

УДК 548.732

МОДУЛИРОВАННОЕ КОМПТОНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАССЕЯННОЕ НА ЛЕГКИХ АТОМАХ

М. А. НАВАСАРДЯН, О. С. СЕМЕРДЖЯН, Р. Ц. ГАБРИЕЛЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 29 апреля 1997 г.)

Показано, что в случае комптоновского рассеяния, когда ожидаемая потеря энергии фотоном меньше, чем энергия К-края поглощения рассеивающего атома, интенсивность рассеяния настолько слаба, что невозможно восстановить картину модуляции рассеянного излучения. Это дает возможность исследовать процесс рассеяния с различных точек зрения. Наблюдалось, в частности, что при одновременном наличии в данном веществе тяжелых и легких атомов процесс поглощения фотонов тяжелыми атомами превалирует над процессом рассеяния легкими атомами.

Появление способа двойной модуляции рентгеновского излучения с целью передачи сигналов в работах [1-3] дало возможность модулировать это излучение во всем звуковом (до 20 кГц) и в близком ультразвуковом диапазонах (до 30 кГц). Используя такие пучки, в работе [4] были возбуждены глубокие энергетические уровни у некоторых атомов (иттрий, железо) и получены отклики (эхо) такого излучения из "недр" атомов. Хорошие результаты были получены и при рассмотрении атомов с тяжелыми (тяжелее Mo) и со средними атомными номерами (легче Mo); в частности, удалось возбудить и регистрировать флуоресцентное излучение как от L, так и от K уровней соответствующих атомов [5].

В настоящей работе рассматривается возможность наблюдения (регистрации) потоков комптоновски-рассеянных (неупруго-рассеянных) фотонов у самых легких атомов (H, Li, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si). При этом особое внимание уделено влиянию энергий уровней этих атомов на процесс взаимодействия излучений с этими же атомами. Необходимость такой работы диктуется тем, что в настоящее время нет определенной взаимосвязи между величиной потерянной энергии фотона и электрона отдачи и начальных состояний энергетических уровней электронов исследованных атомов, хотя имеется много исследований относительно соотношений интенсивностей комптоновски-рассеянного и когерентно-рассеянного излучений [6,7].

Схема возбуждения и регистрации комптоновского излучения, которая идентична схеме для регистрации рентгенфлуоресцентного излучения, описанного в работах [4,5], представлена на рис.1 (схема модуляции падающего пучка не показана). Эксперимент проводился по ниже-

приведенной последовательности. Вещество с легкими атомами (1) (чисто атомарное вещество или соединение) располагается на пути заранее модулированного на рентгеновском модуляторе дифрагированного рентгеновского излучения (2), и в образце генерируется комптоновское излучение (3), которое регистрируется сцинтилляционным детектором (4) со входным бериллиевым окном (5). Для получения модулированного пучка (6) кварцевый или другой модулятор устанавливается с помощью гониометра в отражающее положение для данной длины волны ($0,71 \text{ \AA}$) и для данного семейства атомных плоскостей (например (1011) для кварца), а затем высокочастотными и низкочастотными генераторами в кристалл-модуляторе возбуждается модулированное акустическое колебание, в результате чего в нем образуется модулированное дифрагированное рентгеновское излучение определенной длины волны, согласно условию Брэгга. Для наблюдения картины модуляции излучения после детектора в цепь включены интегрирующая схема (6), усилитель (7) и осциллограф (8), а для того, чтобы услышать модулированный сигнал, проходящий через рентгенпучок, к схеме соединяется также громкоговоритель (9). Детектирование комптоновски-рассеянных фотонов (3) производится под углом $\sim 90^\circ$ по отношению к падающему (2) пучку.

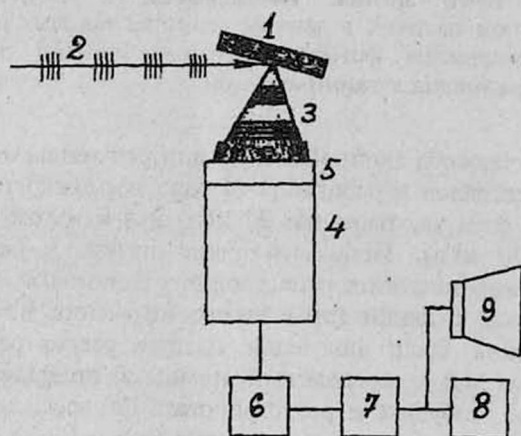
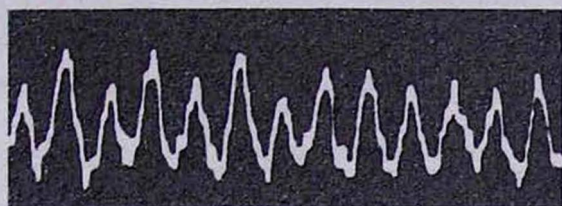


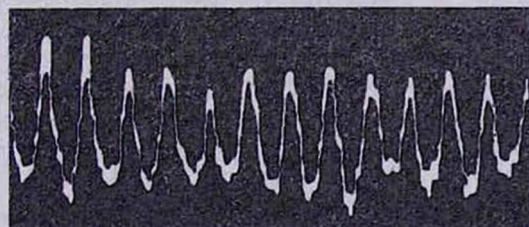
Рис.1. Схема возбуждения и регистрации модулированного комптоновского излучения. 1 — образец с легкими атомами, 2 — модулированный первичный пучок, 3 — модулированное комптоновское излучение, 4 — детектор, 5 — бериллиевое окно у сцинтиллятора, 6 — интегрирующая схема, 7 — усилитель, 8 — осциллограф, 9 — громкоговоритель.

Излучение, обусловленное электронными переходами (рентгенфлуоресцентное излучение) этих атомов, находится в длинноволновой области спектра и не проникает через бериллиевое окно с толщиной $t = 0,4 \text{ мм}$ у входа сцинтилляционного счетчика (5), а томсоновское рассеяние сравнительно слабо для легких элементов, и поэтому такие фотоны не имеют существенного значения. Кроме пяти элементов — бериллий, углерод, магний, алюминий, кремний, которые

находились также в чистом, атомарном состоянии, все остальные элементы входили в состав химических соединений: N — в натриевой селитре, кислород — в составе воды, лейкосапфира, кварца, древесины, ваты и т.д. Углерод, кроме алмаза и графита, находился также в составе парафина (C_nH_{2n+2}), целлюлозы ($C_6H_{10}O_5$), кальцита ($CaCO_3$), сегнетовой соли ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$), оргстекла (полиметилметакрилата — $(C_5H_8O_2)_x$) и хлоропренового каучука (C_4H_5Cl)_x (см. таблицу). Данные о химических соединениях взяты из книги [8]. На рис.2 показана картина модуляции интенсивности излучения комптоновского рассеяния на образцах бериллия и углерода (графита). Аналогичные картины получены и на других образцах, указанных в таблице (+). Из-за малой интенсивности рассеянных фотонов нам не удалось наблюдать четкой модуляции рассеянного излучения на чистом Si, Mg, Al, несмотря на малый атомный номер этих элементов (для наблюдения модуляции необходимы большие мощности рассеянных фотонов, а именно, $5 \cdot 10^4 - 10^5$ фотон/сек и более, достигающие до спинтиллятора детектора).



а



б

Рис.2. Картины модуляции комптоновского излучения, рассеянного на бериллии (а) и углероде (б) при низкочастотном колебании; $\nu = 1000$ Гц, резонансная частота модулятора $\nu_0 = 9,984$ мГц.

Известно, что фотоны при взаимодействии с почти свободными электронами атомов теряют часть своей энергии и образуются новые фотоны с большими длинами волн. Это изменение длины волн выражается формулой

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

Таблица

№	Химический элемент и вещество		Порядковый номер основного химического элемента и характер отклика	К-край поглощения, эВ
1	H (H ₂ O)	вода	1 (+)	13,6
2	Li (LiF)	фтористый литий	3 (+)	54
3	Li (LiNbO ₃)	ниобат лития	3 (-)	54
4	Be	бериллий	4 (+)	111
5	B (B ₄ C)	карбид бора	5; 6 (+)	192; 283
6	C	графит (алмаз)	6 (+)	283
7	C (CaCO ₃)	кальцит	6 (-)	283
8	N (NaNO ₃) N (KNO ₃)	натриевая селитра калиевая селитра	7 (+ ? -)	400
9	O (Al ₂ O ₃), (SiO ₂)	сапфир, кварц	8 (-)	531
10	F (CaF ₂)	фтористый кальций	9 (-)	689
11	Na (NaCl)	каменная соль	11 (-)	1071
12	Mg	магний	12 (-)	1303
13	Al	алюминий	13 (-)	1560
14	Si	кремний	14 (-)	1840
15	K (KCl)	силвин	19 (-)	3608
16	H, C (C _n H _{2n+2})	парафин	1; 6 (+)	13,6; 283
17	H, C (C ₆ H ₁₀ O ₅)	целлюлоза	1; 6 (+)	13,6; 283
18	H, C (NaKC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O)	сегнетова соль	1; 6 (+)	13,6; 283
19	H, C (C ₅ H ₈ O ₂) _x	оргстекло полиметилметакрилат	1; 6 (+)	13,6; 283
20	H, C (C ₄ H ₅ Cl) _x	хлоропреновый каучук	1; 6 (+)	13,6; 283

где h — постоянная Планка, m_0 — масса покоя электрона, c — скорость света, θ — угол между направлением падающего излучения и рассеянного фотона. В результате такого взаимодействия появляются электроны отдачи, которые приобретают энергию, равную разнице энергий этих фотонов [6]:

$$E_{\text{кин}} = h\nu \frac{2 \frac{h\nu}{m_0 c} \cdot \cos^2 \varphi}{\left(1 + \frac{h\nu}{m_0 c}\right)^2 - \left(\frac{h\nu}{m_0 c}\right)^2 \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (2)$$

где φ — угол между направлением падающего фотона и направлением движения электронов отдачи. $E_{\text{кин}}$ приобретает значение от нескольких

до сотен эВ. Величина $E_{кин}$ зависит от величины $h\nu$ падающего фотона и от угла вылета φ . Если учесть то обстоятельство, что $\Delta\lambda$ рассеянного под углом 90° фотона не зависит от λ и имеет значение $\Delta\lambda = 0,024 \text{ \AA}$, то соответствующая разница в энергиях этих фотонов, т.е. $\Delta E = h\nu^1 - h\nu$, при MoK_α излучении приобретает значение до $\Delta E \approx 500 - 1000 \text{ эВ}$. Как показали наши наблюдения, если атом в состоянии получить такую порцию энергии, то он может и рассеивать. А атом может получить эту порцию, если будут возбуждены его соответствующие уровни. Это вытекает из поведения исследованных веществ, а именно, фотоны рассеиваются на тех атомах, для которых выполняется условие $\Delta E \geq E_{край}$ ($E_{край}$ — энергия любого края поглощения данного атома). Следовательно, критерием свободности электрона является выполнение для них этого условия. Отсюда и вытекает пороговый характер величины интенсивности комптоновски-рассеянных фотонов.

Таким образом, если энергия К-края или любого другого края поглощения данного легкого атома больше, чем энергия, потерянная фотоном (для O, N, Mg, Al, Si это имеет место для MoK_α излучения), то атомы этих элементов не возбуждаются, и следовательно, они сильно не рассеивают и детектор не реагирует на рассеянный модулированный пучок. В нашем случае это происходит для веществ со знаком (-) (см. табл.), т.е. в атомах O, N, Mg, Al, Si не возбуждается достаточно интенсивный модулированный комптоновский пучок. Понятно, что при увеличении энергии $h\nu$ падающего фотона эти атомы будут сильно рассеивать, так как они будут поглощать потерянную порцию энергии. Фактически это наблюдалось в общеизвестной работе Бу [9], в которой, однако, этому обстоятельству не уделено никакого внимания. В этой работе применялось AgK_α излучение и атомы Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca дали удовлетворительное рассеяние интенсивности для обычных методов регистрации (без модуляции), т.к. в этом эксперименте количественные элементы ограничения интенсивностей не сыграли определенной роли. И напротив, они имеют существенное значение в нашем эксперименте для воспроизведения картины модуляции рентгеновского пучка. В этой же работе [9] для сравнительно тяжелых элементов — Cr, Fe, Ni, Cu — имеется слабое комптоновское рассеяние. В нашем же случае Mo слабое рассеяние начинается с элементов Mg, Al, Si. По-видимому, для элементов от Na до Ca в работе [9] определенную роль играет их L край поглощения, так как у них L серия имеет значительную интенсивность (энергия L края поглощения у них меньше, чем ΔE для AgK_α излучения). Данные относительно энергий уровней и взаимосвязи $\Delta\lambda$ и ΔE взяты из книги [10].

Таким образом, основные результаты настоящей работы заключаются в следующем:

1. Достаточно высокая интенсивность комптоновски-рассеянных фотонов при MoK_α излучении получается и регистрируется в качестве модулированного пучка у самых легких элементов H, Li, Be, B, C, но начиная с N и O число рассеянных фотонов резко падает и модуляция рассеянных фотонов прекращается. А резкий переход между этими группами элементов связан с тем, что поглощение фотонов имеет пороговый (резонансный) характер.

2. Интересно отметить и то обстоятельство, что если легкий атом

находится в составе соединения, у которого имеется и атом с большим коэффициентом поглощения (Li и C в соединениях LiNbO_3 , CaCO_3 соответственно), то в этих случаях также нет достаточного количества рассеянного излучения. По-видимому, это связано с тем, что процесс поглощения фотона тяжелыми атомами в сложных (составных) молекулах превалирует над процессом комптоновского рассеяния из-за того, что коэффициент поглощения у тяжелых атомов зависит от четвертой степени его атомного номера Z . Поэтому фотоны в основном поглощаются на тяжелых атомах, а возбужденные в последних рентгенфлуоресцентные излучения не фиксируются, т.к. они не проникают через бериллиевое окно и не регистрируются детектором. Если в соединениях нет сильно поглощающих элементов (H_2O , LiF , $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ и т.д.), то комптоновское рассеяние на легких атомах выражается сильно и регистрируются модулированные пучки. Модуляция пучка наблюдается и тогда, когда число легких атомов в соединении намного больше числа тяжелых атомов (парафин, оргстекло, сегнетовая соль, каучук и т.д.). Таким образом, имеется некоторая конкуренция между процессом поглощения фотонов атомами с большим коэффициентом поглощения и процессом комптоновского рассеяния со стороны легких элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.А. Навасардян, Ю.Р. Назарян, В.К. Мирзоян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, 14, 425 (1979).
2. А.Р. Мкртчян, М.А. Навасардян, В.К. Мирзоян и др. АС СССР №1327716, 01.04.1987.
3. М.А. Навасардян, П.А. Безирганян, К.Т. Айрапетян, С.С. Галстян. АС СССР №1642933, 15.12.1990.
4. М.А. Навасардян, Ц.М. Навасардян, Р.Ц. Габриелян. Ученые записки ЕГУ, 2, 112 (1995).
5. М.А. Навасардян, О.С. Семерджян, Р.Ц. Габриелян. Изв. НАН Армении, Физика, 32, 144 (1997).
6. М.А. Блохин. Физика рентгеновских лучей. М., ИТТЛ, 1957.
7. А. Комптон, С. Аллисон. Рентгеновские лучи, теория и эксперимент. М.-Л., ОГИЗ, 1941.
8. Краткий справочник химика, под ред. Б.В. Некрасова, М., Госхимиздат, 1954.
9. Y.H. Woo. Phys.Rev., 27, 119 (1926).
10. М.А. Блохин, И.Г. Швейцер. Рентгеноспектральный справочник. М., Наука, 1982.

MODULATED COMPTON RADIATION SCATTERED BY LIGHT ATOMS

M. A. NAVASARDIAN, H. S. SEMERGIAN, R. Ts. GABRIELIAN

It is shown that when supposed energy lost by photon in the Compton scattering is less than the energy of the K-absorption edge of a given atom (of which a matter is consisted), then the intensity of scattered radiation in some cases is so weak that the modulation of the primary beam cannot be reproduced. It gives a possibility to investigate the process of scattering from different points of view. In particular, there has been observed the superiority of the phenomenon of the absorption by heavy atoms, in comparison with the process of photons scattering by light atoms at their simultaneous presence in the compound matter.