

ОПТИКА РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.

Д. Н. Наследов, Киев.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.

Комптон в своей речи, читанной в Bad-Kissingen в сентябре прошлого года, подчеркнул, что явления преломления и отражения следует рассматривать как одну проблему. Это вытекает из того, что отражение мы можем наблюдать только тогда, когда световой луч падает на поверхность раздела двух сред с различными преломляющими способностями. Таким образом, наблюдая одно явление, мы тем самым доказываем и существование другого.

Начиная с Рентгена вплоть до самого недавнего времени было сделано много безуспешных попыток обнаружить преломление рентгеновских лучей ¹⁾.

Случай помог здесь подойти ближе к решению проблемы. Благодаря сильно усовершенствованной Зигбаном методике рентгеноспектроскопии, Стенстрем ²⁾, изучая спектры рентгеновских лучей большой длины волны с помощью кристаллов сахара и гипса, обнаружил некоторые отступления от закона Брэгга. Позже Яльмар исследовал всесторонне этот вопрос и предложил формулу, заменяющую с большей точностью формулу Брэгга. Эти отступления от закона Брэгга оказались возможным объяснить преломлением луча в кристалле. При этом необходимо было только допустить, что показатель преломления рентгеновских лучей меньше единицы.

Комптон из этого сделал тот естественный вывод, что рентгеновские лучи при переходе из воздуха в какое-либо тело могут испытать полное отражение. Доказав же существование полного отражения, мы тем самым доказываем преломление рентгеновских лучей. Кроме того, определивши предельный угол полного отражения, мы получаем возможность вычислить показатель преломления рентгеновских лучей.

¹⁾ Об этих ранних работах ср., напр., УФН. 5, 1—2, 149, 1925.

²⁾ W. Stenström, Diss. Sund, 1919.

В 1923 г. Комптон ¹⁾ опубликовал результаты своих исследований. Рис. 1 показывает схему его опыта. Пучок рентгеновских лучей, выделяемый щелями S_1 и S_2 , падает на полированную поверхность серебра или стекла под углом в несколько минут и отражается от него. Далее лучи падают на кристалл и следует затем в ионизационную камеру. Таким путем Комптон доказал, что показатель преломления исследованных

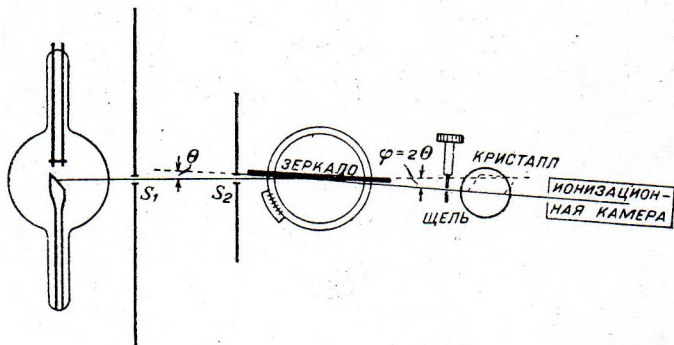


Рис. 1.

материалов действительно меньше единицы. В таблице 1 приведены результаты измерений Комптона для некоторых веществ.

Таблица 1.

	Стекло $\lambda = 1,279$	Стекло $\lambda = 0,52$	Серебро $\lambda = 1,279$
α	10'	4'	22,5'
$\delta \cdot 10^6$	4,2	0,9	21,5

Здесь α — предельный угол и $\delta = 1 - \mu$, где μ показатель преломления.

Совсем недавно аналогичные исследования были произведены Доаном ²⁾. Рис. 2 воспроизводит его снимки. Из рассмотрения этих снимков видно, что точность измерения предельного угла может быть очень большой. На этих снимках линия P соответствует прямому лучу, линия C — критическому углу полностью отраженного луча.

Нужно заметить, что еще ранее Доана Линник и Лашкарев ³⁾ занимались изучением преломления рентгеновских лучей. Им удалось с помощью крайне простого метода наблюдать явление полного отражения. Предельный угол α у вышеназванных физиков мог быть из-

¹⁾ А. Н. Compton, Phil. Mag., 45, 1121, 1923.

²⁾ R. S. Doan, Phil. Mag., 30, 100, 1927.

³⁾ W. Linnik u. W. Laschkarew, Z. f. Physik, 38, 659, 1926.

мерен с точностью до 1%. Рис. 3 показывает снимок для кварца. Как видно, кварц дает очень резкую границу.

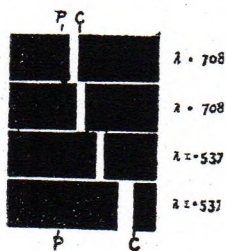


Рис. 2.

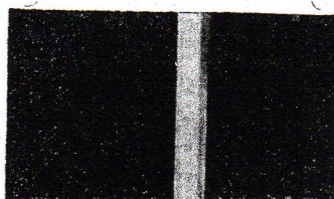


Рис. 3.

В таблице 2 приведены результаты измерений Линника и Лашкарева.

Таблица 2.

	Кварц	Кронглас	Флинтглас	Исландский шпат	Железо
α	13,4'	13,0'	14,5'	14,2'	около 23'
$\delta \cdot 10^6$	7,60	7,14	8,85	8,48	около 22,4

Здесь α и δ имеют то же значение, что и в таблице данных Комптона.

Чрезвычайно любопытно то обстоятельство, что Линником и Лашкаревым было получено обыкновенное отражение рентгеновских лучей от посеребренного зеркала даже под углом падения около 2°!

Итак, теперь можно с уверенностью говорить о преломлении и отражении рентгеновских лучей. Если это так, то крайне интересно было бы иметь возможность получить рентгеновский спектр при помощи обыкновенной стеклянной призмы. И вот в конце 1924 г. Зигбан, Ларсон и Валлер ⁴⁾ опубликовали исследование, в котором им удалось получить рентгеновский спектр при помощи стеклянной призмы с большим преломляющим углом. Как и следовало ожидать, лучи призмой отклонялись в сторону противоположную основанию ее. Это, как легко сообразить, является следствием того, что для рентгеновских лучей $n < 1$. На фотографической пластинке был получен таким образом рентгеновский спектр с достаточно резкими линиями; кроме того на ней же заметен отраженный луч.

⁴⁾ A. Larsson, M. Siegbahn, J. Waller, Naturwissenschaften, 52, 1212, 1924.

В таблице 3 находятся данные измерений величины δ для линий К-серии Fe, Cu и Mo.

Таблица 3.

(Стеклоплатиновая призма, плотность 2,551).				
Вещество	Линия	λ	$\delta \cdot 10^6$	$\delta/\lambda^2 \cdot 10^6$
Fe	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\alpha_{1,2}} \\ K\beta \end{array} \right.$	1,933	$12,38 \pm 0,4$	$3,31 \pm 0,10$
		1,750	$10,00 \pm 0,4$	$3,26 \pm 0,10$
Cu	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\alpha_{1,2}} \\ K\beta \end{array} \right.$	1,538	$8,125 \pm 0,6$	$3,435 \pm 0,02$
		1,389	$6,648 \pm 0,05$	$3,443 \pm 0,03$
Mo	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\alpha_{1,2}} \\ K\beta \end{array} \right.$	0,703	$1,64 \pm 0,10$	$3,3 \pm 0$
		0,630	$1,22 \pm 0,15$	$3,1 \pm 0,4$

Необходимо еще упомянуть о том, что измерения показателя преломления рентгеновских лучей очень хорошо согласуются с следствиями теории дисперсии Друде и Лоренца. По замечанию Комптона согласие между теорией и опытом достигает 1%, что следует безусловно считать познейшим подтверждением тех предположений, которые лежат в основании теории. С другой стороны, считая правильным уравнение дисперсии теории электронов, можно на основании данных опыта вычислить число электронов в атоме преломляющей среды. Вычисления показывают, что различие между числом электронов в атоме и порядковым номером элемента меньше 0,5%!

ДИФФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.

Вскоре же после открытия Рентгена и его неудачных опытов с диффракционной решеткой Хага и Винд¹⁾ поставили ряд опытов с тонкими щелями. Их опыты позже были повторены Вальтером и Полем²⁾ с еще более тонкой установкой. Если вышеназванные авторы и получили какие-либо результаты, то все же их опыты были настолько малоубедительны, что требовалось все это еще многократно проверить и повторить. Всем известно, что этот вопрос был разрешен при использовании естественных диффракционных решеток — кристаллов. С помощью кристаллов с большими постоянными при пользовании вакуум-спектрографов Зигбану и его ученикам удалось продлить спектр рентгеновских лучей до 13,6 Å. С другой стороны, Милликэн исследовал спектр ультрафиолетовых лучей при помощи диффракционных решеток очень тонкой конструкции, работая в вакууме, до 144 Å. Таким образом оставался очень большой пробел между рентгеновскими и ультрафиолетовыми лучами.

¹⁾ H a g a u. W i n d, W i e d. A n n., 68, 884, 1899.

²⁾ W a l t e r u. P o h l, A n n. d. P h y s., 29, 331, 1909.

Можно было наметить три пути для заполнения этого пробела: 1) применение кристаллов с большими постоянными, 2) применение фотоэффекта и 3) применение искусственных дифракционных решеток. Естественно вполне то, что исследователи первое время обращали большое внимание на первый путь. Кое-чего они этим самым и достигли. Так, например, Тореус и Зигбан¹⁾ воспользовались кристаллами пальмитиновой кислоты, постоянная которых равна 35,5 Å. Они измерили *L*-линии *Sr* с длиной волны около 21 Å. Этим же методом пользовался Довийе²⁾. Так получил он линию *Ka* углерода, для которой $\lambda = 45,3$ Å. Этими работами уже частично заполняется разрыв в общем спектре излучения. Вторым путем — использованием закона Эйнштейна — шли тоже очень многие экспериментаторы. Из них следует назвать Ричардсона, Юза (Hughes), Фута, Гольвека и Лукирского. Особенно интересна работа последнего³⁾.

Лукирский определил между прочим и длину волны для линии *KaC*. Для нее, по Лукирскому, $\lambda = 48,9$ Å. Это число довольно хорошо согласуется с числом, которое определил Довийе совершенно иным методом. Метод фотоэффекта прежде всего является методом косвенным, и постольку, поскольку мы не можем с большой точностью измерить как скорость фото-электрона, так и работу вырывания, точное измерение длины волны с помощью его невозможно. Вот почему этот метод был вскоре оставлен. Конечно, идеальным решением вопроса следует считать метод получения рентгеновского спектра при помощи искусственной дифракционной решетки, ибо только он дает нам возможность произвести абсолютное измерение длины волны луча. Даже метод кристалла по существу своему не в состоянии нам дать этого, так как все же он основывается на определенных гипотезах о строении кристаллов. В этом отношении крайне важно было бы путем абсолютного измерения длин волн рентгеновских лучей проверить эти гипотезы. Поэтому-то внимание лучших экспериментаторов последние годы было обращено на методы получения спектров рентгеновских лучей при помощи искусственных дифракционных решеток. Перейдем теперь к описанию этих работ. Но прежде мы покажем, что для лучей с малой длиной волны гораздо предпочтительней метод тангенциального, чем метод нормального падения.

Для этого обратимся к рис 4. Основное уравнение дифракционной решетки, как известно, пишется следующим образом:

$$n\lambda = d [\cos \Theta - \cos (\alpha + \Theta)]. \quad (1)$$

При достаточно малом угле Θ его можно переписать:

$$n\lambda = \frac{d}{2} (\alpha^2 + 2\alpha\Theta)$$

¹⁾ Siegbahn u. Thoraеus, Arch. f. M. o. F., 19, I, 1925; Thoraеus, Phil. Mag., 7, 312, 1926.

²⁾ Dauvillier, Comptes Rendus, 182, 1083, 1926.

³⁾ Lukirsky, ZS. f. Physik, 22, 1924.

или, если положить:

$$\alpha + 2\Theta = \Delta,$$

оно переписывается следующим образом:

$$n\lambda = \frac{d}{2} \alpha \Delta. \quad (2)$$

Эти формулы, конечно, предполагают условия тангенциального падения луча.

Тибо в своей работе отмечает преимущество тангенциального падения перед нормальным, заключающееся в том, что при первом рассеивающая способность больше, чем при втором.

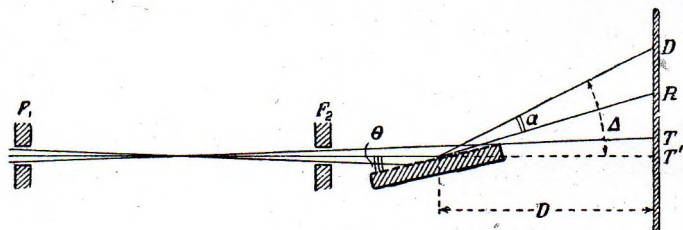


Рис. 4.

В самом деле, предположим, что мы имеем две решетки с одной и той же постоянной d . Пусть на них падают лучи одной и той же длины волны λ , но на первую тангенциально, а на вторую нормально, под углами α_1 и α_2 . Полагая эти углы достаточно малыми, нетрудно получить для них следующие выражения:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{2\lambda}{d}} \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda}{d}.$$

Рассеивающие способности будут равны соответственно:

$$p_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial \lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\lambda d}} \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{\partial \alpha_2}{\partial \lambda} = \frac{1}{d}. \quad (3)$$

Из этих формул видно, что для тангенциального падения рассеивающая способность зависит от λ и при очень малых длинах волн может быть весьма большой. Тибо ⁴⁾ указывает, что для $\lambda = 1860 \text{ \AA}$ решетка в 20 штрихов при тангенциальном падении дает тот же эффект, что и решетка в 730 штрихов, освещаемая нормально. Для $\lambda = 500 \text{ \AA}$ решетка в 2400 штрихов может быть заменена решеткой в 570 штрихов! Можно показать также, что метод тангенциального падения дает нам возможность получения очень тонких спектральных линий.

⁴⁾ J. Thibaud, Journ. de Phys. et le Radium, VIII, 13, 1927; VIII, 447, 1927; Phys. Z. S., 29, 241, 1928.

Теперь перейдем к описанию дифракции рентгеновских лучей при помощи решетки с тангенциальным падением, которую получил Тибо. Угол падения θ Тибо выбирал таким образом, чтобы он был меньше предельного угла полного внутреннего отражения. Таким образом, конечно, будет достигнут максимум интенсивности диффрактированного пучка лучей. Из того, что этот угол, как указывалось выше, очень мал, явствует уже вся трудность и тонкость работы. Сначала Тибо делал снимки в пустоте со стеклянной решеткой

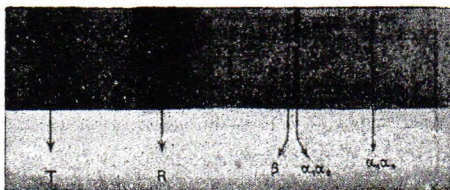


Рис. 5.

в 200 штрихов на 1 мм. Расстояние между пластинкой и решеткой было равно 445 и 1300 мм. Экспозиция заключалась между 10 и 60 мин. На рис. 5 приведен снимок спектра меди при расстоянии 1300 мм. На нем мы видим след прямого луча T , затем след луча, испытавшего полное отражение, и, наконец, систему прекрасных спектральных линий.

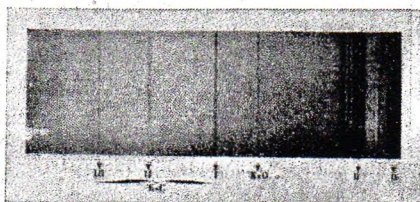


Рис. 6.

Тибо пытался те же спектры получить при помощи металлической решетки с 570 штрихами на 1 мм, но даже при очень большой экспозиции ему не удалось достигнуть сколько-нибудь хороших результатов. Это он объясняет тем, что для данного рода лучей металлическое зеркало имеет коэффициент отражения значительно меньший, чем для стеклянного.

Посмотрим теперь, что дало измерение λ .

Тибо получил для линии $K\alpha_{Cu}$:

$$\lambda = 1,540 \text{ \AA}.$$

Кристалл же дает для той же линии:

$$\lambda = 1,538 \text{ \AA}.$$

Совпадение, как видим, блестящее, что служит доказательством правильности всех тех положений, которые до сих пор лежали в основании рентгеноспектроскопии. Итак можно получить спектр рентгеновских лучей самым обыкновенным оптическим методом, именно методом стеклянной дифракционной решетки. Любопытно было бы теперь воспользоваться этим для заполнения пропасти, существующей между ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами. Этот последний вопрос и разрешил Тибо

в своей последней работе, напечатанной в конце 1927 г. Для этой цели он сконструировал специальную металлическую рентгеновскую трубку. Трубка работала при напряжениях 900—1 000 V и при силе тока от 10 до 50 мА. Решетка бралась постоянно стеклянная на основании предыдущих исследований. Первая, употребленная им решетка имела 200 штрихов на 1 мм. Антикатоде трубки служил углерод. Вторая решетка Тибо имела 1 180 штрихов на 1 мм. Рис. 6 показывает спектр, полученный при помощи этой решетки. На спектре кроме линии $K\alpha C$ заметна еще $K\alpha$ — линия кислорода. Постоянная второй решетки была измерена с очень большой точностью при помощи линии $\lambda = 5461 \text{ \AA}$ ртутной дуги и оказалась равной $d = 8477 \text{ \AA}$. Таким образом возможно было измерение длин волн в абсолютной мере с достаточно большой точностью. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Линии	Длина волны		$\frac{\nu}{R}$
	в $\text{\AA}$	в вольтах	
$LaFe$	17,7	697	51,4
$K\alpha O$	23,8	518	38,2
$K\alpha C$	44,9	275	20,3
$M Mo$	65,0	190	14,0

Абсолютная точность измерений, учитывая уже все источники погрешностей, составляла приблизительно $0,2\text{\AA}$.

Интересно сравнить результаты измерений Тибо с результатами прежних исследований. Так, как было уже нами отмечено, для $LaFe$ Тореус получил $17,58 \text{ \AA}$, Тибо — $17,7 \text{ \AA}$. Для $K\alpha O$ Довийе получил $24,8 \text{ \AA}$, Тибо — $23,8 \text{ \AA}$. Наконец, для $K\alpha C$ Довийе получил $45,5 \text{ \AA}$, Лукирский — $48,9 \text{ \AA}$ и Тибо — $44,9 \text{ \AA}$. Конечно, с наибольшим доверием следует относиться к числам, полученным Тибо.

Необходимо еще упомянуть, что не менее удачные результаты с обыкновенной дифракционной решеткой были получены и рядом других авторов. Из них наиболее замечательны работы Осгуда, Гунта и некоторых других.