

ЭФФЕКТИВНОЕ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ГАЗОВЫХ МОЛЕКУЛ ПО ОТНОШЕНИЮ К МЕДЛЕННЫМ ЭЛЕКТРОНАМ И ИОНАМ *

К. Рамзауэр и Р. Коллат, Берлин—Рейникендорф

II. Ионы **

§ 28. Предварительные замечания. До сих пор, в части I, мы рассматривали взаимодействия между молекулами и электронами. Сейчас мы дадим обзор того, что известно о поведении молекул по отношению к ионам различной массы.

Говоря об эффективном поперечном сечении (э. п. с.) газовых молекул по отношению к ионам, мы имеем в виду поперечное сечение, получаемое в результате построения окружности с радиусом равным сумме эффективных радиусов обеих сталкивающихся частиц, как это было уже указано нами в конце § 5 этой статьи. Новое, по сравнению с рассмотренным выше случаем электронов, возникает в связи с тем, что между молекулами и ионами оказывается возможен совершенно особый вид взаимодействия: обмен заряда.

Этот процесс состоит в том, что ион отдает свой заряд нейтральной молекуле, становящейся в результате этого ионом, обладающим молекулярной скоростью, в то время как бывший ион продолжает свой путь в виде быстрой нейтральной частицы. Обмен заряда играет особенно большую роль при наличии ионов с большой энергией.

Как уже указывалось в историческом обзоре (§ 2), из весьма большого числа ионов исследованию подверглись лишь очень немногие. Ввиду этого нам казалось целесообразным рассмотреть весь материал не по методам измерения, результатам опытов, характеру взаимодействий и т. п., а по группам ионов, и разделить, таким образом, материал на три большие части. Внутри каждой из этих частей соответствующие работы располагаются просто в хронологическом порядке. Этот способ подразделения казался нам особенно удобным потому, что методы исследования в различных случаях сильно отличались друг от друга, вследствие чего для понимания

* Handb. d. Phys. Изд. II, т. XXII ч. II, стр. 296—322, перевод с немецкого Н. Хлебникова.

** Окончание, см. Успехи физич. наук XIV, 1934, и XV, 1935.

многих работ необходимо особое описание применяемой методики. Упомянутые выше три группы работ относятся к медленным: 1) водородным ионам, 2) ионам щелочных металлов, 3) прочим ионам.

Необходимо отметить, что для рассматриваемой нами области скоростей до сих пор нет измерений, относящихся к отрицательным ионам.

§ 29. Поведение газовых молекул в отношении медленных ионов водорода. Первым исследовавшим длину свободного пути водородных ионов в водороде, был Айх¹, схема опытов которого изображена на рис. 1.

Нить накала F находится при одном потенциале с сеткой N_1 и имеет потенциал приблизительно на 20 V ниже потенциала

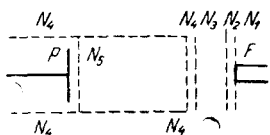


Рис. 1. Установка Айха.

сетки N_2 . Таким образом вылетевшие из нити электроны попадают в пространство между сетками N_1 и N_2 со скоростями около 20 V, ионизируют и диссоциируют находящиеся там водородные молекулы (вся установка наполнена водородом под давлением около 0,04 мм Hg). Получившиеся в результате этого положительные ионы выводятся при помощи слабого ускоряющего поля за сетку N_3 и между N_3 и N_4 ускоряются до 25 V. Эти 25 V ускоряющего напряжения достаточны, чтобы отбросить от N_4 обратно все электроны, ионы же продолжают двигаться дальше в свободном от поля пространстве между N_4 и N_5 и частично достигают улавливающей пластинки P . Эта пластинка имеет по отношению к N_5 настолько высокий положительный потенциал, что достигнуть ее могут только ионы, не испытавшие существенных изменений скорости и направления. P и N_5 могут перемещаться так, что расстояние между ними и N_4 меняется. Измерения состоят в определении величины ионного тока на P при различных расстояниях между P и N_4 . На основании изменения силы этого ионного тока с изменением расстояния, если, кроме того, известно еще давление газа, может быть вычислено взаимное э. п. с. молекулы водорода и иона. Постоянство эмиссии электронов из F проверяется во время измерений.

Для э. п. с. получается величина, равная $20,6 \text{ см}^2/\text{см}^3$, т. е. приблизительно равная поперечному сечению молекулы водорода, вычисленному согласно кинетической теории газов. Айх заключил из этого, что ионы, с которыми он работал, представляли собою по преимуществу ионы одноатомного водорода. Мы увидим ниже, что это заключение неверно, так как в описанных опытах могли точно так же учитываться H_2^+ -ионы и H_3^+ -ионы (см. ниже работу Гольцера).

В то время как в способе Айха невозможно было разделить друг от друга различные ионы водорода, Демпстер² осуществил

это разделение при помощи магнитного поля. Установка Демпстера схематически изображена на рис. 2. Образование ионов осуществляется двумя различными способами в части прибора, лежащей над диафрагмой 1. Один из способов — тот же, что и у Айха; второй разработанный Демпстером в связи с его исследованием изотопов, состоит в следующем: электроны из нити накала F , находящейся под отрицательным потенциалом относительно остальных частей прибора, бомбардируют пластинку Li из металлического лития, производя при этом положительные ионы, ускоряемые затем в направлении диафрагмы 1. Преимущество этого второго способа состоит в том, что область образования ионов резко ограничена, чем в случае ионизации газа, а также в том, что им удастся получить больший процент протонов.

Полученные ионы приобретают между 1 и 2 требуемую скорость и, пролетев 2, попадают в магнитное поле, перпендикулярное плоскости чертежа, которое заставляет их двигаться по окружности. При надлежащем выборе напряженности поля они пролетают сквозь диафрагму 3 и попадают на улавливающую пластинку P , соединенную с электрометром E^* . Исследуемый газ непрерывно втекает в прибор около середины полукруга и выкачивается через трубку, расположенную около источника протонов; таким образом создается некоторое подвижное равновесие. Демпстер исследовал гелий при скоростях ионов от 14 до 1000 V.

Демпстер пользовался уже описанным нами (§ 10) способом снятия кривых распределения по скоростям при помощи магнитного поля. Отличие этого случая от описанного выше состоит в том, что здесь помимо скорости переменной величиной является отношение $\frac{e}{m}$, так как, вообще говоря, образуются ионы нескольких сортов. Поддерживая скорость ионов постоянной, Демпстер изменял напряженность магнитного поля и измерял заряд пластинки, соответствующий каждому значению напряженности. Откладывая по оси абсцисс напряженность поля, а по оси ординат — заряд пластинки P , он получил для давления в $77 \cdot 10^{-4}$ мм Hg кривую, показанную на рис. 3а. Происхождение трех главных максимумов этой кривой выясняется весьма легко при помощи известного соотношения

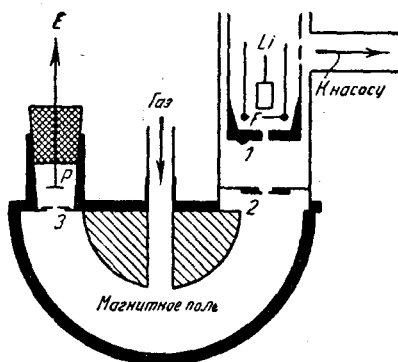


Рис. 2. Установка Демпстера

* В действительности для получения большей точности измерений Демпстер пользовался компенсационным способом измерения, на описание которого мы останавливаться не будем.

между напряженностью магнитного поля и корнем квадратным из массы и контрольного опыта, позволяющего установить принадлежность одного из максимумов ионам гелия. Этот опыт может состоять, например, в снятии кривой при полном отсутствии в установке гелия.

Для того, чтобы исследовать влияние газа на ионы, Демпстер изменял давление гелия в установке, переходя к все более и более высоким давлениям (рис. 3*b—d*). При этом обнаруживается следующее*. Ионы He^+ частично поглощаются уже при небольших, H_2^+ -ионы — при несколько большем повышении давления, в то время как максимум, соответствующий H^+ -ионам, сохраняется вплоть до наивысших исследованных давлений. Расширение кривой указывает на то, что действие газа на протоны состоит, главным образом, в рассеянии их под малыми углами. Эти опыты Демпстера имеют качественный характер, но с несомненностью устанавливают, что для протонов атомы гелия в исследованной области скоростей (800—900 V) обладают весьма малым э. п. с.

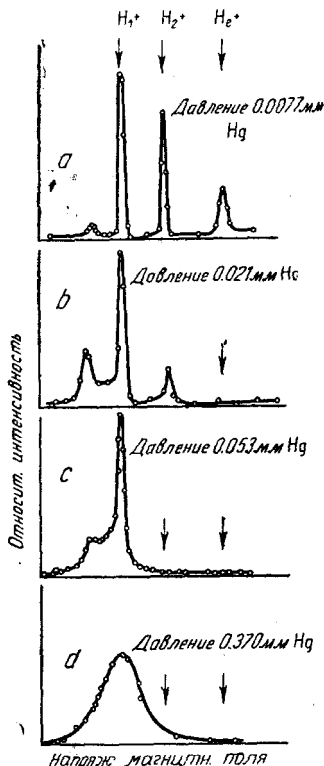


Рис. 3. Прозрачность гелия для протонов (по Демпстеру)

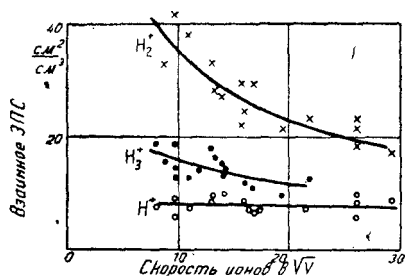


Рис. 4. Э. п. с. водорода по отношению к H^+ , H_2^+ , H_3^+ (по Гольцеру).

Гольцер³ определял взаимное поперечное сечение молекул водорода по отношению к H^+ -, H_2^+ и H_3^+ -ионам. Он пользовался аппаратурой, подобной аппаратуре Демпстера, и вел измерения с одной ловушкой (способ Броде, см. § 8). Из его результатов (рис. 4) особенно замечательны следующие: а) взаимное поперечное сечение молекул водорода и H^+ -ионов почти постоянно в области от 80 до 800 V; б) наименьшее сечение молекулы водорода

* По вопросу о первом максимуме, приписываемом Демпстером добавочной диссоциации H_2^+ , см. работу Демпстера.

по отношению к H_2 -ионам значительно больше, чем по отношению к H_3 -ионам.

Для того чтобы иметь возможность судить о характере взаимодействий, Гольцер сравнивал кривые распределения по скоростям (получались при помощи магнитного поля) при различных давлениях и вывел на этом основании следующие заключения:

H_3^+ -ионы — передача заряда мало вероятна;
основное явление — рассеяние;

H_2^+ -ионы — передача заряда играет существенную роль; быть может, существует рассеяние под большими углами;

H^+ -ионы — передача заряда мало вероятна;
основное явление — рассеяние.

Рамзауэр, Коллат и Лилиенталь⁴ исследовали э. п. с. для различных газов по отношению к протонам в области скоростей между 30 и 2500 V по способу, существенно отличному от описанных в предыдущих работах (рис. 5). Протоны получались по методу Демпстера бомбардировкой литиевой поверхности электронами из нити накала F . Затем они отклонялись на 90° при помощи магнитного поля внутри магнита M , благодаря чему пучок делался однородным. Покинув магнит, протоны в виде прямолинейного пучка поступали в измерительное приспособление, состоявшее, как и в случае электронов, из двух ловушек V и H . Вычисление

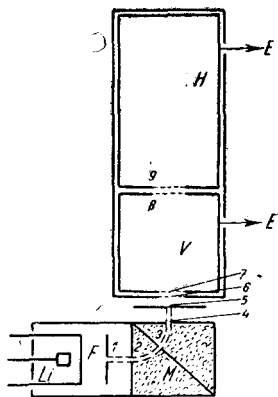


Рис. 5. Установка Рамзауэра, Коллата и Лилиенталья.

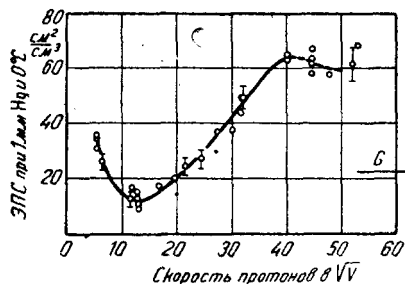


Рис. 6. Э. п. с. атомов аргона по отношению к протонам (по Рамзауэру, Коллату и Лилиенталю).

э. п. с. осуществлялось по уравнению (4), § 7, на основании измерений интенсивности при ловушках, соединенных вместе, и при одной только ловушке H . Обратные поля на ловушки не накладывались. Поэтому протоны, претерпевшие изменение скорости без одновременного изменения направления, регистрировались как вообще не подвергшиеся воздействию. Были исследованы He, Ne, Ar, H_2 и N_2 .

В качестве примера результатов на рис. 6 приведена кривая для аргона. По оси абсцисс нанесена скорость протонов в $\sqrt{V}$, по оси ординат — взаимное э. п. с. в $см^2 см^3$ при 1 мм Hg и $0^\circ C$. С правой стороны чертежа черта, отмеченная буквой G , указывает величину газкинетического поперечного сечения молекулы аргона.

По мере увеличения скорости протонов э. п. с. сначала быстро спадает, достигая приблизительно половины газкинетического сечения, и затем снова возрастает примерно до трехкратной по сравнению с газкинетическим величины. Измерения, относящиеся к скоростям больше 40 V, не могут быть рассматриваемы как количественные (отмечено пунктиром), потому что эта область находится на границе применимости установки.

Рис. 7 дает представление о результатах, полученных для всех 5 исследованных газов. Во всех случаях наблюдается подъем кривой после минимума (о кажущемся отклонении для гелия см. ниже работу Допеля). Между положениями минимумов и величинами ионизационных потенциалов для всех газов существует, повидимому, связь; физический смысл этого пока еще неясен. Замечательной является чрезвычайно малая величина э. п. с. для гелия, которая

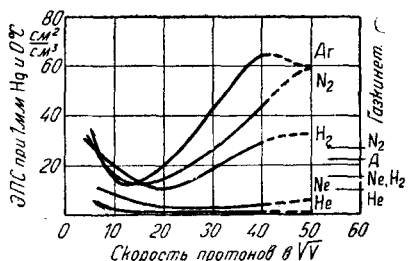


Рис. 7. Э. п. с. различных газов по отношению к протонам (по Рамзауэру, Коллату и Лилиенталу).

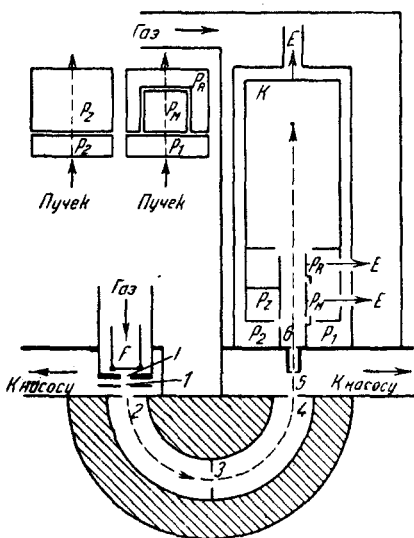


Рис. 8 и 9. Установка для исследования передачи заряда (по Гольдману).

при скоростях выше 100 V на целый порядок меньше газкинетического значения. Этот факт очень хорошо подтверждает качественные заключения Демпстера (см. выше) о поведении гелия в отношении протонов.

На основании исследования характера взаимодействия между молекулами газа и протонами авторы установили, что ход кривой по ту и другую сторону от минимума обусловлен двумя совершенно различными процессами. Подъем в сторону малых скоростей является следствием возникающего рассеяния, подъем же в сторону больших скоростей — следствием наличия большого числа медленных частиц. При этом остается открытым вопрос о том, возникают ли эти частицы в результате передачи заряда или же вследствие больших потерь скорости протона.

В работе Гольдмана⁵ исследовалось взаимодействие между молекулами водорода и аргона и протонами. На рис. 8 и 9 изображена

схема измерительной установки. Протоны получались путем ионизации водорода термоэлектронами (нить накала F), причем для увеличения интенсивности служило особое „сопло“, показавшее себя весьма эффективным приспособлением. В конце концов пучок протонов через диафрагмы 5 и 6 попадает в измерительную камеру, состоящую из системы пластин, из которых измерительной пластиной является P_M (см. также рис. 9). Не подвергшиеся воздействию протоны пролетают мимо пластин и улавливаются цилиндром H , соединенным, так же как и P_M , с электрометром. Каждая из пластин может быть независимо от других заряжена до желаемого потенциала.

Наиболее существенным результатом работы является установление того факта, что в исследованном интервале скоростей (от 400 до 4000 V) имеет место по преимуществу передача заряда, а не ионизация молекул протонами. Иллюстрацией этого служат непосредственные результаты измерений, приведенные на рис. 10, где

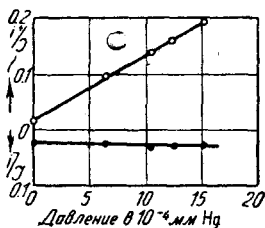


Рис. 10. Зависимость положительного и отрицательного тока насыщения от давления (по Гольдману).

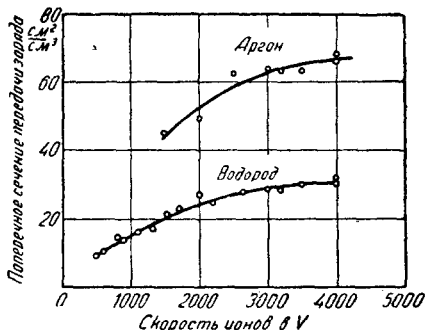


Рис. 11. „Поперечное сечение передачи заряда“ для аргона и водорода по отношению к протонам (по Томсону).

по оси абсцисс отложено давление газа, по оси ординат — заряд i пластинки P_M , отнесенный к единице интенсивности J как для положительного (i^+), так и для отрицательного (i^-) тока на P_M . Потенциал пластинки равнялся при этом ± 10 V*.

По мере возрастания давления увеличивается только число положительных частиц в пространстве между пластинками, число же отрицательных (электроны, получавшиеся вследствие ионизации) от давления газа не зависит. Это указывает на то, что наблюдающееся уже в вакууме слабое отрицательное заряджение пластинки обусловлено не присутствием газа и что положительные частицы образуются лишь путем передачи заряда, но не ионизации.

Установка допускает также проведение количественных исследований. Измеренные поперечные сечения передачи заряда для аргона и водорода представлены на рис. 11 в функции скорости прото-

* Особыми измерениями было установлено, что при потенциале в 10 V почти наступает насыщение.

нов, выраженной в вольтах. Легко видеть, что полученные значения имеют тот же порядок величины, что и найденные Рамзауэром, Коллатом и Лилиенталем э. п. с. (Сравнение всех измерений, относящихся к протонам, дано на рис. 14 в конце этого параграфа.)

Опыты Томсона⁶ относились к рассеянию быстрых (4000—26 000 V) протонов и находятся таким образом вне той области, которой мы решили ограничиться. Мы цитируем, тем не менее, эту работу так же, как и следующую — Допеля, тоже работавшего с быстрым протоном (2500—2000 V), потому, что они представляют собой переход к исследованиям быстрых канальных лучей*, а также вследствие того, что Томсону первому удалось обнаружить интересную аналогию между поведением молекул по отношению к электронам и протонам.

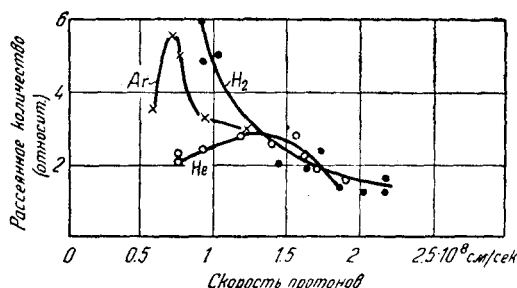


Рис. 12. Рассеяние протонов (по Томсону).

диафрагмы помещалась фотографическая пластинка, на которой пучок давал черное пятно. Расширение пятна при впуске в прибор газа измерялось фотометрически. Этим путем определялось распределение протонов по углам в вакууме и газе при различных скоростях. Выбрав на полученной кривой распределения какую-либо абсциссу и определив для нее разность почернений в газе и вакууме, получают относительную меру рассеяния под соответствующим этой точке — естественно очень малом — углом. Найденные таким способом для неизменного давления относительные рассеяния наносят по оси ординат в функции скорости протонов, отложенной по оси абсцисс (рис. 12). В то время как для водорода с уменьшением скорости протонов наблюдается непрерывное увеличение рассеяния, гелий и особенно аргон обнаруживают максимумы рассеяния при некоторых определенных скоростях. Томсон указал на то, что положение этих максимумов рассеяния протонов гелием и аргонном почти совпадает с положением максимумов э. п. с. для электронов, если строить те и другие кривые, откладывая по оси абсцисс значения линейной скорости электронов и протонов.

Согласно предварительному сообщению, Допель⁷ исследовал пе-

* См. также работу Бартельса (H. Bartels) о передаче заряда протонами в водороде при скоростях между 4000 и 30 000 V.

редачу заряда протонами в гелии при скоростях от 2500 до 30 000 V. Он обнаружил максимум числа передач, лежащий при скорости протонов в $1 \cdot 10^8$ см/сек (рис. 13), не указав абсолютной величины максимума. Его результаты являются интересным дополнением измерений Рамзауэра, Коллата и Лилиентала, обнаруживших в пределах до 50 V уменьшение э. п. с. Таким образом оказывается, что гелий в отношении протонов не представляет исключения, но что передача заряда происходит в этом газе лишь при значительно более высоких скоростях протонов.

В заключение этого параграфа мы даем на рис. 14 сопоставление результатов измерений взаимного э. п. с. молекул водорода и протонов, потому что, за исключением Демпстера *, этот случай был исследован всеми упомянутыми выше авторами. При рассмотрении этого рисунка следует помнить, что

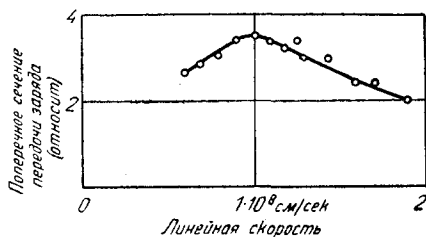


Рис. 13. Передача заряда протонами в гелии (по Допелю).

кривая Гольдмана ⁵ относится только лишь к передаче заряда, а кривая Томсона ⁸ — только к рассеянию под малыми углами. Кривая Гольцера ³ выпадает совершенно, так как находится в противоречии как с данными Рамзауэра, Коллата и Лилиентала ⁴, так и с результатами Гольдмана ⁵, причем причины расхождения до сих пор не выяснены. Кривую Томсона ⁸ не следует рассматривать как продол-

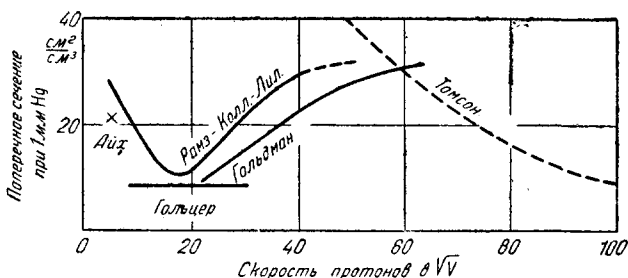


Рис. 14. Э. п. с. водорода по отношению к протонам (по литературным данным).

жение кривой Рамзауэра, Коллата и Лилиентала ⁴, так как абсолютная высота ее ординат совершенно произвольна. Эта кривая показывает, тем не менее, что кривая э. п. с. по мере возрастания скорости вновь начинает падать **.

* Если не считать некоторых качественных измерений, показавших поведение водорода относительно протонов, аналогичное поведению гелия.

** Для передачи скорости это доказано Бартельсом (см. дополнение).

§ 30. Поведение молекул газов в отношении медленных ионов щелочных металлов. Целью работы Рамзауэра и Беека⁹ было измерение взаимного э. п. с. молекул различных газов и медленных ионов (скорости от 1 до 30 V) ионов щелочных металлов. Метод измерения был тот же, что и применявшийся для электронов (магнитный метод с двумя ловушками; см. § 9, рис. 12). Источником ионов служила платиновая полоска, особым способом покрытая амальгамой того или иного щелочного металла.

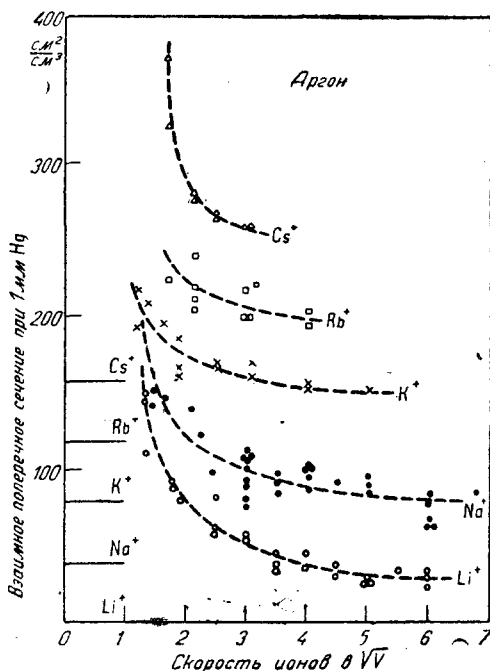


Рис. 15. Взаимное поперечное сечение аргона и ионов щелочных металлов (по Рамзауэру и Бееку).

диуса К-иона (по Герцфельду и Гримму) тем сильнее отличаются от газкинетических радиусов молекул газа, чем больше (газкинетически) молекула (рис. 16).

Гарнвелл¹⁰ произвел некоторые исследования качественного характера относительно движения Cs⁺- и K⁺-ионов в гелии, неоне, аргоне, водороде и азоте. Его установка была того же устройства, что и описанная в § 28 установка Айха. Гарнвелл нашел, что длина свободного пути имеет величину того же порядка, что и вычисленная согласно кинетической теории газов, в то время как обнаруженные на опыте потери скорости оказываются гораздо меньшими,

Все кривые э. п. с. для аргона независимо от рода ионов обнаруживают одинаковый характер (рис. 15), спадая, по мере возрастания скорости, сначала быстро, потом все более и более медленно. Такого же вида оказываются и кривые для всех прочих исследованных газов.

Если сравнить э. п. с. различных газов при одном и том же роде ионов (например К), имеющих скорость, соответствующую (согласно рис. 15) приблизительно постоянному значению э. п. с., и изобразить полученные результаты в виде суммы радиусов, получаются весьма интересные соотношения: разности между полученными значениями сумм радиусов и теоретической величиной радиуса

чем можно было ожидать, исходя из обычных представлений о механизме столкновения.

Цитируемые ниже работы принадлежат исследователям школы Демпстера. Они должны поэтому рассматриваться как части некоторого целого.

С помощью аппаратуры Демпстера, описанной в § 28 (рис. 2), Дурбин¹¹ исследовал ионы калия со скоростями от 8 до 350 V в He, Ar, N₂, O₂ и воздухе при давлениях от 0 до $150 \cdot 10^{-4}$ мм Hg. Дурбин измерял заряд улавливающей пластинки

R в зависимости от давления газа. Для того чтобы сделать его результаты сравнимыми с результатами других работ, мы выразим их через э. п. с. Как видно из рис. 17, Дурбин получил кривые, подобные кривым Рамзауэра и Беека. При этом он полагал, что путем экстраполяции найденных значений э. п. с. до скорости ионов, равной нулю, для э. п. с. молекул различных газов будут получены вели-

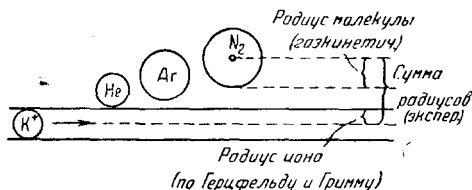


Рис. 16. Расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями сумм радиусов (по Рамзауэру и Бееку).

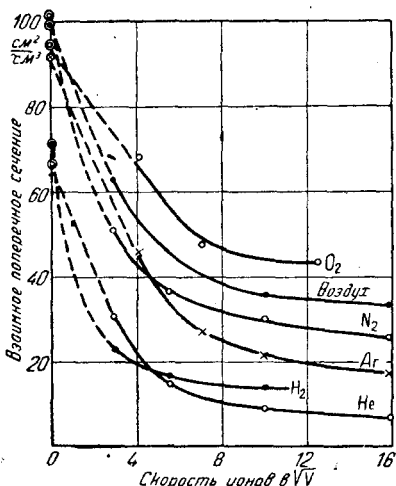


Рис. 17. Взаимное поперечное сечение K^+ -ионов и молекул различных газов (по Дурбину).

Пользуясь совершенно идентичной аппаратурой, Кеннард¹² исследовал Na^+ , Rb^+ и Cs^+ -ионы в He, Ar и N₂. Им исследовалась длина свободного пути и, главным образом, характер воздействия молекулы на ионы. Для этой цели он использовал способ, описанный уже в применении к электронам (§ 10), основанный на изме-

чения, равные газкинетическим, если вычислять последние, пользуясь вместо поперечного сечения K -иона поперечным сечением атома аргона. Это заключение, казавшееся правдоподобным при изображении результатов по Дурбину (по оси абсцисс — вольты, по оси ординат — отношение экспериментального значения длины свободного пути к его значению, вычисленному указанным способом), при способе изображения, принятом здесь (абсциссы — $\sqrt{V}$, ординаты — взаимное э. п. с.), перестает казаться верным. Оно находится, кроме того, в противоречии с результатами Рамзауэра и Беека, приводящими к значительно меньшим величинам скорости, и в дальнейших работах школы Демпстера более не фигурирует.

нении кривых распределения по скоростям, вызываемом наличием газа. Для уяснения выводимых автором заключений мы должны рассмотреть влияние на форму кривой нового рода взаимодействий — передачи заряда.

Кеннард различает три крайних случая изменения формы кривой, схематически показанные на рис. 18:

а) Уменьшение площади, заключенной между кривой распределения и осью абсцисс. Налицо только передача заряда.

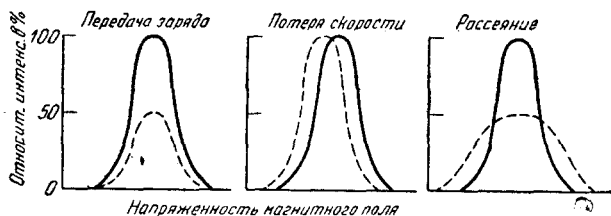


Рис. 18. Изменение формы кривых распределения.

б) Сдвиг кривой без изменения ее формы и площади в сторону меньших напряженностей магнитного поля. Налицо только потеря скорости.

с) Расширение кривой без изменения площади. Налицо только рассеяние под малыми углами.

Результаты Кеннарда, иллюстрируемые рис. 19, состоят в следующем:

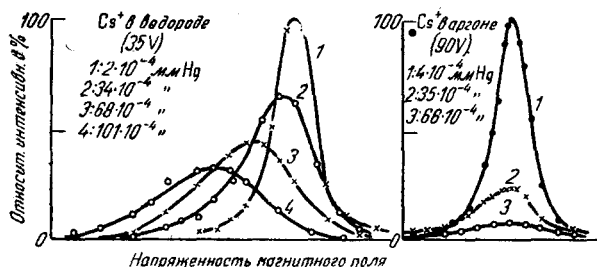


Рис. 19. Потери скорости (слева) и передача заряда (по Кеннард).

1) Cs^+ -ионы в H_2 и He . Взаимодействие выражается, главным образом, в потере скорости.

2) Cs^+ -ионы в Ar (35 и 90 V). Процесс состоит, главным образом, в передаче заряда. Возможно, существует рассеяние под большими углами.

3) Na^+ -ионы в H_2 (445 V; на рис. 19 не показано). Наблюдаются все три рода взаимодействия — передача заряда, потеря скорости и рассеяние под малыми углами.

Таким образом тяжелые ионы в легких газах ведут себя совершенно отлично от тяжелых ионов в тяжелых газах.

Работу Кеннарда дополняют исследования Кокса¹³, относящиеся к легким ионам в тяжелых газах, причем был выбран по возможности крайний случай — ионы лития в парах ртути. Установка Кокса несколько отличалась от описанных до сих пор в отношении приспособления для улавливания ионов. При соединении цилиндров H и V (рис. 20) можно было снимать кривые распределения по скоростям, как это делал Кеннард. Кроме того, можно было производить измерения э. п. с. по способу прямолинейного пучка. Оба рода измерений велись для ионов со скоростями от 25 до 250 V.

Рис. 21 изображает кривые распределения при различных давлениях газа. Строя зависимость площадей, ограничиваемых кривыми, от давления, мы получаем спадание по экспоненциальному закону, причем показателем при e является взаимное э. п. с. при соответствующей скорости ионов. На рис. 22 изображены значения э. п. с., полученные по способу двух ловушек с прямолинейным пучком ($\bullet$); для сравнения приведены значения, найденные по указанному выше способу ($\circ$).

На основании полученных результатов Кокс заключил, что Li^+ -ионы при прохождении через ртутный пар не испытывают потерь скорости (отсутствие сдвига кривых). Из сильного расхождения между значениями э. п. с., полученными обоими методами, выводится заключение, что основным процессом является рассеяние под малыми углами.

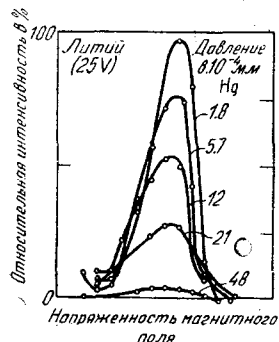


Рис. 21. Кривые распределения по скоростям для Li^+ -ионов в ртутном паре (по Коксу).

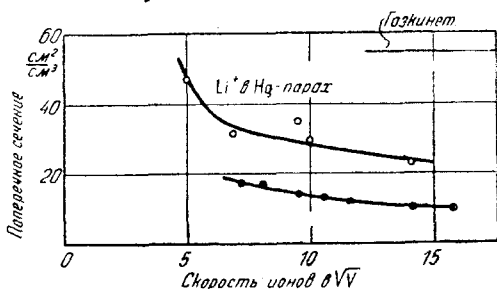


Рис. 22. Поперечное сечение молекул ртутного пара по отношению к ионам лития при различных методах измерения (по Коксу).

С помощью установки, аналогичной только что описанной, Томпсон¹⁴ производил следующие измерения:

- 1) Снятие кривых распределения по скоростям магнитным методом (как выше).
- 2) Измерение э. п. с. с помощью двух ловушек (как выше).
- 3) Снятие кривых при наложении задерживающего потенциала в ловушках 1 и 2, соединенных вместе.

Исследования велись с He и H_2 (легкие газы) и Li^+ (легкий ион)

и Cs^+ (тяжелый ион) при скоростях ионов от 5 до 500 V. Полученные результаты подтверждают результаты Кеннарда: Cs^+ -ионы в He испытывают по преимуществу лишь потери скорости. Уменьшение скорости пучков было обнаружено Томпсоном не только в виде сдвига кривых распределения, но и как изменение формы кривых задерживающего потенциала (рис. 23).

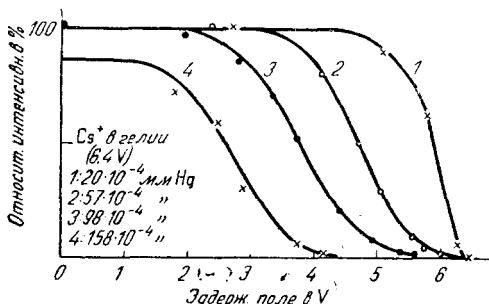


Рис. 23. Кривые задерживающего потенциала для Cs^+ -ионов в гелии (по Томпсону).

ионам в He, показаны на рис. 24. Кривая I изображает результаты, полученные с прямолинейным пучком при двух ловушках, кривая II — изменение площади кривых распределения по скоростям. Сравнение обеих кривых рис. 24 обнаруживает сильное влияние методики измерений на получаемую величину э. п. с., что рассматривается автором как доказательство того, что Li^+ -ионы испытывают в He лишь рассеяние под малыми углами.

При нанесении на рис. 24 точек, полученных Рамзауэром и Бееком (...) для Li^+ в He, они образуют как бы продолжение кривой I. Томпсон объясняет это замечательное совпадение, равно как и низкое положение кривой I, применением широких диафрагм. Это не кажется правильным, поскольку, как было выяснено в § 27, метод двух ловушек при диафрагмах равной ширины дают те же результаты, что и метод одной ловушки с очень узкой диафрагмой. На основании этого следовало бы ожидать совпадения результатов Рамзауэра и Беека с кривой II.

В заключение дадим краткий обзор результатов измерений с

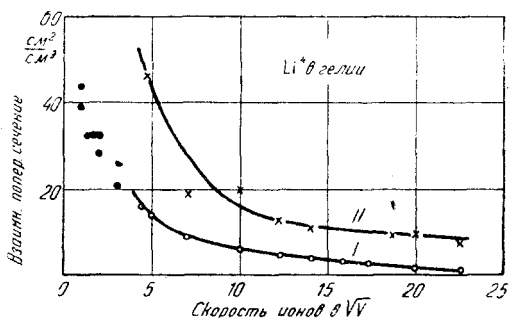


Рис. 24. Взаимное поперечное сечение атомов гелия и Li^+ -ионов по Томпсону и Рамзауэру — Бееку.

ионами щелочных металлов. Всеми исследователями было найдено, что кривые э. п. с. с возрастанием скорости ионов спадают сначала быстро, затем медленнее. Между абсолютными высотами кривых э. п. с., полученных различными авторами, наблюдаются значительные расхождения, которые частично могут быть объяснены рассеянием под малыми углами.

Характер взаимодействия сильно зависит от атомного веса обеих сталкивающихся частиц: легкие ионы обнаруживают и в легких и в тяжелых газах лишь рассеяние без потери скорости; тяжелые же ионы в тяжелых газах испытывают перезарядку, в легких — потери скорости.

§ 31. Прочие ионы. Сведения, имеющиеся о поведении молекул газа по отношению к другим ионам, помимо протонов и ионов щелочных металлов, получены, главным образом, Кальманом и Розеном¹⁵, работавшими с самыми различными ионами, в том числе и с несущими несколько (2) зарядов, для довольно узкого интервала скоростей. Следующая таблица указывает исследованные ионы и газы.

Газы	He	Ne	He—Ne	Ar	Hg	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	NH ₃
Ионы	He ⁺ Ar ⁺ Ar ⁺⁺	Ne ⁺	Ar ⁺ N ₂ ⁺ N ₂ ⁺⁺	Ar ⁺ He ⁺ Ne ⁺ N ⁺ N ₂ ⁺	Hg ⁺ Hg ⁺⁺	N ₂ ⁺ Ar ⁺ N ⁺ Hg ⁺ Hg ⁺⁺	O ₂ ⁺ O ⁺ N ⁺ N ₂ ⁺	CO ⁺ C ⁺	CO ₂ ⁺ O ⁺ C ⁺ CO ⁺ H ₂ O ⁺	C ⁺ CO ⁺

Первоначально Кальман и Розен применяли аппаратуру, в существенных чертах идентичную с описанной в § 29 аппаратурой Демпстера (рис. 2). Ионы получались путем ионизации соответствующего газа. В большинстве случаев скорость ионов равнялась 400 V. Измерялось уменьшение интенсивности ионного пучка в зависимости от давления газа. Основным результатом этих исследований состоял в следующем: уменьшение интенсивности (абсорбция) с повышением давления тем больше, чем ближе энергия нейтрализации иона лежит к потенциалу ионизации исследуемого газа.

Помимо указанных измерений, те же авторы исследовали передачу заряда, пользуясь для этого установкой, схематически изображенной на рис. 25, особенностью которой являлось расположенное вокруг ловушки А кольцо R. Ловушка А служила для измерения интенсивности ионного пучка, кольцо R — для определения количества медленных ионов, образованных пучком во время пробега между диафрагмой 4 и ловушкой. Эти медленные ионы несут положительный заряд и образуются в результате передачи

заряда ионами, принадлежащими пучку. Что медленные ионы не являются рассеянными ионами пучка, было установлено специальными контрольными опытами при помощи несколько видоизмененной установки. Вычисленное на основании этих измерений поперечное сечение передачи заряда имеет величину, приблизительно равную газкинетической. Поскольку в этих опытах рассеяние почти не играет роли, полное э. п. с. представляет собой э. п. с. передачи заряда.

Пеннингом и Венемансом¹⁶ было произведено сравнение прохождения сквозь аргон ионов Ag^+ и K^+ . В их установке, схематически изображенной на рис. 26 и весьма схожей с установкой Айха (§ 29, рис. 1), ионы аргона получались при посредстве га-

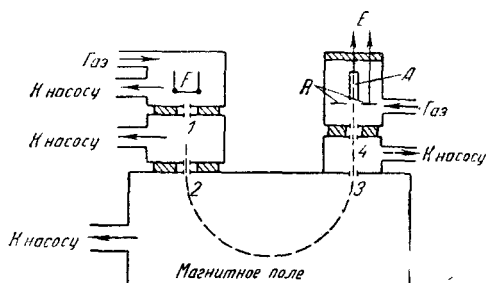


Рис. 25. Исследование передачи заряда ионами (по Кальману и Розену).

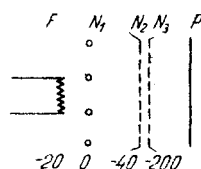


Рис. 26. Измерения передачи заряда по Пеннингу и Венемансу.

зового разряда, и ионы калия — при помощи анода Кунсмана, который мог быть устанавливаем на место $F-N_1$. Ионы получались ударами электронов в пространстве между N_1 и N_2 , между N_2 и N_3 они ускорялись (160—200 В) и попадали затем в задерживающее поле между N_3 и P .

Исходя из кривых задерживающего потенциала, можно заключить, что Ag^+ -ионы теряют в аргоне значительно больше энергии, чем ионы K^+ . Причиной этого авторы считают передачу заряда, более сильную для Ag^+ в Аг. Проведенные измерения позволяют вычислить поперечное сечение передачи заряда для Ag^+ в Аг, оказывающееся, согласно цитируемым авторам, равным 0,8 газкинетического, т. е. приблизительно $74 \text{ см}^2/\text{см}^3$. (О сопоставлении этой величины с результатами других измерений см. в следующей работе).

В своей первой работе Вольф¹⁷ измерял с помощью установки с прямолинейным пучком и двумя ловушками взаимное поперечное сечение аргона и Ag^+ при скоростях ионов от 25 до 900 В. Не останавливаясь на этой, мы перейдем ко второй работе Вольфа, имевшей целью исследование передачи заряда, результаты которой охватывают результаты первой и, кроме того, дают количественные сведения относительно связи между различными видами взаимо-

действий ионов и молекул. Установка Вольфа изображена на рис. 27. Ионы Ag^+ получаются при помощи газового разряда и освобождаются магнитным полем M от всех других ионов. Пройдя диафрагмы 1, 2 и 3, пучок попадает в измерительное устройство. При некотором постоянном давлении газа измеряется, с одной стороны, полное количество прошедших 3 ионов, а с другой — их количество, попавшее на кольцо R . При этом на R накладывается отрицательный потенциал такой величины, что на кольцо попадают все ионы (кривые насыщения), образованные в результате передачи заряда в пространстве S между N_4 и N_5 . После этого такие же измерения повторяются для другого давления. По двум значениям интенсивности, по давлению и расстоянию между N_4 и N_5 вычисляется поперечное сечение передачи заряда. При помощи такой же аппаратуры возможно измерение поперечного сечения ионизации. Для этого на кольцо R накладывают положительный потенциал такой величины, что ионы, образовавшиеся в результате передачи заряда, не могут более попасть на него и к кольцу притягиваются все электроны, получившиеся вследствие ионизации молекул в S .

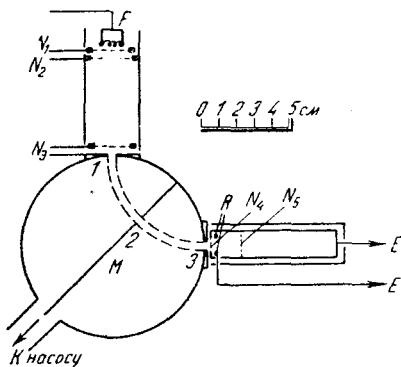


Рис. 27. Измерение передачи заряда и ионизации по Вольфу.

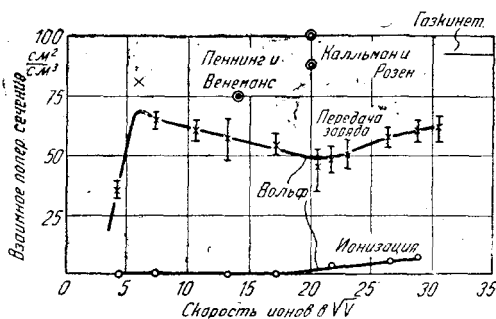


Рис. 28. Поперечное сечение передачи заряда и поперечное сечение ионизации атомов аргона по отношению к Ag^+ -ионам (по Вольфу).

той справа. Из хода кривой поперечного сечения ионизации ($\circ-\circ-\circ$) легко видеть, что ионизация аргона Ag^+ -ионами наступает лишь при скоростях последних, больших 300 В, и медленно

Результаты измерений Вольфа изображены на рис. 28. Поперечное сечение передачи заряда ($\times-\times-\times$) имеет максимум при 6 В и минимум при 21 В, и затем медленно увеличивается с повышением скорости. Величина этого поперечного сечения все время меньше двойного поперечного сечения нейтрального атома аргона, вычисленного согласно кинетической теории; последняя величина показана на рис. 28 чер-

растет с увеличением скорости ионов. В конце исследованного интервала скоростей (около 1000 V) поперечное сечение ионизации составляет еще лишь около 10⁰/₀ сечения передачи заряда.

Для сравнения результатов Вольфа¹⁸ с результатами других авторов на том же рис. 28 нанесены отдельные точки из измерений Кальмана и Розена¹⁹ для скорости около 400 V (⊙) и Пеннинга и Венеманса¹⁶ (⊙) для скорости ~ 200 V. При этом сравнении нужно иметь в виду, что как Кальман и Розен, так и Пеннинг и Венеманс не слишком уверены в достоверности своих результатов с количественной стороны. Это сравнение имеет целью только показать, что некоторые авторы получают значения поперечного сечения передачи заряда, довольно близкие к величине газкинетического поперечного сечения.

Добавление

Работы, появившиеся за промежуток времени между написанием статьи и получением корректуры, мы разбиваем на три группы: экспериментальные работы по рассеянию электронов, теоретические работы по тому же вопросу и работы по рассеянию ионов, и кратко реферируем их в алфавитном порядке по авторам.

1. Экспериментальные работы по рассеянию электронов. Юз и Мак-Миллен²⁰ в двух работах исследовали рассеяние электронов молекулами водорода и гелия при скоростях от 25 до 700 V в интервале углов от 0 до 170°, пользуясь своей прежней методикой (см. § 22). Полученные ими кривые распределения по направлениям обнаруживают в случае гелия — до 100 V, в случае водорода — до 200 V минимум рассеяния для углов, близких к 90°. В водороде, кроме того, для скоростей между 35 и 50 V наблюдается максимум рассеяния при угле в 155°. Помимо этого, те же авторы исследовали, как и в прежней работе, распределение по направлениям электронов, рассеянных с потерей скорости, а также электронов, выбитых из атомов в процессе ионизации.

Тейт и Пальмер²¹ изучали рассеяние электронов со скоростями от 80 до 700 V молекулами ртутного пара в интервале углов от 10 до 130°. Их установка была подобна первой из установок Гарнвелла²²: подвижная нить накала — неподвижная ловушка. Распределение по скоростям определялось методом задерживающего потенциала. При наложении сильных обратных полей возможно исследование распределения по скоростям только упруго рассеянных электронов. Результаты в этой части хорошо согласуются с данными Арнота. Кроме того, как и у Юза и Мак-Миллена, исследовалось распределение по скоростям электронов, рассеянных с потерей скорости, и электронов ионизации. Авторы проделали на основании своих данных количественные определения, т. е. вычислили полное э. п. с., поперечное сечение возбуждения и поперечное сечение ионизации. Результаты вычислений удовлетворительно совпадают с данными Броде (э. п. с.) и Смита (поперечное сечение ионизации).

2. Теоретические работы по рассеянию электронов. Феенберг²³ показал, что применявшееся до сего времени для вычисления э. п. с. волновое уравнение является приближенным уравнением для случая многих электронов. Далее, — что в случае рассеяния обмен электронов играет весьма малую роль, поскольку учет этого явления сказывается лишь для первого приближения. Феенберг дал приближенную формулу для вероятности рассеяния, совпадающую при больших скоростях электронов с первым приближением формулы Борна. В примечании к корректуре Феенберг сообщает, что результаты числовых вычислений дают хорошее качественное совпадение с опытными данными также и для самых медленных электронов.

Геннеберг²⁴, пользуясь способом Факсена и Гольтсмарка²⁵, вычислил, исходя из распределения потенциала по Ферми, рассеяние электронов со скоростями от 135 до 800 V молекулами ртутного пара. Согласие с опытом (Арнот, Пирсон и Арнквист), особенно для больших скоростей, — хорошее.

Массей и Мор²⁶ в первой работе применили теорию Борна и Оппенгеймера к столкновению между электронами и молекулами. Кривые рассеяния в водороде и азоте совпадают с экспериментальными данными лишь для высоких скоростей электронов (теория Борна применялась лишь к этому случаю). Для скоростей < 50 V в водороде и < 30 V в азоте начинаются расхождения. Во второй работе тех же авторов²⁷ при расчете по методу Борна учтен в первом приближении обмен электронов. Результаты получаются тем более надежными, чем меньшую роль играет обмен. Авторы обращают внимание на то, что отклонения функции рассеяния от уравнения плоской волны и эффект обмена действуют, вообще говоря, в противоположных направлениях, следствием чего и является кажущаяся применимость теории Борна для малых скоростей электронов. Им удалось в этой работе не только объяснить с качественной стороны (как это было сделано ранее) „обратное“ рассеяние в водороде, но и указать величину скорости, при которой „прямое“ рассеяние переходит в „обратное“.

Штиер²⁸ применил теорию рассеяния Гольтсмарка к случаю симметричной двухатомной молекулы, приняв вместо конечного поля с шаровой симметрией конечное эллипсоидальное. С помощью этих представлений он смог рассчитать положение резкого максимума э. п. с. в азоте и построить кривые рассеяния для окиси азота в интервале скоростей от 0,5 до 2 V, хорошо согласующиеся с экспериментальными.

3. Работы по рассеянию ионов. Единственная работа из этой области принадлежит Бартельсу²⁹, исследовавшему передачу заряда протонами в водороде в интервале разностей потенциалов от 4 до 30 kV, перебросив таким образом мост от исследований этого явления при быстрых протонах к исследованиям для случая малых скоростей (в особенности работы Гольдмана). Он обнаружил (при хорошем совпадении своих результатов с резуль-

татами других авторов в уже исследованных областях) максимум передачи заряда, лежащей около 7000 V, где поперечное сечение передачи заряда при давлении водорода в 1 мм Hg оказалось равным $50 \text{ см}^2/\text{см}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Aich, Z. Physik **9**, 372, 1922.
2. A. J. Dempster, Phil. Mag. **3**, 115, 1927,
3. R. E. Holzer, Phys. Rev. **36**, 1204, 1930.
4. C. Ramsauer, R. Kollath u. D. Lilienthal, Ann. Phys. **8**, 709, 1931.
5. F. Goldmann, Ann. Phys. **10**, 460, 1931.
6. G. P. Thomson, Phil. Mag. **1**, 961, 1926; **2**, 1076, 1926.
7. R. Döpel, Naturwiss. **19**, 179, 1931.
8. G. P. Thomson, Phil. Mag. **1**, 961, 1926.
9. C. Ramsauer u. O. Beeck, Phys. Z. **28**, 858, 1927; Ann. Phys. **87**, 1, 1928.
10. G. P. Harnwell, Phys. Rev. **31**, 634, 1928.
11. F. M. Durbin, Phys. Rev. **30**, 844, 1927.
12. R. B. Kennard, Phys. Rev. **31**, 423, 1928.
13. J. W. Cox, Phys. Rev. **34**, 1426, 1929.
14. J. S. Thompson, Phys. Rev. **35**, 1196, 1930.
15. H. Kalmann u. B. Rosen, Z. Physik **61**, 61, 1930; **64**, 806, 1930.
16. F. M. Penning u. C. F. Veenemans, Z. Physik **62**, 746, 1930.
17. F. Wolf, Z. Physik **72**, 42, 1931; **74**, 574, 1932.
18. F. Wolf, Z. Physik **74**, 547, 1932.
19. H. Kalman u. B. Rosen, Z. Physik **61**, 61, 1930.
20. A. L. Hughes u. J. H. Mc. Millan, Phys. Rev. **41**, 39, 154, 1932.
21. J. Tate a. R. R. Palmer, Phys. Rev. **40**, 731, 1932.
22. G. P. Harnwell, Proc. Nat. Acad. Am. **14**, 546, 1928.
23. E. Feenberg, Phys. Rev. **40**, 40, 1932.
24. W. Henneberg, Naturwiss. **20**, 561, 1932.
25. H. Faxen u. J. Holtsmark, Z. Physik **45**, 307, 1927; J. Holtsmark, Z. Physik **48**, 231, 1929; **52**, 485, 1928; **55**, 437, 1929; **66**, 49, 1930.
26. H. S. W. Massey a. C. B. O. Mohr, Proc. Roy. Soc., London **135**, 258, 1932.
27. H. S. W. Massey a. C. B. O. Mohr, Proc. Roy. Soc., London **136**, 289, 1932.
28. H. Chr. Stier, Z. Physik **76**, 439, 1932.
29. H. Bartels, Ann. Phys. **13**, 373, 1932.