

индекс 3624

ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕФИ-483(26)-81

А.Т.МАРГАРЯН

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЙ ТОЛЩИНЫ РАДИАТОРА И
УГЛОВОЙ КОЛЛИМАЦИИ НА СПЕКТР ТОРМОЗНЫХ
 γ -КВАНТОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

ԵՐԵՎԱՆ 1981 ԵՐԵՎԱՆ

A.T.MARGARIAN

CALCULATION OF THE INFLUENCE
OF THE RADIATOR THICKNESS AND ANGULAR COLLIMATION
ON THE BREMSSTRAHLUNG γ -QUANTA SPECTRUM
WITH MONTE-CARLO METHOD

Bremsstrahlung γ -quanta spectrum is calculated with Monte-Carlo method taking into account the radiator thickness and angular collimation. The exact distributions of Moliere and Schiff were used. The absorption of γ -quanta in the radiator is considered as well. Exploitation factors are given in tables.

Yerevan Physics Institute
Yerevan 1981

А.Т.МАРГАРЯН

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЙ ТОЛЩИНЫ РАДИАТОРА И УГЛОВОЙ
КОЛЛИМАЦИИ НА СПЕКТР ТОРМОЗНЫХ γ -КВАНТОВ МЕТОДОМ
МОНТЕ-КАРЛО

Ереван 1981

Дифференциальные сечения тормозного излучения по углам и энергиям излученных γ -квантов при взаимодействии электронов с тонким аморфным радиатором хорошо известны [1]. Теоретическое значение функции распределения по энергиям излученных γ -квантов подтверждено экспериментально с большой точностью [2]. В практике обычно применяют радиаторы толщиной $t = (0.01+0.1) \lambda_0$ (λ_0 - рад. длина вещества). При взаимодействии электронов высоких энергий с радиаторами толщиной ($t = 0.01+0.1$) λ_0 , акты многократного излучения, которыми уже нельзя пренебрегать, приводят к деформации энергетических спектров тормозных γ -квантов, так как электрон с начальной энергией E_0 в первом акте взаимодействия излучающий фотон с энергией K в дальнейшем взаимодействует с энергией $E_0 - K$. Это приводит к уменьшению вероятности излучения фотонов в основном в высокоэнергичной части спектра. Таким образом, электроны при взаимодействии с толстым радиатором в начальных и в последних слоях этого радиатора излучают γ -кванты с разными энергетическими спектрами. Но так как γ -кванты из разных слоев радиатора имеют разные угловые распределения из-за многократного рассеяния электронов, следовательно энергетический спектр тормозных γ -квантов зависит также и от угловой коллимации γ -лучка. В случае взаимодействия электронов с тонкими радиаторами энергетические спектры излученных γ -квантов практически не зависят от угла излучения [3]. При взаимодействии электронов с радиатором толщиной $\approx 0,1 \lambda_0$ играет роль также поглощение излученных γ -квантов в самом радиаторе. Учет влияния толщины радиатора и угло-

всей коллимации на энергетический спектр тормозных γ -квантов был проведен в ряде работ [3-5]. В работе [3] был вычислен так называемый эксплуатационный фактор радиатора, с помощью которого можно определить число фотонов с энергией K , содержащихся в определенном коллимированном пучке при использовании радиатора определенной толщины. Результаты этих расчетов приведены в виде таблиц, удобных для применения в практике. Эксплуатационный фактор радиатора - α определялся следующим образом

$$\alpha(u, t, x) = \frac{dn_\gamma}{dk} / \frac{dn_\gamma^0}{dk},$$

где $\frac{dn_\gamma}{dk}$ - вычисленное число γ -квантов с энергией K с учетом толщины радиатора и угловой коллимации, $\frac{dn_\gamma^0}{dk}$ - число γ -квантов, полученное из теоретического спектра тормозного излучения, интегрированное по всем углам, без учета многократных процессов, u - угол коллимации в единицах $m_0 c^2 / E_0$, где $m_0 c^2$ и E_0 - энергия покоя и начальная энергия электрона соответственно, t - толщина радиатора в радиационных единицах, $x = K / E_0$ - энергия фотона в единицах начальной энергии электрона. В работе [3] угловые распределения тормозного излучения и многократного рассеяния аппроксимированы в виде гауссианов, а поглощение γ -квантов в радиаторе не учтено.

Угловое распределение тормозного излучения и многократного рассеяния, а также поглощение γ -квантов аккуратно было учтено в работе [5], в которой, к сожалению, не приводятся таблицы значений эксплуатационного фактора.

В настоящей работе влияние толщины радиатора и угловой коллимации на энергетический спектр тормозных γ -квантов вычис-

лено применением метода Монте-Карло. Моделирование процесса взаимодействия высокоэнергичного электрона с радиатором можно представить в следующей последовательности.

1. Разыгрывается координата взаимодействия электрона в радиаторе t .

2. Разыгрывается энергия излученного γ -кванта - K .

3. Разыгрывается поглощение γ -кванта.

Если γ -квант не поглотился в радиаторе, разыгрывается угол u , который он получает за счет углового распределения тормозного излучения и многократного рассеяния электрона. Этот процесс продолжается, до тех пор пока электрон не выйдет из радиатора. Увеличением длины пробега электрона в радиаторе за счет многократного рассеяния пренебрегается.

Координата взаимодействия электрона в радиаторе и энергия излученного γ -кванта разыгрывается согласно работе [6]. При учете поглощения γ -кванта использовались полные сечения комптоновского рассеяния [6] и образования электрон-позитронных пар [7].

Способ розыгрыша угла, который в конечном счете получает γ -квант, детально описан в работе [8]. Здесь только укажем, что для этой цели были использованы точные распределения мольера, для многократного рассеяния электрона и Шиффа - для углового распределения тормозного излучения. Углом, полученным электроном в процессе тормозного излучения, пренебрегалось.

Излученные γ -кванты группируются в следующие 10 энергетических интервала $x = K / E_0$: (0.0+0.1), (0.2+0.3), (0.4+0.5), (0.5+0.6), (0.6+0.7), (0.7+0.8), (0.8+0.85), (0.85+0.9), (0.9+0.95), (0.95+1.0). Были проведены вычисления, соответствующие прохожде-

нию электронов с начальной энергией $E_0 = 3000$ МэВ, через радиаторы из свинца толщиной 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 и 0.2 X_0 (радиационная длина свинца $X_0 = 6.37 \text{ г/см}^2$ [9]). Точность Монте-Карло вычислений составляет $\approx 2\%$. Отношение

$\Delta N_{\chi_i}(t) / \Delta N_{\chi_i}^{\circ}(t)$, где $\Delta N_{\chi_i}(t)$ и $\Delta N_{\chi_i}^{\circ}(t)$ — число χ -квантов в i -том энергетическом интервале, вычисленное нашим способом и согласно спектру тормозного излучения Бете-Гайтлера, соответственно, для $t \approx 0,01 X_0$, в пределах ошибок Монте-Карло вычислений можно принять равным единице. Отношение $\Delta N_{\chi_i}(t) / \Delta N_{\chi_i}^{\circ}(t)$ для $t = 0,05, 0,1$ и $0,2 X_0$ приведено в таблице 1. Как видно, с увеличением толщины радиатора спектр деформируется, особенно ее высокоэнергичная часть. Программа вычисляет также угловое распределение χ -квантов во всех 10 энергетических интервалах. С увеличением толщины радиатора угловое распределение высокоэнергичных χ -квантов становится острее по сравнению с угловым распределением низкоэнергичных χ -квантов. Это объясняется тем, что высокоэнергичные χ -кванты преимущественно образуются в передних слоях радиатора.

В таблицах 2-6 приведены значения $\eta_{\text{эфф}}^{\circ}(t, u)$ для разных значений t и u .

$$\eta_{\text{эфф}}^{\circ}(t, u) = \frac{\Delta N_{\chi_i}(t, u)}{\Delta N_{\chi_i}(t)},$$

где $\Delta N_{\chi_i}(t, u)$ — число χ -квантов в i -том энергетическом интервале с углами $\approx u$, $\Delta N_{\chi_i}(t)$ — общее число χ -квантов в этом энергетическом интервале. Эксплуатационный фактор радиатора будет равняться

$$a(u, t, x) = \frac{\Delta N_{\chi_i}(t)}{\Delta N_{\chi_i}^{\circ}(t)} \eta_{\text{эфф}}^{\circ}(t, u).$$

В таблице 7 приведены значения эксплуатационного фактора, вычисленные нашим способом, а также результаты Лутца и Шульца.

В таблице 8 приведены отношения значений $K I_{\chi}$, где I_{χ} — интенсивность χ -квантов, для интервала энергий $X = (0,88 \pm 0,92)$, к значению $K I_{\chi}$ при $X = (0,08 \pm 0,12)$. Для сравнения приведены также эти отношения, взятые из работ [3] и [5]. Точность Монте-Карло расчета при $u \approx 1$ составляет $\sim 5\%$, с увеличением угла коллимации точность составляет $\approx 2\%$. Наши результаты находятся в хорошем согласии с результатами Тайта [5].

На рис. 1 приведена зависимость интенсивности χ -пучка в энергетическом интервале $X = (0,85 \pm 0,95)$ от толщины радиатора, при постоянном значении угла коллимации $u = 5$. При увеличении толщины радиатора интенсивность пучка стремится к постоянному значению. На рис. 2 приведена зависимость интенсивности пучка тормозных χ -квантов от угла коллимации, при постоянном значении толщины радиатора $t = 0,1 X_0$. Для сравнения на этих же рисунках приведены также результаты расчетов Лутца и Шульца [3].

Таким образом, мы видим, что в целом результаты Монте-Карло расчета находятся в хорошем согласии с результатами работ [3] и особенно [5]. Некоторое расхождение между нашими результатами и результатами Лутца и Шульца, частные случаи которых показаны на рис. 1 и 2, можно объяснить использованием нами точных функций распределений мольера и Шиффа. Отметим, что спектр тормозного излучения Бете-Гайтлера в области энергии

начальных электронов $E_0 \sim \text{ГэВ}$, слабо зависит от энергии электронов. С другой стороны, когда углы измеряются в единицах

mc^2/E_0 , функция распределения тормозного излучения по углам тоже слабо зависит от E_0 [8]. Поэтому приведенные значения эксплуатационного фактора $a(u, t, x)$, вычисленные при $E_0 = 3 \text{ ГэВ}$, можно использовать также при других энергиях электронов $\sim \text{ГэВ}$.

Автор благодарит проф. Г.А.Вартапетяна, по инициативе которого была выполнена настоящая работа, а также Г.Л.Баятина и С.Г.Князян за полезные обсуждения и ценные замечания.

Таблица I

Значение $\Delta N_{\gamma_i}(t) / \Delta N_{\gamma_i}^0(t)$ в различных энергетических интервалах, при разных толщинах радиатора, $E_0 = 3 \text{ ГэВ}, Z = 82$

$x \backslash t$	0.2+0.3	0.4+0.5	0.5+0.6	0.6+0.7	0.7+0.8	0.8+0.85	0.85+0.9	0.9+0.95	0.95+1.0
0.05	0.98	0.97	0.97	0.96	0.98	0.94	0.93	0.94	0.87
0.1	0.95	0.93	0.92	0.91	0.88	0.86	0.87	0.85	0.77
0.2	0.88	0.84	0.80	0.79	0.76	0.73	0.73	0.68	0.57

Таблица 2

Но	X U	Значение $\eta_{эфф}(t, \psi) = \frac{\Delta N_{\chi_i}(t, \psi)}{\Delta N_{\chi_i}(t)}$		(в процентах) в разных энергетических и угловых интервалах, при толщине радиатора $t = 0.005 \chi_0$						
		0.2+0.3	0.4+0.5	0.5+0.6	0.6+0.7	0.7+0.8	0.8+0.85	0.85+0.9	0.9+0.95	0.95+1.0
	0.5	8,40	8,34	8,04	8,16	8,17	8,05	8,15	8,49	8,67
	I 26,51	26,85	26,60	26,55	26,03	26,79	25,95	26,90	27,41	26,84
	I,5 45,53	46,03	45,85	45,92	44,43	45,18	44,81	45,67	45,83	45,83
	2 61,04	61,52	61,19	61,13	60,72	61,02	61,12	60,52	62,63	61,51
	2,5 72,38	72,61	72,53	72,39	72,30	72,83	72,90	72,09	73,95	71,67
	3 80,21	80,30	80,30	80,57	79,80	81,00	80,43	79,70	81,03	80,41
	3,5 85,55	85,75	85,64	85,78	85,24	86,24	85,90	85,37	86,11	85,65
	4 89,11	89,35	89,33	89,37	88,91	89,68	89,88	88,87	89,52	89,04
	4,5 91,63	91,82	91,77	91,91	91,49	92,05	92,12	91,60	92,40	91,42
	5 93,37	93,44	93,44	93,55	93,30	93,82	93,74	93,13	93,98	93,57
	7,5 97,11	97,03	97,25	97,34	97,12	97,04	97,14	96,72	97,36	97,16
	10 98,37	98,35	98,47	98,48	98,55	98,34	98,64	98,13	98,72	98,46
	12,5 98,93	98,93	98,92	99,03	99,01	98,87	99,07	98,65	99,24	99,16
	15 99,24	99,23	99,21	99,30	99,25	99,15	99,36	98,97	99,46	99,45
	17,5 99,41	99,40	99,45	99,46	99,40	99,43	99,55	99,24	99,61	99,65
	20 99,53	99,53	99,56	99,57	99,51	99,52	99,70	99,34	99,65	99,70

Таблица 3

Но	X U	Значение $\eta_{эфф}(t, \psi) = \frac{\Delta N_{\chi_i}(t, \psi)}{\Delta N_{\chi_i}(t)}$		(в процентах) в разных энергетических и угловых интервалах при толщине радиатора $t = 0.01 \chi_0$						
		0.2+0.3	0.4+0.5	0.5+0.6	0.6+0.7	0.7+0.8	0.8+0.85	0.85+0.9	0.9+0.95	0.95+1.0
	0.5	5,64	5,49	5,40	5,44	5,67	5,60	5,43	5,73	5,54
	I 0 18,57	18,71	18,66	18,57	18,38	18,74	18,82	18,53	18,90	17,73
	I,5 33,80	33,92	34,29	34,45	33,62	33,33	33,98	33,69	34,63	33,03
	2,0 47,95	48,40	48,66	48,65	48,39	47,38	49,27	47,97	48,91	46,72
	2,5 60,01	60,75	60,58	60,80	60,26	60,22	61,76	60,80	60,99	58,86
	3,0 69,59	69,61	69,83	70,33	69,34	70,08	71,09	70,19	70,32	68,76
	3,5 76,96	76,92	74,42	77,39	76,53	77,45	78,27	77,36	77,62	75,88
	4,0 82,42	82,53	83,06	82,82	82,19	83,09	83,56	82,54	83,24	81,93
	4,5 86,50	86,56	86,96	86,71	86,23	87,00	87,30	86,52	87,12	85,79
	5,0 89,45	89,43	90,01	89,50	89,26	90,04	90,12	89,57	90,43	88,88
	7,5 95,92	95,98	96,29	96,25	95,96	96,02	96,35	95,97	96,63	95,54
	10,0 97,82	97,80	97,96	97,98	97,97	97,73	98,04	97,62	98,31	97,51
	12,5 98,60	98,62	98,70	98,72	98,79	98,71	98,76	98,41	99,01	98,56
	15,0 99,01	99,04	99,14	99,13	99,11	99,19	99,03	98,81	99,27	99,17
	17,5 99,26	99,26	99,39	99,41	99,29	99,46	99,28	99,12	99,48	99,47
	20,0 99,42	99,43	99,3	99,78	99,63	99,57	99,44	99,38	99,54	99,58

Таблица 4

Значение $\eta_{эфф}(t, \alpha) = \frac{\Delta N_{xi}(t, \alpha)}{\Delta N_{xi}(t)}$ (в процентах)

в разных энергетических и угловых интервалах, при толщине радиатора $t = 0.05 \text{ X}$.

X	0.0+0.1	0.2+0.3	0.4+0.5	0.5+0.6	0.6+0.7	0.7+0.8	0.8+0.85	0.85+0.90	0.90+0.95	0.95+1.0
0.5	1.75	1.83	1.71	1.86	1.80	1.71	1.86	1.66	1.69	1.66
1.0	6.25	6.57	6.32	6.17	6.27	6.13	6.81	6.16	6.55	6.53
1.5	12.78	12.54	12.54	12.55	12.25	12.30	13.10	12.78	12.90	12.79
2.0	19.04	19.22	19.46	19.23	19.54	19.48	20.27	19.91	19.84	20.36
2.5	26.05	26.35	26.46	26.18	26.73	28.86	27.91	27.29	27.39	27.48
3.0	33.01	33.19	33.46	33.06	33.75	33.95	35.00	33.69	34.40	34.44
3.5	39.76	40.09	40.21	39.89	40.72	40.84	42.04	40.46	41.47	41.69
4.0	46.17	46.45	46.69	46.27	47.15	47.69	48.51	46.81	47.83	48.73
4.5	52.13	52.53	52.74	52.37	53.11	53.76	54.02	53.01	53.58	54.63
5.0	57.58	58.13	58.44	57.86	58.66	59.09	59.36	58.94	59.07	60.07
7.5	77.73	78.21	78.58	78.70	78.53	79.48	79.60	79.52	79.44	80.60
10.0	88.27	88.76	89.19	89.24	89.02	90.05	89.70	89.77	89.72	90.35
12.5	93.38	93.89	94.33	94.23	94.25	95.23	94.88	94.41	94.72	94.97
15.0	95.82	96.25	96.65	96.72	96.62	97.00	96.93	96.99	96.98	97.02
17.5	97.10	97.55	97.78	97.91	97.83	98.12	98.04	98.10	98.14	98.02
20.0	97.97	98.26	98.34	98.58	98.43	98.60	98.66	98.69	98.68	98.74

Таблица 5

Значение $\eta_{эфф}(t, \alpha) = \frac{\Delta N_{xi}(t, \alpha)}{\Delta N_{xi}(t)}$ (в процентах) в разных энергетических и угловых интервалах при толщине радиатора $t = 0.1 \text{ X}$.

X	0.0+0.1	0.2+0.3	0.4+0.5	0.5+0.6	0.6+0.7	0.7+0.8	0.8+0.85	0.85+0.9	0.9+0.95	0.95+1.0
0.5	0.99	1.10	1.08	1.01	1.04	1.00	1.04	0.98	1.12	1.21
1.0	3.58	3.90	3.75	3.67	3.64	3.68	3.72	3.74	4.11	4.40
1.5	7.23	7.63	7.46	7.61	7.46	7.56	7.39	7.53	7.98	8.37
2.0	11.40	11.90	11.74	11.97	11.77	11.87	11.64	12.11	12.41	12.74
2.5	15.93	16.49	16.15	16.44	16.54	16.66	16.22	16.88	17.54	17.76
3.0	20.64	21.39	20.93	21.18	21.38	21.63	21.00	21.47	22.49	22.54
3.5	25.42	26.01	25.70	26.00	25.96	26.56	25.95	26.20	27.55	28.30
4.0	30.19	30.79	30.43	31.06	31.10	31.57	30.94	30.97	32.65	33.43
4.5	34.87	35.52	35.22	35.86	35.90	36.22	35.61	35.68	37.72	38.31
5.0	39.39	40.15	39.81	40.55	40.67	40.71	40.29	41.15	42.57	43.19
7.5	59.01	60.08	59.81	60.08	60.74	61.33	61.36	61.82	63.17	64.50
10.0	73.24	74.41	74.17	74.86	75.35	76.04	76.16	76.25	77.38	78.53
12.5	82.57	83.79	83.83	84.26	84.70	85.63	85.61	85.87	86.24	87.57
15.0	88.40	89.62	89.74	90.13	90.72	91.13	91.49	91.64	91.78	92.68
17.5	91.98	93.14	93.42	93.78	94.08	94.47	94.91	94.86	95.03	95.47
20.0	94.10	95.33	95.48	95.80	96.00	96.41	96.76	96.80	96.90	97.05

Таблица 8
 Значения отношения $KI_{\gamma} (X=0.9)/KI_{\gamma} (X=0.1)$
 $t = 0.1 X_0$

u	Лутц и Шульц [3]	Н.Р.С.Тайт [5]	Монте-Карло
0.5	0.7258	0.7533	0.765
1.0	0.7216	0.7559	0.755
2.0	0.7160	0.7542	0.742
3.0	0.7099	0.7461	0.743
5.0	0.6997	0.7275	0.727
10.0	0.6837	0.7003	0.721
∞	---	0.6741	0.692

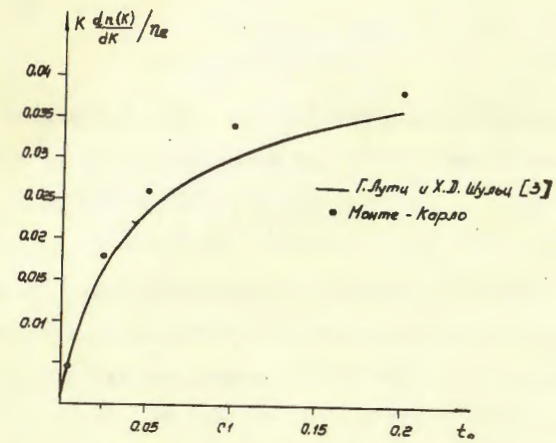


Рис.1

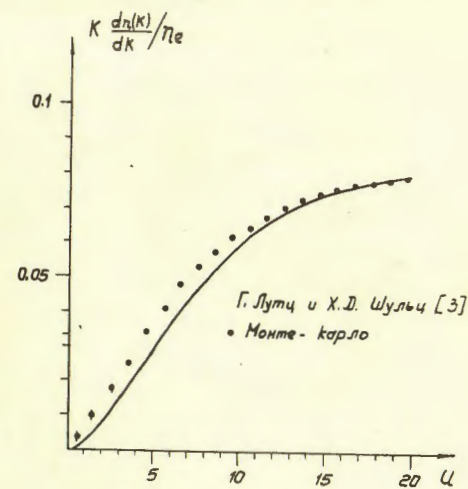


Рис.2

Подписи к рисункам

Рис.1 Зависимость интенсивности γ -пучка с энергией

$K_\gamma = (0.85-0.95) E_0$ при угле коллимации $U = 5$ от толщины радиатора в сравнении с результатами расчетов Лутца и Шульца.

Рис.2 Зависимость интенсивности пучка тормозных γ -квантов энергией $K_\gamma = (0.85-0.95) E_0$ от угла коллимации при толщине радиатора $t = 0.1 X_0$. Сплошная кривая соответствует работе [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. H.W.Koch and J.W.motz, Rev.Mod.Phys. 31, 920, 1959.
2. H.D.Schulz and G.Lutz, Phys.Rev. 157, 1280, 1968.
3. G.Lutz and H.D.Schulz, DESY 67/29, 1967.
4. Y.S.Tsai and Van Whitis, Phys.Rev. 149, 1248, 1966.
5. N.R.S.Pait, Nucl.Instr. and Meth. 67, 56, 1969
6. H.Messel and D.F.Crowford, Electron-Photon Distribution Function (Pergamon Press, Oxford, 1970)
7. D.Bollini et al. Lett.al Nuovo Cimento, V.25,N.4,97, 1979.
8. Г.А.Заятян,С.Г.Миязян,А.Т.Маргарян.Препринт БрФМ 421(28)-80 Ереван 1980
9. Y.S.Tsai, Rev.Mod.Phys., V.46, N.4, 815, 1974

Рисунки поступили 15-го апреля 1981 г.

Редактор Л.П.Мукаян
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 432

ВФ- 05414

Тираж 299

Препринт ЕФИ

Формат издания 60 x 84/16

Подписано к печати 9/УП-81г. I, 5 уч. изд. л. Ц. 10 к.

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36, пер. Маршаряна 2