Becmhuk

московского университета

n....

№ 4 — 1967

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.531:535.5.

А. А. САНИН, А. В. ЖАРКО

К ВОПРОСУ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ СЛАБОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

1. В ряде случаев в лабораторной практике необходим прибор, который определял бы степень поляризации рентгеновских лучей малой интенсивности. Особое значение эта проблема приобретает при космических исследованиях [1]. Интенсивность кос-

мического рентгеновского излучения составляет по порядку величины 1—10 квантов сек см².

Поэтому обычно применяемые методы обнаружения поляризации, например использование поворачиваемой парафиновой пластинки и соединенной с ней ионизационной камеры, непригодны. Кроме того, существующие установки весьма громоздки, что недопустимо в условиях космоса.

Для рассмотрения поставленного вопроса воспользуемся следующими соображениями. Для измерения любых характеристик рентгеновских квантов необходимо, чтобы они вступили во взаимодействие с веществом. При этом для энергий порядка единиц и десятков Кэв возможны только два процесса: фотоэффект и рассеяние Томсона, так как в этом диапазоне фотоядерный эффект или образование пар отсутствуют, а гакже практически не наблюдается комптон-эффект.

Явления, связанные с прохождением рентгеновских лучей через кристаллы, мы рассматривать не будем ввиду незначительной величины этих эффектов.

2. Использование фотоэффекта для обнаружения поляризации основано на том, что угловое распределение фотоэлектронов для полностью поляризованных рентгеновских лучей примерно пропорционально $\cos^2 \varphi$, где φ — угол между направлением вылета фотоэлектрона и направлением колебаний электрического вектора падающих квантов [2]. Поэтому появляется возможность по угловому распределению фотоэлектронов судить о наличии поляризации, ее степени и направлении. Однако, как известно [3, 5], и рентгеновские лучи, и электроны при прохождении через вещество поглощаются по закону

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu_m \rho x}$$

где N_0 и N — интенсивности пучка до и после прохождения слоя x, ρ — плотность вещества, а величина μ_m оказывается различной для электронов и фотонов, быстро падает при увеличении их энергии и для фотонов возрастает с увеличением атомного номера Z элементов, из которых состоит вещество. Однако даже у веществ с весьма высоким Z величина μ_m , по нашим расчетам, остается в рассматриваемом диапазоне значительно (не менее чем на порядок) меньше для фотонов, чем для электронов.

С другой стороны, для того чтобы можно было работать с малым числом падающих на прибор квантов, нужно, чтобы достаточно большой их процент регистрировался. Поэтому путь пучка квантов в веществе должен быть достаточно длинным, чтобы бо́льшая часть смогла провзаимодействовать с веществом, т. е. выбить фотоэлектроны; а путь электронов в веществе от места попадания кванта до места регистрации должен быть как можно колоче во избежание растраты их энергии на этом пути.

жен быть как можно короче во избежание растраты их энергии на этом пути. Совокупность этих условий приводит к такой геометрии опыта, когда проекция тела, в котором происходит фотоэффект, на направление движения квантов много больше проекций этого тела на нормальное направление. Однако такую геометрию трудно осуществить. Кроме того, так как квант, выбивая фотоэлектрон, затрачивает при этом энергию на ионизацию атома, кинетическая энергия фотоэлектрона может быть в несколько раз меньше энергии кванта. Особенно сильно- это явление сказывается вблизи скачков поглощения со стороны больших энергий. В этом случае почти вся энергия кванта уходит на работу выбивания фотоэлектрона из атома, так что кинетическая энергия фотоэлектронов оказывается близкой к нулю.

При этом поглощение фотоэлектронов в веществе сильно возрастает (обратно пропорционально примерно четвертой степени энергии) и, следовательно, эффективность работы прибора резко падает.

Вторым источником ухудшения качества работы прибора является изменение первоначального направления движения фотоэлектронов. Фотографии, полученные при помощи камеры Вильсона, показывают, что при малых энергиях трэки фотоэлектронов весьма извилисты. Вследствие этого, распределение фотоэлектронов на некотором расстоянии от места их вылета из атома сильно отличается от первоначального, то есть пропорционального соз² и приближается к изотропному. В результате этого точность поляризационных измерений сильно ухудшается.

Эти соображения, являясь весьма общими, не зависят от того, каким конкретно образом явление фотоэффекта используется для измерения поляризации.

3. Угловое распределение рассеянных квантов отличается от углового распределения фотоэлектронов тем, что оно пропорционально sin² φ, а не cos² φ. Оно тоже может быть использовано для обнаружения поляризации. Практически это можно осуществить следующим образом: берут массивное тело, например в виде параллелепипеда, один из размеров которого много больше двух других, и помещают вблизи него один или несколько счетчиков рентгеновских квантов. При этом необходимо подобрать геометрию опыта таким образом, чтобы эти счетчики регистрировали только вторичное, то есть рассеянное этим телом излучение, а от первичного потока квантов были бы защищены.

Массивное тело, играющее, таким образом, роль рассенвателя, облучают потоком квантов рентгеновского излучения. Направление движения квантов должно быть перпендикулярным наиболее длинному размеру параллелепипеда. В таком случае число квантов, попадающих в счетчики, и, следовательно, число регистрируемых импульсов оказывается различным в зависимости от угла между плоскостью поляризации падающего на прибор потока рентгеновских квантов и длинной стороной облучаемого параллелепипеда. Это происходит потому, что при этом путь, проходимый рассеянными квантами в веществе, оказывается существенно различным для разной ориентации плоскости поляризации.

Поэтому, вращая параллеленипед вокруг оси, параллельной первичному потоку квантов, можно по изменению скорости счета судить о наличии или отсутствии поляризации, а также определять степень поляризации и направление ее плоскости.

4. Рассмотрим, какими соображениями необходимо руководствоваться при выборе вещества рассеивателя. Как известно,

$\mu_m = \sigma_m + \tau_m,$

где μ_m , σ_m и τ_m — массовые коэффициенты ослабления, рассеяния и фотопоглощения; σ_m и τ_m пропорциональны эффективным сечениям атомов соответственно для рассеяния и фотопоглощения. Поэтому для получения высокой эффективности прибора, основанного на рассеянии Томсона, нужно, чтобы σ_m было как можно больше по сравнению с τ_m . Так как σ_m с ростом Z растет слабо, а τ_m , напротив, весьма сильно, следует применять легкие элементы. Для выбора рассеивателя существенно также, какую длиниу $x_{90\%}$ он должен иметь, чтобы в нем провзаимодействовала заданная доля, например 90%, падающих на прибор квантов, и удобство вещества в эксплуатации.

Все эти параметры сведены нами в табл., содержащую данные о веществах с

наибольшим $\eta = \frac{\sigma_m}{\mu_m}$. Система единиц — СГС. Данные для парафина и политена при-

мерно справедливы и для многих других углеводородов. Все величины вычислены для энергии 10 Кэв по данным опытов Аллена и др. ([5], стр. 122 и 799), а величины в скобках — по таблицам Ионссона [2]. Химические свойства и р взяты из разных справочников, в основном из [6]. Таблица позволяет выбрать оптимальное для каждого коңкретного случая вещество рассеивателя.

5. Отражение рентгеновских лучей — частный случай рассеяния, но оно имеет овои особенности. Так, при углах падения, меньших 90° лишь на 10'—20', наблюдается полное внешнее отражение, не зависящее от поляризации. При углах Брэгга коэффициент отражения велик и зависит от нее, но ширина линии имеет порядок 1" [7], что сводит к нулю возможности этого метода. Пусть, например, такая аппаратура установлена на спутнике. Ввиду его перемещения условие Брэгга—Вульфа будет удовлетворяться для квантов любой энергии ничтожный отрезок времени, и число их, попавшее в счетчик, будет крайне мало.

В остальных случаях коэффициент отражения зависит от поляризации, но очень мал. Соответствующие установки [2] могут измерять поляризацию лишь весьма сильных пучков.

H, газ при н. у. 9 · 10 ⁻⁵ 0,40 0,05 0,45 89 4 · 10 ⁻⁵ 5,8 · 10 ⁴ малая плотность H, кидкий 0,071 0,40 0,05 0,45 89 0,032 73 необходимость охлаждения H, твердый 0,081 0,40 0,05 0,45 89 0,036 65 необходимость охлаждения He, газ при и. у. 1,8 · 10 ⁻⁴ 0,20 0,10 0,30 67 5,4 · 10 ⁵ 4,4 · 164 малая плотность Li 0,53 0,23 0,44 0,67 34 0,355 6.7 легко окисляется Be 1,8 0,25 0,700 0,951 26 1,7 1,4 токсичен C 2,3 0,30 1,05 1,35 22 3,1 0,8 чрезвычайно тверд LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4,55 9 разлагается в присутствии влаги воз LiBH4 0,67 0,29 0,67 0,96 30 0,64 37 19 разлагается в присутствии влаги воз роогораетс	Вещество	ρ.	σ _m	τ _m	μ _m	η%	$\mu = \rho \mu_m$	^x 90%	Отрицательные свойства
Н, жидкий 0,071 0,40 0,05 0,45 89 0,032 73 необходимость охлаждения Н, твердый 0,081 0,40 0,05 0,45 89 0,036 65 необходимость охлаждения Не, газ при н. у. 1,8·10 ⁻⁴ 0,20 0,10 0,30 67 5,4·10 ⁵ 4,4·10 ⁴ малая плотность Li 0,53 0,23 0,44 0,67 34 0,35 6.7 легко окисляется Be 1,8 0,25 0,700 0,955 26 1,7 1,4 токсичен B 2,3 0,30 1,055 1.35 22 3,1 0.8 чрезвычайно тверд LiH 0,81 0,25 0,70 0,950 (8 (8)) (0.3) LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4,5 9 разлагается в присутствии влаги воз LiBH4 0,67 0,29 0,67 0.96 30 0.64 3,7 (3,2) разлагается в присутствии влаги воз возгорается от контакта с целик ными	Н, газ при н. у.	9.10-5	0,40	0,05	0,45	89	4.10-5	5,8·104	малая плотность
H, твердый 0,081 0,40 0,65 0,45 89 0,036 65 необходимость охлаждения Не, газ при и. у. 1,8·10 ⁻⁴ 0,20 0,10 0,30 67 5,4·10 ⁵ 4,4·10 ⁴ малая плотность Li 0,53 0,23 0,44 0,67 34 0,55 6,7 летко окисляется Be 1.8 0.25 0,701 0.955 26 1,7 1,4 токсичен B 2,3 0,30 1,05 1,35 22 3,1 0,8 чрезвычайно тверд C 2,3 0,31 2,111 2,42 13 5,6 0,4 LiH 0,81 0,25 0,70 0,95 (6,9) (0,3) разлагается в присутствии влаги воз LiBH4 0,67 0,29 0,67 0,96 30 0,64 3,7 1,9 разлагается в присутствии влаги воз розгорается от контакта с целлик LiBH4 0,67 0,29 0,67 0,96 30 0,64 3,7 1,9 разлагается в присутствии влаги воз розгорается от контак	Н, жидкий	0,071	0,40	0,05	0,45	89	0,032	73	необходимость охлаждения
Не, газ при и. у. 1,8·10 ⁻⁴ 0,20 0,10 0,30 67 5,4·10 ⁵ 4.4·16 ⁴ малая плотность Li 0,53 0,23 0,44 0,67 34 0,35 6.7 легко окисляется Be 1.8 0.25 0,70 0,95) 26 1,7 1,4 токсичен B 2,3 0,30 1.05 1.35 22 3,1 0,8 чрезвычайно тверд C 2,3 0,31 2,11 2.42 13 5.6 0,4 0.31 — LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4.5 разлагается в присутствии влаги возд LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4.5 разлагается в присутствии влаги возд розгорается от контакта с целлис LiBH4 0,67 0.29 0,67 0.96 30 0,64 3,7 разлагается в присутствии влаги возд розгорается от контакта с целлис Парафин 0,99 0.32 1,81 2,13 15 (0,9) 0,9 — — <td>Н, твердый</td> <td>0,081</td> <td>0,40</td> <td>0,05</td> <td>0,45</td> <td>89</td> <td>0,036</td> <td>65</td> <td>необходимость охлаждения</td>	Н, твердый	0,081	0,40	0,05	0,45	89	0,036	65	необходимость охлаждения
Li 0,53 0,23 0,44 0,67 34 0,35 6,7 легко окисляется Be 1.8 0,25 0,70) 0,95) 26 1,7 1,4 токсичен B 2,3 0,30 1,05 1,35 22 3,1 0,8 чрезвычайно тверд C 2,3 0,31 2,11 2,42 13 5,6 0,4 LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4,5 разлагается в присутствии влаги возд (0,34) 6,69) разлагается в присутствии влаги возд (0,34) возгорается от контакта с целлко ными матерналами LiBH4 0,67 0,29 0,67 0,96 30 0,64 3,7 разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлко ными матерналами Парафин 0,99 0,32 1,81 2,13 (10) (2,7) (0,9) Политен 0,95 0,32 1,81 2,13 (10) (2,8) (0,8)	Не, газ при и. у.	1,8.10-4	0,20	0,10	0,30	67	5,4.105	4,4.104	малая плотность
Ве 1,8 0,25 0,70 (0,71) 0,95 (0,96) 26 (26) 1,7 (1,7) 1,4 (1,4) токсичен B 2,3 0,30 1,05 (1,48) 1,35 (1,78) 22 (17) 3,1 (4,1) 0,8 (0,66) чрезвычайно тверд C 2,3 (графит) 0,31 2,11 (3,19) 2,42 (3,50) 13 (8) 5,6 (8,1) 0,4 (0,3) LiH 0,81 0,25 0,39 (0,17) 0,64 (1,09) 39 (27) 0,64 (0,34) 3,7 (0,73) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю ными матерналами LiBH ₄ 0,67 0,29 0,67 (0,80) 0,96 (1,09) 30 (27) 0,64 (0,73) 3,7 (3,2) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю ными матерналами Парафин 0,9 0,32 1,81 (2,68) 2,13 (3,0) 15 (10) 1,9 (2,8) 1,2 (0,8)	Li	0,53	0,23	0,44 (0,20)	0,67 (0,43)	34 (53)	0,35 (0,22)	6,7 (11)	легко окисляется
В 2,3 0,30 1,05 1,35 22 3,1 0,8 чрезвычайно тверд C 2,3 0,31 2,11 2,42 13 5,6 0,4 — LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4,5 разлагается в присутствии влаги возд LiH 0,81 0,25 0,39 0,64 39 0,52 4,5 разлагается в присутствии влаги возд LiBH4 0,67 0,29 0,67 0.96 30 0,64 3,7 разлагается в присутствии влаги возд Парафин 0,9 0,32 1,81 2,13 (10) (2,7) (0,9)	Be	1,8	0,25	0,70) (0,71)	0,95) (0,96)	26 (26)	1,7 (1,7)	1,4 (1,4)	токсичен
С 2,3 (графит) 0,31 2,11) (3,19) 2,42 (3,50) 13 (8) 5,6 (8,1) 0,4 (0,3) — LiH 0,81 0,25 0,39 (0,17) 0,42) 39 (0,42) 0,52 (60) 4,5 (0,34) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю LiBH4 0,67 0,29 0,67 (0,80) 0,96 (1,09) 30 (27) 0,64 (2,7) 3,7 (0,73) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю Парафин 0,9 0,32 1,81 (2,68) 2,13 (3,0) (10) (2,7) (0,9) — Политен 0,95 0,32 1,81 (2,68) 2,13 (3,0) 15 (10) 2,0 (2,8) 1,2 (0,8) — —	В	2,3	0,30	1,05 (1,48)	1,35 (1,78)	22 (17)	3,1 (4,1)	0,8 (0,6)	чрезвычайно тверд
LiH 0,81 0,25 0,39 (0,17) 0,64 (0,42) 39 (60) 0,52 (0,34) 4,5 (6,9) разлагается в присутствии влаги возд (6,9) LiBH4 0,67 0,29 0,67 (0,80) 0,96 (1.09) 30 (27) 0,64 (0,73) 3,7 (3,2) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю ными материалами Парафин 0,9 0,32 1,81 (2,68) 2,13 (3,0) (10) (2,7) (0,9) Политен 0,95 0,32 1,81 (2,68) 2,13 (3,0) 15 (10) 2,0 (2,8) 1,2 (0,8)	С	2,3 (графит)	0,31	2,11) (3,19)	2,42 (3,50)	13 (8)	5,6 (8,1)	0,4 (0,3)	
LiBH ₄ 0,67 0,29 0,67 0,96 0,96 (1,09) 20 0,67 (0,73) 15 (3,2) разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю ными материалами 0,9 0,32 1,81 2,13 (10) (2,7) (0,73) (3,2)	LiH	0,81	0,25	0,39 (0,17)	0,64 (0,42)	39 (60)	0,52 (0,34)	4,5 (6,9)	разлагается в присутствии влаги возд
Парафин 0,9 0,32 1,81 2,13 (10) (2,7) (0,9)	LiBH4	0,67	0,29	0,67 (0,80)	0,96 (1,09)	30 (27)	0,64 (0,73)	3,7 (3,2)	разлагается в присутствии влаги возд возгорается от контакта с целлю
Политен 0,95 0,32 1,81 2,13 15 2,0 1,2 —	Парафин	0,9	0,32	1,81 (2,68)	2,13 (3,0)	15 (10)	1,9 (2,7)	1,2 (0,9)	пыми материалами
	Политен	0,95	0,32	1,81 (2,68)	2,13 (3,0)	15 (10)	2,0 (2,8)	1,2 (0,8)	

Выражаем благодарность акад. В. Л. Гинзбургу за интерес к работе и плодо-творные обсуждения, а также профессорам М. М. Уманскому и И. Б. Боровскому за внимание и ценные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В. Л. «Успехи физич. наук», 89(4), 549, 1966.

2. Блохин М. А. Физика рентгеновских лучей. М., ГИТТЛ, 1953.

3. Шпольский Э. В. Атомная физика, т. 1. М., Физматгиз, 1963.

Шпольский Э. Б. Атомная физика, т. г. М., Физматгиз, 1965.
 Lenard P. Quantitatives über Kattodenstrahlen aller Geschwindigkeiten, Heidelberg, Karl Winters Universitätsbuchhandlung, 1925.
 Compton A. H., Allison S. K. X-rays in theory and experiment. London, 1935.
 Gmelins Handbuch der anorganischer Chemie. Berlin, 1926, 1927, 1930, 1954 u. a.
 Жданов Г. С. Основы рентгеновского структурного анализа. М., ГИТТЛ, 1940.

Поступила в редакцию 3. 5 1966 г.

ниияф

УДК 53:519.25

НГУЕН ТАНГ

О ВЫЧИСЛЕНИИ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ

В работах [1—4] показано, что методом Гиббса выводятся точные соотношения, позволяющие вычислять флуктуации и моменты различных физических величин как для классических, так и для квантовых систем. В работе [5] этот метод был распространен на распределенные системы и было сделано квантовое обобщение формулы для вычисления спектров временных корреляций. Однако полученная обобщенная формула не является точным соотношением, так как в квантовом обобщении исходили из полученного в [6] результата, найденного в первом приближении теории возмуще-ний. В этой работе показано, что все точные соотношения, полученные в [4], могут быть распространены на распределенные системы.

Предположим, что на систему в направлении обобщенной координаты $\widehat{Q}_i(\vec{r})$ лействует дополнительная сила — $a_i(r)$, тогда гамильтониан системы имеет вид

$$\widehat{H} = \widehat{H}_0 + \int a_i \left(\overrightarrow{r} \right) \widehat{Q_i} \left(\overrightarrow{r} \right) d\overrightarrow{r}.$$

Если, как и в [5], пространство изменения координаты \widehat{Q}_i разбить на большое число не-перекрывающихся частей $\Delta v_1, \ldots, \Delta v_n$, то интегрирование заменяется суммированием.

Пусть $a_i(\Delta v_{\lambda}) = \frac{a_i}{\Delta v_{\lambda}}$ внутри объема Δv_{λ} , а $a_i(\Delta v_{\lambda}) = 0$ вне указанного объема,

тогда $\hat{H} = \hat{H}_0 + a_i \hat{Q}_i (\vec{r}_\lambda).$

Таким образом, термодинамическое равновесное состояние описывается матрицей плотности

$$\widehat{\rho} = \exp\left(\frac{\psi - \widehat{H}_0 - a_i \cdot \widehat{Q}_i \cdot (\overrightarrow{r}_{\lambda})}{\theta}\right)$$

Проводя вычисление так же, как в [4], получаем соотношения

$$\frac{1}{2} \overline{[\widehat{F}(\vec{r})\widehat{Q}(\vec{r}_{\lambda})]_{+}} - \overline{\widehat{F}(\vec{r}|\vec{r}_{\lambda})} \cdot \overline{\widehat{Q}(\vec{r}|\vec{r}_{\lambda})} = -\theta \frac{\partial\widehat{F}(\vec{r}|\vec{r}_{\lambda})}{\partial a} + \frac{\hbar}{2} \frac{\partial}{\partial a} \left[\operatorname{ctg} \frac{\hbar p}{2\theta} \widehat{F}(\vec{r}) \right], \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} \overline{[\widehat{F}(\vec{r})\widehat{Q}^{(n)}(\vec{r}_{\lambda})]_{+}} = (-1)^{n} \frac{\hbar}{2} \frac{\partial}{\partial a} \left[\operatorname{ctg} \frac{\hbar p}{2\theta} \widehat{F}(\vec{r})^{(n)} \right], \quad (2)$$

где []+ означает антикоммутатор; $\widehat{F(r)}^+$ - произвольный оператор, зависящий от положения в пространстве; $\widehat{F}(\overrightarrow{r}_{\lambda})$ — макроскопическая величина системы, на которую в