



### Варламов Сергей Дмитриевич

*Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики специализированного учебно-научного центра МГУ им. М.В. Ломоносова. Член жюри Московской городской и Всероссийской олимпиад школьников по физике.*

## Золото Резерфорда

В любой науке имеются ключевые моменты, которые обуславливают дальнейшее её развитие в определённом направлении. В физике эксперименты Резерфорда, в которых была установлена структура атомов, являются одним из краеугольных камней для построения теории вещества. В статье рассматриваются детали физической картины взаимодействия атомов с альфа-частицами, которые обычно опускаются при рассмотрении этой темы в школьном курсе физики. Если импульс альфа-частицы сильно изменяется, то изменяется и импульс соответствующего атома. Полученная атомом кинетическая энергия может быть настолько большой, что атом срывается со своего места в кристаллической решётке. В статье обсуждается судьба таких атомов.

### Ядра в атомах

Один из известнейших учеников и коллег Эрнеста Резерфорда Петр Леонидович Капица предложил схематично делить физиков на два типа исследователей.

«Один – это тип скорее немецкой школы, когда экспериментатор исходит из известных теоретических предположений и старается их проверить на опыте. Другой же тип учёного, скорее английской школы, исходит не из теории, а из самого явления – изучает его и смотрит, может ли это явление быть объяснено существующими теориями. Тут изучение явления, его анализ являются основным мотивом для экспериментатора.

И если такое деление возможно, Резерфорд был ярким представителем этого второго направления в экспериментальной физике. Главное для Резерфорда было – разобраться, понять явление. Эксперимент должен быть так построен, чтобы было ясно, в чём состоит явление».

Когда Резерфорд с учениками Г. Гейгером и Э. Марсденом в 1911 году начал изучать рассеяние  $\alpha$ -частиц (альфа-частиц) при их движении в веществе, у него не было заранее выдвинутого предположения, что будут обнаружены отклонения частиц на большие углы. Исследовалось само явление рассеяния, которое могло

дать информацию о распределении зарядов и массы внутри атомов. Поскольку в воздухе длина пробега  $\alpha$ -частиц составляла около 5 см и наблюдалось рассеяние частиц на небольшие углы, то предполагалось, что то же самое будет и в конденсированных веществах. В конденсированных веществах концентрация атомов в тысячи раз больше, поэтому, чтобы  $\alpha$ -частицы могли пройти через вещество, нужно было использовать очень тонкие пластины. Чтобы  $\alpha$ -частицы могли быть замечены после небольшого дополнительного пробега в воздухе, толщина пластины должна быть значительно меньше длины пробега в веществе пластины.

В первых экспериментах изучалось рассеяние альфа-частиц ( $\alpha$ -частиц) в золоте, которое было выбрано из нескольких соображений. Во-первых, нужно было получить однородную тонкую пластину из одинаковых атомов без примеси атомов других сортов. То есть вещество должно быть легко обрабатываемым механически. Во-вторых, эта тонкая пластинка должна быть химически устойчива (не должна окисляться на воздухе). В-третьих, это вещество не должно быть поликристаллическим (как, например, железо), чтобы пластинка из такого вещества имела одинаковые свойства по всей её поверхности. Золото подходило по всем перечисленным критериям, его легко было получить в химически чистом виде, оно «раскатывалось» в тонкую полупрозрачную пластинку с толщиной меньше 1 мкм.

Альфа-частицы получались из вещества, содержащего радий  $^{226}\text{Ra}$  (период полураспада  $T=1600$  лет, энергия  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha=4,8$  МэВ). Активность использованного источника была равна примерно  $13 \cdot 10^4$  беккерель

(число распадов в секунду) или 0,13 резерфорд (один резерфорд =  $10^6$  беккерель). Это соответствова-



ло массе радия в источнике примерно равной  $3,5 \cdot 10^{-9}$  кг. Такой источник с радиом имел совсем малые размеры, поэтому его можно считать точечным источником  $\alpha$ -частиц. Из контейнера, в котором находился источник,  $\alpha$ -частицы вылетали сквозь небольшое отверстие и попадали на пластину из золота. За 10 секунд через такое отверстие вылетало в среднем 3 частицы.

Проводя эксперимент, физики сидели в темноте (в лаборатории Резерфорда это было подвальное помещение) и регистрировали световые вспышки, которые возникали на экранах, покрытых сернистым цинком, то есть записывали значения углов, на которые отклонились  $\alpha$ -частицы после падения на золотую пластину. В золоте длина пробега равна примерно  $1,7 \cdot 10^{-5}$  м (по современным справочным данным для  $\alpha$ -частиц с энергий 4,8 МэВ). Пластины из золота в экспериментах Резерфорда имели толщину примерно в 100 раз меньшую, чем  $1,7 \cdot 10^{-5}$  м. Большинство  $\alpha$ -частиц поэтому пролетало сквозь пластину. Для них (для большинства частиц) наблюдались отклонения от первоначального направления движения на малые углы порядка 0,5 граду-

са. При длине пробега в воздухе 5 см и размерах установки явно меньших такой длины отклонения большинства частиц составляли примерно 0,4–0,5 мм. Поэтому экспериментаторы рассматривали экраны с использованием лупы с большим увеличением.

Если предположить, что вспышки регистрировались каждые 3–5 секунд (более частые вспышки экспериментатору просто не успеть зарегистрировать), то общее количество вспышек, зарегистрированных за 10 часов наблюдений, могло составлять около 9 тысяч. Гейгер говорил, что за время проведения экспериментов ему пришлось зарегистрировать более миллиона вспышек.



Отклонения частиц на углы большие  $90^\circ$  были обнаружены случайно, и затем экспериментальная установка была модифицирована так, чтобы можно было изучать именно эти редкие события. Оказалось, что для изготовленных из золота пластин, использовавшихся в первых экспериментах, примерно одна из нескольких тысяч  $\alpha$ -частиц отклоняется от своего первоначального направления движения на угол, больший  $150$  градусов. Если направлять  $\alpha$ -частицы на стопку из нескольких одинаковых пластин золота (или на одну более толстую пластину), то число частиц, отклонявшихся на большие углы, увеличивалось в срав-

нении с числом частиц, отклонявшихся на тот же угол от одной (тонкой) пластины. Это говорило о том, что  $\alpha$ -частицы отражаются не от поверхности пластин, а отражаются где-то внутри них.

В качестве материала для изготовления фольги Резерфорд с коллегами использовали не только золото, но и другие вещества. Были у них пластины из олова, платины, серебра, железа (поликристалличность железа в таком эксперименте несущественна), алюминия, других металлов. Оказалось, что при одинаковом количестве атомов, приходящихся на единицу площади пластины, на большие углы отражалось тем больше  $\alpha$ -частиц, чем больше была масса отдельного атома вещества, из которого сделана пластина.

Анализ распределения частиц по большим углам рассеяния позволил установить характер зависимости сил взаимодействия  $\alpha$ -частиц и рассеивающих эти частицы центров от расстояния между ними. Оказалось, что силы взаимодействия подчиняются закону Кулона: они обратно пропорциональны квадрату расстояния между частицами, если частицы считать точечными. Только после многочисленных проверочных экспериментов и тщательных вычислений в 1911 году Резерфорд опубликовал результаты, из которых сделал вывод о наличии в атомах положительно заряженных ядер, в которых сосредоточена почти вся масса атома. Таким образом, из аккуратно поставленного эксперимента был получен «ответ природы» на вопрос экспериментатора о распределении массы и заряда в атомах.

В экспериментах Резерфорда с золотом не было обнаружено отклонений от кулоновского закона взаимодействия. Центры, рассеивающие  $\alpha$ -частицы в золоте, имели размеры

меньшие  $5 \cdot 10^{-14}$  м. Поэтому в экспериментах с золотом не были обнаружены ядерные реакции. Только через несколько лет в 1918 году, используя всё те же  $\alpha$ -частицы, Резерфорд от-

крыл ядерные реакции, которые возникали при взаимодействии  $\alpha$ -частиц с ядрами атомов азота (но это другая история, и о ней нужно рассказывать отдельно и очень подробно).

### Судьба атома золота после удара $\alpha$ -частицы

Если считать, что с судьбами  $\alpha$ -частиц мы разобрались, то можно обратить внимание и на поведение атомов золота. Скорости  $\alpha$ -частиц, вылетающих из радиоактивного источника, настолько велики в сравнении с тепловыми скоростями движения ядер золота и других металлов, что их ядра можно считать до взаимодействия с налетающими альфа-частицами покоившимися. При упругом «лобовом столкновении» ядро с массой  $M_\alpha$ , значительно большей массы

нена по порядку величины отношению: (молярная теплота испарения + молярная теплота плавления)/число Авогадро. Для золота эта величина равна примерно 3,5 эВ, что значительно меньше энергии, которую приобретает ядро после столкновения с  $\alpha$ -частицей.

Если пересест в систему отсчёта, движущуюся со скоростью этого «сорвавшегося с места» ядра, то кинетическая энергия электронов с массами  $m_e$ , которые можно считать «оставшимися» на месте вследствие инерции, будет равна примерно

$$\frac{4E_\alpha m_\alpha m_e}{M_\alpha^2}.$$

Эта величина составляет для рассматриваемого эксперимента с золотом меньше 1 эВ. Энергия связи электронов в атоме золота гораздо больше 1 эВ, то есть электроны не отрываются от «своего» ядра при таком событии, а отправляются в путешествие вместе с ним.

При такой большой кинетической энергии (0,39 МэВ) ядро золота вместе со своими электронами, то есть атом золота целиком, «срывается с места» и, прорываясь сквозь другие атомы, постепенно теряет свою энергию. Здесь ситуация почти полностью соответствует движению энергичных  $\alpha$ -частиц сквозь вещество. Для них серьёзные препятствия (ядра атомов золота) расположены в пространстве редко: на расстоянии друг от друга, равном диаметру атомов золота  $D = 2,5 \cdot 10^{-10}$  м. Поэтому только ма-



$m_\alpha$   $\alpha$ -частицы, приобретает кинетическую энергию, примерно равную 
$$\frac{4E_\alpha m_\alpha}{M_\alpha}.$$

Например, для ядер золота эта величина составляет примерно 0,39 МэВ, а для более лёгких ядер других элементов эта величина ещё больше.

Энергия химической связи одного атома в кристаллической структуре металла пластины может быть оце-

лая доля энергичных частиц испытывает отклонения на углы, большие, например,  $30^\circ$ . Чем больше энергия налетающей частицы, тем меньше для неё размеры препятствий (при том же значении угла отклонения). Аналогичное положение и для летящего сквозь вещество атома золота.

Если предположить, что скорость отдачи ядра золота направлена в точности на ядро соседнего атома, то для начальной энергии  $0,39$  МэВ расстояние наибольшего сближения двух ядер атомов золота равно примерно  $4 \cdot 10^{-12}$  м  $\ll$   $2,5 \cdot 10^{-10}$  м. Это характерный размер препятствия, которое может существенно изменить направление движения частицы с заданной энергией. Предположим, что ядро с такой энергией летит в произвольном направлении и не теряет своей энергии, прорываясь сквозь встречающиеся на пути атомы. Средняя длина свободного пробега (от одного препятствия до другого) составит в этом предположении около  $1000 D$ . Эта длина для рассматриваемого случая равна примерно  $250$  нм и совпадает по порядку величины с толщиной золотой пластинки  $< 1$  мкм.

### Неожиданное и удивительное иногда встречается

Однажды летом, гуляя по парку в Сочи, я боковым зрением увидел между деревьями, как вдалеке над морем в воздухе пролетел человек с поднятыми вверх руками. Увиденное меня очень удивило, и я направился посмотреть, что это было. Пока я шёл, пролетело еще несколько человек. Только подойдя ближе, я разглядел, что они съезжают над морем вдоль натянутого троса и с удовольствием плюхаются с высоты в воду. Удивление прошло, но впечатление о нём осталось навсегда.

Так что часть атомов золота, испытывавших столкновения с  $\alpha$ -частицами близкие к «лобовым», очевидно, вылетает за пределы пластинки. Оказавшись вне пластинки в воздухе, атом золота может либо вернуться на пластинку, либо покинуть её навсегда.

Осталось неясным, насколько будет велик пробег сорвавшегося с места атома золота (в результате близкого к лобовому столкновения с  $\alpha$ -частицей), если он не испытает ни одного «серьёзного» столкновения с другими атомами золота, и растратит всю свою энергию на возбуждение и ионизацию атомов, мимо которых он пролетает? Пусть этот вопрос останется пока без ответа. Должна же сохраняться тайна, которую читатели захотели бы раскрыть самостоятельно! И, кроме того, у читателей должно возникнуть и остаться совершенно правильное ощущение, что ещё не все открытия совершены, что каждому поколению физиков было и всегда будет чем заняться! Нужно быть внимательным и по-хорошему любопытным, чтобы самому открыть для себя интересную область исследований.

Эксперименты, поставленные Резерфордом, удивительны. Они входят в золотой фонд классических физических экспериментов.

