

70
Б-12

822

2.3



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

В.В. Бабиков

P - 822

ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ
СОСТАВНОГО ЯДРА
И γ -ИЗЛУЧЕНИЕ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
АТОМНЫХ ЯДЕР

ЖЭТФ, 1962, т.42, в.5, с.1244-1248.

В.В. Бабиков

Р - 822

1262/1 48

ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ
СОСТАВНОГО ЯДРА
И γ -ИЗЛУЧЕНИЕ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
АТОМНЫХ ЯДЕР

Направлено в ЖЭТФ

А н н о т а ц и я

Получены основные характеристики электромагнитного излучения компаунд-системы, по предположению состоящей из двух не полностью слившихся ядер и обладающей большим моментом вращения. Анализ экспериментальных данных по γ -излучению в реакциях с тяжелыми ионами показывает качественное согласие с ожидаемыми эффектами. Время образования составного ядра, как системы пришедшей в полное равновесие, оценивается $\tau = 10^{-14} - 10^{-15}$ сек.

Abstract

The main features of the electromagnetic radiation of the compound -- system which is assumed to consist of the two partially fused nuclei and to possess a high angular momentum have been obtained. An analysis of the experimental data on the γ -rays in heavy ion reactions indicate a qualitative agreement with the effects expected. The time for which the compound nucleus as a complete equilibrium system is formed has been estimated to be $\tau = 10^{-14} - 10^{-15}$ sec.

Боровская концепция составного ядра, как возбужденной системы, находящейся в полном термодинамическом равновесии, проверена в многочисленных экспериментах по облучению ядер легкими частицами / p, n, d /, и время его образования оценивается, как величина $\tau \sim 10^{-18}$ сек /см., например, /1/. Существенной особенностью взаимодействия с ядрами тяжелых ионов средней энергии / ≤ 10 Мэв/нуклон/ является образование систем с большим моментом вращения / $\sim 10^2 \hbar$ / при сближении центров масс ядер на расстояние $R \sim 10^{-12}$ см /2/. Естественно ожидать, и это подтверждается расчетами по модели жидкой капли /см., например, /3/, что равновесной формой компаунд-системы будет форма, близкая к сильно вытянутому эллипсоиду с осью симметрии, перпендикулярной оси вращения. Однако, такую систему нельзя считать еще пришедшей в полное термодинамическое равновесие, т.е. составным ядром, если образующие ее ядра сохраняют некоторую индивидуальность. В данной работе показывается, что изучение электромагнитного излучения при взаимодействии атомных ядер может прояснить вопрос о времени образования составного ядра.

Ввиду больших квантовых чисел, соответствующих моменту / $l \sim 10^2$ /, компаунд-систему можно рассматривать, как вращающуюся с частотой $\omega = \frac{l \hbar}{I}$ / I - момент инерции/ классическую систему, состоящую из двух неполовностью слившихся /по предположению/ ядер. Существенно, что при неполном слиянии система будет обладать не только электрическим квадрупольным, но и электрическим дипольным моментом. Упростим, далее, задачу, полагая, что ядра - точечные заряды / $Z_1 e, Z_2 e$ / с массами / A_1, A_2 /, находящиеся на неизменном расстоянии R_0 друг от друга. Сводя задачу двух тел к вращению одного точечного заряда вокруг центра тяжести, получим для дипольного и квадрупольного электрических моментов системы /4/:

$$\vec{d} = e_D \vec{R}_0, \quad e_D = e \frac{Z_1 A_2 - Z_2 A_1}{A_1 + A_2}; \quad /1/$$

$$D_{\alpha\beta} = e_{k\beta} (3R_0^\alpha R_0^\beta - R_0^2 \delta_{\alpha\beta}), \quad e_{k\beta} = e \frac{Z_1 A_2^2 + Z_2 A_1^2}{(A_1 + A_2)^2}. \quad /2/$$

Так как эффективный дипольный заряд e_D системы всегда мал по

сравнению с эффективным квадрупольным / $e_D / e_{k\delta} \approx 0,1$ /, из-за близости отношений Z/A для всех ядер, а кроме того из-за их частичного слияния, интенсивности дипольного и квадрупольного излучений сравнимы, несмотря на малость $\lambda/R_0 \sim 0,1^x$.

Вращение системы с частотой ω_0 приводит к дипольному /с энергией $\hbar\omega_0$ / и квадрупольному /с энергией $2\hbar\omega_0$ / излучениям, имеющим следующие угловые распределения интенсивности / θ - угол между направлением излучения и моментом вращения, см. рис. 1/:

$$dW_D = \frac{e_D^2 R_0^2 \omega_0^4}{8\pi c^3} (1 + \cos^2 \theta) d\Omega; \quad /3/$$

$$dW_{k\delta} = \frac{e_{k\delta}^2 R_0^4 \omega_0^6}{2\pi c^3} (1 - \cos^4 \theta) d\Omega. \quad /4/$$

Для сравнения с экспериментом угловые распределения /3/, /4/ надо усреднить по всем направлениям момента, лежащим в плоскости, перпендикулярной пучку падающих частиц. В результате этого усреднения получаем / θ - угол между направлениями излучения и падения частиц, см.

рис. 2/:

$$dW_D = \frac{e_D^2 R_0^2 \omega_0^4}{8\pi c^3} (1 + \frac{1}{2} \sin^2 \theta) d\Omega; \quad /5/$$

$$dW_{k\delta} = \frac{e_{k\delta}^2 R_0^4 \omega_0^6}{2\pi c^3} (1 - \frac{3}{8} \sin^4 \theta) d\Omega. \quad /6/$$

Полученные на основе гипотезы о неполном слиянии сталкивающихся ядер результаты позволяют высказать следующие утверждения:

а/ должна наблюдаться симметричная относительно 90° анизотропия γ -излучения, определяемая формулами /5/ и /6/, причем, спектр излучения под углами 0° и 180° должен быть более жестким, чем под углом 90° , так как квадрупольное излучение в два раза более жесткое, чем дипольное.

б/ Увеличение момента вращения системы, состоящей из данной пары ядер при заданной полной энергии, должно привести к уменьшению слияния ядер, и, следовательно, к увеличению дипольного момента системы. Это, в

^{x/} Магнитным дипольным излучением, как всегда, в системе двух тел можно пренебречь, если не учитывать эффект излучения /трение/. Электрическое и магнитное излучения более высокой мультипольности малы из-за малости отношения размеров системы / $R_0 \sim 10^{-12}$ см / к длине волны / $\lambda \sim 10^{-11}$ см, см. ниже /.

свою очередь, приведет к относительному смягчению спектра излучения под углом 90° по сравнению с 0° , хотя само излучение и будет несколько более жестким за счет увеличения частоты вращения.

в/ При взаимодействии тождественных ядер дипольное излучение будет отсутствовать, так что не должно наблюдаться изменение жесткости излучения в зависимости от угла наблюдения.

Экспериментальные данные по γ -излучению в реакциях с тяжелыми ионами ^{15/}, ^{16/} показывают, что отмеченное выше увеличение жесткости излучения под малыми углами действительно существует. Большой разброс величин моментов компаунд-систем в толстых мишенях, используемых в данных экспериментах, и связанное с этим широкое распределение γ -квантов по энергиям позволяют произвести только грубое выделение частей спектра, соответствующих дипольному и квадрупольному излучениям. Если принять, что максимум распределения под 90° в мягкой части спектра отвечает дипольному излучению компаунд-систем, обладающих наиболее вероятным значением момента, а излучение с энергией в два раза большей определяется, в основном, квадрупольным излучением этих же систем, можно провести сравнение ожидаемой и наблюдаемой анизотропий. Полная анизотропия излучения, проинтегрированного по всему спектру, дает представление об относительных величинах дипольного и квадрупольного моментов рассматриваемых компаунд-систем. В таблицах 1 и 2 приведено сравнение отношений спектральной и полной интенсивностей под различными углами, вычисленных на основе формул ^{15/}, ^{16/}, и найденных экспериментально.

Ввиду больших экспериментальных ошибок в определении представленных в таблицах величин и больших упрощений, сделанных при теоретическом рассмотрении, не следует придавать большого значения близкому совпадению некоторых чисел. Однако, можно утверждать, что модель компаунд-системы, обладающей электрическим дипольным моментом, т.е. не пришедшей к полному термодинамическому равновесию, позволяет качественно понять основные характеристики γ -излучения, а именно угловые и спектральные распределения. Сравнение полных интенсивностей излучения под углами 90° и 45° приводит к заключению, что система $\text{Te} + \text{C}$ обладает

значительным дипольным моментом, так что преобладает дипольное излучение, в то время как в системе $V + C$ интенсивности дипольного и квадрупольного излучений примерно одинаковы. Большая величина дипольного момента системы $Te + C$ объясняется, по-видимому, как сравнительно большим эффективным дипольным зарядом, вычисляемым на основе $/1/ \quad /e_D = 1,1/$, так и отмеченным выше увеличением дипольного момента с ростом φ средний момент вращения $\bar{l} = 38^{/6/}$. Меньшая величина момента вращения $/\bar{l} = 16/$ и относительно малый дипольный заряд $/e_D = 0,48/$ системы $V + C$ приводят к увеличению интенсивности квадрупольного излучения по сравнению с реакцией $Te + C$.

Аналогичным образом малость момента вращения компаунд систем, образованных в реакциях с α -частицами $^{16/}$, может объяснить и преобладающую роль квадрупольного излучения $/см. таблицу 2/$. Это находит отражение и в угловых распределениях $^{16/}$ γ -излучения. За исключением системы $Co + \alpha$ и, возможно, $Ba + \alpha$, для которых ввиду малой массы компаунд-системы $/и, соответственно, меньшего момента инерции/$ влияние момента вращения увеличивается, приводя к меньшему слиянию, так что можно ожидать некоторого увеличения дипольного излучения, ни одно угловое распределение не обнаруживает характерного повышения жесткости под углом 45° по сравнению с углом 80° , наблюдающегося в реакциях с тяжелыми ионами.

Если учесть, что ядра могут совершать малые колебания около положения равновесия P_0 с частотой ω , большой по сравнению с частотой вращения,

$$R = P_0 (1 + a \cos \omega t), \quad a \ll 1, \quad \omega \gg \omega_0, \quad /7/$$

то эти колебания мало отразятся на вращательном спектре, но будет наблюдаться дипольное излучение с частотой ω и интенсивностью излучения в элемент телесного угла с той же анизотропией, что дает $^{15/}$ $x^1/$:

$$dW = \frac{e^2 R^2 a^2 \omega^4}{8\pi c^3} (1 + \frac{1}{2} \sin^2 \theta) d\Omega \quad /8/$$

Эксперимент $^{16/}$ показывает, что такое излучение в области $\hbar\omega \sim 3$, по-видимому, существует, причем его интенсивность тем

^{x)} Учет конечности размеров колеблющихся ядер может привести к квадрупольному излучению с распределением интенсивности, имеющим минимум под углом 90° к направлению пучка ионов.

больше, чем больше ожидаемый дипольный момент системы. В реакциях с α -частицами оно проявляется слабее, чем в реакциях с ионами углерода. Сравнивая интенсивности излучения с энергией $\epsilon_{\gamma} = 0,6$ Мэв и $\epsilon_{\gamma} = 3$ Мэв и, считая, что они определяются дипольным излучением одной системы, можно заключить, что амплитуда колебаний $a \sim 0,1$, т.е. действительно мала.

Так как момент вращения является, по-видимому, основным фактором, препятствующим полному слиянию ядер, временем образования составного ядра τ можно считать время высвечивания момента системы за счет электромагнитного излучения (торможение излучением).

Изменение момента вращения \vec{M} заряда, движущегося по окружности с частотой ω и излучающего с интенсивностью W ,

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = [\vec{n} \vec{p}] = -\frac{W}{\omega} \frac{\vec{M}}{M}.$$

Так что время излучения равно

$$\tau = \frac{M}{W}.$$

Полагая /это соответствует системе $Te + C$ /, $\ell = 40$,
 $\omega = 1 \cdot 10^{21}$ сек $^{-1}$, $R = 0,7 \cdot 10^{-12}$ см, $W = \frac{2}{3} \frac{e^2 R^2 \omega^4}{c^3} = 2 \cdot 10^{15} \frac{\text{Мэв}}{\text{сек}}$,

получаем $\tau = 1 \cdot 10^{-14}$ сек.

Учет квадрупольного излучения может привести к некоторому уменьшению этой величины. Таким образом следует считать, что временами образования в реакциях с тяжелыми ионами составного ядра, находящегося в полном равновесии, являются величины $\tau \sim 10^{-14} - 10^{-15}$ сек, т.е. на три-четыре порядка большие, чем в реакциях с легкими частицами.

Надо отметить, что в данной работе рассмотрен только один из возможных механизмов γ -излучения, а именно коллективные вращательные и колебательные движения системы, обладающей электрическими квадрупольным и дипольным моментами. Рассмотрение однонуклонных переходов и связанное с этим γ -излучение представляет самостоятельный теоретический интерес, но в настоящее время этот вопрос еще недостаточно изучен, ввиду недостатка знаний о механизме взаимодействия тяжелых ионов с ядрами.

В заключение заметим, что успех расчетов упругого рассеяния ионов азота на ядрах углерода и бериллия по оптической модели ^{/7/} также указывает на известную стабильность ядер в процессе взаимодействия.

Автор признателен Ю.Ц.Оганесяну за предоставление экспериментальных данных до их опубликования и Б.Н.Калинкину за полезное обсуждение.

Л и т е р а т у р а

1. T.Ericson. *Advances in Physics*, 9, 425 (1960).
2. В.В. Бабиков, *ЖЭТФ*, 38, 274, /1960/.
T.D.Thomas. *Phys. Rev.*, 116, 703 (1959).
3. R.Beringer, W.J.Кнох. *Phys. Rev.*, 121, 1195 (1961).
4. Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц "Теория поля", Физматгиз, /1960/.
5. Ю.Ц.Оганесян, Ю.В. Лобанов, Б.Н. Марков, Г.Н. Флеров /в печати/.
6. J.F.Mollenauer. *Effects of Angular Momentum on Gamma-Ray Production in Compound Nucleus Reactions*. University of California. 1961.
7. R.H.Bassel, R.M.Drisko. *Proc. Int. Conf. Nuclear Structure*. Kingston, Canada (1960).

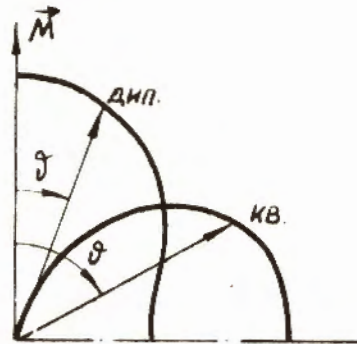
Рукопись поступила в
издательский отдел 28 октября 1961 года.

Т а б л и ц а 1

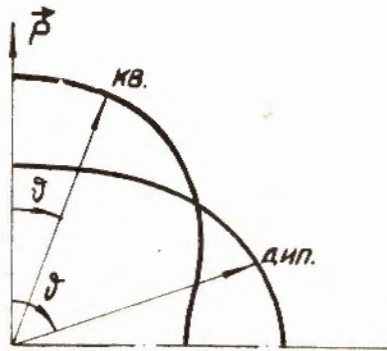
Система	Энергия иона МэВ	ξ_{γ} МэВ	$2\xi_{\gamma}$ МэВ	θ_1	θ_2	$dW(\xi_{\gamma}, \theta_1)$		$dW(2\xi_{\gamma}, \theta_1)$		$dW(\theta_1)$			$e_{\text{д}}$	$e_{\text{кв}}$
						$dW(\xi_{\gamma}, \theta_2)$ теор. эксп.		$dW(2\xi_{\gamma}, \theta_2)$ теор. эксп.		теор. дип.	теор. квад.	эксп.		
Cu + O	95	0,25	0,5	115°	20°	1,33	1,1	0,75	0,74	1,33	0,75	-	0,69	5,5
Te + C	115	0,8	1,2	90°	45°	1,2	1,5	0,69	0,7	1,2	0,69	1,2	1,1	5,8
V + C	58	0,6	1,2	90°	45°	1,2	1,6	0,69	0,7	1,2	0,69	0,86	0,48	4,7

Т а б л и ц а 2

Система	энергия МэВ α -част.	$dW(90^\circ)/dW(45^\circ)$			$e_{\text{д}}$	$e_{\text{кв}}$
		теор. дип.	теор. квад.	эксп.		
Ba + α	45	1,2	0,89	0,70	0,37	2,5
Ho + α	45	1,2	0,69	0,69	0,37	2,5
Ta + α	45	1,2	0,89	0,65	0,38	2,5
Co + α	45	1,2	0,69	0,78	0,16	2,0



Р и с. 1. Диаграмма направленности для интенсивности дипольного и квадрупольного излучений компаунд-системы относительно вектора момента вращения.



Р и с. 2. Диаграмма направленности для интенсивности дипольного и квадрупольного излучения мишени относительно направления импульса падающих частиц.