

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В ФОТОГРАФИЯХ*)

Следы заряженных частиц в фотографических эмульсиях

К. Ф. Поуэлл и Г. П. С. Оккиалини

Метод толстослойных фотопластинок, впервые разработанный Л. В. Мысовским и с большим успехом применявшийся им самим, А. П. Ждановым и другими советскими физиками для изучения ядерных процессов и космических лучей, оказался очень плодотворным. По количеству полученных с помощью этого метода результатов он ещё не может конкурировать с камерой Вильсона, однако за последнее время он начинает применяться всё чаще и чаще. Этому успеху способствовало появление фабричным образом изготовленных фотопластинок со специальными эмульсиями „для ядерных исследований“. Авторы — К. Ф. Поуэлл и Г. П. С. Оккиалини — являются энтузиастами этого метода и для его пропаганды написали небольшую книжку „Nuclear Physics in Photographs“, в которой они иллюстрируют различные ядерные процессы полученными ими интересными фотографиями.

Полный перевод этой книжки будет опубликован в настоящем и в следующем номерах нашего журнала. В связи с задачей, поставленной себе авторами, книжка носит совершенно популярный характер, особенно в первых параграфах. Тем не менее, принимая во внимание интересную цель авторов — иллюстрировать ядерную физику исключительно фотографиями, полученными по методу фотопластинок, — мы помещаем её перевод полностью.

Редакция

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние восемнадцать месяцев во время наших исследований в области ядерной физики нами было получено большое количество микрофотографий следов заряженных частиц в фотографических эмульсиях. Мы нашли, что этот материал позволяет очень просто и непосредственно показать основные особенности ядерной физики на данном этапе её развития. Ввиду интереса к этому предмету со стороны широкого круга читателей было найдено целесообразным собрать часть фотографий и снабдить их минимумом тек-

*) C. F. Powell and G. P. S. Occhialini, Nuclear Physics in Photographs Oxford 1947. Перевод Л. Н. Белла.

ста. Мы пытались сделать текст простым, чтобы он был понятен большому числу людей, поэтому у читателей предполагается лишь знание элементарной механики и электростатики в объёме курса средней школы.

Однако в тех случаях, когда какой-нибудь предмет представлял особый интерес, в приложении было добавлено более подробное его изложение. В частности, приведён простой анализ упругих столкновений между различными лёгкими ядрами, так как такие столкновения лучше иллюстрируют применение элементарных динамических принципов, чем задачи о бильiardных шарах, столь хорошо знакомые многим поколениям школьников. Эти последние задачи нереальны и не имеют практического интереса, в то время как в ядерной физике аналогичные задачи очень важны, и все выводы выполняются с большой точностью.

Одна из наиболее привлекательных черт фотографического метода — его простота; много опытов по естественной радиоактивности, включая и эксперименты с помощью фотопластинок, могут быть выполнены с очень простой аппаратурой, имеющейся во многих школьных лабораториях. Мы поэтому добавили указания относительно проявления и фиксирования пластин в надежде, что некоторые из читателей смогут самостоятельно изучить ядерную физику. Астрономы-любители, внесшие вклад в свою науку, преодолевали значительно большие технические трудности, чем те, которые встречаются при получении хороших микрофотографий. Нам поэтому кажется, что и энтузиасты ядерной физики смогут играть подобную роль.

Наиболее простой областью является радиоактивность, но если достаточно число людей заинтересуется, то, вероятно, можно будет получить и более обширный экспериментальный материал. Так, например, быстро движущаяся плёнка, покрытая новыми типами эмульсии, после бомбардировки первичным пучком частиц от циклотрона дала бы экспериментальный материал, которого хватило бы нескольким исследователям, работающим в течение многих месяцев. Рассмотрение такой плёнки под микроскопом не могло бы не выявить ряд интересных результатов по расщеплению лёгких элементов эмульсии быстрыми дейтонами.

До настоящего времени вклад фотографического метода в ядерную физику очень мал по сравнению с достижениями, полученными с помощью камеры Вильсона или электрическими счётчиками. Однако с появлением новых эмульсий и связанным с этим улучшением качества следов можно думать, что значение этого метода в ближайшем будущем возрастёт. Мы надеемся поэтому, что вопреки элементарному характеру этой книги, она представит и некоторый интерес для физиков, так как приведённые фотографии иллюстрируют широкое поле применения метода для изучения следов тяжёлых заряженных частиц.

АТОМЫ

Исследования химиков прошлого века показали, что можно понять многообразие различных предметов окружающего нас мира, если считать их состоящими из несметного числа маленьких частиц — так называемых атомов вещества. Только немногие вещества, получившие названия химических элементов, оказались простыми в том смысле, что они состоят из атомов одного сорта; все другие вещества состоят из двух или большего числа элементов. Так, например, наименьшее мыслимое количество воды, её молекула, которая при дальнейшем делении перестаёт быть водой, содержит два атома элемента водорода и один атом кислорода. В отличие от этого простого случая структура биологических организмов с атомистической точки зрения очень сложна, так как они построены из большого числа различных молекул, каждая из которых содержит много атомов. Химики хорошо научились строить или, как говорят, синтезировать сложные молекулы из более простых веществ и также анализировать различные вещества с целью определения их атомного состава.

До открытия радиоактивности принято было считать атомы неизменными и неразрушимыми единицами материи, и, повидимому, Клерк Максвелл выразил общее мнение научного мира своего времени, когда в своей речи перед Британской Ассоциацией в 1873 г. сказал: «Пусть извечно происходили катастрофы и в дальнейшем они будут иметь место в небесах, пусть древние системы распадались и из их руин возникали новые, но молекулы, из которых состоят эти системы — эти основные кирпичи материальной вселенной, — останутся нерушимыми и неизменными».

В то время не было возможности глубоко изучать вопрос о строении самих химических атомов и выяснить, не состоят ли они из более простых элементарных единиц, хотя в этом направлении уже были сделаны первые шаги. Химики уже придумали методы для определения относительных весов различных сортов атомов.

В 1815 году Прют указал, что атомные веса многих из лёгких элементов выражаются почти точно целыми числами, если за единицу принять вес атома водорода. Отсюда он сделал заключение, что все атомы построены из этого лёгкого элемента; однако из-за ряда весьма заметных отклонений от этого правила — например, у хлора атомный вес равняется 35,5 — эта гипотеза долгие годы рассматривалась лишь как научный курьёз. Только с открытием радия и полония супругами Кюри в 1898 г. стало ясно, что по крайней мере часть химических элементов не представляет собой неизменных структур, а, подобно биологическим видам, находится в процессе развития, и это обстоятельство вскоре привело к сознанию, что старая гипотеза Прюта содержала зародыш идеи решающего значения.

ЯДРА

Выяснение структуры атомов в значительной мере было результатом работы Резерфорда и Бора. Было найдено, что в различных химических элементах можно подметить удивительную степень порядка; что каждый атом можно рассматривать как миниатюрную солнечную систему, в центре которой находится ядро, соответствующее солнцу, окружённое определённым числом «планетарных» электронов. Как и в солнечной системе, ядро — наиболее тяжёлая часть атома, но химические и другие свойства последнего определяются окружающими электронами. Это верно и в случае, когда атомы отделены друг от друга, как в газе, и в случае, когда они находятся в различных комбинациях, образуя великое разнообразие материалов, знакомых нам в нашей повседневной жизни. Ядро атома и сопровождающие его электроны сами очень малы по сравнению с атомом в целом и поэтому последний, как и солнечную систему, следует рассматривать, как в значительной мере пустое построение с относительно большими расстояниями между составляющими его частицами.

Хотя ядро и сопровождающие его электроны обладают электрическим зарядом, обычный атом электрически нейтрален, так как положительный заряд ядра уравнивается отрицательным зарядом всех электронов. Если через e обозначим заряд одного электрона, то заряд ядра будет $+Ze$, где Z означает число электронов в нейтральном атоме. Когда атом теряет один или более электронов, он приобретает положительный заряд и превращается в «положительный ион». Z называется атомным номером элемента. Те девяносто шесть различных химических элементов, которые в настоящее время известны, могут быть расположены в виде нумерованной последовательности, начиная с водорода, для которого $Z=1$ (и следовательно, его нейтральный атом имеет один единственный электрон) и переходя дальше к гелию ($Z=2$), литию — 3, бериллию — 4, бору — 5 и т. д. Таким образом, можно изобразить первые шесть членов этой последовательности, которая известна химикам как периодическая система Менделеева, в виде следующих простых схем (рис. 1).

Большое различие в массах электронов и ядер видно из того, что даже в случае самого лёгкого элемента, водорода, масса ядра атома в 1870 раз больше массы электрона. В тяжёлых элементах это отношение в сто раз больше этого значения.

Сила, заставляющая электроны двигаться по их орбитам в атоме, рассматриваемом нами как маленькая солнечная система, есть электростатического притяжения между имеющими различные знаки зарядами ядра и электронов. Важно понять, что свойства всех тех предметов, с которыми мы знакомы, зависят от электронного строения атомов, в то время как ядра только ответственны за большую

часть массы, и величина их заряда определяет число окружающих электронов. Никакие из обычно имеющихся в нашем распоряжении способов воздействия, как, например, высокие давления, высокие температуры или глубокий холод, — не оказывают заметного влияния на ядра, так как они защищены против таких вторжений окружающей их оболочкой из электронов. Поэтому только после созда-

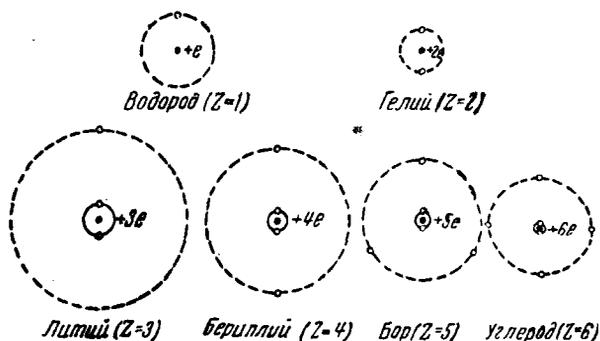


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая электронную структуру первых шести элементов периодической таблицы. Рисунок даёт только грубое представление о распределении электронов в атомах.

ния специальных технических средств, возникших после открытия радиоактивности, стало возможным поставить вопрос о поведении и строении ядер.

ИЗЛУЧЕНИЕ

Мы до сих пор говорили о строении материи, пользуясь такими терминами, как атомы, ядра и электроны, но наше знание о мире получается не только с помощью слуха, обоняния или непосредственного соприкосновения, которые могут, пожалуй, быть объяснены поведением атомов, но так же и на основе нашего чувства света. Какое же «вещество» ответственно за видимое изображение предметов, которое мы воспринимаем нашими глазами? В настоящее время мы говорим об этом «веществе», как об излучении, и можем считать его, как и самую материю, состоящим из отдельных частиц, которые мы в отличие от атомов назовём «квантами» или «фотонами».

Мы теперь знаем, что существует близкая связь между атомами и квантами. Например, когда газ сильно нагрет, скажем, в пламени, то составляющие его атомы движутся с увеличенной скоростью. При столкновении атомов друг с другом их электроны могут перейти на орбиты более высокой энергии. О таких атомах говорят, что

они «возбуждены». Вообще говоря, возбуждённый атом быстро возвращается в нормальное энергетическое состояние, и при таком переходе избыток энергии выделяется в виде кванта излучения. Если E_1 и E_0 обозначают соответственно энергию атома в возбуждённом и нормальном или нижнем состояниях, то энергия испущенного кванта излучения даётся уравнением (1) $h\nu = E_1 - E_0$. В этом уравнении h есть постоянная, так называемая постоянная Планка, а ν есть частота испущенного излучения.

Найдено, что для атома данного типа есть только ограниченное число возбуждённых состояний различной энергии, в которых атом может существовать. Соответственно различным возможным переходам атома между различными парами таких состояний существует только ограниченное число различных фотонов, обладающих каждый определённым квантом энергии, величина которой даётся уравнением (1). По этой причине видимый свет от каждого элемента всегда может быть разложен в спектроскопе на ряд линий, каждая из которых соответствует свету определённой частоты и, следовательно, определённой энергии кванта.

Наши глаза чувствительны к излучению с частотой ν , заключённой в довольно узкой области. Мы теперь знаем, однако, что в природе существуют излучения, которые, начиная с радиоволн, простираются к области инфракрасных волн и дальше через видимый спектр к рентгеновским и γ -лучам, причём все эти излучения в сущности одной природы. При переходе от радиоволн к наиболее проникающим γ -лучам значение ν меняется больше чем на сорок октав, но все соответствующие кванты движутся в пустоте с одной и той же скоростью c , равной скорости света, 3×10^{10} см/сек.

Согласно набросанной выше картине фотон не находится в готовом виде в атоме, который его испускает, а рождается при переходе атома из одного состояния в другое. Получающийся фотон потом летит от излучающего вещества до встречи с другим веществом. Тогда, если слой последнего достаточно толст, фотон исчезает, или, как говорят, поглощается. Процесс поглощения в деталях своих довольно разнообразен и зависит от частоты излучения, но в случае видимого света и рентгеновских лучей он в значительной мере обусловлен возбуждением или ионизацией атомов того вещества, на которое падает фотон. «Ионизация» означает, что вместо того, чтобы электрон был переведён на орбиту более высокой энергии, он полностью выбивается из атома, вследствие чего общий заряд последнего становится равным $+e$ и получается, следовательно, положительный ион. Фотоны, которые попали в Ваш глаз от этой страницы, имели очень кратковременное существование, если Вы читаете при искусственном свете. Расстояние, которое они прошли, вероятно, порядка 300 см и время их полёта равно $300/3 \cdot 10^{10} = 10^{-8}$ сек; с другой стороны, в межзвёздном пространстве кванты от наиболее отдалённых туманностей проходят путь до Земли в течение $5 \cdot 10^8$ лет.

ВОЛНЫ И ЧАСТИЦЫ

Два пункта в изложенном в предыдущем параграфе материале могут представить некоторые трудности для читателей, незнакомых с понятиями атомной физики. Во-первых, мы утверждаем, что электроны в атоме могут находиться лишь в определённых энергетических состояниях. Аналогия атома с миниатюрной солнечной системой, следовательно, имеет только ограниченную применимость. Кинетическая энергия Земли, при движении её вокруг Солнца, имеет в настоящий момент некоторое значение, но постепенно уменьшается в результате действия приливов. Поэтому энергия и радиус орбиты с каждым годом становится всё меньше и меньше. Наши знания о поведении атомов, с другой стороны, не позволяют нам допустить подобных изменений энергии их электронов. Опыт показывает, что атом может существовать только в некоторых состояниях с определённой энергией, причём переходы между этими состояниями сопровождаются поглощением или испусканием фотонов.

Во-вторых, мы начали с того, что утверждали, что излучение состоит из частиц определённого типа, из фотонов, а потом говорили о «радиоволнах». Это кажется парадоксальным, так как по нашим обычным представлениям нечто может быть или волной, или частицей, но не и тем и другим одновременно; эти две категории взаимно исключены. Мы таким образом находим в обоих случаях, что для описания явлений в мире атомов приходится вводить понятия, которые чужды нашим повседневным представлениям.

Проблемы этого типа в период их открытия — около начала нашего века — создали большие трудности для физиков. В течение двухсот лет классическая физика развивалась на основе ньютоновой механики. Эта система основывается на таких понятиях, как масса и сила, которые в основном выводятся из обычного жизненного опыта и с течением времени стали частью нашего общего научного наследства. Они поэтому могут быть некритически использованы и мы их часто рассматриваем как нечто само собой разумеющееся. Например, закон всемирного тяготения Ньютона известен каждому, знакомому с элементами науки, и он обычно воспринимается без всяких затруднений; именно непривычность более современных законов делает трудным их понимание.

Открытие квантовой природы излучения было одним из первых открытий, потребовавших разрыва с классическими традициями в физике. Некоторые стороны поведения излучения могут быть описаны по аналогии с волнами на поверхности пруда, в то время как другие — только если мы представим излучение концентрированным в маленьких пакетах или квантах; однако ни одна из этих аналогий не полна. Мы можем сохранить представление об атомах и фотонах, как о частицах, только в том случае, если мы примем, что движение частиц описывается не с помощью классической механики

Ньютона, а по новой системе — волновой механике, — которая имеет близкие аналогии с волновым движением. Обе системы дают одинаковый результат при применении к тяжёлым телам, состоящим из многих атомов.

Подобные кризисы идей органически связаны с ростом человеческих знаний и развитием способов управления силами природы и происходят время от времени в каждой области науки и человеческого познания. Вряд ли можно ожидать, что дальнейшие исследования разрешат эту трудность в том смысле, что станет возможным сказать, является ли излучение «в действительности» волной или частицей. Мы теперь знаем, что «двойственность» волна-частица присуща всем реальностям, встречающимся в мире атомов и ядер, и нам остаётся её сделать привычной частью наших представлений. Таким способом мы обогащаем содержание нашего мышления и будем иметь увеличенные запасы, из которых можно черпать аналогии, когда в будущем мы ещё глубже проникнем в тайны природы. Вспомним, что до времён Коперника было бы невозможным описать атом, как своего рода миниатюрную солнечную систему.

Задача освоения этих фактов усугубляется для студента ещё и тем, как нам кажется, что курсы оптики в наших школах следуют историческому развитию этого предмета только до конца прошлого века. Немало внимания обращается на волновые свойства света — интерференцию, диффракцию, поляризацию, — а квантовые свойства излучения часто обходятся. Таким образом создаётся одностороннее представление, тогда как для понимания природы излучения, а также для технического применения этого знания обе стороны должны получить одинаковое освещение.

МАССА И ЭНЕРГИЯ

В обычных расчётах мы пользуемся знакомыми единицами, например, граммом для измерения массы и эргом или килограммометром для измерения работы или энергии. Если иметь дело с отдельными атомами или электронами, то оказывается, что эти единицы слишком велики. Удобно принять $\frac{1}{16}$ часть массы атома обычного кислорода в качестве единицы массы и энергию электрона, прошедшего разность потенциалов в один вольт, в качестве единицы энергии. Последняя единица, называемая электрон-вольт, обозначается символом eV. Средняя энергия движения молекулы газа при обычных температурах равняется примерно 0,03 eV, в то время как в центре Солнца, где температура порядка $2 \cdot 10^7$ градусов Цельсия, средняя энергия отдельных атомов порядка 2 000 eV.

Удобство электрон-вольта, как единицы энергии, состоит в том, что часто приходится сообщать атомным или ядерным частицам большие скорости путём ускорения их в вакууме между двумя точками, имеющими определённую разность потенциалов. Если, как это обычно

бывает, известен заряд частиц, то их энергия сразу определяется, если дана пройденная разность потенциалов. Сходство этой единицы с хорошо известным килограммометром, следовательно, очень близкое, так как последняя единица определяется как кинетическая энергия, приобретённая грузом весом в один килограмм при падении по вертикали с высоты в один метр.

Одна из основных особенностей классической физики, базирующейся на механике Ньютона, та, что масса тела есть постоянная величина, не зависящая от физического состояния тела: от его скорости, температуры и т. д. Далее, масса и энергия замкнутой системы рассматриваются как две отдельные и различные величины, каждая из которых остаётся постоянной при любых изменениях, происходящих внутри системы *). Эти две особенности находят своё выражение в двух знаменитых аксиомах — в законе сохранения массы и законе сохранения энергии.

Эти основы физики были подорваны развитием теории относительности Эйнштейна. В отличие от ньютоновой механики в релятивистской механике масса тела увеличивается, когда оно приходит в движение, благодаря увеличению его кинетической энергии. Для тех скоростей, с которыми мы знакомы в нашей обыденной жизни, эти изменения массы настолько незначительны, что они не могут быть обнаружены даже самыми точными имеющимися приборами. С другой стороны, в ядерной физике частицы со скоростями, приближающимися к скорости света, — обычное явление, и изменения массы имеют существенное значение. При этих обстоятельствах становится нужным обозначать массу недвижущегося тела специальным термином, и поэтому говорят о «массе покоя» тела.

Предыдущий пример есть частный случай более общего закона, вытекающего из теории относительности, согласно которому между массой и энергией существует общая эквивалентность. Данное количество массы в m граммов эквивалентно количеству энергии в E эргов, а именно, $m = \frac{E}{c^2}$ или $E = mc^2$, где c — скорость света. Далее, масса может превратиться в энергию или энергия в массу, и поэтому отдельные принципы сохранения массы и сохранения энергии должны быть заменены одним общим принципом сохранения массы-энергии. Энергия должна измеряться в единицах $\text{эрг}/c^2$, которые выражают в граммах ту массу, которой она эквивалентна.

Этот общий закон опять-таки верен и для явлений, обычно наблюдаемых нами, но если исключить область ядерной физики, то изменения энергии, а следовательно, и массы слишком малы, чтобы

*) Термин «замкнутая система» означает, что рассматриваемая система частиц полностью изолирована от воздействия окружающих тел. Такая изоляция практически, конечно, невозможна, но в некоторых случаях удаётся создать такую степень изоляции, что влияние внешнего мира незначительно по отношению к данным конкретно рассматриваемым процессам.

их можно было обнаружить. Если мы сжигаем определённое количество угля в сосуде, используя, например, для этого определённое количество кислорода, то масса всех продуктов сгорания будет равняться массе первоначальных продуктов при условии, что тепло и свет, которые появляются при сгорании, полностью задерживаются сосудом. Если, однако, мы соберём эти продукты и дадим им охладиться, то их масса в холодном состоянии будет меньше массы первоначальных продуктов на величину, соответствующую масс-эквиваленту энергии, потерянной системой. Современные весы не позволяют произвести измерения таких изменений массы, так как последние в тысячу раз меньше тех, которые можно было бы обнаружить. Однако энергия, выделяемая в ядерных реакциях, превышает в миллион раз количество энергии, выделяемой в химических реакциях при одном и том же количестве участвующих материалов, и изменения массы, следовательно, делаются ощутимыми.

Эквивалентность между массой и энергией, выраженная соотношением Эйнштейна, позволяет определить энергию в электрон-вольтах, соответствующую массе электрона. Получается значение в 510 000 eV или 0,51 MeV, где символ 1 MeV обозначает один миллион электрон-вольт. Если, следовательно, мы сообщим электрону кинетическую энергию в миллион электрон-вольт, то его масса будет примерно в три раза больше, чем у покоящегося электрона. При ещё больших энергиях, какие встречаются в космических лучах, заряженные частицы будут иметь массы, во много раз большие их массы покоя, и теперь зависящие в основном от их энергии.

Из соотношения Эйнштейна также следует, что с фотоном связана масса, равная $\frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$. В этом случае масса зависит от частоты излучения и для обычного видимого света она очень мала по сравнению с массой электрона. Для очень проникающих фотонов, входящих в состав космических лучей, энергия квантов может быть настолько значительной, что соответствующие массы превышают даже массы покоя атомных ядер.

СОХРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСА

В то время, как в современной физике отдельные принципы сохранения массы и сохранения энергии заменяются более общим законом Эйнштейна, третий фундаментальный принцип классической механики, а именно, закон сохранения импульса, остаётся в силе и находит очень широкое применение. Этот закон гласит, что импульс системы не меняется в результате взаимодействия её составных частей. Простым примером из классической механики является выстрел из ружья. Мы можем пренебречь количеством движения газов, появляющихся в результате взрыва заряда. Предположим, что m — масса пули и M — масса ружья, V есть скорость вылета пули и

v — скорость отдачи ружья, причём считается, что первоначально ружьё было в покое и, следовательно, начальный импульс пули и ружья равнялся нулю. Тогда принцип сохранения импульса утверждает, что начальные и конечные импульсы равны, т. е. $mV = Mv$ или импульс движущейся вперёд пули равняется импульсу отдачи ружья.

Мы находим много примеров применения этого уравнения в ядерной физике. Следует заметить, что оно означает, что в результате взрыва заряда пуля получает большую часть выделяющейся энергии. Так, если ружьё имеет массу в 100 единиц, а пуля в 1 единицу, то скорости относятся как 1 к 100. Кинетическая энергия тела с массой m и скоростью v равняется $\frac{1}{2}mv^2$. Таким образом энергия пули, $\frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 100^2 = 5000$ единицам — в сто раз больше энергии ружья, равной $\frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 1^2 = 50$ единицам. Чем больше различие масс обеих частиц, тем большую долю выделяемой энергии получает более лёгкая частица.

В более общем случае появления нескольких осколков в результате взрыва необходимо определять общий импульс системы по результирующим импульсам отдельных осколков с учётом их направлений или, как говорят, суммируя их векторно.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ЯДЕР: α -РАСПАД

Та стадия развития наших знаний о строении вещества, которая описана в предыдущих параграфах, была достигнута примерно в 1912 г. Было установлено, что явление радиоактивности обусловлено тем, что ядра наиболее тяжёлых элементов, как уран (92), радий (88) и полоний (84), неустойчивы и могут самопроизвольно «взрываться». В одном из типов этого процесса «радиоактивного распада» ядро атома испускает маленький, имеющий собственную структуру, осколок — α -частицу, которая, как показал Резерфорд, тождественна с ядром второго элемента периодической таблицы, т. е. гелия ($Z=2$). Потеря α -частицы приводит к уменьшению заряда ядра на $+2e$. Так, для полония заряд ядра меняется от $+84e$ до $+82e$ и, следовательно, получается ядро 82-го элемента периодической системы, т. е. свинца.

α -частицы, излучаемые радиоактивными веществами, покидают материнские ядра со скоростями, приближающимися к скорости света, и с энергиями порядка нескольких миллионов электрон-вольт. Они, таким образом, двигаются примерно в 10 000 раз быстрее обычных атомов при комнатной температуре, которые, как мы видели, обладают энергией теплового движения порядка 0,03 eV. Если радиоактивное вещество находится в воздухе, то испущенные α -частицы проходят через атомы воздуха, т. е. кислорода и азота, наподобие быстрой звезды, проходящей через множество солнечных систем, и

выбивают из атомов планетарные электроны, постепенно теряя при этом свою скорость.

Исключая некоторые очень редкие случаи, при прохождении через атом α -частица теряет лишь незначительную долю своей энергии и только после прохождения сотен тысяч атомов она останавливается.

Однако даже в газе число атомов в малом объеме настолько велико, что расстояние, проходимое α -частицей радия, равняется всего 3,2 см.

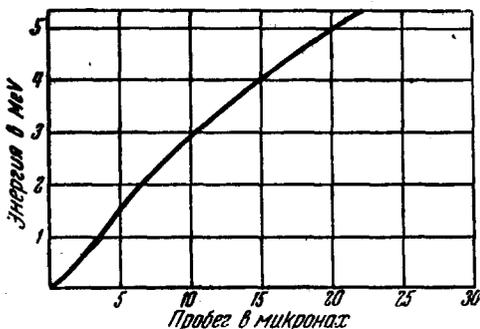


Рис. 2а. Кривая пробег-энергия для α -частиц в эмульсиях Ильфорта типа „Nuclear Research“.

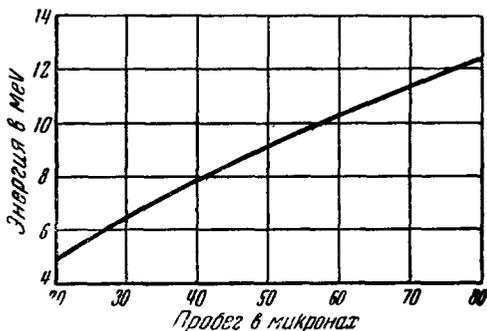


Рис. 2б. Кривая пробег-энергия для α -частиц в эмульсиях Ильфорта типа „Nuclear Research“.

Важной чертой процесса радиоактивного распада является то обстоятельство, что почти все α -частицы от материнского ядра данного типа имеют одинаковые скорости вылета, а следовательно, проходят пути почти одной и той же длины, т. е. имеют примерно равные «пробеги»*) в воздухе при нормальных условиях давления и температуры. Для различных радиоактивных элементов, однако, энергия испускаения различна и, следовательно, различны и пробеги соответствующих α -частиц. Таким образом знание пробега α -частицы может сильно содействовать определению природы материнского атома, испустившего её.

Точное определение энергии α -частиц, испускаемых различными радиоактивными ядрами, было выполнено Розенблюмом методом магнитного отклонения, но входить в детали этих опытов здесь было бы неуместно. Однако, если известно соотношение между энергией ча-

*) Следует остановиться на термине „разброс“ α -частиц по двум причинам. Во-первых, многие радиоактивные вещества, испытывающие α -распад, испускают несколько различных однородных групп частиц. Вообще, существует одна основная группа для данного типа ядер, соответствующая обычному способу распада, и одна или больше слабых групп с разными пробе-

стицы и её пробегом, можно по пробегу частицы оценить её первоначальную энергию. Хотя этот метод и менее точен, чем метод магнитного отклонения, он значительно проще и до сих пор почти повсюду применяется в опытах с ядерными частицами. Кривая «пробег-энергия» для α -частиц в ильфордовской эмульсии типа «Nuclear Research» показана на рис. 2а и б.

СЕМЕЙСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Другой величиной, характеризующей радиоактивное ядро данного типа, является его «период полураспада». Грамм радия содержит $2,6 \cdot 10^{21}$ атомов. При радиоактивном распаде часть атомов радия испускает α -частицы и превращается в атомы нового элемента — радона ($Z=86$). Таким образом, имеет место постепенное исчезновение радия и опыты показывают, что примерно за 1500 лет половина ядер начальных атомов радия подвергается изменению. В течение следующих 1500 лет начальное число уменьшается в четыре раза и т. д. Этот «экспоненциальный» распад радия, при котором за определённый промежуток времени определённая доля первоначально имевшихся атомов исчезает в результате радиоактивного распада, характерен для всех радиоактивных веществ. Промежуток времени, в течение которого половина начального числа ядер самопроизвольно распадается, называется «периодом полураспада»*).

Период полураспада τ сильно зависит от типа радиоактивного вещества. Так, для одного вида урана τ равняется 10^{10} лет, в то время как для RaC' он порядка 10^{-6} сек. (т. е. одной миллионной части секунды)! Существует общая связь между пробегом α -частиц от данного элемента и его периодом полураспада, которая в математическом своём виде получила название закона Гейгера-Нутталла. Согласно этому закону чем меньше период полураспада элемента, тем больше пробеги испускаемых им α -частиц.

гамм, соответствующими особым способам распада. Пример такой α -частицы с исключительным пробегом, испущенной торием C', показан на фотографии VI.

Во-вторых, хотя все α -частицы данной группы и испускаются со скоростями, почти одинаковыми в очень узком интервале, пробеги отдельных частиц подвержены некоторым изменениям. Каждая частица теряет свою энергию в результате большого, но конечного числа столкновений, испытываемых при прохождении сотен тысяч атомов. Следовательно, расстояние, пройденное при данной потере энергии, подвержено статистическим флуктуациям. Говорят в этом случае о «разбросе» α -частиц; следствием этого явления оказывается то, что при определении энергии α -частицы по её пробегу погрешность может оказаться порядка 1 процента.

*) Согласно современным представлениям распад радиоактивных ядер подчиняется законам случая. Таким образом, число α -частиц, испущенных за определённый промежуток времени источником α -частиц данной силы, подвержен статистическим флуктуациям. Если, однако, число α -частиц велико, то статистические флуктуации относительно малы.

Мы видели, что радиоактивный распад радия приводит к образованию нового элемента — радона, Rn ($Z=86$). Этот элемент также радиоактивен и распадается довольно быстро ($\tau=3,8$ дня) с образованием радия А ($Z=84$). Далее следует ещё целый ряд превращений (см. рис. 3), пока не образуется устойчивое ядро особого вида свинца ($Z=82$). Можно

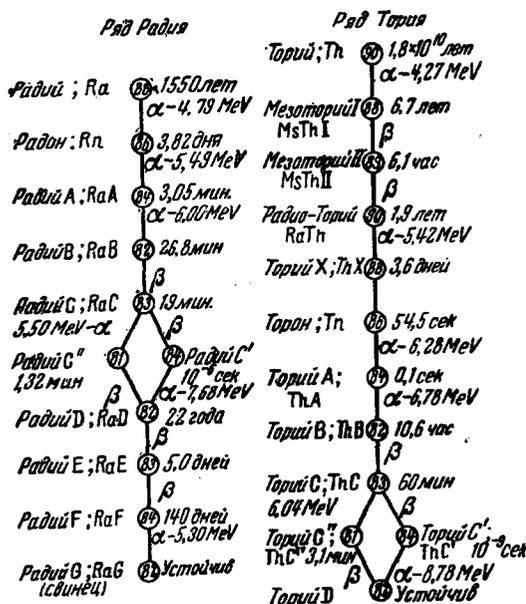
заметить что в этой последовательности превращений не всякое ядро распадается с испусканием α -частицы. Некоторые ядра испускают быстрый электрон или β -частицу, в результате чего заряд ядра не уменьшается на две единицы, как в случае α -распада, а увеличивается на одну единицу, что и соответствует потере одного заряда ($-e$) ядром.

Число примеров β -распада, которые мы встретим в этой книге, очень мало, так как обнаружить следы электронов в фотографических пластинках в настоящее время невозможно; этот вопрос, однако, имеет очень большое значение.

Все атомы периодической таблицы могут быть получены теперь в радиоактивном виде, и работники самых разнообразных областей науки теперь

вооружены новым мощным методом исследования. Почти во всех случаях эти радиоактивные ядра распадаются с испусканием электронов, которые могут быть обнаружены методами электрического счёта.

Рассмотрение рис. 3 показывает, что после распада ядра радия последующие превращения происходят довольно быстро, так как периоды полураспада соответствующих ядер гораздо меньше, чем период полураспада радия. Этот эффект ещё заметнее в семействе радиоактивных ядер, для которых исходным веществом является торий.



В этом случае, который также показан на рис. 3, все превращения, следующие за распадом ядра радиотория, происходят практически в течение нескольких дней. Можно также заметить, что когда образуются «С» вещества, в радиоактивной серии происходит «разветвление»: как радий С, так и торий С могут распадаться с испусканием или α - или β -частицы.

СЛЕДЫ α -ЧАСТИЦ В ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ЭМУЛЬСИЯХ

На фотографиях (см. в конце выпуска) показаны следы, созданные быстрыми заряженными частицами при прохождении их через фотографическую эмульсию. Обычная фотографическая пластинка представляет собой плоскую стеклянную пластинку толщиной примерно в два миллиметра, на которой осаждается слой эмульсии, содержащей желатин и большое число мельчайших зёрен галоидных соединений серебра, — чаще всего бромистого или иодистого. Эти маленькие кристаллы образуются в эмульсии осаждением при определённых температурных условиях и обычно называются «зёрнами» или «гранулами» галоида серебра. После просушки эмульсии на стекле получается крепкий устойчивый слой.

При нормальном фотографировании изображение фотографируемого предмета образуется на поверхности эмульсии при освещении её светом. В результате, в части зёрен образуются маленькие крупинки серебра, состоящие всего из нескольких атомов и слишком маленькие, чтобы их можно было обнаружить обычным микроскопом. Такая крупинка серебра называется «скрытым изображением». Чем больше интенсивность света, падающего на данную площадь, тем большее число зёрен подвергается изменению.

Если после экспозиции опустить пластину в раствор, называемый «проявителем», который содержит подходящие восстанавливающие агенты, то те зёрна галоида серебра, в которых существуют скрытые изображения, превращаются в чёрные зёрна металлического серебра. С другой стороны, зёрна без скрытого изображения или со скрытыми изображениями недостаточных размеров не чувствительны к проявителю. Далее, пластину кладут в другой раствор, «фиксаж», который растворяет неразрушенные зёрна галоида серебра, но оставляет нетронутыми проявленные зёрна. Различные степени почернения в окончательно обработанной фотопластинке соответствуют относительному количеству света, попавшего на различные участки её площади. Чем интенсивнее свет, тем больше число проявленных зёрен и тем больше соответствующее почернение пластинки.

Для работ по ядерной физике изготавливаются специальные фотографические эмульсии, которые содержат примерно в десять раз больше галоида серебра по отношению к данному количеству желатины, чем обычные эмульсии. Кроме того, часто делают гораздо бо-

лее толстые слои эмульсии, чем в простой фотографии, причём обычно применяемая толщина равняется примерно $\frac{1}{10}$ миллиметра *).

Если α -частицы попадают в эмульсию одной из этих специальных пластин, то они проходят через зёрна галоида серебра, вкрапленные в желатине, но, благодаря большей плотности атомов твёрдого вещества по сравнению с газом, их пробег в эмульсии почти в две тысячи раз меньше соответствующего значения для воздуха. Если после экспозиции проявлять и фиксировать эмульсию, то только зёрна, задетые α -частицами, будут проявлены и останутся в виде зёрен серебра. В результате при рассмотрении пластинки под микроскопом следы частицы проявляются в виде линии из чёрных зёрен серебра подобно чёрным бусам, беспорядочно нанизанным на невидимой нити. Из-за малого пробега частиц обычно за единицу длины принимают одну тысячную долю миллиметра — микрон, который обозначают символом μ .

Все приведённые фотографии были получены с помощью специальных фотографических эмульсий, изготовленных компанией Илфорд и получивших название «Nuclear Research» эмульсий. Так как плотность галоида серебра у этих эмульсий значительно больше, чем в обычных фотографических эмульсиях, то расстояние между соседними зёрнами значительно меньше и следы α -частиц имеют вид почти сплошных цепочек зёрен серебра, так что легко могут быть рассмотрены под микроскопом. Изготавливаются различные типы пластин — «А», «В», «С», «D» и «Е», причём средний размер зерна меняется для различных типов от $0,5 \mu$ до $0,1 \mu$. Относительно метода проявления и фиксирования эмульсий см. приложение А.

Этот способ получения видимых следов частиц, прошедших через эмульсию, подобен методу камеры Вильсона, сыгравшему такую выдающуюся роль в ядерной физике. Преимуществом фотопластинки, однако, является то, что она постоянно сохраняет чувствительность и чрезвычайно проста в обращении. С другой стороны, мы уже видели, что на данной стадии её усовершенствования фотопластинка не регистрирует быстрых электронов, которые оставляют на своём пути несравненно более тонкий след ионов, чем тяжёлые частицы, и которые, следовательно, имеют гораздо более слабое фотографическое действие на зёрна галоида серебра, через которые они проходят.

Фотографии следующих параграфов иллюстрируют простые опыты по радиоактивности. Некоторые из них могут быть получены с очень скромной аппаратурой. Например, полученные следы могут быть сделаны ясно видимыми с помощью микроскопа с $\times 40$ сухим объективом (4 мм) и $\times 6$ окуляром, при достаточно хорошо отрегулированном освещении. Чтобы получить фотографии высшего каче-

*) Использование толстослойных фотопластинок было впервые предложено Л. В. Мысовским, который разработал технику их изготовления и методы применения. В дальнейшем этот метод разрабатывался и с большим успехом применялся А. П. Ждановым и другими советскими физиками. *Ред.*

ства, обычно применяют объективы с высокой апертурой, погружённые в масло, чтобы разрешить тонкую структуру следов. Но тогда возникает та трудность, что фокусное расстояние таких объективов невелико, вследствие чего в фокусе находятся только объекты, расположенные в очень узком слое. При этих обстоятельствах след можно сфотографировать целиком только в том случае, если окажется, что он находится в плоскости, параллельной плоскости эмульсии. В случае же наклона к этой плоскости приходится наводить фокус на различные участки следа и делать целую серию фотографий. Последние потом могут быть использованы для изготовления перекрывающейся мозаики подобно тому, как это делается при аэрофотосъёмке. Подобный метод используется так же и в том случае, как это часто бывает, когда предмет слишком велик, чтобы его можно было сфотографировать под микроскопом при одной экспозиции.

Часть из приводимых ниже фотографий была получена при одной экспозиции и показывает следы, которые выходят из фокуса. В тех случаях, когда несколько фотографий были соединены вместе в одну мозаику, это особо указывается в тексте.

ИЗОТОПЫ

До сих пор мы различали ядра по их заряду Z , который определяет химические свойства атомов. Детальное изучение радиоактивных семейств выявило, однако, что ядра тяжёлых элементов не все имеют одинаковую массу. Удобно измерять массу ядра по отношению к массе протона, являющегося ядром самого лёгкого элемента, водорода. Во всех случаях это отношение равно, хотя и не совсем точно, целому числу, которое называется массовым числом ядра. Таким образом данное ядро описывается его зарядным и массовым числами.

Атомы, имеющие ядра с одинаковым зарядом, но различными массовыми числами, называются «изотопами», и их химические свойства настолько близки, что их нельзя разделить химическим путём. Например, торий и радиоторий оба имеют ядра с зарядным номером 90, так что химически они практически неотличимы, но их массовые числа равны соответственно 232 и 228. Заряд и массовое число гелия равны соответственно 2 и 4. Отсюда следует, что при распаде ядра с испусканием α -частицы его массовое число уменьшается на 4. С другой стороны, β -распад, который связан только с вылетом электрона, не меняет массового числа ядра.

Эти факты можно иллюстрировать с помощью уже рассмотренных выше семейств радиоактивных ядер, если построить график массового числа ядра в функции зарядного номера. Последовательные изменения в радиоактивных семействах, начинающихся с радия и тория, показаны таким графиком на рис. 4. Можно заметить, что некоторые из элементов, изображённых на рисунке, имеют два или даже больше изотопов. Так, например, радий В, торий В, радий D, торий D

и радий G все являются изотопами свинца с зарядным номером $Z=82$ и массовыми числами соответственно 214, 212, 210, 208 и 206. Первые три ядра радиоактивны и распадаются с испусканием β -частицы, а последние два являются устойчивыми изотопами. Аналогично, мезоторий I и торий X оба являются изотопами радия, причём первый испускает β -частицы, а второй — α -частицы.

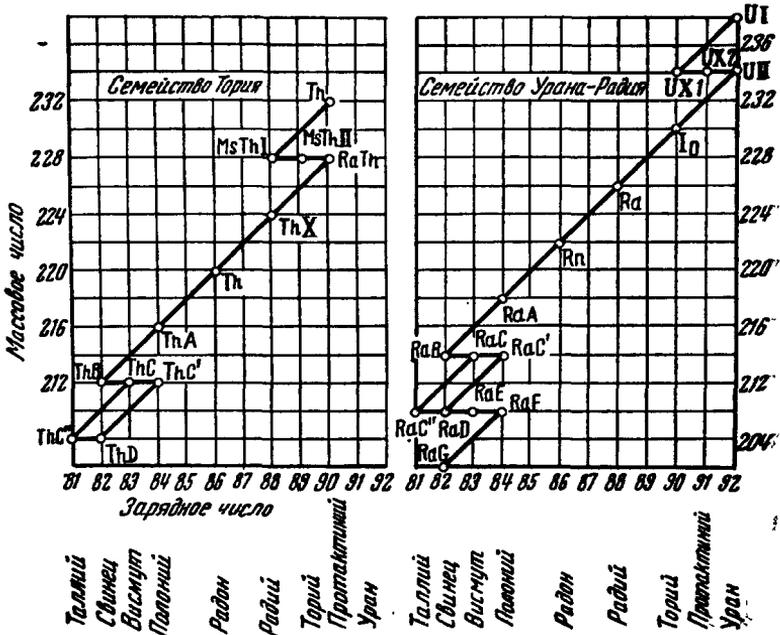
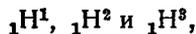


Рис. 4. Другой метод изображения семейств радиоактивных элементов, в котором массовое число ядра изображается как функция зарядного номера.

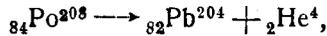
Очень многие из обычно существующих химических элементов также состоят из двух или больше изотопов. Особо важным случаем является водород, который имеет три различных типа ядер, из которых обычный водород имеет массовое число 1, а остальные два типа — массовые числа 2 и 3. Эти три ядра настолько важны, что получили особые названия, а именно протона, дейтона и тритона и обозначаются соответственно



где символ H означает химический элемент водорода, а верхние и нижние числа соответственно массовые и зарядные числа. Водород, состоящий из атомов, имеющих в качестве ядра дейтона или тритона, называется соответственно дейтерием и тритием. Малые количества дейтерия (0,015%) находятся в обычном природном водороде,

но тритий приходится получать искусственно, и до сих пор были изготовлены только малые количества.

Следует заметить, что в любом ядерном превращении полный заряд и массовое число не меняются. Так, испускание α -частиц полным можно изобразить равенством



причём для обеих частей равенства полный заряд и массовое число одинаковы и равны соответственно 84 и 208. Строго говоря, не обязательно приводить атомный номер элемента и его символ, так как из одного из них следует другое. Однако удобнее это делать, ибо такое написание избавляет нас от необходимости определять зарядные числа из таблиц.

КРИВАЯ БРЭГГА

На фотографиях VIII—XVI показаны следы быстрых протонов и дейтонов в эмульсии. Эти частицы не испускаются радиоактивными ядрами, но могут быть созданы рядом способов, например, при искусственном превращении ядер или с помощью какой-нибудь большой машины вроде циклотрона. Будучи ядрами водорода, эти частицы несут заряд всего в $+e$ по сравнению с $+2e$ у α -частицы. В результате, они менее эффективно, чем α -частицы, обладающие той же скоростью, ионизуют атомы, через которые проходят, и поэтому число, а следовательно, и плотность созданных ими проявленных зёрен в эмульсии гораздо меньше. Далее, из-за их меньшей ионизирующей способности они медленнее, чем α -частица теряют свою энергию, и, следовательно, при одинаковой начальной энергии проходят более длинный путь в эмульсии, прежде чем остановятся. Соотношение между пробегом и энергией для протонов в ильфордовских «Nuclear Research» эмульсиях показано на рис. 5.

Из рис. 5 можно видеть, что пробег протона не пропорционален его энергии. Так, протон с энергией в 5 MeV имеет пробег, превосходящий более чем в десять раз пробег протона в 1 MeV; соответствующие пробеги их равны 173 μ и 14,5 μ . Это обусловлено тем, что ионизация, производимая заряженной частицей на единице пути, уменьшается при увеличении скорости. Например, пробег протона с энергией в 6 MeV равен 234 μ , а протона с энергией в 5 MeV— всего 173 μ . Следовательно, протон с начальной энергией в 6 MeV проходит путь 61 μ , потеряв энергию в 1 MeV, в то время как протон с энергией в 1 MeV останавливается по прохождении пути всего лишь в 14,5 μ длины. Подобный результат верен и для α -частиц (см. рис. 2).

На первый взгляд этот результат может казаться парадоксальным, потому что мы склонны представить себе процесс ионизации как процесс чисто механических столкновений быстрой частицы с попадающими на её пути атомами, а в этом случае «разрушений» будет

тем больше, чем больше скорость ударяющейся частицы. Мы однако видели, что процесс проникновения быстрой частицы в атом можно представить себе по аналогии с быстрой звездой, движущейся через солнечную систему. В таком случае следует ожидать, что планета будет выбита не в результате прямого удара, который вследствие малости размеров соответствующих тел будет иметь место лишь очень редко, а в результате гравитационного притяжения между планетой

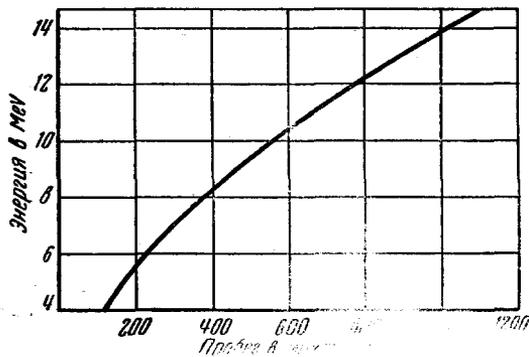
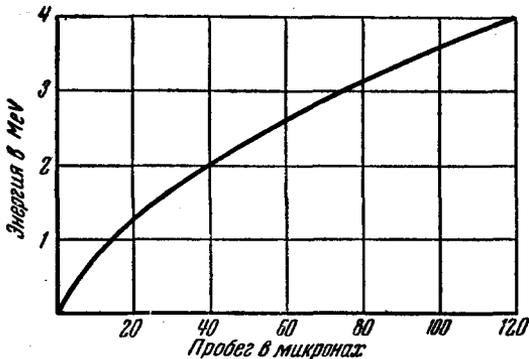


Рис. 5. Кривая пробег-энергия для протонов в ильфордских эмульсиях типа „Nuclear Research“. Следует заметить, что масштаб на обоих графиках различный.

и звездой. Но величина гравитационного притяжения не зависит от скорости взаимодействующих тел, а только от расстояния между ними. Следовательно, если звезда движется очень быстро, то время, в течение которого эта сила действует, будет относительно мало. Движение планеты поэтому мало изменится, и она получит малое количество движения. Подобные рассуждения применимы и к взаимодействию α -частицы или протона с атомом: чем больше скорость частицы, тем меньшее число атомов на её пути подвергается ионизации.

Изменение ионизации вдоль треков α -частиц впервые было изучено У. Г. Брэггом. Полученные результаты могут быть изображены графиком, подобным графику, изображенному на рис. 6 и относящемуся к экспе-

риментам по ионизации воздуха α -частицами. Подобный же результат имеет место и для других веществ. Таким образом, мы должны ожидать, что около конца следа, где скорость частиц меньше, плотность зёрен в эмульсии будет больше. Для α -частиц из радиоактивных веществ с энергиями, меньшими 10 МэВ, этот эффект выражен слабо, так как во всех точках следа ионизация настолько велика, что получается почти «сплошной» след без промежутков

между зёрнами. Для протонов с той же энергией, однако, ионизация гораздо меньше из-за большей скорости протона и меньшего заряда и в результате начальный участок следа более тонкий, чем в случае α -частиц, и иногда можно заметить увеличенную плотность зёрен около конца пробега. Для α -частиц, протонов и дейтонов гораздо больших энергий — от 100 до 400 MeV, — которые в настоящее время могут быть получены с помощью синхроциклотрона, ионизация в начале следов частиц оказывается сильно уменьшённой. Результатом этого является то, что число зёрен на участке пути частицы, где скорость последней была наибольшей, оказывается настолько малым, что в случае протонов и дейтонов невозможно обнаружить траекторию названных частиц. (См. например фотографии XXXII и XXXIII*.)

Для частиц с ещё меньшей массой — мезонов, которые мы рассмотрим ниже в другом параграфе, изменение плотности зёрен в следе оказывается выраженным резче, чем для протонов. Далее, крайним случаем являются электроны, которые имеют малую массу и двигаются настолько быстрее протонов той же энергии, что они не создают заметных следов в любой из эмульсий, имеющих в настоящее время. Возможно, что они создают одно или два зёрна на конце своего пробега, но их трудно идентифицировать с какой-либо степенью достоверности.

Эти выводы могут быть резюмированы следующим образом: частица с зарядом Ze и скоростью v создаёт на единице пути своего пробега ионизацию, которая очень приближённо дается уравнением

$$I \sim (Ze)^2 / v^2.$$

Важно отметить, что ионизация, а следовательно, и потери энергии на единице пути зависят только от заряда и скорости частицы и не зависят от её массы.

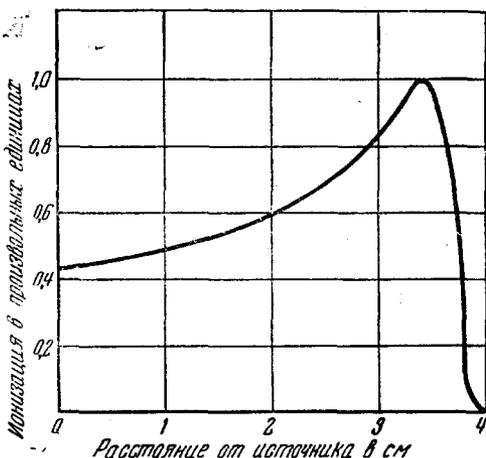


Рис. 6. Кривая зависимости ионизации для параллельного однородного пучка α -частиц от расстояния последних до конца их пробега. Такие кривые называются «кривыми Брегга».

* Эти фотографии будут помещены в следующем выпуске. Редакция.

РАССЕЯНИЕ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ ВСЛЕДСТВИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ С ЯДРАМИ

Фотографии, помещаемые ниже, знакомят нас также с другой важной особенностью следов частиц. На них воспроизведены следы, которые обнаруживают эффекты упругого рассеяния частиц ядрами некоторых из атомов, через которые они проходят. Мы видели, что подобно α -частице быстрый протон или дейтрон проходит через сотни тысяч атомов, прежде чем остановиться в эмульсии. Однако только в редких случаях они проходят настолько близко к ядру, чтобы на них начали действовать силы электростатического отталкивания. Когда же такой случай имеет место, то частица отталкивается, и направление её движения меняется, иногда на большие углы. В этом случае говорят, что частица претерпела упругое рассеяние. Термин «упругое рассеяние» означает, что при столкновении частица не теряет кинетической энергии *).

Исследование рассеяния α -частиц на большие углы, произведённое учениками Резерфорда Гейгером и Мёрсденом методом сцинтилляций, имело решающее значение для развития ядерной теории строения атомов. Например, если бы атом представлял собой шар, равномерно заполненный положительным электричеством, в котором, как изюминки в пуддинге, вкраплены электроны (а именно такого взгляда придерживался ряд физиков в начале нашего века), то объяснить рассеяние быстрых частиц на большие углы было бы невозможно. Результаты экспериментов могут быть объяснены только в предположении, что как основная масса, так и положительный заряд атома сосредоточены в области малых размеров — в ядре.

Гейгер и Мёрсден изучали относительную частоту рассеяния на различные углы α -частиц, проходящих данную толщину вещества, например фольгу из золота **).

*) Термин „упругое“ рассеяние означает, что при взаимодействии двух частиц кинетическая энергия не теряется, и именно это обстоятельство отличает это событие от „неупругого“ рассеяния. В процессе последнего типа ударяемое ядро может быть возбуждено до состояния с более высокой энергией и потом испустить γ -луч и возвратиться в нормальное состояние. По принципу сохранения энергии, данной энергии возбуждённого состояния должно соответствовать эквивалентное количество кинетической энергии, которая исчезает при таких столкновениях.

**) Задача о рассеянии α -частиц на большие углы первоначально была решена методами классической механики подобно по своей форме проблеме о движении планеты вокруг Солнца под действием сил гравитационного притяжения. Такое рассмотрение показывает, что число α -частиц $N(\theta) d\theta$, рассеянных под углами, лежащими между θ и $\theta + d\theta$, даётся уравнением

$$N(\theta)d\theta = \frac{k}{E^2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} \operatorname{cosec}^2 \frac{\theta}{2} d\theta,$$

где E — энергия падающих частиц.

Из графика этой функции можно видеть, что число рассеянных частиц сильно падает при увеличении угла рассеяния.

Отклонения на большие углы происходят гораздо реже, чем рассеяние на малые углы. Было обнаружено, что результаты экспериментов могли быть точно объяснены в предположении, что сила между α -частицей и ядром даётся законом Кулона:

$$\text{сила} = \frac{e_1 e_2}{r^2},$$

где e_1 и e_2 — заряды обеих частиц и r — расстояние между их центрами. Зная скорость и массу α -частицы, можно вычислить то расстояние, на которое частица должна была приблизиться к ядру, чтобы подвергнуться рассеянию на заданный угол; в случае рассеяния ядрами золота на большие углы получается значение порядка $3 \cdot 10^{-12}$ см. Отсюда следует, что сумма радиусов ядра золота и α -частицы должна быть во всяком случае меньше этого значения; в противном случае надо было бы ожидать, что α -частица проникнет в ядро, с которым она столкнулась, а тогда опыты по рассеянию не дали бы результатов, согласующихся с теми, которых следовало бы ожидать в предположении применимости закона Кулона. Из подобных опытов можно сделать вывод, что радиусы многих типов ядер меньше 10^{-12} см, т. е. в десять тысяч раз меньше размера атома.

При прохождении через фотографическую эмульсию протоны чаще испытывают изменения в направлении своего движения, чем α -частицы с той же скоростью, из-за их меньшей массы. Мы увидим в другом параграфе, что ещё более частое рассеяние, которому подвергается мезоны, позволяет отличить их следы от следов протонов. Следует отметить, что для частиц с любой массой вероятность рассеяния больше, когда их энергия мала, и мы поэтому находим, что изгибы в следах чаще встречаются у концов пробега частиц.

Приводимые ниже фотографии VII—X были получены в условиях, когда частицы входили в эмульсию в виде почти параллельного пучка под малым углом наклона к поверхности, причём в каждом случае стрелки указывают соответствующие направления входа.

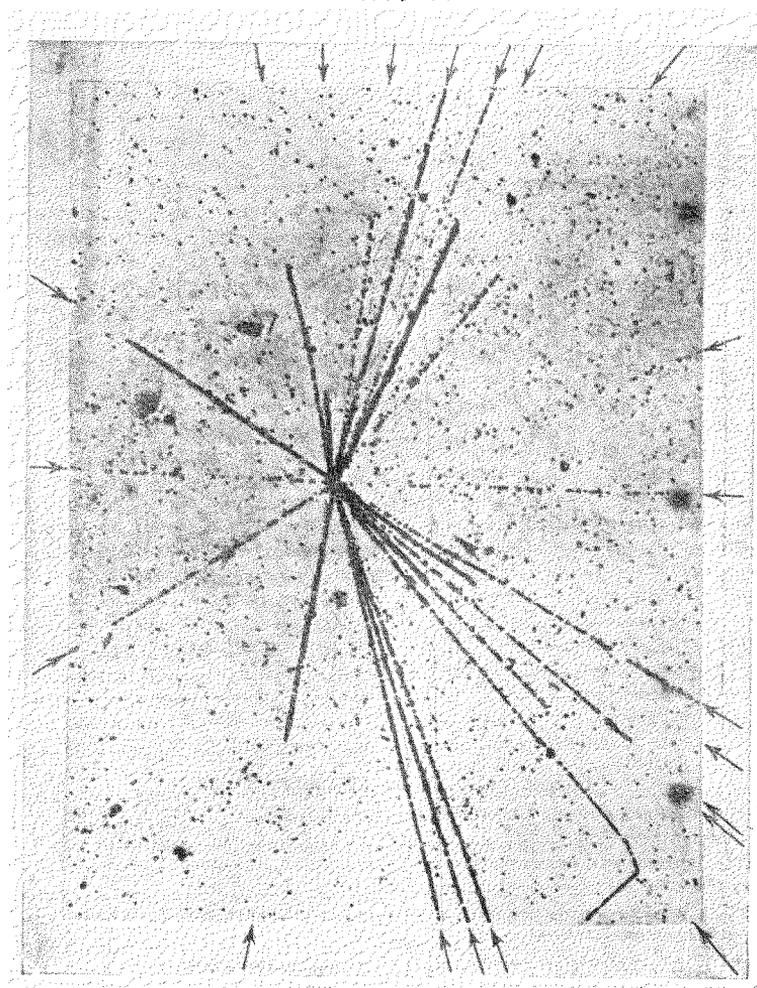
РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ ЛЁГКИМИ ЯДРАМИ

Фотографии VII—X показывают рассеяние протонов тяжёлыми ядрами, при котором ядра отдачи не оставляют заметного следа. Если, однако, быстрый протон сталкивается с ядром лёгкого элемента, то заметная доля его энергии может быть передана последнему, и становится возможным обнаружить следы обеих частиц. Первые три из следующих фотографий дают пример такого крайнего случая, когда массы ударяющего и ударяемого ядер равны. Каждый из разветвлённых следов получился в результате столкновения быстрого протона с другим протоном, находившимся в покое в желатине эмульсии. Не совсем правильно говорить, что протон находился

«в покое» в эмульсии, так как атом водорода, частью которого он является, принимает участие в общем тепловом движении. Однако скорости этого движения при обычных температурах настолько малы по сравнению со скоростями ядерных частиц, что для наших целей ими можно пренебречь.

Простые механические соображения показывают, что в таких случаях после столкновения оба протона должны двигаться во взаимно перпендикулярных направлениях. Эта задача подобна задаче об упругом столкновении бильярдного шара подобным же шаром, находящимся первоначально в покое. Практически столкновение между бильярдными шарами не вполне упругое, так как шары находятся на столе, который оказывает некоторое действие на их движение, но такое рассмотрение с большой точностью применимо к столкновениям между ядрами. Для читателей, знакомых с элементарной динамикой, соответствующий вывод даётся в приложении С. Результаты подобного анализа имеют большое значение при измерении энергии другого типа частиц — нейтронов, о которых речь пойдёт позже. Фотографии XI — XVI показывают случаи упругого столкновения дейтонов и α -частиц с различными лёгкими ядрами.

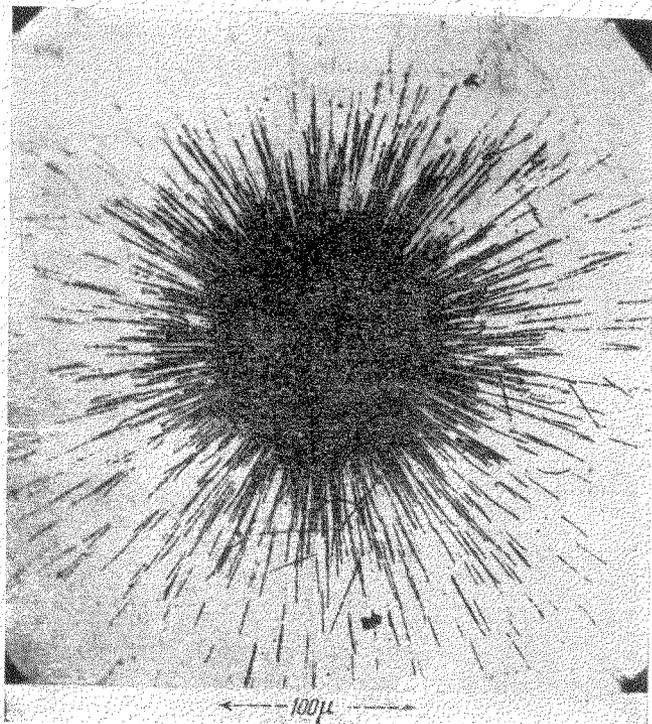
(Окончание в следующем выпуске.)



«Взрывное» расщепление ядра

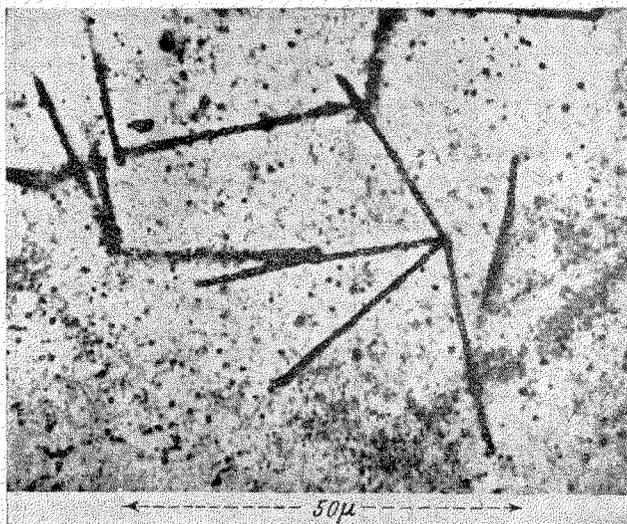
Мозаика микрофотографий «взрывного» расщепления ядра атома серебра, вызванного частицей большой энергии в космических лучах. Следы двадцати пяти осколков могут быть обнаружены под микроскопом, включая следы протонов, α -частиц и более тяжёлых ядер. Многие из следов сильно наклонены к плоскости пластинки и заканчиваются в одной из плоскостей эмульсии.

ФОТОГРАФИЯ I

Следы α -частиц от крупинки радия

Эта фотография была получена после встряхивания над фотопластинкой иголки, на которой было осаждено малое количество радия. Крупинки радиоактивного вещества, которые во многих случаях были слишком малы, чтобы их можно было заметить в микроскопе, были отделены этим методом от иголки и осели на пластинку. Несколько дней спустя пластинка была проявлена и изучена под микроскопом, где было найдено, что она покрыта большим числом «звезд», одна из которых показана здесь. На фотографии видны следы α -частиц, выходящих из малой области в середине звезды. Фотография иллюстрирует большое число частиц, испускаемых количеством радия, которое слишком мало, чтобы быть обнаруженным под микроскопом. Так как за время экспозиции распалось только одно из ста тысяч ядер радия, то фотография даёт наглядное представление об огромном числе атомов, содержащихся даже в ничтожных количествах материи.

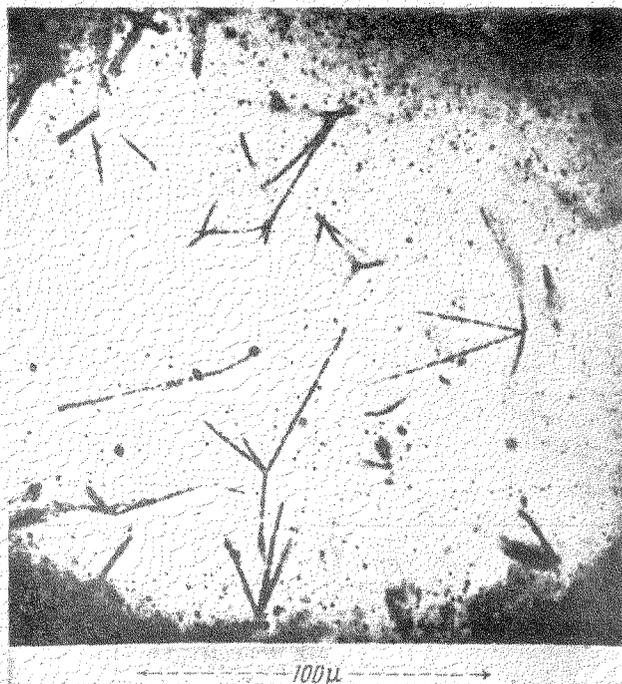
ФОТОГРАФИЯ II



«Звёзды» от радиотория

В этом случае α -частицы проникали в эмульсию не из точки на её поверхности, а само радиоактивное вещество было включено в эмульсию с помощью особой техники обработки последней. Пластинка пропитывалась раствором ацетата тория в воде (1 процент по весу) в течение 10 минут, промывалась в проточной воде в течение 1 минуты и после просушки была оставлена в темноте в течение 3 дней. Затем она опять промывалась и была проявлена. Под микроскопом в подобном образом обработанных пластинках можно заметить большое число «звёзд» от радиотория. Каждая звезда создаётся последовательным распадом первоначального ядра радиотория (см. рис. 3). В некоторых случаях можно заметить, что следы не исходят строго из одной точки. Это является следствием того факта, что при испускании α -частицы остаточное ядро испытывает отдачу, подобно ружью при выстреле. Иногда эти ядра отдачи называют α -частицами. Их энергия и пробег настолько малы, что трудно заметить различие в положении точек, откуда испускаются α -частицы. Чёткая звезда на фотографии была специально выбрана для фотографирования, так как все четыре следа случайно оказались лежащими почти в одной плоскости, параллельной поверхности эмульсии. Измеряя длину отдельных следов звезды, можно определить, какое ядро испустило данную α -частицу, а следовательно, и порядок, в котором они были испущены. На фотографии также видны изображения других следов, не находившихся в фокусе.

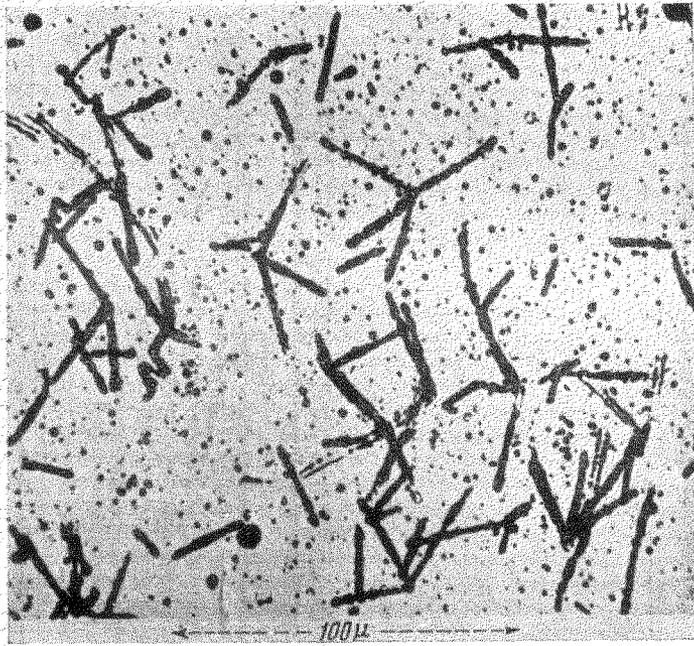
ФОТОГРАФИЯ III



«Звёзды» от радиотория

Звёзды на этой фотографии были сфотографированы С. Р. Бэрчем с помощью сконструированного им зеркального микроскопа. При тех размерах зёрен бромистого серебра, которые использованы в современных эмульсиях, нормальные объективы микроскопа с высокой апертурой позволяют рассматривать большинство деталей следов заряженных частиц; предел точности метода определяется величиной зёрен, а не „разрешающей силой“ микроскопа. Однако изготовление эмульсий с меньшими зёрнами требует оптических инструментов большей разрешающей силы. Преимущество зеркального микроскопа состоит в том, что он позволяет фотографировать при ультрафиолетовом свете, что даёт большее разрешение. Кроме того, его „рабочее расстояние“ гораздо больше, чем в обычных инструментах и, следовательно, он может быть использован для рассмотрения эмульсий с толщиной, значительно большей 300 μ. Длинный след в звезде немного ниже середины фотографии образован частицей из ThC' с пробегом в 8,6 см нормального воздуха.

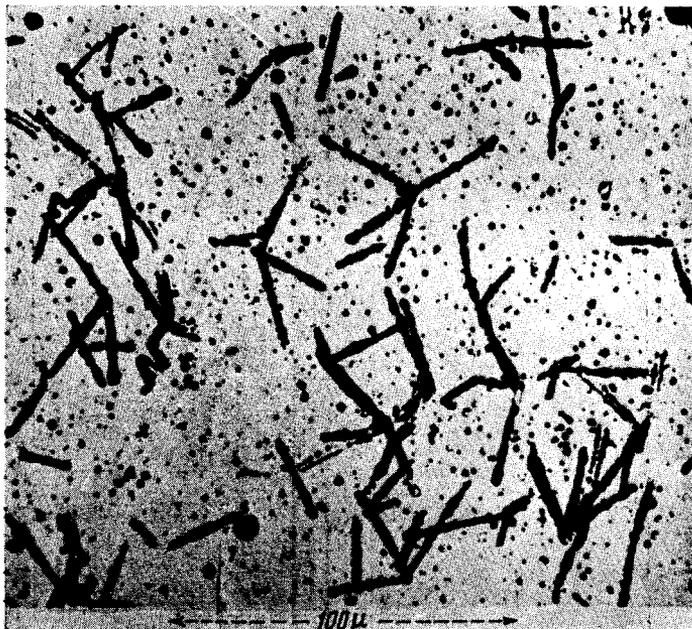
ФОТОГРАФИЯ IV



«Звёзды» от радия

Эта фотография была получена после обработки пластинки в растворе бромида радия с концентрацией в одну сотую миллиграмма на литр. Фокусное расстояние объективов с высокой апертурой ограничено, так что только очень немногие из следов находятся по всей своей длине в фокусе. Длинный тонкий след создан протоном. Последний появился в результате проникновения одной из α -частиц в ядро атома эмульсии и последующего превращения ядра в другое. Расщепления этого типа впервые наблюдались в 1919 г. Резерфордом, который использовал метод сцинтилляций для обнаружения частиц: это были первые успешные случаи искусственного превращения элементов.

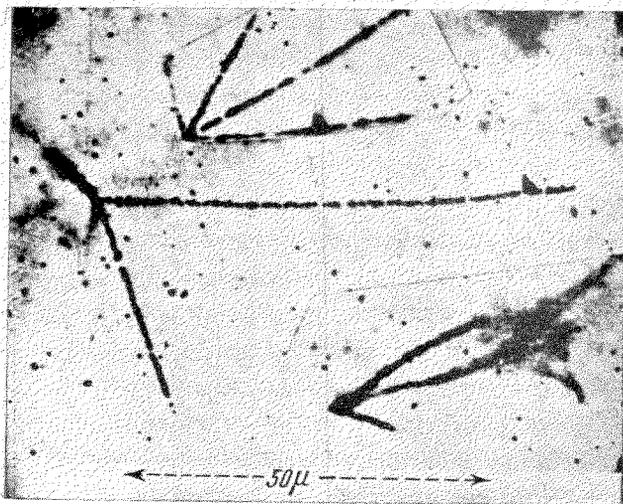
ФОТОГРАФИЯ V



«Звёзды» радиотория после усиления

При обычном фотографировании иногда бывает, что экспозиция слишком мала и негатив получается слабым и недостаточно тёмным в тех местах, где свет был наиболее интенсивный. В таких случаях почернение может быть увеличено путём опускания негатива в подходящий раствор, в котором другой металл осаждается вокруг проявленных зёрен серебра в эмульсии, так что степень почернения увеличивается. Подобный метод может быть использован и для «усиления» следов от заряженных частиц с тем, чтобы делать их более чёткими. Приведённая выше микрофотография показывает получающийся при этом эффект. Для усиления в этом случае были использованы соли урана. Этот процесс может оказаться полезным в тех случаях, когда необходимо считать число следов. С другой стороны, хотя теперь следы лучше видны, они толще, чем в необработанной пластинке и, следовательно, ряд деталей может пропасть.

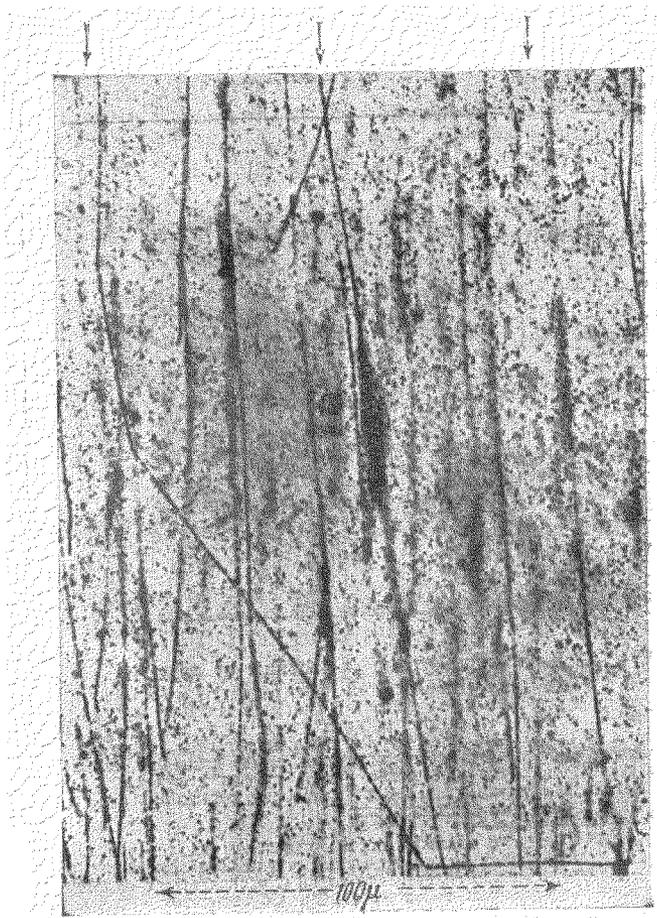
ФОТОГРАФИЯ VI

**Длиннопробежные α -частицы от тория C'**

На фотографии 1 был показан пример α -частицы от тория C' (пробег в нормальном воздухе 8,6 см). В одном из 10 000 случаев α -частица, возникающая в результате распада этого ядра, имеет ненормально большой пробег — 11,6 см*). Горизонтальный след, показанный на данной фотографии, является примером такой длиннопробежной α -частицы. Существует ещё более редкая группа с пробегом в 9,7 см. Фотографии двух обычных звёзд радиотория, снятых при том же увеличении, приведены для сравнения.

*) Это событие является первым указанием на то, что ядра, подобно атомам, обладают ограниченным числом энергетических состояний. Из рис. 3 можно видеть, что торий С распадается с вылетом β -частицы и образованием тория C' (ThC'). Образованное таким образом ядро обычно распадается в состоянии наименьшей энергии (нижнем состоянии) и испускает α -частицу с пробегом 8,6 см воздуха. Однако ядро ThC' может также образоваться в возбуждённом состоянии C' энергией 1,8 MeV. α -частица, испущенная таким возбуждённым ядром, обладает повышенной энергией и, следовательно, и большим пробегом. Ещё более редкая группа частиц с пробегом в 9,6 см воздуха соответствует распаду ThC' в другом возбуждённом состоянии с энергией 0,7 MeV.

ФОТОГРАФИЯ VII

**Упругое рассеяние протона тяжёлыми ядрами**

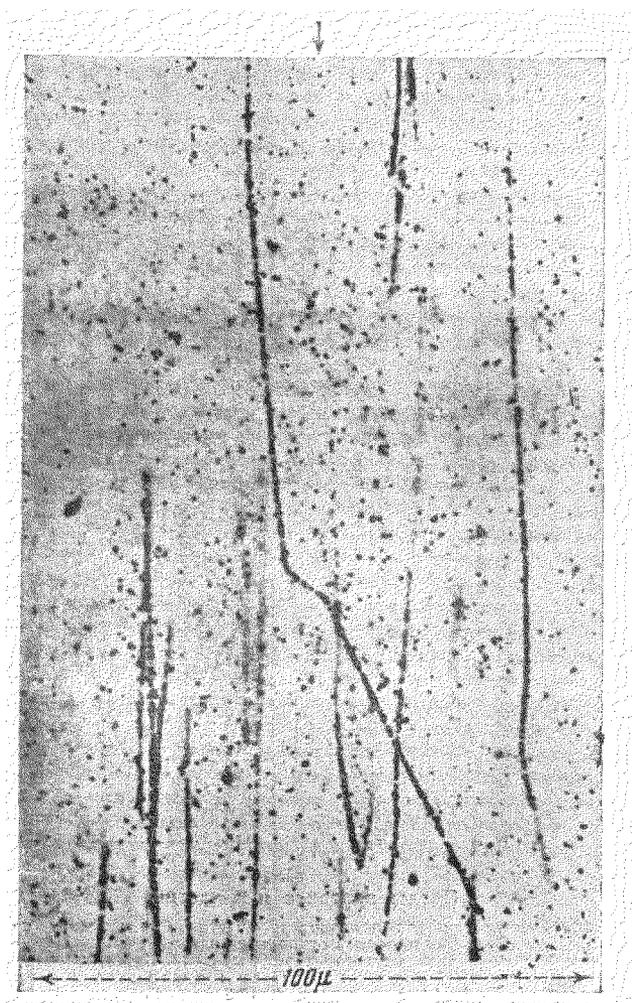
Следы протонов в ильфордовской эмульсии „Nuclear Research“ типа В I. Можно усмотреть следы многих протонов, один из которых был трижды рассеян в столкновениях с ядрами атомов эмульсии. Эта и следующая фотография показывают два очень редких события такого рода, но следы всех протонов обнаруживают отклонения на малые углы при прохождении их через эмульсию. Ядра, с которыми столкнулись частицы, испытывают некоторую отдачу, но из-за большой массы они получают только малую долю кинетической энергии протона. Поэтому их след слишком мал, чтобы его можно было заметить.

ФОТОГРАФИЯ VIII

**Следы протонов и α -частиц**

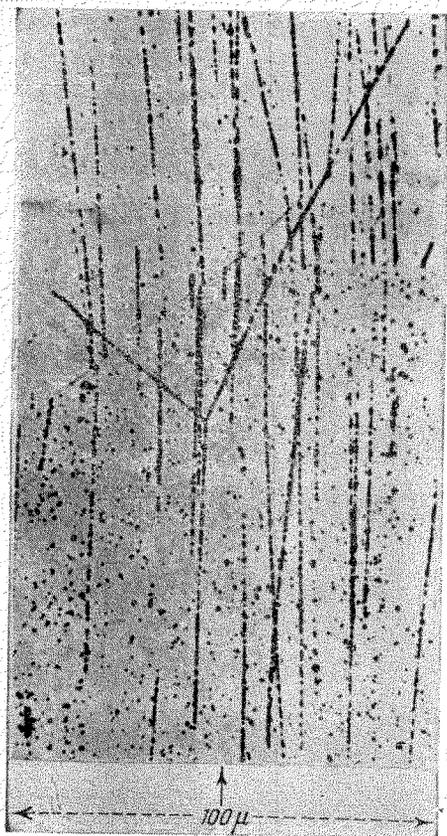
Смешанный поток протонов и α -частиц был направлен на эмульсию. Один из протонов отклонился на большой угол в результате столкновения с ядром атома эмульсии. Короткие следы в верхней части фотографии обусловлены α -частицами. Можно заметить, что в этих следах плотность зёрен больше, чем в следах протона. Часть следов α -частиц также обнаруживает искривления, вызванные столкновениями с ядрами.

ФОТОГРАФИЯ IX

**Двойное рассеяние протона**

Редкий случай, когда протон дважды рассеивался при своём прохождении через эмульсию.

ФОТОГРАФИЯ XIV

**Рассеяние дейтона протоном**

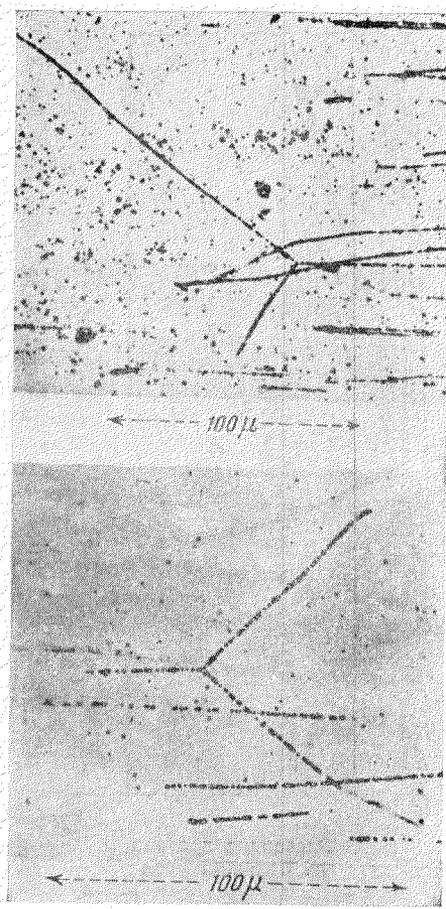
Следы дейтонов в фотографической эмульсии. Один из дейтонов столкнулся с протоном и сообщил ему скорость. Анализ этого случая, произведённый в приложении, показывает, что при таком столкновении дейтон не может отклониться на угол, больший 30° . Мы поэтому вправе предположить, что след дейтона находится справа, где угол отклонения равняется $23,5^\circ$, а протон, след которого слева, выбрасывается под углом $52,5^\circ$. Чтобы следы были в фокусе по всей длине своего пути, пришлось сделать две фотографии.

ФОТОГРАФИЯ XI

**Столкновение протона с протоном**

Рассеяние протона, находившегося около конца своего пробега, другим протоном. В этом случае после столкновения каждый из следов образует угол почти в 45° с первоначальным направлением движения первичного протона, и энергия примерно поровну делится между обеими частицами. Можно заметить, что у конца своих пробегов следы протонов почти сплошные. Более короткие следы обусловлены α -частицами.

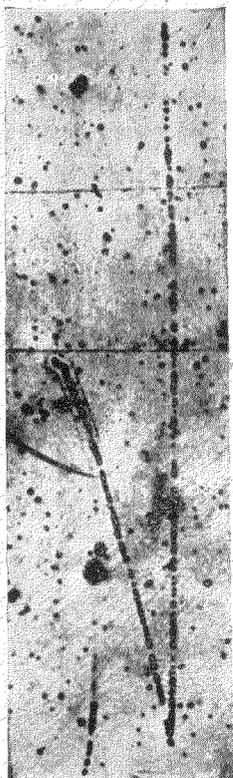
ФОТОГРАФИИ XII и XIII



**Другие примеры рассеяния протонов
протонами**

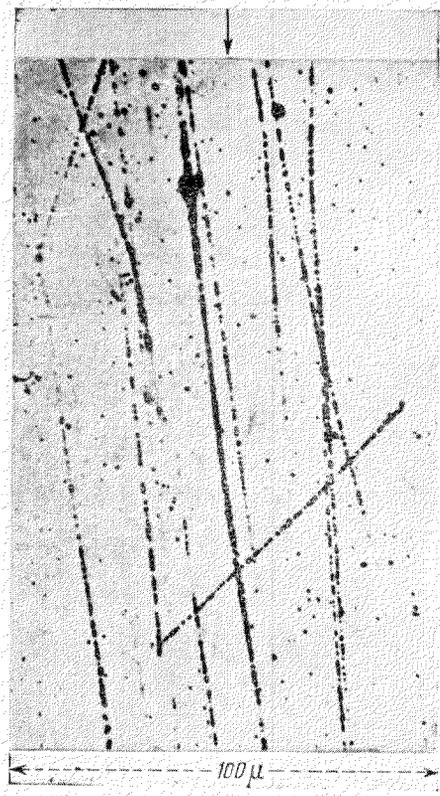
На верхней фотографии можно заметить, что протон, рассеянный под большим углом, имеет меньший пробег, чем второй протон (см. приложение С).

ФОТОГРАФИЯ X

**Рассеяние протона
на большой угол**

Очень редкий случай рассеяния протона под углом в 160° , вероятно, в результате столкновения с ядром атома серебра или брома. На фотографии видно, что вероятность рассеяния увеличивается около конца пробега. Этот факт, а также увеличенная плотность зёрен в следе около конца пробега позволяет определить направление движения частицы.

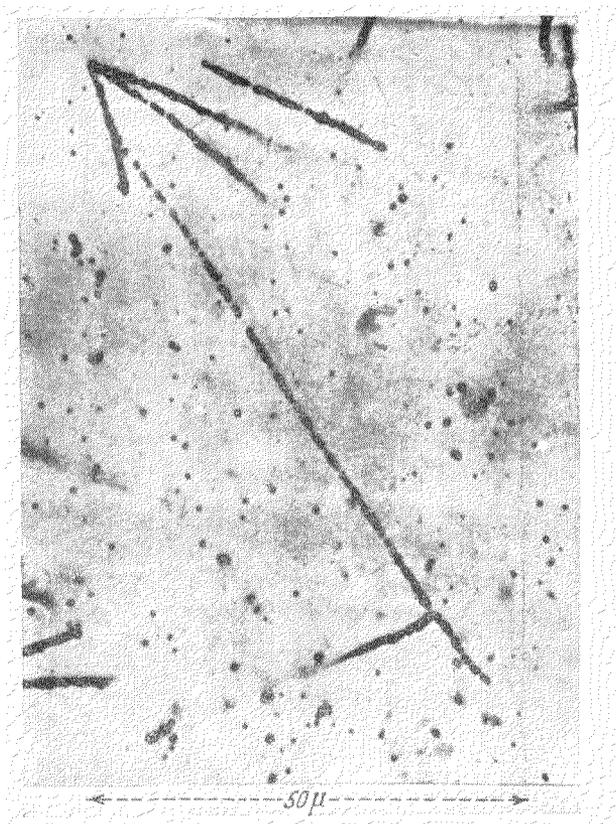
ФОТОГРАФИЯ XV



**Рассеяние быстрого дейтона
ядром углерода или кислорода**

Упругое столкновение дейтона с лёгким ядром в эмульсии. Невозможно определить, принадлежало ли это ядро углероду, кислороду или азоту. В рассматриваемом случае отношение масс обеих взаимодействующих частиц было таким, что ядро отдачи получило заметную долю энергии отдающего дейтона и след отдачи, хотя и короткий, ясно виден на фотографии.

ФОТОГРАФИЯ XVI

**Столкновение α -частицы с протоном**

α -частица от звезды радиотория, созданной в левом верхнем углу фотографии, столкнулась с протоном, отбросив последний. Видно, что след протона в непосредственной близости от точки столкновения более тонкий, чем след α -частицы, и становится более плотным около конца пробега. Пробег другой α -частицы оканчивается вблизи следа протона, но эти два события надо считать независимыми друг от друга. Анализ этого случая даётся в приложении Е.