

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Д. С. РОЖДЕСТВЕНСКОГО**

535(092)

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ Д. С. РОЖДЕСТВЕНСКОГО*С. Э. Фриш*

Научное наследие академика Дмитрия Сергеевича Рождественского, 100-летие со дня рождения которого отмечается в 1976 г., чрезвычайно велико и разнообразно. Несмотря на то, что со времени появления большинства его работ прошло свыше пятидесяти лет, они до сих пор сохраняют свежесть и актуальность — факт весьма примечательный в наше время бурного и стремительного развития науки.

Темы исследований Д. С. Рождественского никогда не носили случайного характера — они возникали в результате глубокой продуманности, были направлены на решение принципиально важных вопросов науки своего времени или задач большой практической значимости. Мастерство, с которым написаны его статьи, точность и одновременно образность языка могут служить высоким образцом не только для начинающих ученых, но и для людей, имеющих за плечами не один год работы.

Значительная и наиболее плодотворная часть деятельности Д. С. Рождественского приходится на первые годы существования советской власти. Это были годы не только больших политических свершений, но и годы становления и развития народного хозяйства и техники на новых социально-экономических и научных основах. Дмитрий Сергеевич с огромным энтузиазмом и энергией принялся за решение жизненно важных для страны научно-технических задач. Он является одним из организаторов и создателей советской оптической промышленности, в первую очередь оптического стекловарения. Поскольку эта сторона его деятельности уже достаточно освещена, здесь мы остановимся на его работах более «абстрактного», как он сам говорил, характера. Однако чрезвычайно показательным для Дмитрия Сергеевича, что, занимаясь и «абстрактными» исследованиями, он никогда не упускал из вида их тесной связи с практикой и часто говорил об этом. Характеризуя деятельность созданного им Государственного оптического института, он писал: «ГОИ именно правильный тип научного института в социалистической стране, где необходимо техника поддерживается абстрактной наукой и наоборот». И далее: «Оторвать ту или иную часть — науку или технику — значит, омертвить обе».

* * *

Наиболее известную долю научного наследия академика Д. С. Рождественского составляют его исследования по аномальной дисперсии света. В течение всей своей научной деятельности он много раз возвращался к этой теме. С нее он начал, готовясь еще молодым человеком к маги-

стерской диссертации, ей была посвящена его последняя работа, опубликованная после его смерти. По этой теме продолжают до наших дней работать его многочисленные ученики и последователи в Государственном оптическом институте, в Ленинградском университете и в других научных учреждениях. Созданный им оригинальный метод экспериментального изучения аномальной дисперсии, получивший название «метода крюков», позволил поставить и решить большое число задач, имеющих первостепенное значение для теории строения атомов, физики плазмы, астрофизики и физики атмосферы. Изучение аномальной дисперсии



Д. С. Рождественский (1876—1940).

методом Рождественского стало монополией советских ученых. Сравнительно немногочисленные работы по аномальной дисперсии, проведенные за границей, выполнены по большей части методом крюков с помощью аппаратуры, скопированной с аппаратуры Рождественского.

Приступая в 1908 г. к работе по аномальной дисперсии света, Д. С. Рождественский ставил перед собой вполне конкретную и весьма актуальную с точки зрения тогдашней физики задачу — подтвердить гипотезу Лоренца о квазиупругом характере колебаний электронов внутри атомов. Как известно, квазиупругая модель электрона приводит к тому, что в одноатомном паре или газе с дискретным рядом узких линий поглощения коэффициент преломления n определяется формулой Зельмейера

$$n^2 - 1 = \sum_i \frac{a_i}{v_i^2 - v^2}, \quad (1)$$

где v_i — частоты собственных колебаний электронов внутри атома. Величины a_i представляют собой константы, связанные с зарядом и мас-

сой электрона e и m и числом электронов N_i , обладающих собственной частотой колебаний ν_i . Эта связь выражается соотношением

$$a_i = \frac{e^2}{\pi m} N_i. \quad (2)$$

Задача, поставленная Рождественским, сводилась к точной количественной проверке выполнимости формулы Зельмейера. Всякое отступление от нее означало бы отступление от линейного характера уравнений, определяющих внутриатомные колебания электронов. Очевидно, особенной чувствительности проверка достигнет при проведении измерений как можно ближе к линии поглощения, т. е. при значениях ν , близких к ν_i . Из этих соображений и вытекали требования к постановке работы: располагать методикой, позволяющей точно измерять дисперсию вблизи линии поглощения; выбрать пар или газ с небольшим числом интенсивных линий поглощения.

До начала работ Д. С. Рождественского исследования по аномальной дисперсии носили в основном качественный характер. Вуд использовал для наблюдения аномальной дисперсии старый способ скрещенных призм, предложенный еще Ньютоном для изучения дисперсии в стеклах. Однако способ Вуда не давал возможности производить надежные измерения. Более обещающим был метод скрещенных интерферометра и спектрографа, предложенный Пуччанати. Этот метод вначале применил и Рождественский, придя к нему, кстати сказать, самостоятельно, и только впоследствии ознакомившись с работой Пуччанати. Сущность метода Пуччанати — Рождественского заключается в следующем: горизонтальные интерференционные полосы, получающиеся в белом свете, проектируются на вертикальную щель спектрографа. В результате спектр оказывается прочерченным светлыми и темными полосами, тянущимися вдоль всей его длины. Если ввести в одну из ветвей интерферометра исследуемое вещество в виде плоскопараллельного однородного столба паров, то полосы сместятся на величину, пропорциональную введенной разности хода. Разность же хода при данной толщине столба паров пропорциональна $n - 1$, где n — коэффициент преломления паров. Таким образом, смещение интерференционных полос в спектрографе воспроизводит ход дисперсии во всей наблюдаемой области. На рис. 1, а приведена фотография интерференционных полос вблизи одиночной узкой линии поглощения. Около линии полосы изгибаются в соответствии с формулой Зельмейера.

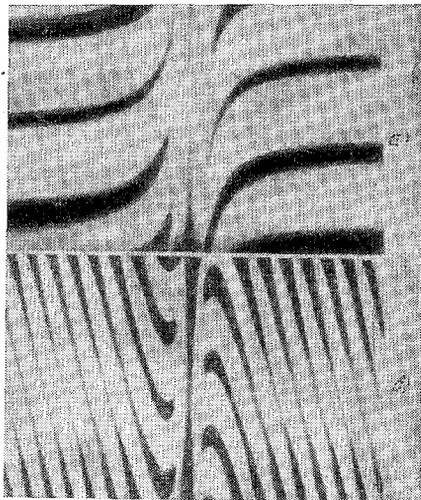


Рис. 1.

Но и такой метод изучения аномальной дисперсии мало пригоден для получения точных количественных данных. Он требует промера большого числа точек на круто восходящей или ниспадающей части интерференционной полосы, где измерения кропотливы и недостаточно надежны. В связи с этим Д. С. Рождественский подверг способ Пуччанати существенному и весьма остроумному изменению. Во вторую ветвь интерферометра он ввел плоскопараллельную стеклянную пластинку опреде-

ленной толщины. При отсутствии паров введение во вторую ветвь интерферометра пластинки приводит к сильному наклону интерференционных полос (за счет разности хода). При одновременном действии паров и стеклянной пластинки смещение полос определяется алгебраической суммой смещений, вызванных парами и пластинкой в отдельности. Вблизи линии поглощения превалирует наклон, вызванный дисперсией паров, а вдали от нее — обусловленный разностью хода, вносимой стеклянной пластинкой. В результате полосы в некотором месте дадут максимумы и минимумы, своеобразно изогнувшись (рис. 1, б). Эти изгибы Рождественский назвал «крюками».

При данной толщине стеклянной пластинки положение крюков определится величиной дисперсии около рассматриваемой линии поглощения паров. Чем сильнее дисперсия паров вблизи линии, тем дальше от нее образуется крюк. Теория метода была развита Рождественским в его первой же большой работе по аномальной дисперсии¹, а затем уточнена в его последующих публикациях^{2,3}. Вкратце воспроизведем ее для частного случая одиночной узкой линии поглощения.

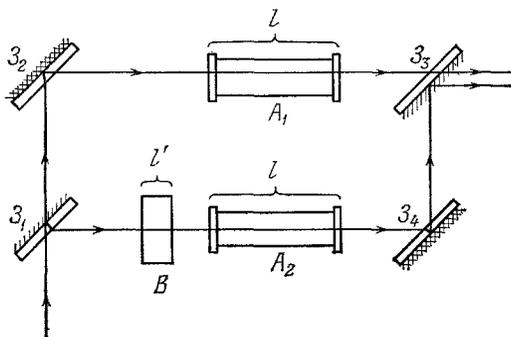


Рис. 2.

Пусть горизонтальные интерференционные полосы проектированы на вертикальную щель спектрографа. Будем отсчитывать координату y вдоль щели. Изменение фазы колебаний φ можно считать пропорциональным координате y . Следовательно, для интерференци-

онной полосы k -го порядка, при отсутствии как диспергирующих паров, так и стеклянной пластинки, можно написать

$$by_k = k\lambda, \quad (3)$$

где b — константа, определяемая геометрией установки.

Рождественский вводил в одну из ветвей интерферометра (рис. 2) кювету A_1 длиной l с исследуемыми парами, а в другую — компенсирующую эвакуированную кювету A_2 той же длины l и плоскопараллельную стеклянную пластинку B толщиной l' с коэффициентом преломления n' . Кювета и пластинка внесут добавочную разность хода лучей и равенство (3) заменится равенством

$$by_k - (n - 1)l + (n' - 1)l' = k\lambda, \quad (4)$$

где n — коэффициент преломления паров.

Условие образования максимумов и минимумов («крюков») определяется равенством

$$\frac{\partial y_k}{\partial \lambda} = 0.$$

Вблизи линии поглощения коэффициент преломления паров n , в соответствии с формулой Зельмейера, меняется быстро, в то время как коэффициент преломления стекла во всей области его прозрачности меняется медленно и монотонно, поэтому

$$\frac{\partial (n-1)}{\partial \lambda} \gg \frac{\partial (n'-1)}{\partial \lambda}.$$

В силу этого неравенства можно при дифференцировании равенства (4) пренебречь членом, содержащим $\partial(n' - 1)/\partial\lambda$. Тогда в месте расположения крюков должно быть выполнено условие

$$\frac{\partial(n-1)}{\partial\lambda} = -\frac{k}{l}. \tag{5}$$

Если для n воспользоваться формулой Зельмейера, то при переходе от частот к длинам волн, в приближении, достаточно хорошо выполняемом вблизи одной линии поглощения, получится

$$\frac{a_i \lambda_i^2}{4c^2 (\lambda - \lambda_i)^2} = \frac{k}{l}.$$

Решая это уравнение, найдем значения для длин волн λ , определяющих положение крюков:

$$\lambda = \lambda_i \pm \sqrt{\frac{a_i \lambda_i^2 l}{4c^2 k}}, \tag{6}$$

где c — скорость света в пустоте.

Как видно в сделанном приближении, положение крюков определяется лишь свойствами диспергирующих паров (a_i, λ_i) длиной кюветы l и порядком интерференции k . Последний может быть найден по толщине стеклянной пластинки l' и ее коэффициенту преломления n' . Однако Рождественский показал, что k можно найти и по числу p наклонных интерференционных полос, приходящихся на заданный интервал длин волн. Таким образом, нет надобности предварительно иметь количественные данные о стеклянной пластинке, ибо нужное значение k получается путем промера фотографии, получаемой с помощью той же установки, которая используется для наблюдения крюков.

Как видно, по положению крюков можно найти константу a_i , определяющую величину дисперсии в изучаемых парах вблизи данной спектральной линии λ_i . Подбором соответствующей толщины стеклянной пластинки (изменением k) крюки всегда можно сместить по отношению к линии и добиться их удобного для измерений положения. В этом большое преимущество метода Рождественского: измерения производятся просто, точно и могут выполняться на столь малых расстояниях от линии поглощения, где другие методы не пригодны.

Метод крюков позволяет решить две задачи: а) проверить выполнимость формулы Зельмейера; б) найти число электронов N_i с частотой собственных колебаний, соответствующих частоте линии поглощения. Обе они решаются на основании формулы (6). В случае точной выполнимости формулы Зельмейера значения a_i для данной линии поглощения должны получиться одинаковыми, независимо от порядка интерференции k (толщины стеклянной пластинки). Вторая задача решается, коль скоро оказывается найденным численное значение a_i .

В качестве первого объекта исследования Рождественский выбрал пары натрия, которые, как известно, имеют в видимой части спектра две тесно расположенные интенсивные линии поглощения (желтый дублет натрия). Остальные линии поглощения натрия расположены далеко от них и значительно слабее. Поэтому в формуле Зельмейера (1) под знаком суммы можно оставить лишь два члена, так что она примет вид

$$n^2 - 1 = \frac{a_1}{v_1^2 - v^2} + \frac{a_2}{v_2^2 - v^2}, \tag{7}$$

где v_1 и v_2 — частоты линий поглощения натрия. Приведенная выше теория метода крюков, как показал Рождественский, легко обобщается и на этот случай.

При создании рабочей установки было необходимо преодолеть большое число экспериментальных трудностей. Прежде всего требовалось обеспечить высокую степень стабильности интерференционной картины. Последняя легко нарушалась в результате того, что в одну из ветвей интерферометра вводилась электрическая печь, нагревавшая кювету с парами натрия. Кроме того, применявшийся в работе фотографический метод регистрации спектра требовал яркого источника света, что вело к добавочному и неравномерному нагреванию зеркал интерферометра.

Обдумывая все детали установки, Д. С. Рождественский пришел к выводу, что ни один из употреблявшихся в то время интерферометров, — Жамена и Майкельсона, — не удовлетворяет выдвигаемым требованиям. Поэтому он решил остановиться на интерферометре, в котором пучки света разделяются за счет отражения от четырех зеркал (рис. 2), два из которых (Z_2, Z_4) сплошные, а два (Z_1, Z_3) — полупрозрачные. Интерферометр такого типа уже использовался в некоторых работах под названием интерферометра Маха — Цендера (что, по-видимому, было не известно Рождественскому), но в нем все четыре зеркала устанавливались на отдельных подставках, затруднявших юстировку прибора и делавших его чувствительным к механическим сотрясениям и температурным неоднородностям. Д. С. Рождественский разработал свой вариант интерферометра (он назвал его интерферометром «типа Жамена»), в котором зеркала попарно (Z_1, Z_2 и Z_3, Z_4 ; см. рис. 2) укреплены на общем для них металлическом блоке. Оба блока установлены на массивной амортизированной бетонной плите. Такой интерферометр по праву может называться интерферометром Рождественского. Впоследствии Рождественский дал его подробную теорию⁴. Интерферометр Рождественского относительно прост в изготовлении, удобен в работе и дает весьма устойчивую интерференционную картину.

С помощью созданной экспериментальной установки Д. С. Рождественский прежде всего проверил точность выполнимости формулы Зельмейера. Он показал, что в случае паров натрия отношение a_1/a_2 (формула (7)) получается одинаковым независимо от толщины вводимой стеклянной пластинки, т. е. независимо от того, на каком расстоянии от линии поглощения образуются крюки. Толщина стеклянных пластинок менялась от 6 до 24 мм, измерения проводились вплоть до точек, лежащих на 0,5 Å от линии поглощения. Большое число тщательных измерений показало, что формула Зельмейера точно выполняется в широком интервале длин волн; погрешность измерений не превышала 2,5%. Лишь очень близко от линии поглощения (на расстоянии 1 Å и меньше) наблюдались некоторые отклонения. Однако оказалось, что величина этих отклонений зависит от разрешающей силы спектрографа. При работе в спектрах разного порядка дифракционной решетки величина отступлений менялась. На основании этого Рождественский пришел к выводу, что отступления носят аппаратный характер. Впоследствии эта точка зрения подтвердилась.

Таким образом, Д. С. Рождественский смог дать вполне определенный ответ на поставленный им вопрос: формула Зельмейера выполняется точно вплоть до частот, очень близких к частоте линии поглощения. Гипотеза Лоренца о квазиупругом характере колебаний электронов в атоме подтверждается.

Как известно, теория квазиупругого электрона не долго продержалась в науке. Ее сменила сначала теория Бора, а затем квантовая механика. Но значение измерений Рождественского сохранилось: всякая теория, какова бы она ни была, обязана считаться с точной выполнимостью формулы Зельмейера. В связи с этим интересно привести мнение,

высказанное самим Дмитрием Сергеевичем на сессии Академии наук СССР в 1936 г. по поводу наблюдаемых кривых аномальной дисперсии. Он сказал: «Вряд ли кто-нибудь тщательнее меня вдоль и поперек исследовал эти кривые, и мой ответ: да, эти кривые — гиперболы и, следовательно, электрон имеет квазиупругую связь. К счастью, присущий мне скепсис заставил меня прибавить: впрочем, достаточно линейности уравнений, заведующих колебаниями электрона, чтобы обусловить гиперболу, не входя в рассмотрение вопроса о сущности связи».

Вторая задача, поставленная Рождественским, относилась, как сказано, к измерению числа электронов N_i , которым соответствует частота собственных колебаний ν_i . Определив по положению крючков константу a_i , можно непосредственно найти N_i по формуле (2). Это — число электронов в единице объема диспергирующего пара. С теоретической точки зрения важно, конечно, знать число электронов n_i с заданной частотой собственных колебаний ν_i , приходящихся на один атом. Очевидно, n_i равно N_i/N_0 , где N_0 — полное число атомов данного элемента в единице объема. Однако в то время, когда Рождественский выполнял свою работу, упругость насыщающих паров натрия была известна плохо, что не позволяло сколько-нибудь надежно оценить значение N_0 в условиях опыта. Поэтому Рождественский определил отношение числа электронов N_1/N_2 , соответствующих обем компонентам дублета натрия (индекс 1 относится к коротковолновой, более интенсивной компоненте). Результат этого определения получился интересным. Оказалось, что для желтого дублета натрия ($\lambda_1 = 5889,96 \text{ \AA}$ и $\lambda_2 = 5895,93 \text{ \AA}$) отношение N_1/N_2 близко к целому числу 2. Как среднее из большого числа измерений было получено $N_1/N_2 = 1,98$ с погрешностью, не превышающей 2,5%.

Надо отметить, что в то время разные авторы получали для желтого дублета натрия отношения N_1/N_2 , различающиеся между собой и, как казалось, зависящие от плотности и температуры паров. Рождественский прежде всего задался целью показать, что N_1/N_2 не зависит от условий наблюдений и, следовательно, является атомной константой. Действительно, уже его первые измерения указывали на независимость значения N_1/N_2 от температуры печи, нагревающей трубку с парами натрия. Однако, поскольку трубка была стеклянной, температуру можно было менять в сравнительно небольшом интервале. Поэтому несколько позже Рождественский вместе со студентом-дипломником В. И. Туроверовым⁵ провел измерения для паров натрия, введенных в пламя вольтовой дуги, горячей при пониженном давлении. Значение N_1/N_2 вновь получилось близким к двум. Впоследствии были произведены измерения для головного дублета калия в условиях, когда упругость паров менялась в очень широком диапазоне. Отношение N_1/N_2 снова оказалось независимым от условий наблюдений. На основании всех этих опытов Рождественский мог определенно утверждать, что отношение числа диспергирующих электронов для составляющих дублетов есть атомная константа, не зависящая от упругости и температуры паров.

* * *

Проблеме определения относительного числа диспергирующих электронов Рождественский посвятил свою следующую работу: «Простые соотношения в спектрах щелочных металлов»², которая послужила темой его докторской диссертации, успешно защищенной в 1915 г.

Аномальная дисперсия была измерена вблизи составляющих ряда дублетов главной серии K, Rb и Cs. Для головных дублетов всех этих элементов отношение числа электронов снова оказалось близким к целому

числу — двум. В случае же второго дублета рубидия (4202—4216 Å) для N_1/N_2 было найдено значение 2,57, отличающееся от целого числа на величину, значительно большую ошибки измерения. Для последующих дублетов главной серии цезия промеры дали для N_1/N_2 значения 2,053; 4,07; 7,4; 9,1. Из этих величин видно, что, во-первых, отношение N_1/N_2 не остается постоянным для последовательного ряда дублетов главной серии щелочных металлов, а быстро возрастает по мере перехода к более высоким членам серии; во-вторых, N_1/N_2 не обязательно, как полагалось раньше, целочисленно.

Затем Рождественский смог оценить отношение числа диспергирующих электронов для двух последующих дублетов главной серии. Для калия оно получилось равным примерно 100, для рубидия и цезия — 60.

Весь этот чрезвычайно интересный и важный экспериментальный материал надо было теоретически осмыслить. Первоначально Рождественский, в соответствии с гипотезой Лоренца, полагал, что, например, равенство для натрия отношения $N_1/N_2 = 2$, означает, что в атоме натрия имеется вдвое больше электронов с частотой собственных колебаний, соответствующих более яркой компоненте головного дублета, чем соответствующих более слабой. Сравнение найденного численного значения $N_1 + N_2$ с полным числом атомов натрия в единице объема, оцененном по упругости паров, показало, что эти два числа одного порядка. Это указывало, что общее число электронов, обуславливающих ход дисперсии вблизи желтого дублета натрия, невелико — три или другое небольшое число. Аналогичный результат получился для головного дублета калия. Но тогда становится совершенно не понятным, как можно объяснить, что отношение числа диспергирующих электронов для первого и второго дублетов калия равно 100. Это обстоятельство, как и ряд других соображений, заставило отказаться от предположения, что число электронов в атоме равно числу его собственных частот колебаний (или второе меньше, если вибраторы считать анизотропными). Оставалось предположить, что один и тот же электрон, в зависимости от условий возбуждения, может колебаться с различными собственными частотами. Но это противоречит тому установленному Рождественским факту, что отношение N_1/N_2 есть атомная константа, не зависящая от внешних условий. Ответ, как известно, пришел после появления теории Бора, а в более исчерпывающем виде — после создания квантовой механики.

Прежде всего, выражение для константы a_i в формуле Зельмейера можно преобразовать формально, заменив число диспергирующих электронов N_i произведением $N_i = f_i N_0$, где N_0 — число атомов в единице объема. Величина f_i , получившая неудачное название «силы осциллятора», имеет смысл среднего числа электронов n_i с данной частотой собственных колебаний ν_i , приходящихся на один атом. Тогда вместо формулы (2) получим

$$a_i = \frac{e^2}{\pi m} f_i N_0. \quad (8)$$

Экспериментально найденное по измерению аномальной дисперсии значение a_i позволяет определить произведение $f_i N_0$. В случае составляющих дублета отношение $a_1/a_2 = N_1/N_2 = f_1/f_2$, т. е. отношение числа электронов N_1/N_2 заменяется отношением сил осцилляторов f_1/f_2 .

После введения Эйнштейном вероятностного описания процессов испускания и поглощения света атомами было установлено, что между силами осцилляторов и вероятностями спонтанных переходов A_{ki} имеет

место соотношение

$$f_{hi} = \frac{g_h}{g_i} \frac{mc^3}{8\pi^2 e^2 \nu_{hi}^2} A_{hi}; \quad (9)$$

здесь g_h и g_i — статистические веса стационарных состояний, при переходе между которыми возникает спектральная линия с данной частотой ν_{hi} . Таким образом, оказалось, что экспериментальные исследования Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии приводят к методу точного нахождения вероятностей переходов A_{hi} , относящихся к числу основных атомных констант.

Вероятности переходов, как известно, могут определяться не только по аномальной дисперсии, но на основании и других явлений, например, испускания и поглощения спектральных линий. Эти два последних метода, между прочим, более чувствительны, чем метод Рождественского. В чем же тогда причина, что он сохраняет значение? Причин этих в основном две: во-первых, независимость результатов измерений от вида контура линии испускания или поглощения. Крюки должны быть лишь образцованы достаточно далеко от центра линии. Это справедливо и для случая, когда линия обладает сверхтонкой структурой. Методы же, основанные на испускании и поглощении света, должны учитывать структуру и контур уширения линии, что часто представляет весьма сложную задачу. Второе, метод крюков не чувствителен к неоднородности диспергирующей среды вдоль направления распространения света. При наличии неоднородности надо лишь заменить N_0 усредненным значением

$$\bar{N}_0 = \frac{1}{l} \int_0^l N_0(l) dl.$$

Методы же испускания и поглощения в случае пространственной неоднородности объекта требуют сложных расчетов, часто дающих мало надежные результаты.

Для дублетов главной серии щелочных металлов $n^2S_{1/2} - n'^2P_J$ нижние энергетические уровни простые, а верхние — двойные, для которых квантовое число J принимает значения $J_1 = 3/2$ и $J_2 = 1/2$. По теории Бора — Зоммерфельда вероятности обоих переходов A_{hi} (${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$) и A_{li} (${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$) равны друг другу, откуда на основании формулы (9) вытекает, что силы осцилляторов этих двух составляющих дублета относятся как статистические веса верхних уровней. Статистические же веса равны $2J + 1$. Таким образом, оказывается, что отношение сил осцилляторов для двух близких составляющих дублетов главной серии должно равняться:

$$\frac{f_{hi}}{f_{li}} = \frac{g_h}{g_l} = \frac{2J_h + 1}{2J_l + 1} = 2.$$

Этот результат сходится с данными измерений Рождественского для головных дублетов главных серий Na, K, Rb, Cs, но расходится с указанными выше результатами его измерений для последующих дублетов тех же серий. Соответствующее уточнение теории было получено лишь на основании квантовой механики Шрёдингера. Но раньше чем говорить о сопоставлении квантовомеханических расчетов с экспериментальными данными, остановимся на одном недоразумении, встречающемся при изложении работ Д. С. Рождественского. Относящиеся к нему обстоятельства давно выяснены, по все же разберем их, так как иначе может создаться впечатление, что Рождественскому принадлежат неверные утверждения.

Дело идет о связи работ Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии с интенсивностями спектральных линий. Прежде всего оговорим,

что мы будем иметь дело с линиями испускания, а затем заменим неопределенный термин: «интенсивность» точным фотометрическим термином «яркость». Для протяженного источника малой оптической плотности яркость спектральной линии определяется мощностью излучения единицы объема. По Эйнштейну же, как известно, мощность спонтанного излучения линии с частотой ν_{ki} от единицы объема равна

$$W_{ki} = N_k A_{ki} h \nu_{ki}.$$

Отсюда, на основании формулы (9), для отношений яркостей составляющих дублетов главной серии (рис. 3, б) получим

$$\frac{I_{ki}}{I_{li}} = \frac{N_k}{N_l} \frac{g_l}{g_k} \frac{f_{ki}}{f_{li}} \left(\frac{\nu_{ki}}{\nu_{li}} \right)^3.$$

Здесь все отношения, стоящие в правой части равенства, кроме отношения N_k/N_l , постоянны для данного дублета. Величины N_k и N_l равны соответственно числу атомов в единице объема в k -м и l -м возбужденных состояниях. Они зависят от условий опыта и их отношение может

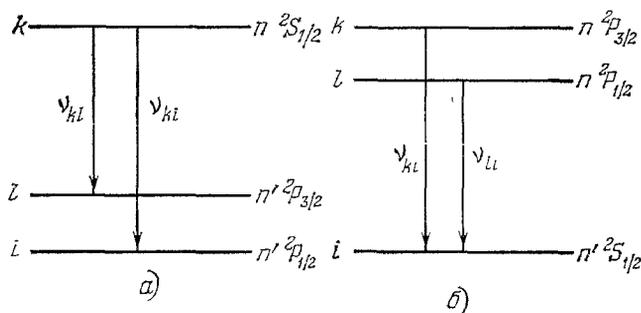


Рис. 3.

меняться в любых пределах. Например, Вуду в его известных опытах по флюоресценции паров натрия удавалось заселить один из двух уровней $3^2P_{1/2}$, $3^2P_{3/2}$, в то время как второй оставался незаселенным.

Лишь для дублетов резкой серии ($n^2P_J - n'^2S_{1/2}$; рис. 3, а), обе компоненты которых имеют общий исходный уровень $n'^2S_{1/2}$, отношение яркостей равно

$$\frac{I_{ki}}{I_{li}} = \frac{g_i}{g_l} \frac{f_{ki}}{f_{li}} \left(\frac{\nu_{ki}}{\nu_{li}} \right)^3,$$

т. е. не зависит от условий возбуждения атомов (при отсутствии в источнике реабсорбции света и других вторичных процессов).

Из сказанного становится ясно, что приводимое иногда без всяких оговорок утверждение, будто Рождественский доказал неизменность и целочисленность отношения «интенсивностей» составляющих дублетов, неверно. Каждый частный случай требует специального разбора. Сам Рождественский в своих статьях писал об отношении либо числа диспергирующих электронов, либо сил осцилляторов. Более подробный анализ всех относящихся сюда вопросов был дан учеником Д. С. Рождественского — А. Н. Филипповым⁶.

* * *

За время, протекшее с начала работ Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии до середины 30-х годов, произошли фундаментальные изменения точек зрения на строение атомов. Тем не менее, как было сказано, его работы не только сохранили значение, но приобрели особую

актуальность. Измерение методом крюков вероятностей переходов в атомах превратилось в одну из важнейших задач экспериментальной атомной физики. Поэтому естественно, что в конце 30-х годов Дмитрий Сергеевич снова обратился к исследованию аномальной дисперсии. За два последних года жизни, в 1939—1940 гг., он выполнил в стенах университета, куда вернулся после восьмилетнего перерыва, новое большое исследование³.

Употреблявшаяся ранее экспериментальная установка позволяла исследовать сравнительно легкоплавкие элементы. Естественно возникла потребность создать установку, которая позволяла бы вести работу и с тугоплавкими элементами. Для этой цели Рождественский решил

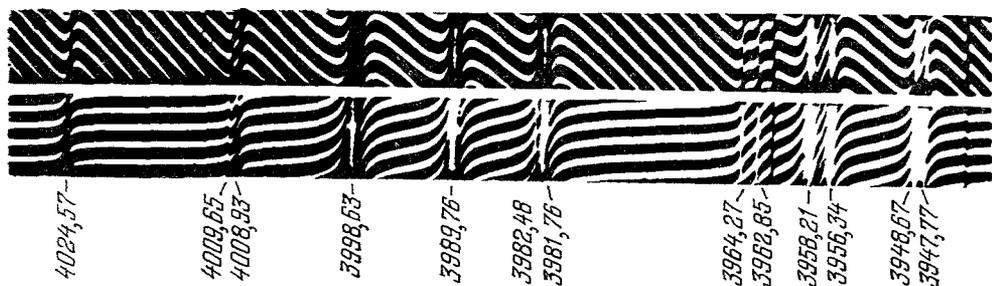


Рис. 4.

использовать вакуумную печь, типа печи Кинга, с телом накала в виде графитовой трубки. Работа была связана с преодолением новых и еще более существенных, чем раньше, экспериментальных трудностей. В одну из ветвей интерферометра — тончайшего оптического прибора — требовалось ввести громоздкую печь, легко нарушавшую необходимый строгий температурный режим. После года напряженной работы, в которой Дмитрию Сергеевичу помогал его молодой сотрудник Н. П. Пенкин, установка была создана. В одну из ветвей большого интерферометра, с размером стоек в 30 см, была введена печь, которая питалась 30-киловаттным вольтопонижающим трансформатором. При силе тока в 1800 а печь давала температуру до 3000 °С.

В результате создания такой установки экспериментальные возможности сильно раздвинулись. Была намечена обширная программа исследований — прежде всего исследование элементов с достраивающейся *d*-оболочкой (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni). Установка оправдала себя: удалось наблюдать аномальную дисперсию в парах железа и хрома, а позже и для ряда других элементов. Для узкого мультиплета хрома ${}^5S_2 - {}^5P_{1,2,3}$ было измерено отношение сил осцилляторов, оказавшееся равным 3,004 : 4,997 : 7,00, что совпадает с теоретическим целочисленным отношением 3 : 5 : 7. На рис. 4 приведена фотография интерференционных полос и крюков вблизи линий титана, лежащих в области 4025—3947 Å.

Эта последняя работа Дмитрия Сергеевича была своего рода завещанием его ученикам и сотрудникам — завещанием продолжать и расширять работы по применению метода крюков для решения задач атомной физики. Ценность всякой научной работы определяется не только тем, что в ней непосредственно получено, но и тем, началом каких новых

исследований она послужит. В этом отношении значение работ Д. С. Рождественского по аномальной дисперсии исключительно велико. За ними последовал длинный ряд исследований, начатых еще при его жизни и широко развитых в последующие годы.

Следует отметить одну характерную особенность Дмитрия Сергеевича: он никогда не включал при публикации свою фамилию в число авторов, если не принимал сам непосредственного участия в измерениях или расчетах. Число опубликованных им работ по аномальной дисперсии (включая работы по теории интерферометра) равно всего семи. Вместе с тем еще при его жизни его учениками была опубликована, без упоминания его фамилии в числе авторов, целая серия работ, в постановке которых он принимал самое близкое участие. Владимир Константинович Прокофьев вспоминает, что когда он принес Дмитрию Сергеевичу на просмотр текст своей первой статьи, Дмитрий Сергеевич вычеркнул свое имя из числа авторов, пояснив: помогать вам в выполнении работы была моя обязанность, как вашего руководителя, а ставить мое имя рядом с вашим я не могу, работу делали вы и под статьей должно стоять ваше имя.

Вместе с тем без учета работ учеников и сотрудников Д. С. Рождественского нельзя по-настоящему оценить ни глубину принадлежащих ему идей, ни значимость разработанных им методов исследований.

Дадим краткий обзор этих работ, появившихся приблизительно до конца 40-х годов. Более поздние работы столь обширны, что для их изложения потребовалась бы отдельная статья. В. К. Прокофьев и А. Н. Филиппов измерили вероятности переходов для ряда последовательных линий главных серий атомов щелочных металлов. Поскольку большинство этих серий лежит в ультрафиолете, пришлось разработать новую аппаратуру. А. Н. Филиппов, безвременно скончавшийся талантливый и тонкий экспериментатор, построил интерферометр с флюоритовой оптикой. Это — уникальный прибор, позволяющий работать во всей спектральной области, вплоть до крайнего ультрафиолета. Пользуясь этим флюоритовым интерферометром, Филиппов и Прокофьев ⁷ наблюдали аномальную дисперсию у 25 последующих членов главной серии натрия и измерили вероятности переходов у 16 из них. Было показано, что, начиная с 11-го члена, хорошо выполняется предсказанная теоретически обратная пропорциональность вероятностей переходов кубу главных квантовых чисел. Однако для первых членов главной серии натрия спад вероятностей переходов происходит быстрее. У лития Филиппов обнаружил еще большее отступление от «закона кубов»: ход вероятностей переходов не монотонен, вероятность перехода для третьего члена главной серии больше, чем для второго.

Измерения Филиппова и Прокофьева позволили еще в одном отношении сопоставить выводы теории и опыта ⁸. По так называемому правилу Томаса — Куна алгебраическая сумма всех сил осцилляторов данного уровня должна равняться $\frac{1}{3}$ числа степеней свободы k излучающего атома:

$$\sum_i f_i = \frac{1}{3} k.$$

Филиппов и Прокофьев нашли, что для натрия, а особенно для таллия, правило Томаса — Куна не выполняется.

Появление расхождений между теорией и опытом требовало разъяснений. Теоретические расчеты того времени носили в основном полумодельный характер и не могли претендовать на точность. Расчеты надо было делать на основе квантовой механики, разработав метод точного

определения собственных функций для атомов с одним и несколькими валентными электронами. Первый шаг в этом направлении был сделан В. К. Прокофьевым⁹, который, воспользовавшись незадолго перед тем появившейся работой японского физика Сугиуры, рассчитал вероятность переходов для последующего ряда дублетов главной серии натрия. Результаты расчетов хорошо совпали с опытными данными. Заинтересовавшись этим успехом, Дмитрий Сергеевич решил образовать специальную группу теоретиков-расчетчиков. Возглавить группу был приглашен В. А. Фок. В ее состав вошли: М. Г. Веселов, М. И. Петрашень, А. Р. Кричагина. Работа группы оказалась исключительно успешной. В короткое время В. А. Фок создал приближенный метод расчета собственных функций, приобретший впоследствии мировую известность под названием метода Фока — Хартри. По этому методу были рассчитаны вероятности переходов для атомов ряда элементов, оказавшиеся в хорошем согласии с экспериментами. В. А. Фок показал также¹⁰, что расхождение экспериментальных данных с правилом Томаса — Куна вполне объяснимо.

Значение метода Фока — Хартри далеко выходит за пределы задач, связанных с расчетом вероятностей переходов. Однако ради исторической точности следует помнить, что работы В. А. Фока по приближенным методам расчета собственных функций атомов начались в результате поисков решения задач, выдвинутых Д. С. Рождественским.

Следующая важная группа работ основана на возможности по методу Рождественского находить концентрацию атомов в излучаемом паре или газе. По формуле (8) константа a_i связана с произведением $N_0 f_{0k}$. Здесь в случае, когда нижним уровнем является нормальный уровень, N_0 означает концентрацию нормальных атомов. Когда же нижним уровнем является возбужденный уровень с энергией W_i , то по a_i находится произведение $N_i f_{ik}$, где N_i — концентрация возбужденных атомов. Таким образом, если известны силы осцилляторов f_{ik} , то метод аномальной дисперсии Рождественского позволяет с большой точностью находить концентрации нормальных или возбужденных атомов. Их относительные значения можно определять и без знания сил осцилляторов f_{ik} .

Весьма интересна выполненная в этом направлении работа Г. С. Кватера¹¹. Он изучал аномальную дисперсию в парах таллия, атомы которого характеризуются тем, что у них несколько выше нормального уровня ${}^2P_{1/2}$ расположен метастабильный уровень ${}^2P_{3/2}$. При достаточно высокой температуре заметная часть атомов таллия окажется переведенной в метастабильное состояние ${}^2P_{3/2}$ и в спектре поглощения обнаружатся две серии. Измерение аномальной дисперсии позволяет найти отношение концентрации атомов в двух состояниях $N_1 ({}^2P_{1/2})/N_2 ({}^2P_{3/2})$. С другой стороны, это отношение по закону Больцмана равно

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} e^{-(W_1 - W_2)/kT}.$$

Сопоставляя экспериментальные и теоретические данные можно было показать, что они согласуются в пределах 1,5% — величины, не превышающей ошибки измерений. До появления этой работы было известно несколько более или менее косвенных способов экспериментальной проверки закона Больцмана. Работа же Кватера показала, что метод крюков Рождественского дает наиболее прямой и точный способ проверки этого основного закона статистической физики.

Наблюдения над аномальной дисперсией позволили проверить и другой вывод из статистической физики, а именно так называемую формулу Саха, дающую концентрацию ионов при термической ионизации. Н. П. Пенкин¹², продолжая после смерти Д. С. Рождественского работать на

упомянутой установке с высокотемпературной печью Кинга, измерил концентрацию ионов бария в парах при высокой температуре. Результаты измерений оказались в хорошем согласии с формулой Саха. Иначе результаты этих наблюдений можно истолковать в том смысле, что пары бария находились в термодинамическом равновесии со стенками печи, характеризующимися определенной температурой T .

Аналогичным образом метод крюков дает возможность измерять концентрацию частиц в газоразрядной плазме и судить о том, достигается ли в плазме термодинамическое равновесие или нет. Наблюдения такого типа получили особый интерес с появлением лазеров, когда на очередь стал вопрос изучения механизма возникновения инверсии заселенностей. Интересно отметить, что первые предложения использовать метод крюков для экспериментального изучения индуцированных переходов были сделаны еще в 1924 г. Тогда, во время съезда физиков, происходившего в Ленинграде, П. С. Эренфест обсуждал с Д. С. Рождественским возможность прямого экспериментального подтверждения существования индуцированных переходов, введенных в рассмотрение Эйнштейном. Однако по состоянию тогдашней экспериментальной техники казалось невозможным сделать это путем измерения интенсивности линий поглощения — дело шло об уменьшении поглощения по сравнению с ожидаемым на основании классической модели (идея о возможности обнаружить генерацию света в то время еще не приходила в голову). Поэтому было решено попытаться наблюдать проявление индуцированных переходов в аномальной дисперсии. Уже тогда было известно, что учет индуцированных переходов ведет к дополнительному члену в формуле Зельмейера:

$$n^2 - 1 = \frac{e^2}{\pi m} \sum_k \frac{f_{ik} N_i}{v_{ik}^2 - v^2} \left(1 - \frac{g_i}{g_k} \frac{N_h}{N_i} \right). \quad (10)$$

Наличие в формуле (10) добавочного члена снижает дисперсию, что может рассматриваться как проявление «отрицательной дисперсии». Однако обычно концентрация атомов в верхнем возбужденном состоянии значительно меньше, чем в нижнем, так что $N_h/N_i \ll 1$. Поэтому отрицательная дисперсия заметно не проявляется. Следовательно, дело шло о подборе таких условий опыта, при которых отношение N_h/N_i оказалось бы достаточным, чтобы можно было заметить отступление от обычного вида формулы Зельмейера. Было решено, что Рождественский в ближайшее время займется постановкой соответственной работы. Но вышло так, что Дмитрий Сергеевич, слишком занятый другими делами, к этой теме не приступил. Несколькими годами позже, в результате переписки с Дмитрием Сергеевичем, изучением отрицательной дисперсии занялся известный немецкий физик Ладенбург. Рождественский оказал непосредственную помощь в проведении этой работы, которая выполнялась по методу крюков. Он переслал Ладенбургу чертежи своего интерферометра, а затем давал ему ряд консультаций во время личных встреч в Берлине.

В современной литературе принято считать, что Ладенбург доказал существование отрицательной дисперсии в возбужденном неоне¹⁸. Но в действительности интерпретация результатов его наблюдений недостаточно убедительна. Подтверждение формулы (10) по методу крюков Рождественского еще продолжает стоять на очереди.

* * *

Работы по аномальной дисперсии далеко не исчерпывают научной деятельности Д. С. Рождественского. Большое число других вопросов

теоретической и прикладной оптики привлекало его внимание. Особенно много времени он уделил теории строения атомов и атомным спектрам.

В декабре 1919 г. при праздновании первой годовщины основания Оптического института Д. С. Рождественский выступил с докладом «Спектральный анализ и строение атомов»¹⁴. С большой научной смелостью и проницательностью он обобщил в этом докладе основные положения теории Бора, относившиеся лишь к атому водорода, на другие более сложные атомы. Впоследствии стало известно, что многие из его положений были примерно в то же время открыты рядом ученых Запада, но это не умаляет, а наоборот, подчеркивает его заслугу. Он один, полнее и в более общей форме высказал то, что высказало несколько наиболее крупных ученых за границей.

Для правильной оценки этой работы надо вспомнить, что в то время Советская Россия была отрезана блокадой от мировой науки и сведения о строении атомов ограничивались теми, которые были опубликованы до 1917 г. Работы Зоммерфельда об эллиптических орбитах в атоме водорода были последней новинкой. С удивительной научной прозорливостью Д. С. Рождественский сформулировал основные положения, позволившие расширить теорию на спектры любых атомов. Вот эти положения:

1) спектральные серии определяют орбиты валентных электронов в атомах;

2) далекие орбиты в атомах щелочных металлов сходны с далекими орбитами в атоме водорода;

3) число орбит валентных электронов в атоме щелочных металлов равно числу орбит в атоме водорода;

4) дублеты и триплеты создаются внутренним магнитным полем атома;

5) причина аномального явления Зеемана тоже заключается в существовании магнитного поля в атомах;

6) спектр однократного иона некоторого элемента должен походить на спектр нейтрального атома элемента, предшествующего ему в периодической системе Менделеева.

Многие из идей, высказанных Д. С. Рождественским, представляют собой фундаментальные открытия, лежащие в основе спектральной систематики, и справедливость требует, чтобы они были связаны с его именем.

Рождественский обладал обостренной способностью подмечать связи, иногда на первый взгляд второстепенные, но которые в действительности позволяли делать далеко идущие выводы. Так, заметив сходство инфракрасных спектров водорода и атомов щелочных металлов, он смог правильно сопоставить их высокие энергетические состояния и показать, что спектры щелочных металлов являются лишь сильно возмущенными спектрами водорода. Со свойственной ему образностью он говорил: «Если бы мы обладали инфракрасными глазами, т. е. прибором, столь же чувствительным к инфракрасной области, как глаза или фотографическая пластинка к видимой части, то мы увидели бы целый ряд линий, столь близких к водородным, что соответствие между спектрами всех атомов и спектром водорода было бы установлено десятки лет тому назад, непосредственно после открытия спектрального анализа».

Д. С. Рождественский высказал идею о магнитной природе спектральных дублетов и триплетов, в значительной мере облек ее в форму настоящей математической теории и связал с теорией явления Зеемана¹⁵. Тогда эта идея оспаривалась многими видными физиками, но для Рождественского, умевшего обобщать экспериментальный материал, было ясно, что только силы магнитного характера могут быть причиной возникновения дублетов и триплетов. Отстаивая эту теорию, он вместе

с тем ясно видел и те трудности, которые она в то время встречала. Как известно, впоследствии выяснилось, что полностью теория спектральных мультиплетов может быть построена лишь при учете электронного спина, тогда еще не известного.

Кроме того, Д. С. Рождественский впервые дал полный анализ спектра иона магния¹⁶. Эта работа послужила образцом для проведенных позже многочисленных анализов спектров ионов. Особый интерес представляет его работа по анализу спектра неона¹⁷. Он полнее, чем кто-либо до него, использовал гипотезу о возможности испускания одной монокроматической линии при одновременной перестройке состояния двух электронов. Эта гипотеза имеет не только большое принципиальное значение, но и является ключом к разгадке структуры сложных спектров атомов и ионов со многими валентными электронами. Наконец следует упомянуть его доклад на Менделеевском съезде в сентябре 1934 г. «Периодический закон на основе анализа спектров»¹⁸. Сопоставляя графики Мозли для следующих друг за другом элементов, Рождественский весьма наглядно проследил порядок заполнения электронных оболочек атомов. Широко пользуясь новейшими теоретическими данными, он вместе с тем предостерегал против увлечения формализмом, опасности отрыва от данных опыта. Он подчеркивал огромное значение квантовой механики для понимания структуры спектров и одновременно говорил: «Погружаться в ее таинственные глубины без прямого указания эксперимента не только опасно — просто бесплодно».

Рассматривая всю совокупность экспериментальных данных, Дмитрий Сергеевич сразу обнаружил зияющую лакуну: спектры редких земель почти не изучены. Со свойственной ему целеустремленностью он сразу сделал практический вывод: необходимо организовать систематическое проведение работ по изучению спектров редких земель. Он говорил, что мы ничего не знаем о 14 элементах из 92, стоящих в таблице Менделеева. Не может быть, чтобы они не обладали свойствами, представляющими не только научный, но и большой практический интерес. Он не ограничился словами, но начал энергично действовать. По его представлению в системе Академии наук СССР была образована Комиссия по изучению редких земель, которую он возглавил. Эта Комиссия, преобразованная потом (1939 г.) в Спектроскопическую лабораторию АН СССР, существовала недолго, но все же в ней был начат и отчасти закончен ряд интересных и оригинальных работ по изучению спектров редких земель.

Через несколько лет выяснилась необычная важность знания физических свойств элементов редкоземельной группы для решения задач ядерной энергетики. Таким образом, еще раз проявилась чрезвычайная научная прозорливость Дмитрия Сергеевича и подтвердилась правота его идеи о неразрывной связи «абстрактной» науки с техникой.

Работы Д. С. Рождественского по атомной спектроскопии также не остались без дальнейшего развития. Еще при его жизни А. Н. Теренин провел многочисленные и весьма интересные опыты по флюоресценции ряда элементов, позволившие уточнить расположение их энергетических уровней¹⁹. С. Э. Фриш выполнил анализ спектра ионизованного натрия²⁰, указавший на его сходство со спектром неона. Тем самым было показано, что предположение Рождественского о сходстве спектра иона со спектром нейтрального атома, предшествующего ему в таблице Менделеева, оправдывается и на стыке двух различных строк таблицы.

Несомненно и на последующих советских работах по атомной спектроскопии сказалось влияние пионерских исследований Рождественского в этой области. Весьма важен был уже один тот факт, что к моменту про-

рыва блокады русская наука не только не отстала от спектроскопии Западной Европы и Америки, но и шла с ней в ногу.

Научные работы Д. С. Рождественского относятся еще и к теории оптических приборов, в частности, к теории микроскопа. Он много сил и внимания уделил также изучению свойств оптического стекла и технологии его изготовления. Несмотря на большое значение этих работ, мы не будем на них останавливаться. Но, в заключение, чтобы пополнить представление о научном облике Д. С. Рождественского, укажем на его интерес к химии. Он много и убежденно говорил о необходимости глубокого проникновения физических идей в химию. Ему принадлежат слова: «В ясном понимании, в детальной картине химических явлений — конец химического эмпиризма; вместо пробы в колбе или реторте — расчет и предвидение. Химик-математик — в роли решающей инстанции». И еще: «Знание молекул необходимо включает знание того, как связаны атомы, и умение строить и разрушать молекулы. Это химия, но химия не до-боровская, эмпирическая, управляемая лишь при помощи феноменологических законов термодинамики, а химия конкретная, понимающая процесс в тончайших деталях и управляющая атомом, как шофер автомобилем».

Значение химии Рождественский видел не только в «строительстве» новых молекул, но и в решении задачи освоения солнечной энергии с помощью фотохимических процессов. Он говорил: «Мы слепо и тупо смотрим, как льется эта драгоценная энергия мимо нас на землю, не совершая работы, не снабжая нас энергией». Он высказывал оптимистическую точку зрения, что задача освоения солнечной энергии скоро будет решена и тогда наступит для человечества новая эра: «Эта новая эра по размаху своему во много раз превзойдет старую. Здесь вопрос будет идти не о новой только форме энергии, но и том, что она станет даровой, как воздух, которым мы дышим».

Дмитрий Сергеевич Рождественский был не только выдающимся физиком и мыслителем, но и большим патриотом своей родины, энтузиастом строительства нового социалистического общества. Его идеи научного и общепринципиального характера сохраняют значение вплоть до наших дней. Его светлый образ должен служить образцом и для людей, живущих через 100 лет после его рождения.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. С. Рождественский, Аномальная дисперсия в парах натрия. Магистерская диссертация, СПб, 1912; см. его же «Работы по аномальной дисперсии в парах металлов», М.—Л., Изд-во АН СССР, 1951, стр. 7 (далее сокращенно — РАД).
2. Д. С. Рождественский, Простые соотношения в спектрах щелочных металлов. Докторская диссертация, Пгр., 1915; см. также РАД, стр. 145.
3. Д. С. Рождественский, Определение сил вибраторов в спектрах атомов (совместно с Н. П. Пенкиным), Изв. АН СССР, сер. физ. 5, 635 (1944); см. также РАД, стр. 307.
4. Д. С. Рождественский, Интерферометр для исследования аномальной дисперсии, Изв. АН СССР, сер. физ., № 8, 1119 (1934); Тр. ГОИ, вып. 101 (1935).
5. Д. С. Рождественский, Соотношение двух линий D_1 и D_2 дублета натрия (совместно с В. И. Турочеровым), ЖРФХО, ч. физ. 49, 128 (1948).
6. А. Н. Филиппов, Тр. ГОИ 8, вып. 85 (1932).
7. W. K. Prokofiew, A. N. Filippow, Zs. Phys. 56, 458 (1929).
8. W. K. Prokofiew, A. N. Filippow, *ibid.* 85, 647 (1933).
9. W. K. Prokofiew, *ibid.* 58, 255 (1929).
10. W. A. Fock, *ibid.* 89, 744 (1934).

11. Г. С. Кв а т е р, ЖЭТФ 11, 421 (1944).
12. Н. П. П е н к и н, Изв. АН СССР, сер. физ. 11, 217 (1947).
13. R. L a d e n b u r g, Rev. Mod. Phys. 5, 243 (1933).
14. Д. С. Р о ж д е с т в е н с к и й, Спектральный анализ и строение атома, Тр. ГОИ 1, вып. 6 (1920); Значение спектральных серий, *ibid* 2, вып. 7 (1921); см. его же «Избранные труды», М., «Наука», 1964, стр. 5 и 66 (далее сокращенно — ИТ).
15. D. S. R o z h d e s t w e n s k i i, Doublets in Spectral Series, Nature 107, 203 (1921).
16. Д. С. Р о ж д е с т в е н с к и й, Серии спектра ионизованного натрия из сравнения со спектром ионизованного гелия, Тр. ГОИ 2, вып. 9 (1921); см. также ИТ, стр. 108.
17. Д. С. Р о ж д е с т в е н с к и й, Две независимые системы серий в спектре неона, Тр. ГОИ 3, вып. 18 (1924); см. также ИТ, стр. 111.
18. Д. С. Р о ж д е с т в е н с к и й, Периодический закон на основе анализа спектров (доклад на Менделеевском съезде, 1934 г.), Труды съезда, 1936, стр. 65; см. также ИТ, стр. 120.
19. А. Н. Т е р е н и н, Тр. ГОИ 4, вып. 32 (1928).
20. S. E. F r i s c h, Naturwissenschaften 15, 507 (1927); Тр. ГОИ 8, вып. 81 (1932).