы с частицей мишени. Мишенью может быть та же частица, что и уско-

ряемая. Частицу-мишень можно разогнать в том же ускорителе, перевести в *накопительное кольцо*, где сгусток таких частиц будет циркулировать до тех пор, пока не придет время «сбросить» его навстречу следующему сгустку ускоренных частиц.

Но за все надо расплачиваться. Наблюдается любопытная тенденция, которую можно проследить по всей этой книге. Улучшение разрешения, как правило, сопровождается ухудшением чувствительности, увеличением продолжительности наблюдения. Глаз достигает высшего разрешения лишь при длительном наблюдении объектов. Радиointерферометр имеет намного более хорошее разрешение, чем отдельный радиотелескоп, но приобретает его за счет очень малой чувствительности по сравнению с той, что имел бы радиотелескоп с антенной размерами с радиointерферометр. В электронном микроскопе повышение напряжения, т. е. уменьшение длины волны электронов, сопровождается значительным уменьшением тока, еще более сильно это проявляется при переходе к ионным микроскопам. В циклотроне можно получать пучки протонов с токами даже около 1 мА, в синхрофазотронах же, в сгустках, находится такое число протонов, которое эквивалентно току порядка долей микроампера. При падении протонов на неподвижную мишень плотность партнеров по столкновению имеет порядок 10^{30} м^{-3} (например, в мишени из жидкого водорода), во встречных же пучках эта плотность, а следовательно, и число актов столкновений уменьшается на добрых 12 порядков.

Называть такую тенденцию законом природы, однако, не стоит. Она, скорее, отражает ограниченность возможностей наблюдательной техники на каждом этапе ее развития. Эти ограничения успешно преодолеваются на каждом этапе разными способами, в первую очередь с помощью совершенствования техники регистрации фотонов и частиц. Следует лишь помнить, что когда дело доходит до пределов чувствительности, т. е. до счета частиц чуть ли не поодиночке, вступает в свои права статистика, которая требует для уверенного заключения об объектах наблюдения увеличивать потоки частиц или время их наблюдения. Ибо такое заключение тем более надежно, чем больше фотонов или частиц зарегистрировано при наблюдении.

Целое и части

Что же наблюдается при столкновениях частиц очень высоких энергий? Еще двадцать лет назад под такими энергиями понимали сотни и тысячи мегаэлектронвольт в расчете на одну частицу. Сегодня речь идет о сотнях и тысячах гигаэлектронвольт. Но уже двадцать лет назад, изучая картины рассеяния фундаментальных частиц друг на друге, физики поняли, что встретились с необычными, принципиально новыми явлениями.

Впрочем, поначалу эти открытия оказывались словно в русле привычных представлений. В середине 50-х годов американский физик Хофстедтер начал изучать рассеяние очень энергичных (с энергиями сотни мегаэлектронвольт) электронов на основных частицах вещества, из которых состоят атомные ядра, — на протонах и нейтронах. С помощью упругого рассеяния электронов, имевших при таких энергиях длину волны порядка 10^{-16} м, ему удалось найти распределение плотности электрического заряда в ядерных частицах (рис. 25).

Видно, что заряд, сосредоточенный в протоне, всюду положителен. Его плотность равна нулю в центре протона, возрастает, достигает максимума, после чего затем плавно уменьшается к краям, обращаясь в нуль на расстоянии от центра около $2 \cdot 10^{-16}$ м. Распределение электрического заряда в нейтроне более интересно: в нем есть зоны как положительного, так и отрицательного заряда, причем общий положительный и общий отрицательный заряды должны компенсировать друг друга, поскольку нейтрон в целом электрически нейтрален. Распределение плотности заряда в нейтроне имеет границу примерно на том же расстоянии от его центра, что и в протоне.

Эти распределения можно было бы истолковать как электронно-микроскопические изображения протона и нейтрона. Но вспомним, что, помимо упругого рассеяния, электроны могут испытывать и неупругое рассеяние, связанное с потерями ими энергии. Такое рассеяние тоже наблюдалось в опытах Хофстедтера и других исследователей. Если построить зависимость эффективного сечения рассеяния электронов на протоне от их энергии, то наблюдается интересная картина. Сечение, как и полагается, посте-

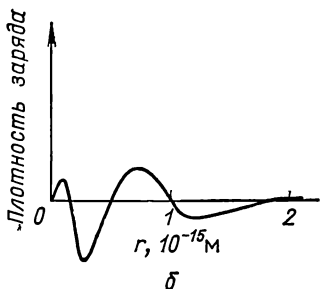
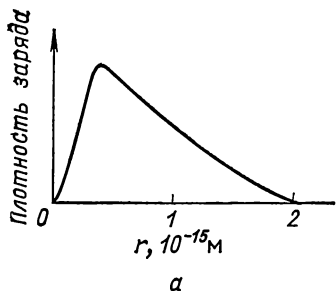


Рис. 25. Распределения плотности электрического заряда в протоне (а) и нейтроне (б)

ленно уменьшается с ростом энергии электронов. Это можно объяснить тем, что электрон все меньше времени проводит поблизости от протона, а значит, все слабее взаимодействует с ним. Но при некоторых значениях энергии на сечении рассеяния появляются резкие пики, сечение неожиданно сильно возрастает. Что-то произошло? И, действительно, приборы, установленные вокруг места столкновения частиц, показали: кроме электрона и протона, появились новые частицы — пи-мезоны, или пионы. Откуда они взялись? Может быть, они выбиты электроном из протона? Но тогда почему протон остался невредимым? Выбивание пионов из электрона кажется немыслимым: они более чем в 250 раз массивнее электрона. Кроме того, известно, что протон участвует в ядерных, сильных взаимодействиях, а переносчиками этого взаимодействия, квантами ядерного поля как раз служат пионы, поэтому было вполне естественным приписать их появление протону.

Прошло несколько лет, и ученые поставили эксперименты по столкновению электронов с позитронами во встречных пучках частиц, где никаких протонов нет. И что же: снова появились пионы! Выходит, что пионы рождаются даже в отсутствие сильных взаимодействий, непосредственно из электромагнитного поля любых двух электрически заряженных частиц при достаточно высокой энергии их столкновения? (Масса покоя пионов отвечает энергии примерно 140 МэВ.) И опять подождем делать выводы.

В те же годы широким фронтом развернулись работы по изучению взаимных столкновений протонов, столкновений с протонами пионов и других рождающихся вторичных частиц. Пионные пики на энергетической зависимости эффективных сечений рассеяния стали совершенно заурядным событием, были открыты многие другие аналогичные пики, которые получили собирательное наименование резонансов. (Они, действительно, выглядят так, как резонансные максимумы на зависимости амплитуды колебаний от частоты внешнего воздействия на колеблющееся тело, например маятник.) Сегодня такие резонансные пики насчитываются сотнями, и им соответствует появление новых частиц. Все эти частицы неустойчивы, существуют очень короткое время. Наблюдая следы, которые оставили продукты их распада, скажем, в пузырьковой камере, можно определить некоторые характеристики резонансных частиц, например их заряд и массу. Другие их характеристики можно установить, используя законы сохранения. Эти законы утверждают, что сумма некоторых свойств исходных частиц должна остаться неизменной и после их столкновения. (К подобным характеристикам относятся, например, общий заряд частиц, полные их энергия, импульс, момент количества движения и ряд менее известных, скажем, барионный заряд.) Когда это было сделано, выяснилось, например, что при столкновении пиона с протоном могут образоваться ка-мезон (каон) и лямбда-гиперон, причем последний массивнее протона.

С таким взаимопревращением частиц физики ранее никогда не встречались. Но, если говорить строго, то так ли это на самом деле, действительно ли ничего качественно нового они не обнаруживали и при более низких энергиях столкновений? Конечно же, это не так. Вдумаемся, например, в то, как было открыто сложное строение атома. Атом в целом электрически нейтрален, и представление о его неделимости, высказанное еще древними греками, продержалось до середины прошлого века, пока на атом не начали воздействовать намеренно — электрическим разрядом. Выяснилось, что атом может приобретать электрический заряд в результате ионизации, а отсюда был уже один шаг до заключения, что нейтральность атома только кажущаяся, что на самом деле в нем скрыты электрические заряды двух знаков, компенсирую-

щие друг друга, и что эти заряды связаны с некими частицами. Но это и означало открытие делимости атома, обнаружение его внутренней структуры.

Сначала, при невысоких энергиях воздействия, порядка электронвольт (т. е. при напряжении электрического разряда порядка вольт) обнаружили отрицательно заряженный электрон — первый компонент структуры атома. Природа положительного компонента оставалась загадочной до тех пор, пока Резерфорд, изучая упругое рассеяние альфа-частиц, не открыл, что он сосредоточен в центре атома, является его ядром. Но это обнаружилось уже при энергиях частиц порядка миллионов электронвольт. В те же годы было открыто явление, которое свидетельствовало о том, что и само ядро имеет внутреннюю структуру. Мы имеем в виду самопроизвольный распад атомных ядер — радиоактивность. Период дискуссий о том, из каких частиц построено атомное ядро, завершился в начале 30-х годов открытием нейтрона и гипотезой, впервые высказанной советским ученым Д. Д. Иваненко, о том, что ядро состоит из протонов и нейтронов (предположение о том, что положительный заряд ядра обусловлен присутствием в нем протонов, было высказано еще в начале 20-х годов). В последующие годы изучение структуры ядра начали проводить с помощью искусственных ядерных реакций, т. е. неупругого рассеяния частиц, которым при ускорении сообщали нужную для этого энергию порядка единиц и десятков мегаэлектронвольт.

Обобщим только что сказанное. Существует, с одной стороны, тесная связь методов упругого и неупругого рассеяния для изучения невидимого, а с другой стороны, связь того, что при этом обнаруживается, с энергией зондирующих частиц и фотонов. «Чистое» упругое рассеяние имеет место до тех пор, пока энергия «зондов» не сравнивается с энергией связи каких-либо элементов структуры объектов. Но эти элементы уловить в структуре удастся лишь при длинах волн фотонов или частиц того же порядка, что и размеры самих элементов. Если еще более повысить энергию, то элементы уже можно «вычленить» из структуры и придать им независимое бытие, оборвав их связи с объектом, из которого они выбиты. Это уже — неупругое рассеяние. Но не

нужно думать, что для «улавливания» элемента структуры и «выбивания» его из объекта требуются слишком уж различные энергии. В атомном и в еще более глубоко запрятанном мире ядер и фундаментальных частиц размеры элементов и их энергии связи с остальными элементами структуры тесно взаимосвязаны.

В общем, эта связь — обратная пропорциональность. Как уже говорилось, строго очерченных границ объектов в микромире не существует, все микрообъекты, будь то атомы, атомные ядра или фундаментальные частицы, «размыты» в пространстве. Характеристикой такой «размытости» является длина их дебройлевской волны, а она связана с энергией частиц соотношением, которое значительно упрощается при переходе в область очень высоких энергий, где кинетическая энергия частиц намного превышает их энергию покоя. Из формулы (23) тогда получается

$$\lambda = h/p = hc/E, \quad (27)$$

где c — скорость света; E — энергия частиц. Но сказанное означает, что когда длина волны зондирующих частиц приближается к размерам зондируемых элементов структуры, энергия зондирующих частиц все меньше отличается от энергии связи элементов структуры. Иными словами, при этом можно получать информацию обоими методами — и упругого, и неупругого рассеяния — практически одновременно, в одной и той же области энергий. Упругое рассеяние дает больше сведения о том, какое место занимает элемент в структуре, в «коллективе», а неупругое рассеяние — в основном о самом элементе. Задача и состоит в том, чтобы, комбинируя сведения обоого рода, составить непротиворечивое представление об объекте и элементах его структуры.

Задача эта чрезвычайно сложна и напоминает ту, что описана в известной притче о слепцах, ощупывавших слона: один потрогал хобот слона и сказал, что слон — это что-то мягкое и гибкое, другой дотронулся до ноги и заявил, что слон похож на колонну, третий ощупал хвост и решил, что слон — это нечто маленькое и т. д. Сведение воедино всей той информации о фундаментальной частице, которая «нащупана» приборами в разных экспериментах по рассеянию, конечно, очень трудное дело. В каждом из видов эксперимента приходится решать обратную задачу

рассеяния, строить такую модель частицы, которая хорошо согласовывалась бы с опытными данными, а затем согласовывать сами модели. Возможно, все это было бы проще, не будь картина рассеяния, особенно рассеяния неупругого, столь необычной и противоречащей здравому смыслу. В мире фундаментальных частиц здравый смысл, в сущности, терпит фиаско в главном вопросе: соотношение целого и его частей.

В повседневном мире мы привыкли к тому, что целое всегда состоит из более мелких и соответственно более легких частей. Это совершенно очевидно, когда части имеют разную форму и выполняют различные функции, и менее очевидно при изучении сплошных сред, в которых подчас трудно ощутить, а тем более выделить отдельные составные элементы. Но при еще большем углублении в строение вещества мы как будто снова обретаем остров спасения: атом состоит из четко различимых элементов — электронов и ядра, а само ядро — из протонов и нейтронов. Протоны в ядре могут превращаться в нейтроны, и наоборот, но в каждый «макроскопический» интервал времени наблюдения ядро устойчиво по своему составу и позволяет «подразделять» его на протоны и нейтроны.

Посмотрим же на графики распределения плотности заряда в протоне и нейтроне. Какие частицы в составе протона и нейтрона несут этот электрический заряд? При столкновении электрона с протоном появляется пион — может быть, пионы и находятся в протоне? Но они появляются и при столкновении электрона и позитрона, — может быть, пионы находятся и в этих частицах? Но тогда как быть, скажем, с появлением лямбда-гиперона или омега-гиперона, который чуть ли не вдвое массивнее протона, хотя из участвовавших в столкновении исходных частиц ни одна не была массивнее протона?

Почти полвека назад появились первые экспериментальные свидетельства превращения квантов поля в частицы вещества: было открыто превращение гамма-фотонов в пары из электрона и позитрона. В дальнейшем такие факты стали множиться. Превращение фотона в пару из электрона и позитрона требует энергии 1 МэВ, а разогнав обе эти частицы до энергии несколько сот мегаэлектронвольт, можно наблюдать и процесс их превращения

в пару пионов через промежуточный гамма-фотон, обладающий достаточной для этого энергией: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma \rightarrow \pi^- + \pi^+$. Именно об этом процессе «беспротонного» образования пионов уже говорилось. Еще более увеличив энергию сталкивающихся электрона и позитрона, можно наблюдать процесс их превращения, например, в пару из протона и антипротона: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma \rightarrow p + \bar{p}$; существование этого процесса еще недавно можно было считать совершенно фантастическим.

Тогда, может быть, и все остальные неназванные здесь процессы взаимопревращения частиц можно истолковать как «превращение энергии столкновения в массу»? (Фраза не корректна, лучше говорить о превращении квантов поля в частицы вещества, но неточный термин так укоренился, что с указанной оговоркой им все же пользуются.) Конечно, это возможно, и, более того, из закона сохранения энергии прямо следует, что полная энергия (энергия покоя плюс кинетическая энергия) до столкновения частиц остается неизменной и после столкновения. Тогда нет ничего удивительного в том, что две очень легкие, но зато достаточно энергичные частицы при своем столкновении могут образовать две очень массивные и соответственно не очень энергичные частицы. Однако любые ли частицы могут быть при этом образованы? Конечно, нет: первые ограничения накладывают законы сохранения электрического заряда, момента количества движения (или, как его называют в данном случае, — спина) исходных и конечных частиц. Но даже, когда эти законы scrupulously выполнены, остается огромное разнообразие возможных превращений. Природа же почему-то делает чрезвычайно ограниченный выбор. Понять, что лежит в основе такой «пристрастности» природы, и составляет главную задачу физики фундаментальных частиц.

Корень этой пристрастности заключен в свойствах самих частиц и их взаимодействиях. Ученые давно усвоили тот непреложный принцип, что свойства объектов всегда определяются их структурой, строением. Зная структуру, можно предсказывать свойства (если угодно, это можно назвать прямой задачей). Исследуя свойства, можно пытаться понять структуру (это можно назвать обратной задачей). Как же физики решают сегодня последнюю задачу на самом глубоком уровне строения вещества?

Один из подходов к ее решению называют *ядерной демократией*. Ядерной потому, что подход относится к большому семейству частиц, которые могут участвовать в сильных взаимодействиях такого же типа, как взаимодействия протонов и нейтронов в атомных ядрах. Демократией потому, что признается равноправие всех частиц в их семействе: среди них нет каких-либо основных, из которых составлены остальные. Протон может состоять из мезонов и всех других частиц, а скажем, нейтральный пион — из протона и антипротона (тогда его можно добавить в упомянутую выше цепочку превращений, которую претерпевают при своем столкновении электрон и позитрон, обладающие достаточной для этого энергией). Образование легкого пиона из гораздо более массивных протона и антипротона понимают так, что значительная доля энергии покоя переходит в энергию связи этих двух частиц в пионе.

Можно даже «разместить» все эти равноправные частицы друг в друге. Тогда, скажем, на периферии протона расположатся пионы, поглубже — более массивные каоны и другие мезоны, а еще глубже, в зоне, называемой *кernom*, сердцевиной протона — протоны в паре с антипротонами и другие еще более массивные частицы. Глубину при этом надо понимать в смысле соотношения (27): чем выше энергия (неважно — энергия связи или энергия покоя), тем меньше определяемые длиной дебройлевской волны пространственные размеры области, занимаемой элементом структуры частицы.

Существует и другой подход к решению проблемы структуры фундаментальных частиц, который с точки зрения здравого смысла кажется менее «диким». Когда в результате экспериментов по неупругому рассеянию протонов и мезонов на протонах набрался огромный «букет» разнообразных частиц (сегодня их известно уже около четырехсот!), физики почувствовали, что в ядерную демократию становится трудно играть и что нужны какие-то способы упорядочить это необычайно разросшееся семейство.

Вера в то, что целое состоит из частей, никогда не умирала в физике. Более того, сведение всего разнообразия физического мира к сочетаниям лишь небольшого числа основных элементов всегда было девизом физики. Эти соображения руководили учены-

ми и в попытках обнаружить «генетическую» упорядоченность в семействе сильновзаимодействующих частиц, найти среди них «родителей» и «потомков». Родителей в прямом смысле среди них не оказалось, так что в этом отношении ядерная демократия устояла. Тогда и были введены гипотетические частицы, предназначенные на роль основоположников: из различных их комбинаций должны были быть образованы все остальные частицы. Нововведенные частицы называли *кварками*. Вначале их было три вида (и еще три соответствующих им антикварка), потом их дополнили четвертым и еще придумали по три разновидности каждого из них. (Некоторые физики даже шутили, что кварки «размножаются» столь стремительно, что впору опасаться, как бы их не стало больше, чем построенных из них частиц.)

Гипотеза кварков позволила добиться очень большого успеха в наведении «генетического» порядка в семействе сильновзаимодействующих частиц. В частности, она предсказала существование новой частицы, имеющей очень большое по ядерным меркам время жизни, благодаря чему ее и удалось обнаружить в эксперименте с пузырьковой камерой. Эта частица получила название омега-гиперона.

Пока что, несмотря на большие затраченные усилия, кварки в свободном виде обнаружить не удалось. Не удалось и «выбить» их из протонов и других частиц даже при предельной энергии протонов, разогнанных в ускорителе (около 500 ГэВ). Это может означать одно из трех: либо кварков в действительности не существует, либо они связаны в частицах столь прочно, что для разрыва этой связи требуются не достигнутые пока энергии столкновений, либо, наконец, кварки (впервые!) принципиально «невыбиваемы». Если принять второе предположение, то из него следует, что поскольку энергия связи заимствуется из масс связанных частиц, массы самих кварков должны быть очень велики, намного больше масс образованных ими частиц (как, например, массы протона и антипротона значительно больше, чем масса образуемого ими пиона). В свою очередь это означает, что кварки должны быть существенно меньше составленных из них частиц.

При детальном исследовании рассеяния очень энергичных электронов на протонах и нейтронах (подобные эксперименты в

свое время проводил Хофстедтер) выяснилось, что это рассеяние выглядит так, словно внутри протона и нейтрона находятся некие точечные рассеивающие центры. (Это аналогично тому заключению, к которому пришел Резерфорд, изучая рассеяние альфа-частиц на атомах: атом рассеивает не как «пудинг», а так, словно в его центре есть точечный рассеивающий центр — ядро.) Эти центры получили название *партонов* (от английского слова *part* — часть). И теперь, похоже, есть ответ на вопрос, который мог возникнуть при рассмотрении графиков распределения электрического заряда в протоне и нейтроне: каковы «носители» этого заряда. Дело в том, что недавно на роль партонов были предложены кварки и была высказана мысль, что сами кварки «склеены» в протоне с помощью особых частиц, названных *глюонами* (от английского слова *glue* — клей). Разумеется, это не надо понимать так, что партоны не имеют геометрических размеров, представляют собой «безразмерные» геометрические точки. Таких объектов в мире нет и быть не может. Точечность понимается как бесструктурность, т. е. неразделимость на составные части. Именно так надо понимать и современное представление о том, что электрон является точечной частицей (а потому, естественно, очень удобен для изучения строения фундаментальных частиц, поскольку не «накладывает» на него свою структуру при столкновениях).

Таким образом, составляя целое из частей, физика фундаментальных частиц вовсе не считает, что части обязательно менее массивны, чем целое. Напротив, иерархия размеров, понимаемая как иерархия длин дебройлевских волн, говорит об обратном: чем меньше элемент структуры, тем большая энергия с ним связана, тем, скорее всего, он более массивен. В этом смысле максимальный размер какого-либо микрообъекта определяется энергией или массой наиболее легкого его компонента.

Так, размер атома имеет порядок длины дебройлевской волны наименее энергичных электронов в составе его электронной оболочки (оптических электронов, называемых так потому, что они определяют взаимодействие атомов с электромагнитным излучением в области длин волн видимого света). Размер атомного ядра — это величина порядка длины дебройлевской волны протона и нейтрона, характеризуемой взаимодействием (энергией свя-

зи) этих частиц в ядре. Размер самого протона или нейтрона, если в качестве его принять границу распределения плотности электрического заряда этих частиц, сравнительно мало отличается от размеров ядер, поскольку определяется «облаком» пионов, которые осуществляют связь между протонами и нейтронами в атомных ядрах.

А есть ли пределы?

Чего же можно ожидать при дальнейшем углублении в «недра» фундаментальных частиц? Ожиданий, которые разделялись бы всеми исследователями в этой области, не существует. Мы уже говорили, что сегодняшнее предельное разрешение, получаемое с помощью ускоренных до энергии 500 ГэВ протонов, составляет примерно $2,5 \cdot 10^{-18}$ м. «Поблизости» от этих расстояний находится гипотетическая «элементарная длина», по достижении которой, согласно мнению некоторых ученых, должны проявиться некие качественно новые закономерности взаимодействия фундаментальных частиц. В частности, так называемое слабое взаимодействие частиц, ответственное за радиоактивный бета-распад, распад мезонов и других нестабильных фундаментальных частиц, в этой области энергий становится сравнимо по силе с электромагнитным взаимодействием и даже превосходит его. Это, по-видимому, уже наблюдается в эксперименте. (Следует заметить, что сегодня успешно строится единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий, так что она оказывается вполне своевременно «подоспевшей» к тому моменту, когда эксперимент вплотную подошел к упомянутому критическому рубежу энергий взаимодействия.)

Однако существование элементарной длины можно понять и в смысле указания на квантованность пространства и времени (если квант времени истолковать как квант пространства, деленный на скорость света). Проще всего эту квантованность представить как существование предельно маленьких и уже более неделимых ячеек пространства и времени, в пределах которых движение частиц происходит скачками. Ясно, что проникнуть «глубже» кванта пространства нельзя: это — предел проникновения.

Вместе с тем элементарная длина, если учесть соотношение (27), как будто должна говорить о существовании некоего предела энергии взаимодействия. Если принять для этой длины значение порядка 10^{-19} м, предсказываемое из некоторых соображений, то отсюда для энергии получается значение около 10^{13} эВ. Но как это совместить с тем, что в составе космического излучения наблюдаются изредка частицы с энергией, в миллионы раз большей? Если они ускорены до такой энергии в космических просторах, то в принципе это можно сделать и на Земле. Однако изучение взаимодействий космических частиц с энергией порядка 10^{20} эВ с «земными» частицами не выявило никаких поразительных особенностей, которые указывали бы на радикальное изменение характера взаимодействия при таких огромных энергиях.

Впрочем, одна особенность сверхэнергичных взаимодействий подмечена уже давно: с увеличением энергии столкновения довольно быстро растет число образованных в нем частиц, а вовсе не их масса. Массивные частицы при этом появляются редко и тем реже, чем больше их масса. Может быть, элементарная длина как-то ограничивает массу частиц, спектр которых в противном случае можно было бы продолжать до бесконечности?

Ни один из поставленных здесь вопросов сегодня еще не имеет ответа. В сущности, это разные варианты одного и того же вопроса, который был сформулирован в древнегреческой философии, а может быть, еще раньше: бесконечно ли делимо вещество или есть предел его делимости? «Неделимые» атомы просуществовали в науке вплоть до середины прошлого века. Затем при сравнительно малых по сегодняшним понятиям энергиях их удалось искусственно раздробить. Та же участь постигла в последующем и атомное ядро. После этого рубеж неделимости отодвинулся на уровень фундаментальных частиц, и здесь вопрос о делимости повернулся неожиданной стороной, совершенно новый смысл приобрело понятие о соотношении целого и частей. Ядерная демократия на какое-то время вообще сняла вопрос о дальнейшей делимости с повестки дня. Но вот представление о кварках отодвигает рубеж неделимости на новый, еще более глубокий уровень и как будто восстанавливает прежнее его истолкование. Но тогда что же дальше, из чего состоят сами кварки?

Сам путь, следуя которому, физика отодвигала границы делимости на все более сокровенные рубежи, служит ярким подтверждением замечательной мысли В. И. Ленина о неисчерпаемости электрона как символа микромира. Достижение новых рубежей всякий раз знаменовалось открытием новых поразительных свойств микромира, более глубоким и точным пониманием его сущности. В этом смысле проблему делимости вещества можно рассматривать как внешнее наглядное отражение тех намного более сложных и трудных для осмысления проблем, которые связаны со свойствами и поведением вещества на предельно элементарном, а потому и самом фундаментальном уровне.

Так или иначе, «дурная бесконечность» делимости, когда большой предмет, наподобие матрешки, состоит из таких же матрешек, только мал-мала меньше, никогда не угрожала, да и не будет угрожать физикам. Повышая могущество своих приборов, физики никогда заранее не знали, что их ожидает при проникновении в миры все меньших и все больших масштабов. Но опыт их путешествия в новые миры неизменно оказывается оптимистическим. На каждом преодоленном рубеже перед ними открываются качественно новые закономерности физического мира, и это делает его познание чрезвычайно увлекательным,

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОПТИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ	12
Лупа	12
Микроскоп и телескоп	18
О теории микроскопа	25
Дифрагированный свет в микроскопе	32
Фазово-контрастный микроскоп	36
Интерференционный микроскоп	41
Звездный интерферометр	46
Радиоинтерферометр	49
Голографический микроскоп	56
Дальнейшее развитие оптического микроскопа	59
ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВОЛН	62
Что такое прозрачность	62
Интроскопия	66
Рассеяние света	69
Эффективное сечение рассеяния	75
Небо в радиоволнах	79
Рентгеновское излучение и кристаллы	82
Рентгеноструктурный анализ	87
Рентгеновский микроскоп	95
Рентгеновская интерференционная микроскопия	98

ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧАСТИЦ	105
Частицы и волны	105
Просвечивающий электронный микроскоп	110
Образование изображения в электронном микроскопе	114
Электроннография	119
Растровый электронный микроскоп	125
Похвала электронному микроскопу	131
Электронный и ионный проекторы	135
Микроанализаторы	141
Нейтроннография	145
К ПРЕДЕЛАМ НЕВИДИМОГО	150
Измерения в микромире	150
Электростатические ускорители частиц	155
Линейные ускорители частиц	158
Циклические ускорители частиц	162
Встречные пучки частиц	166
Целое и части	169
А есть ли пределы?	179

Виталий Исаакович Рыдник

УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ

Редактор **Е. В. Сатарова**
Художественный редактор **А. Т. Кирьянов**
Обложка художника **Е. Н. Волкова**
Технический редактор **О. Н. Адаскина**
Корректор **Н. А. Смирнова**

ИБ № 505 (Атомиздат)

Сдано в набор 13.06.80. Подписано к печати 31.12.80. Т-22198. Формат 70×100/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 7,48. Уч.-изд. л. 9,60. Тираж 96 000 экз. Зак. тип. 608. Зак. изд. 75248. Цена 30 к.

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.



Автор этой книги — **Виталий Исаакович Рыдник**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Сфера его научных интересов — физика твердого тела, спектральный анализ, метрология. Написал ряд научно-популярных и научно-художественных книг, в том числе «Что такое квантовая механика», «Законы атомного мира», «Многоцветье спектров», «Поле», «Охотники за частицами», пользующиеся заслуженным успехом у читателей и переведенные на иностранные языки. В новой книге В. И. Рыдник знакомит читателей с арсеналом тех методов и приборов, с помощью которых были сделаны выдающиеся открытия как в мире звезд и галактик, так и в мире атомов и элементарных частиц.

ЭНЕРГОИЗДАТ

В.И.Рыдник УВИДЕТЬ НЕВИДИМОЕ