

ВТОРИЧНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Ги Леттье, Джон А. Джунгерман, Карлос М. Кастанеда

В этой статье представлены результаты эксперимента по измерению гамма-излучения, образующегося при торможении протонов. Эти данные могут быть использованы для моделирования эффектов пучков нейтральных частиц для анализа предлагаемых методов дискриминации ложных целей на баллистическом участке траектории. Представлена сводка результатов вычислений, поддерживающих общий вывод о том, что физические ограничения не позволяют создать такую систему.

Ги Леттье и Джон А. Джунгерман работают на физическом факультете Калифорнийского университета в Дэйвисе (CA 95616), а Карлос Кастанеда - в ядерной лаборатории Крокера того же университета.

Задача данной статьи состоит в представлении полученных нами результатов по образованию гамма-лучей при торможении пучка протонов. Такой пучок позволяет моделировать пучок нейтральных частиц, предлагавшийся для неразрушающей дискриминации в системе противоракетной обороны на среднем участке траектории.

В принципе система дискриминации должна работать следующим образом: ускоритель в космосе генерирует пучок частиц. Этот пучок направляется и фокусируется на проверяемый объект, после чего он трансформируется в пучок нейтральных частиц. Когда атомы сталкиваются с мишенью, в результате ядерных реакций образуются вторичные частицы - гамма-кванты. Кроме того, в результате этих реакций образуются нейтроны и рентгеновские лучи, но в данной статье они не рассматриваются.¹

Информация, которую можно получить при измерениях гамма-излучения, может принести важные данные о строении мишени. Поток гамма-излучения на детекторе будет пропорционален массе мишени. Более того, спектр гамма-излучения будет зависеть от типа ядер, с которыми сталкиваются тормозящиеся протоны, так что можно будет оценить состав проверяемой мишени.

Пучки нейтральных частиц (ПНЧ) предлагалось использовать в системе противоракетной обороны (ПРО) для дискриминации ложных целей на среднем (баллистическом) участке траектории.² На этом участке от блока разведения уже отделено до 10 боеголовок и, кроме того, до 10 ложных целей на каждую боеголовку. Важной задачей ПРО на среднем участке траектории является различение истинных боеголовок от ложных целей для того, чтобы сконцентрировать

средства поражения на боеголовках.

В наших экспериментах на ускорителе использовались мишени из алюминия, железа, титана и урана. Толщина всех мишеней составляла 0,025 миллиметра (кроме алюминия, толщина которого равнялась 0,05 миллиметра). В урановой мишени использовался обедненный уран, содержание урана-235 в котором равнялось 0,035% (в естественном уране содержание урана-235 составляет 0,711%). Взаимодействие пучка и мишени сопровождалось генерацией мгновенного гамма-излучения, спектр которого измерялся при помощи спектрометра с германиевым кристаллом, легированным литием. Ток протонов составлял 10 - 100 пикоампер (1 пикоампер = 10^{-12} ампера), и детектор располагался под углами 50, 70, 90, 120, 135 градусов к направлению пучка.

Пучки протонов генерировались на ускорителе ядерной лаборатории Крокера при энергиях 30, 50 и 67,5 МэВ. Измерение выхода гамма-квантов в зависимости от энергии позволяет точнее оценить выход гамма-квантов из толстых мишеней.

Мы измерили не только характерную "сигнатуру" гамма-излучения каждого элемента, но и получили сведения об эффективности регистрации каждой из гамма-линий германиевым детектором. Поскольку каждый элемент мишени излучает гамма-кванты с определенной энергией, то детектор с хорошим энергетическим разрешением (аналогичный использованному в нашей работе германиевому спектрометру) позволяет выявить содержащиеся в мишени элементы и определить их процентное содержание.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Фокусировка пучка на мишени производится при помощи квадруп-

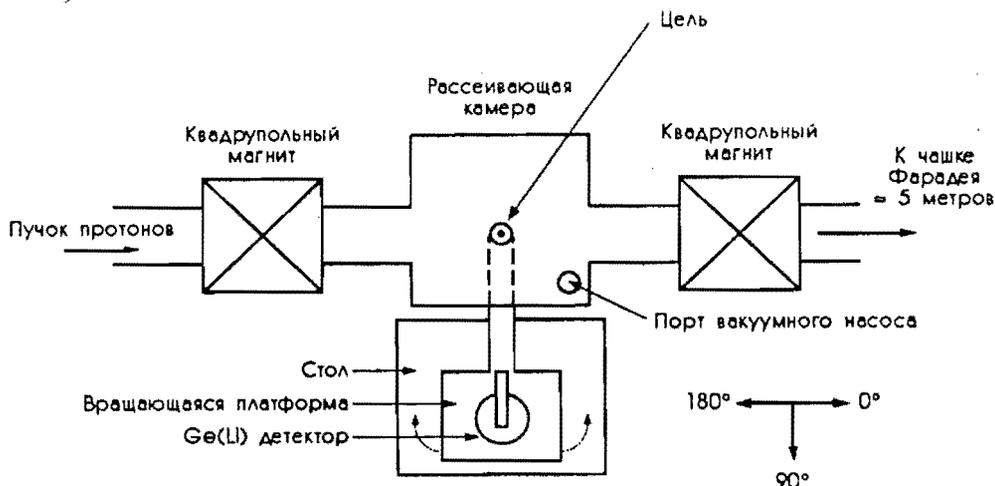


Рисунок 1

Схема экспериментальной установки для исследования образования вторичных гамма-квантов при торможении протонов в ядерной лаборатории Крокера.

польного магнита. Проходящий через мишень пучок собирается другим квадрупольным магнитом и направляется на фарадеевский цилиндр, при помощи которого измеряется ток пучка. Детектор размещается на поворотной платформе, позволяющей устанавливать различные углы зрения по отношению к оси пучка. Для снижения уровня фона детектора применялась схема совпадений, обеспечивающая регистрацию гамма-квантов только во время импульса циклотрона (длительностью 2 наносекунды с интервалом между импульсами в 50 наносекунд).

В табл. 1 приведены характерные энергии гамма-квантов для каждого типа мишени и дифференциальные сечения их образования при различных углах для энергии протонов в 67,5 МэВ. Аналогичные результаты были получены при энергии 30 МэВ, а для энергии в 50 МэВ измерения проводились для всех мишеней, кроме урана.³

Эти данные могут быть использованы для оценки эффективности дискриминации ложных целей на среднем участке траектории по регистрации гамма-излучения, индуцированного пучками нейтральных частиц. Для того, чтобы упростить сравнение, мы будем использовать в этой статье обозначения, принятые в отчете рабочей группы Американского физического общества по научно-техническим аспектам оружия направленной энергии.⁴

Скорость счета dN_D/dt (число событий регистрации гамма-квантов в секунду) при регистрации вторичного гамма-излучения при взаимодействии пучка с мишенью дае-

тся выражением:

$$\frac{dN_D}{dt} = \frac{dS}{dt} n_t \epsilon_D(E) \Delta\Omega(\theta) \frac{d\sigma(E, \theta)}{d\Omega} \quad (1)$$

где dS/dt - число нейтральных частиц, сталкивающихся с мишенью за одну секунду (равное Il/e); f - эффективность нейтрализации отрицательных ионов водорода; I - ток пучка в микроамперах; e - заряд электрона, равный $1,602 \cdot 10^{-12}$ кулона; $\epsilon_D(E)$ - эффективность детектора гамма-излучения при энергии гамма-кванта E ; n_t - число ядер на квадратный сантиметр в мишени, пересекаемых пучком; A_D - площадь детектора в квадратных метрах; R_D - расстояние от мишени до детектора в метрах; $\Delta\Omega(\theta) = A_D/R_D^2$ - телесный угол, под которым виден детектор от мишени; θ - угол между направлением на детектор и осью пучка; $d\sigma(E, \theta)/d\Omega$ - дифференциальное сечение образования фотона с энергией E под углом θ , выраженное в квадратных сантиметрах на стерадиан.

Предположим, что мишень изготовлена из урана, что $f = 0,5$, что $A_D = 1 \text{ м}^2$ и что $\epsilon_D(E) = 0,5$. Предположим также, что плотность ядер мишени на единицу поверхности равна $2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (это соответствует 4 миллиметрам урана, или пробегу протонов с энергией 67,5 МэВ). Мы обнаружили также, что дифференциальное сечение образования гамма-квантов в уране почти не зависит от энергии в интервале от 30 до 67,5 МэВ (см. ниже). Эта энергия несколько меньше проектной энергии ускорителя, разрабатываемого в Лос-Аламосе для изучения нейтральных пучков, равной 100 МэВ.⁵ Тем не менее,

Таблица 1
Дифференциальные сечения образования вторичных гамма-квантов с определенными энергиями для четырех различных мишеней (при энергии протонов 67,5 МэВ для различных углов)

dσ(E,θ)/dΩ, миллибарн настерадиан							
Мишень	E, кэВ	θ = 50°	70°	90°	120°	135°	Ошибка, %
Алюминий	1372,3	3,62	3,08	3,79	4,36	4,14	11
	1810,8	3,25	2,49	2,63	2,26	2,39	14
	2212,5	0,92	0,64	1,22	1,51	-	26
Железо	846,8	2,51	2,54	2,60	2,91	2,64	21
	931,4	3,07	2,67	2,50	2,26	2,80	21
	1408,4	5,78	5,24	5,87	5,84	5,85	13
Титан	889,2	4,62	4,42	5,19	5,36	3,58	23
	1120,1	3,30	3,24	3,47	4,25	4,93	15
	1312,1	1,82	1,91	1,63	2,00	2,31	21
Уран-238	280,0	-	2,13	2,83	5,76	12,5	54
	679,4	6,94	14,4	7,50	6,19	7,57	50
	930,8	3,46	11,5	14,5	11,2	5,37	45

Ошибки измерений представляют собой ошибки подгонки кривых, включающие эффект вычитания фона, статистические ошибки и систематические ошибки измерений. Они могут рассматриваться как предельные значения неопределенности измерений (в отдельных сериях измерений ошибки могут быть заметно меньше).

результаты этой работы показывают, что небольшое уменьшение энергии частиц не скажется заметным образом на результатах оценок. Проектные характеристики Лос-Аламосского ускорителя таковы:

- энергия пучка $E_p = 100$ МэВ;
- ток пучка $I = 100$ миллиампер;
- диаметр пучка $B_s = 0,3$ метра;
- эмиттанс пучка $\epsilon = 1$ миллиметр-миллирадиан.

В указанных предположениях при характеристиках Лос-Аламосского ускорителя (за исключением того, что энергия пучка принималась равной 67,5 МэВ), уравнение (1) для угла $\theta = 90^\circ$ можно переписать в виде:

$$\frac{dN_p(E, 90^\circ)}{dt} = \frac{3,1 \cdot 10^{19}}{R_p^2} L \frac{d\sigma(E, 90^\circ)}{d\Omega} \quad (2)$$

Здесь L - коэффициент потери пучка (когда сечение пучка больше мишени), равное отношению квадратов диаметра мишени и диаметра пучка: $L = D_t^2/B_t^2$.

Пучок заряженных частиц будет расходиться после выхода из ускорителя из-за своего эмиттанса. В случае нейтрализован-

ного пучка атомов водорода будет происходить дополнительное расширение из-за обдирания электронов в процессе нейтрализации отрицательных ионов водорода, выходящих из ускорителя. Эти расходимости будут складываться квадратично (поскольку они независимы) и эффективный диаметр пучка будет равен:

$$B_t^2 = B_s^2 + \alpha_e^2 R_t^2 + \alpha_s^2 R_t^2 \quad (3)$$

где B_s - диаметр пучка на выходе ускорителя (считающийся равным 0,30 метра), $\alpha_e = \epsilon/B_s = (1 \cdot 10^{-6} \text{ мрад})/(0,3 \text{ метра})$ - угловая расходимость из-за эмиттанса ускорителя, α_s - угловая расходимость из-за обдирания электронов, и R_t - расстояние от ускорителя до мишени. В докладе Американского физического общества приводится выражение для расходимости из-за обдирания электронов (уравнение (7.10) из работы₄):

$$\alpha_s = \frac{20}{\sqrt{E_p}} \cdot 10^{-6} \text{ радиан}$$

При энергии 67,5 МэВ это выражение дает величину $\alpha_s = 2,46 \cdot 10^{-6}$ радиана. Используя эту величину, можно преобразовать уравнение (3) в следующий вид:

$$V_c^2 = 0,09 + 1,7 \cdot 10^{-11} R_c^2 \quad (4)$$

(все величины этого уравнения выражаются в метрах).

При энергии 200 МэВ величина α_s становится равной $1,4 \cdot 10^{-6}$ радиана. Если диаметр пучка останется равным 0,3 метра, то второй член уравнения (4) становится равным $1,3 \cdot 10^{-11} R_c^2$. Уменьшение этой составляющей невелико из-за того, что в нем начинает доминировать компонента, связанная с эмиттансом ускорителя, которая сама по себе равна $1,1 \cdot 10^{-11} R_c^2$ для ускорителя с диаметром пучка 0,3 метра и эмиттансом в 1 миллиметр миллирадиан.

Для того, чтобы результаты измерений были статистически значимы, скорость счета фотонов dN_D/dt должна быть достаточно велика. На основании результатов эксперимента мы предполагаем, что минимальным значением скорости счета должна быть величина в 100 отсчетов в секунду. При такой скорости счета неопределенности измерений будут сравнимы с 10% неопределенностью в определении дифференциальных сечений. Эти неопределенности, в свою очередь, трансформируются в сравнимые неточности определения неизвестного элемента состава мишеней. Фоновая скорость счета в космическом пространстве приближенно равна нескольким отсчетам в секунду, т.е., на два порядка величины меньше, чем в эксперименте. В расчетах принималось, что длительность измерений равнялась 1 секунде. Такой короткий интервал необходим для того, чтобы ускорители нейтральных пучков могли провести дискриминацию 10 тысяч боеголовок и 100 тысяч ложных целей за 20 минут баллистического участка траектории.

В качестве особого примера мы рассмотрим возможность обнаружения урана в ядерной боеголовке. Для трех характерных линий урана, приведенных в табл. 1, суммарное дифференциальное сечение образования фотонов $d\sigma/d\Omega$ равно 24,8 миллибарна на стерадиан ($2,48 \cdot 10^{-24}$ см⁻²) для протонов с энергией 67,5 МэВ под углом в 90° к направлению пучка. Такая величина подходит для систем регистрации, настроенных на обнаружение только тех линий, которые характерны для искоемых элементов.

Если пучок больше мишени, то число нейтральных атомов, достигающих мишени,

уменьшается в L раз, и уравнения (2) и (4) можно записать в следующем виде (при диаметре мишени в 0,5 метра):

$$\frac{dN_D}{dt} = \frac{1,9 \cdot 10^{13}}{R_D^2} \left(\frac{1}{0,09 + 1,7 \cdot 10^{-11} R_c^2} \right) \quad (5)$$

На рис. 2 показана зависимость R_D от R_c при скорости счета сигнала dN_D/dt , равной 100 отсчетам в секунду. Обе величины слишком малы для построения разумной системы дискриминации ложных целей на баллистическом участке траектории; они должны быть равны по крайней мере 1500 километрам или более, для того, чтобы число космических аппаратов с ускорителями нейтральных частиц не было слишком большим. При дальности действия детекторов и ускорителей, равной 1200 километрам, Картер⁷ показал, что потребуется около 200 таких аппаратов, и даже при дальности в 4000 километров надо будет использовать 32 аппарата. Большое число требуемых космических аппаратов связано с так называемым "фактором отсутствия", характерным для искусственных спутников Земли.

При дальности в 1500 километров (для R_D и R_c) из уравнения (5) следует, что скорость счета детекторов должна быть равна 0,22 отсчета в секунду; иначе говоря, скорость счета должна быть понижена в 450 раз по сравнению с принятым нами уровнем, или ток пучка должен быть увеличен в такое же число раз (до 45 ампер). Более того, реальное число отсчетов может быть значительно ниже из-за поглощения гамма-квантов в уране или во внешней оболочке ядерного боеприпаса.⁸

Другое применение пучков нейтральных частиц может быть связано с проверкой полезных нагрузок искусственных спутников Земли. В этом случае расстояния R_D и R_c могут быть уменьшены примерно до 100 километров или даже меньше, а фактор расплывания пучка L может быть равным 1 (на таких малых расстояниях диаметр пучка может быть меньше диаметра мишени). Тогда из уравнения (5) следует, что скорость счета может составить 1900 отсчетов в секунду при токе пучка в 100 миллиампер. Это означает, что для успешной инспекции полезных нагрузок искусственных спутников могут быть использованы ускорители с током пучка в 1 миллиампер (или даже меньше при меньших расстояниях). Меньшее значение тока может понизить риск повреждения электронных систем или других уязвимых компонентов при инспекции полезных нагрузок спутников.

Подводя итоги, мы можем отметить на

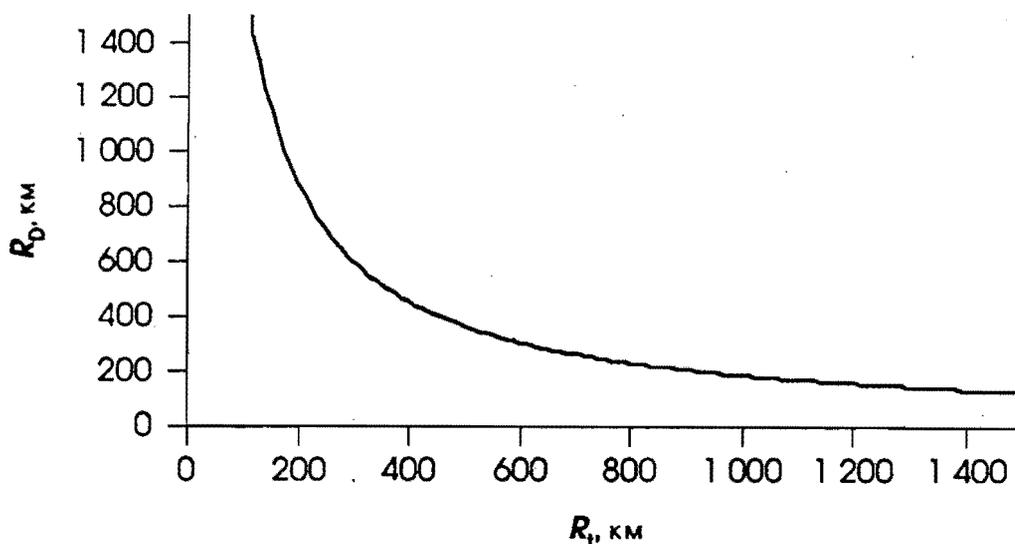


Рисунок 2

Зависимость расстояния от мишени до детектора от расстояния от мишени до ускорителя при пороговом обнаружении характеристического излучения урана в ядерной боеголовке (согласно уравнению (5))

основании наших оценок, что при использованных параметрах пучка применение нейтральных частиц для дискриминации ложных целей на среднем участке траектории не представляется возможным. Расстояния, необходимые для обеспечения работоспособности схемы, будут слишком малы, и для системы потребуется слишком большое число ускорителей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны персоналу и операторам ядерной лаборатории Крокера за поддержку во время проведения эксперимента, и, в особенности, ее директора Томаса Кахилла, за помощь в планировании и финансировании времени на циклотроне.

Мы благодарим Вольфганга Стоффля из Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса за предоставление его программы для аппроксимации кривых "FITEK" на нашем компьютере VAX 780.

Один из нас (Ги Леттье) благодарен Институту глобальных конфликтов и сотрудничества Калифорнийского университета во время его дипломной работы.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Применение нейтральных пучков необходимо из-за того, что выходящие из ускорителя заряженные частицы будут поворачиваться в магнитном поле Зем-

ли на длинном отрезке пути до мишени. Поэтому направить пучок на мишень будет очень трудно. Кроме того, взаимное отталкивание заряженных частиц будет расфокусировать пучок.

2. Aviation Week & Space Technology, 8 December 1986, p. 45.
3. G. Lettier, "In-Beam Measurements of Inclusive Differential Cross Sections for the Production of Gamma Radiation from 30 - 67.5 MeV Protons on Thin Targets of Aluminium, Iron, Titanium and Uranium", University of California at Davis, Physics Department Dissertation, June 1988 (диссертацию можно заказать в организации University Microfilms International, 300 Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106).
4. Report of the American Physical Society of the Study Group on Science and Technology of Directed Energy Weapons, Reviews of Modern Physics, vol. 59, No. 3, November 1987, раздел 7.7.3.1, p. S159.
5. Aviation Week & Space Technology, 8 December 1986, p. 45.
6. Эмиттанс пучка характеризует свойства расходимости пучка. Например, пучок с эмиттансом в 1 миллиметр на миллирадиан при фокусировке на пятно диаметром в 1 миллиметр будет обладать расходимостью в 1 миллирадиан. Если размеры пятна будут меньше, то угловая расходимость увеличится, по-

скольку эмиттанс является сохраняющейся характеристикой конкретного пучка.

7. A.V. Carter, "Directed Energy Missile Defense in Space", Washington, DC, Of-

fice of Technology Assessment, April 1984.

8. Поглощение испускаемых гамма-лучей в стальной оболочке толщиной 3 миллиметра ослабляет их интенсивность примерно в 5 раз.