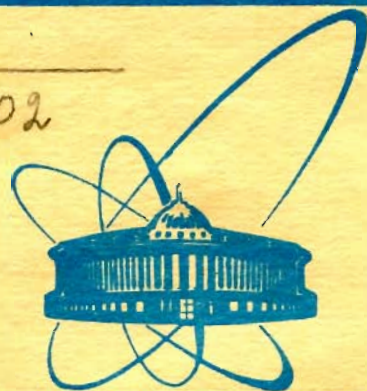


12447

A-302



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

3944/2-79

410-79

P6 - 12447

М.Адилбиш, Н.Г.Зайцева, О.Кнотек, М.Я.Кузнецова,
Ю.В.Норсеев, В.И.Фоминых, В.А.Халкин, В.Г.Чумин

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ
ПРЕПАРАТОВ ^{123}J ИЗ РАДИОКСЕНОНА,
ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В РЕАКЦИЯХ РАСЩЕПЛЕНИЯ
ЯДЕР ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 660 МэВ

1979

P6 - 12447

М.Адилбиш, Н.Г.Зайцева, О.Кнотек, М.Я.Кузнецова,
Ю.В.Норсеев, В.И.Фоминых, В.А.Халкин, В.Г.Чумин

ПОЛУЧЕНИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ
ПРЕПАРАТОВ ^{123}J ИЗ РАДИОКСЕНОНА,
ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В РЕАКЦИЯХ РАСЩЕПЛЕНИЯ
ЯДЕР ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 660 МэВ

Направлено в "International Journal of Applied Radiation and Isotopes"

Получение медико-биологических препаратов ^{123}J из радиоксенона, образующегося в реакциях расщепления ядер протонами с энергией 660 МэВ

Изучены условия получения препаратов ^{123}J из ^{123}Xe , образующегося при облучении массивных мишеней протонами с энергией 660 МэВ. Определены сечения образования изотопов ^{122}Xe , ^{123}Xe и ^{125}Xe в облученных мишенях J, Cs, Ba и La для $E_p = 660$ МэВ.

Расчетным и экспериментальным путем определены выход ^{123}J и содержание изотопных примесей / ^{121}J , ^{125}J , ^{121}Te , ^{119}Te / в препарате, получаемом при облучении расплава CsCl / 54 г/см^2 / и "on-line" выделении ксенона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Medical ^{123}J Production from Radioxenon Formed in Spallation Reactions by 660 MeV Protons

Conditions of the ^{123}J production from ^{123}Xe formed by irradiating thick targets with 660 MeV protons, are studied. The cross sections of the ^{122}Xe , ^{123}Xe and ^{125}Xe production have been determined in the J, Cs, Ba and La targets for $E_p = 660$ MeV. ^{123}J yield and contaminations of ^{121}J , ^{125}J , ^{121}Te and ^{119}Te at the irradiation of the CsCl melt (54 g/cm^2) and the on-line Xe separation, have been determined by calculation and experimental methods.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для медико-биологических исследований все шире используются препараты, содержащие радионуклиды, и среди них большое внимание уделяется препаратам с радиоактивным йодом^{/1-5/}. До недавнего времени они готовились главным образом на основе радионуклида ¹³¹J. В последнее десятилетие встал вопрос о замене в целом ряде важных случаев ¹³¹J на ¹²³J^{/4,5/}. Для решения этой проблемы большинство известных центров, имеющих различного рода ускорители, теперь занимаются производством ¹²³J, преимущества которого перед ¹³¹J хорошо известны.

Йод-123 признан почти идеальным изотопом в ядерной медицине /для диагностики состояния щитовидной железы, легких, почек и т.д./. Его ядерно-физические характеристики /табл. I/ оптимальны для медицинских процедур in-vivo, особенно тех, которые завершаются в течение суток. Период полураспада ¹²³J /13,3 ч/ позволяет проводить необходимые операции химического выделения и очистки радиоiodа, приготовления радиофармацевтических препаратов, доставки их к пациенту и получения клинической информации.

¹²³J распадается путем захвата орбитального электрона /100%/, превращаясь в стабильный ¹²³Te. Распад сопровождается излучением гамма-квантов, в основном, с энергией 159 кэВ /83% на распад/, и электронов внутренней конверсии с соответствующей энергией. Из-за отсутствия бета-излучения и относительно короткого периода полураспада йод-123 менее радиотоксичен по сравнению с йодом-131: радиационная доза, получаемая щитовидной железой взрослого пациента, на два порядка меньше в случае применения ¹²³J, чем при исследованиях с равными по активности количествами ¹³¹J.

определенное время для накопления ^{123}J . После удаления ксенона радиойод вымывается из ловушки подходящим раствором. Следует отметить отличительную черту этого метода - возможность проведения непрерывного удаления радиоксенона из мишени в процессе облучения / "on-line"-методика/ [7,8].

Большая часть работ по получению ^{123}J осуществляется на ускорителях частиц с энергией 10-80 МэВ, для которых условия получения хорошо исследованы [5,9]. С целью расширения производства ^{123}J /и ряда других радионуклидов/ в последнее время было обращено внимание на использование высокоэнергетических ускорителей частиц высоких энергий, таких как BLIP [1] и LAMPF [4,10] в США, TRIUMF [4] в Канаде, SIN [11] в Швейцарии. Для получения радионуклидов на этих ускорителях предполагается использовать внешний пучок протонов, уже прошедший через мишени, поставленные для физических экспериментов. В СССР, в ЛИЯФ [7], ^{123}J получают при облучении раствора хлорида цезия выведенным пучком протонов с энергией 1 ГэВ.

В связи с реконструкцией синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в сильноточный ускоритель - установку "Ф" / $E_p = 700$ МэВ, интенсивность внешнего пучка протонов 30-40 мкА/ - возник вопрос об использовании будущего протонного пучка для производства радионуклидов, в том числе и ^{123}J /из ^{123}Xe /.

Поскольку в реакциях глубокого расщепления ядер-мишеней протонами высоких энергий нейтрондефицитные изотопы ксенона /предшественники радиойода/ с $A > 119$ образуются с измеримыми сечениями, необходимо иметь сведения о степени загрязнения ^{123}J другими изотопами йода. Оценка возможности получения на ускорителях частиц высоких энергий препаратов ^{123}J с пригодной для ядерной медицины радионуклидной и радиохимической чистотой требует поиска оптимальных условий проведения эксперимента: времени облучения мишени и времени распада Xe в J . При этом должны быть известны величины сечения образования нейтрондефицитных изотопов ксенона для заданных энергий и ядер-мишеней. Кроме того, агрегатное состояние вещества мишени и конструкция контейнера для облучения вещества тоже требуют изучения и экспериментальной проверки. Все эти вопросы и послужили основой для проведения настоя-

щей работы, посвященной изучению условий получения ^{123}J из ^{123}Xe , образующегося при облучении массивных мишеней протонами с энергией 660 МэВ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ КСЕНОНА

Для выбора мишени, позволяющей получать ^{123}J с оптимальными выходом и чистотой, необходимо было определить кумулятивные сечения образования ^{123}Xe и других изотопов Xe в различных мишенях, облученных протонами с энергией 660 МэВ. В качестве мишеней для получения радиоксенона в реакциях расщепления использовались близкие к ксенону по порядковому номеру элементы: йод, цезий, барий, лантан.

Водные растворы солей LiJ , CsNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ с известной концентрацией облучались в закрытых сосудах-барботерах, завернутых в Al-фольгу, в течение двух часов выведенным пучком протонов с $E_p = 660$ МэВ на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Для определения потока протонов использовалась реакция $^{27}\text{Al}(p, 3p)n$ ^{24}Na с известным сечением образования ^{24}Na , равным 10,8 миллибарн^{12/}.

Выделение радиоксенона из облученных растворов проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Ловушка с радиоксеноном, помещенная в пенопластовый стакан с жидким азотом, переносилась к Ge(Li)-детектору /38 см³, разрешение 2,6 кэВ при $E_\gamma = 159$ /, с помощью которого измерялись гамма-спектры изотопов Xe и ^{24}Na /табл. 2/. Образцы ^{24}Na представляли собой солянокислый раствор облученного алюминия с объемом, равным приблизительно объему сорбента, поглощающего ксенон. Раствор измерялся в стеклянных пробирках с таким же диаметром и толщиной стенок, как и ловушки с ксеноном. Расстояние между детектором и образцами было, как правило, не менее 10 см, а при измерениях образцов Xe и ^{24}Na на различных расстояниях от детектора в полученные результаты вводилась соответствующая поправка. Площади под фотопиками в гамма-спектрах определялись с помощью программы КАТОК^{14/} на ЭВМ "Минск-2".

Расчет кумулятивных сечений образования изотопов радиоксенона проводился по формуле, приведенной в Приложении 1.

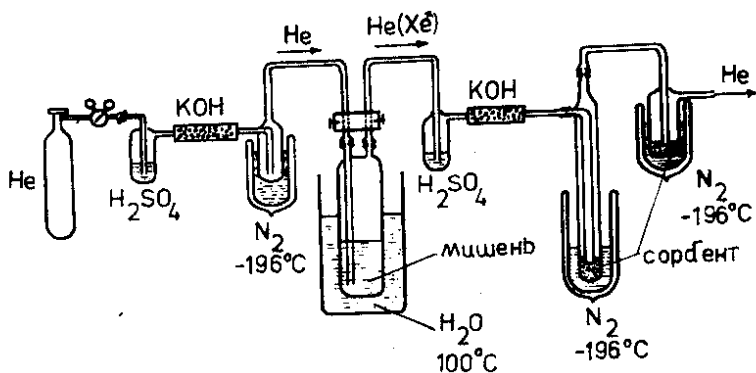


Рис.1. Схема установки для выделения радиоксенона в экспериментах по определению σ_{Xe} .

Таблица 2

Энергии гамма-квантов ^{13/} и их относительные интенсивности, которые использовались при определении σ_{Xe}

Изотоп	$T_{I/2}$	E_{γ} , кэВ	f , % на распад
^{123}Xe	2,08 ч	148	50
		178	16
		330	8,6
^{125}Xe	16,8 ч	188	55
		243	29
		453	4,3
^{122}Xe	20,1 ч	350	7,8
^{24}Na	15 ч	1368	100

Полученные результаты представлены в табл. 3. Ошибки в определении σ_{Xe} являются среднеквадратичными, за исключением σ_{Xe} для мишени J, для которой приведено среднеарифметическое отклонение от среднего значения величины σ_{Xe} . Очевидно, что кроме случайных ошибок значения σ_{Xe} имеют и систематическую ошибку, обусловленную в основном неточностью хода кривой относительной эффективности регистрации гамма-лучей, а также пренебрежением самопоглощения гамма-лучей в образце.

Таблица 3

Кумулятивные сечения образования изотопов Хе /мбн/ при облучении мишеней протонами с $E_p = 660$ МэВ

Мишень	Число опред.	^{123}Xe	^{125}Xe	^{122}Xe	^{121}Xe *)	$\sigma_{^{123}\text{Xe}}/\sigma_{^{122}\text{Xe}}$	$\sigma_{^{123}\text{Xe}}/\sigma_{^{121}\text{Xe}}$
J	2	$3,8 \pm 0,4$	$6,6 \pm 0,5$	$2,6 \pm 0,3$	1,3	$0,58 \pm 0,10$	2,9
C5	5	$29,3 \pm 1,7$	45 ± 5	$19,9 \pm 1,5$	11,0	$0,65 \pm 0,08$	2,7
Ва	3	26 ± 4	38 ± 6	$17,8 \pm 2,6$	10,5	$0,66 \pm 0,18$	2,4
La	5	$31,9 \pm 1,6$	$47,7 \pm 3,9$	$25,0 \pm 3,2$	14,0	$0,67 \pm 0,09$	2,3
*) $\sigma_{^{121}\text{Xe}}$ получены экстраполяцией значений $\sigma_{^{122}\text{Xe}}$, $\sigma_{^{123}\text{Xe}}$, $\sigma_{^{124}\text{Xe}}$							

Найденные нами значения сечений образования ^{125}Xe , ^{123}Xe , ^{122}Xe , ^{121}Xe хорошо согласуются с величинами, полученными для энергий протонов 590 МэВ ^{74, с.76/} и 540 МэВ ^{17/}, но оказались вдвое выше, чем при энергии 1 ГэВ ^{18/}.

Приведенные в табл. 3 результаты позволяют сделать заключение о том, что цезий, барий и лантан, как элементы мишени, равноценны с точки зрения выхода ^{123}Xe и относительных выходов других изотопов ксенона.

ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ^{123}J

Для практического получения препаратов ^{123}J было необходимо оценить наиболее выгодные условия эксперимента, а именно - время облучения мишени, имея в виду одновременное удаление ксенона из мишени в ловушку / "on-line" методика/, время накопления йода из ксенона уже после окончания облучения, и допустимое для последующего использования время распада йода после удаления ксенона из ловушки. Под оптимальными условиями подразумеваются такие, при которых минимальные загрязнения ^{123}J другими изотопами будут сочетаться с его достаточно высоким выходом.

Для расчета активности изотопов йода и теллура, образующихся из спалогенного ксенона при таких условиях, использовались формулы, приведенные в Приложении 2. В табл. 4 и на рис. 2 представлены некоторые результаты этих расчетов для мишени Cs, которые позволяют судить о количестве и изотопном составе препарата ^{123}J в заданный момент времени. Данные показывают, что может быть относительно большой набор оптимальных условий, при которых выход ^{123}J на один час облучения и чистота препарата примерно одинаковы, и таким образом выбор продолжительности экспозиции мишени в пучке протонов и времени накопления йода из ксенона обуславливается необходимой величиной активности препарата ^{123}J .

Таблица 4

Расчетные данные об изотопном составе и активности радио-
йода, получаемого из спалогенного ксенона /выделение Хе
'on-line'; мишень CsCl 54 г/см²; поток частиц
1·10¹² протон./мишень.с/

Изотоп Время [*])	I25 _γ		I23 _γ		I2I _γ		I2I _{Te}	
	мКи	% от I23 _γ	мКи	мКи	% от I23 _γ	мКи	% от I23 _γ	
$\Delta t_1 = 1$ час	0,00224	0,19	1,168	7,788	666,7	0,0049	0,42	
$\Delta t_2 = 5$ час	0,0224	0,40	5,565	5,285	94,9	0,0894	1,60	
$\Delta t_3 = 12$ час	0,0166	0,55	2,985	0,101	3,4	0,1092	3,65	
$\Delta t_1 = 2$ час	0,0072	0,17	4,129	20,926	506,8	0,0292	0,71	
$\Delta t_2 = 5$ час	0,0406	0,36	11,168	9,135	81,8	0,1816	1,63	
$\Delta t_3 = 12$ час	0,0406	0,68	5,997	0,171	2,8	0,2236	3,73	
$\Delta t_1 = 4$ час	0,029	0,22	13,201	42,640	323,0	0,1346	1,02	
$\Delta t_2 = 3$ час	0,067	0,31	21,447	25,881	120,7	0,3227	1,50	
$\Delta t_3 = 12$ час	0,067	0,58	11,473	0,495	4,3	0,4485	3,90	
$\Delta t_1 = 5$ час	0,0452	0,24	18,575	49,857	268,4	0,2185	1,17	
$\Delta t_2 = 2$ час	0,0787	0,31	25,640	38,028	148,3	0,3748	1,46	
$\Delta t_3 = 12$ час	0,0782	0,57	13,722	0,724	5,27	0,5565	4,05	
$\Delta t_1 = 6$ час	0,0641	0,26	24,153	55,156	228,4	0,3074	1,27	
$\Delta t_2 = 1$ час	0,0843	0,29	28,626	51,204	178,9	0,3989	1,39	
$\Delta t_3 = 12$ час	0,0838	0,54	15,323	0,978	6,4	0,6454	4,21	

* Δt_1 - время облучения; Δt_2 - время от конца облучения до момента отделения Хе от дочерних J и Te; Δt_3 - время после отделения Хе от дочерних нуклидов.

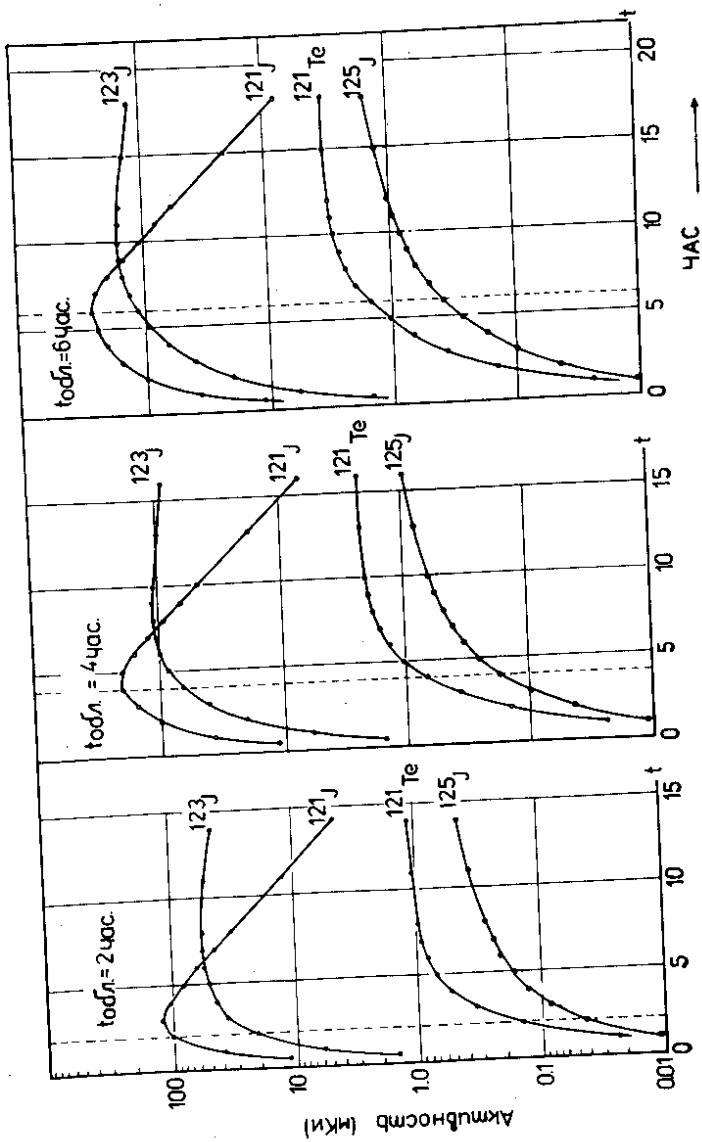


Рис.2. Изменение активности изотопов ^{123}J , ^{125}J , ^{121}J и ^{121}Te , накапливающихся при распаде спалогенного ксенона как в процессе облучения, так и после его окончания. Мишень $\text{CsCl} / 42,5 \text{ г/см}^2 /$, поток частиц $6,25 \cdot 10^{12}$ протон/с / 1 мкА/.

МИШЕНЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ¹²³J И МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Анализ свойств цезия, бария, легких лантанидов, а также соединений этих элементов ¹⁹/с точки зрения использования их в качестве мишеней позволил сделать заключение, что наиболее удобный материал для облучения в интенсивных потоках протонов высоких энергий - расплавленный хлорид цезия. В этом случае не будет радиолитических эффектов, осложняющих процесс облучения и сбор радиоксенона. Плотность хлорида цезия при температуре плавления $640 \pm 2^\circ\text{C}$ равна $3,6 \text{ г/см}^3$. Молярная концентрация цезия в расплаве равна $21,4 \text{ моль/л}$, т.е. выше, чем в расплавах других галогенидов цезия. Упругость паров CsCl над расплавом при 650°C около $0,1-0,2 \text{ Торр}$, следовательно, потери соли за счет уноса с газом-носителем не должны превышать при этой температуре 2 мкг на мл газа-носителя.

Для изготовления контейнера мишени CsCl можно использовать нержавеющие стали, устойчивые в расплавах галогенидов щелочных металлов ²⁰/. Применяемый в наших экспериментах контейнер для расплава CsCl был сделан из стали марки X18H9T. По результатам испытаний вес образцов этой стали не менялся после 10-часового пребывания в расплавленном CsCl в атмосфере гелия. Контейнер обогревался электропечью, температура расплава во время облучения поддерживалась около 650°C . Гелий со скоростью 100 мл/мин продувался над поверхностью расплава. Радиоксенон транспортировался в токе гелия на расстоянии $\sim 70 \text{ м}$ от места облучения к ловушке, в которой он сорбировался при -196°C на окиси алюминия /марки "для хроматографии" с размером частиц $50-70 \text{ мкм}$ /, промытой предварительно слабощелочным раствором ⁷¹/. Накопившийся в результате распада ксенона радиоiod достаточно полно, не менее 90% , вымывался из слоя сорбента водой /рН =7/. В этом растворе радиоiod более чем на 96% был в форме йодида*.

Для проверки согласования расчетных и экспериментальных данных о выходе ¹²³J и содержании в препарате изотопных

* Анализ химических форм радиоiodа методом электрофореза и бумажной хроматографии был выполнен И.Драйер, за что авторы выражают ей благодарность.

примесей при облучении больших количеств расплавленного хлорида цезия облучалась мишень толщиной 54 г/см^2 .

Для определения абсолютной эффективности регистрации гамма-лучей радиоiodа Ge(Li) -детектором использовались образцовые стандартные гамма-источники ^{60}Co , ^{113}Sn , ^{137}Cs и ^{139}Ce . Относительный ход кривой эффективности определялся по гамма-излучению ^{152}Eu . Активность образцов радиоiodа, формы и размеры которых значительно отличались от стандартных источников, измерялась на расстоянии не менее чем 50 см от поверхности детектора, несмотря на это ошибки в определении активности могли быть довольно высокими $\sim 20\%$.

Найденные экспериментально и полученные расчетным путем /для тех же условий/ количества радиоiodа приведены в табл. 5. Необходимо отметить, что рассчитанные величины содержат неопределенность $\sim 15\%$, обусловленную ошибками в определении потока протонов. Удовлетворительное согласие /в пределах ошибок/ экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать заключение о достаточно полном выделении ксенона из большой по массе мишени расплава хлорида цезия.

На рис. 3 приведен гамма-спектр радионуклидов, содержащихся в элюенте, полученном после промывки сорбента водой с $\text{pH} = 7$. Видно, что в препарате содержится в основном ^{123}J /166 мкКи/. Примеси других изотопов: ^{121}J , ^{121}Te , и ^{119}Te , незначительны и равны, соответственно, 1,2; 2,0 и 1,9 мкКи. Отдельное измерение гамма-спектра специально приготовленного препарата на Ge(Li) -детекторе / $0,8 \text{ см}^3$ с разрешением 0,55 кэВ на линии 122 кэВ ^{57}Co / через 12 суток показало, что содержание ^{125}J также незначительно и равно 1,2 мкКи /на то же время, т.е. через 17 ч. после удаления ксенона/.

Найденные экспериментальные данные о выходе ^{123}J из мишени CsCl / 54 г/см^2 / и радионуклидной чистоте препарата позволяют ожидать, что на внешнем пучке протонов установки "Ф" /30-40 мкА/ можно будет получать 400-500 мКи/ч ^{123}J с изотопными примесями ^{121}J и ^{125}J порядка 3,0 и 0,7%, соответственно /на время через 12 ч после удаления ксенона из ловушки от йода/.

Таблица 5

Активность изотопов /мКи/ на момент удаления ксенона из ловушки / "on-line" метод;
мишень CsCl 54 г/см² /

Условия эксперимента	I23 γ		I21 γ		I21 γe	
	Экспер.	Расчет	Экспер.	Расчет	Расчет	Расчет
$\Delta t_1 = 1$ час						
$\Delta t_2 = 5$ час	0,39	0,41	1,05	0,30	0,39	1,30
Поток 7, I. I0 ¹⁰ протон мишень.сек					0,0044	0,0065
$\Delta t_1 = 2$ час						
$\Delta t_2 = 4$ час	0,54	0,58	1,07	0,54	0,66	1,22
Поток 5, I. I0 ¹⁰ протон мишень.сек					0,0071	0,0088
						1,24

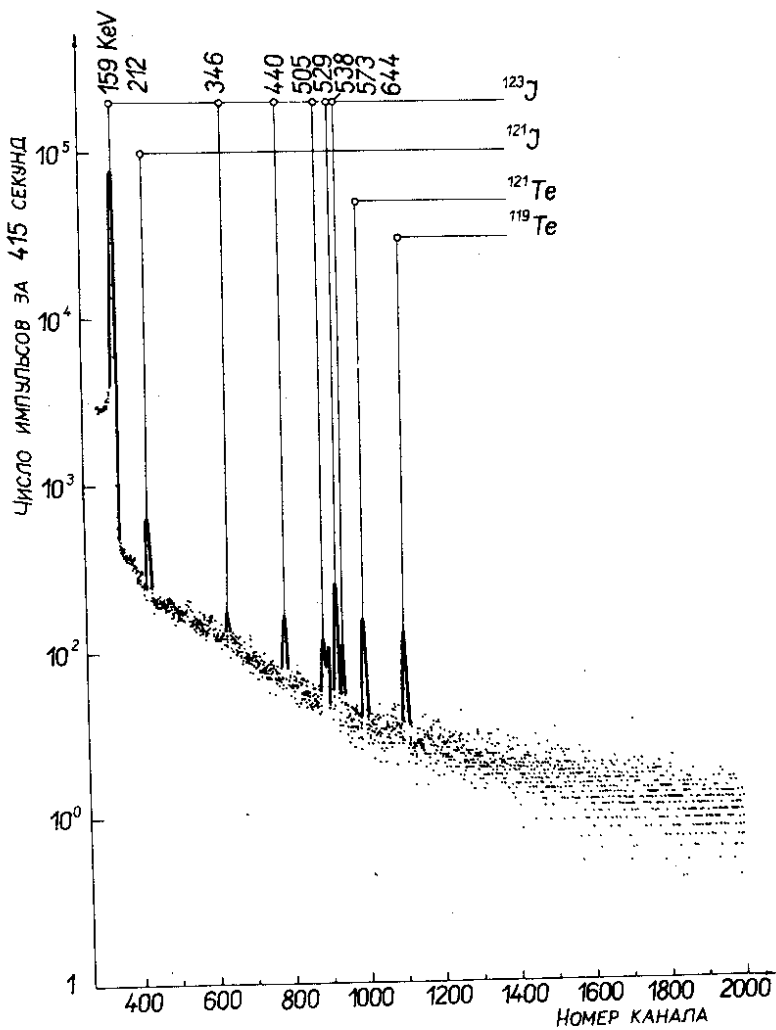


Рис. 3. Гамма-спектр препарата радиоактивного йода, полученного из мишени CsCl /54 г/см²/: время облучения и "on-line" сбора Хе в ловушку 4 ч, время распада Хе после конца облучения - 3 ч /затем ксенон удалялся из ловушки/; элюирование радиоioda из ловушки через 17 ч после удаления ксенона /измерение гамма-спектра сразу после элюирования/.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет сечений образования изотопов спалогенного ксенона проводился по формуле

$$\sigma_{\text{Xe}} = \frac{S_{E_{\gamma}} e^{\lambda_{\text{Xe}} \Delta t_1} \delta_{E_{\gamma}} f_{E_{\gamma}} \alpha_{\text{Na}} \Delta t_2 (1 - e^{-\lambda_{\text{Na}} t_{\text{обл}}}) P_{\text{Al}} A_{\text{обл. миш.}} \sigma_{\text{Na}}}{\delta_{E_{\gamma}} f_{E_{\gamma}} \alpha_{\text{Xe}} \Delta t_2 S_{E_{\gamma}} e^{\lambda_{\text{Na}} \Delta t_1} (1 - e^{-\lambda_{\text{Xe}} t_{\text{обл}}}) P_{\text{обл. мишени}} A_{\text{Al}}}$$

где $S_{E_{\gamma}}$ - площадь под фотопиком гамма-лучей с энергией E_{γ} ; $\delta_{E_{\gamma}}$ - относительная эффективность регистрации гамма-квантов с энергией E_{γ} . Для определения $\delta_{E_{\gamma}}$ в зависимости от E_{γ} использовались источники ^{152}Eu и ^{182}Tm , гамма-излучение которых хорошо изучено $^{15}/f_{E_{\gamma}}$ - процент гамма-квантов данной энергии на один распад исследуемого изотопа; $\lambda_{\text{Xe}}, \lambda_{\text{Na}}$ - постоянные распада изотопов Xe и ^{24}Na ; Δt_2 - истинное время измерения гамма-спектра исследуемого изотопа /в наших измерениях оно менялось от 6 до 20 мин./; Δt_1 - время от конца облучения до середины интервала измерения; $t_{\text{обл.}}$ - продолжительность облучения; P - масса облучаемого элемента в граммах; A - атомный вес облучаемого элемента в граммах; α - химический выход изотопа /100% в данном случае/, σ_{Na} - сечение образования ^{24}Na .

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для того чтобы получить формулы для расчета числа ядер различных изотопов ксенона, йода и теллура при заданных временах облучения различных мишеней высокоэнергетическими протонами, задача ставилась в общем виде следующим образом.

Пусть мишень, содержащая известное число ядер - $N_{\text{обл. ядер}}$, облучается потоком частиц - n *част./см².с* В результате ядерных реакций в мишени образуются ядра типа 1, 2, 3 ... m, ..., причем они находятся в генетической связи, т.е. $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow m \rightarrow \dots$. Очевидно, что при таком условии ядра типа 1 образуются в мишени непосредственно в ядерной реакции, а ядра типа 2, 3 ... m, ... образуются как в результате ядерных реакций, так и в

результате распада своих предшественников. Требуется определить количество радиоактивных ядер любого типа $N_m(t)$ в заданный момент времени t . Для получения соответствующих формул необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_1}{dt} = K_1 - \lambda_1 N_1,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = K_2 + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2,$$

$$\frac{dN_3}{dt} = K_3 + \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3,$$

.....

$$\frac{dN_m}{dt} = K_m + \lambda_{m-1} N_{m-1} - \lambda_m N_m.$$

/1/

Здесь $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m, \dots$ - не равные по величине постоянные распада ядер типа 1, 2, ..., m ..., соответственно, а $N_1, N_2, \dots, N_m, \dots$ - число ядер соответствующего типа на данный момент времени.

$$K_m = nN_{\text{обл. ядер}} \sigma_m,$$

где σ_m - сечение реакции, ведущей к образованию ядер типа m. Решения дифференциальных уравнений /1/ имеют следующий вид:

$$N_m(t) = A_{m0} + A_{m1} e^{-\lambda_1 t} + A_{m2} e^{-\lambda_2 t} + A_{m,m-1} e^{-\lambda_{m-1} t} + A_{mm} e^{-\lambda_m t},$$

/2/

где

$$A_{m0} = \frac{nN_{\text{обл. ядер}}}{\lambda_m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_m),$$

$$A_{mi} = \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_m - \lambda_i} A_{m-1,i},$$

$$A_{mm} = N_m(0) - \sum_{j=0}^{m-1} A_{mj}.$$

В частности, когда $N_1(0) = N_2(0) = \dots = N_m(0)$ и нас интересуют лишь те ядра типа 2,3,4 ..., которые образуются в результате распада ядер типа 1, для нахождения числа ядер $N_m(t)$ также используется формула /2/, но

$$A_{m0} = \frac{n N_{\text{обл. ядер}}}{\lambda_m} \sigma_1$$

$$A_{mm} = - \sum_{j=0}^{m-1} A_{mj}$$

Отметим, что если ядро типа m стабильно, то

$$N_{m \text{ стаб.}}(t) = n N_{\text{обл. ядер}} \sigma_1 t - \sum_{j=1}^{m-1} N_j(t)$$

В другом частном случае, когда $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_m = 0$, формула /2/ применима для определения на любой момент времени числа генетически связанных ядер /16/.

Результаты расчетов ядер ксенона и его дочерних продуктов - йода и теллура в зависимости от продолжительности времени облучения мишени и накопления дочерних изотопов после облучения частично представлены в табл. 4 и на рис. 2. В расчетах использовались экспериментально определенные кумулятивные сечения образования изотопов радиоксенона /табл. 3/.

Расчеты выполнены А.В.Халкиным, за что авторы выражают ему благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Radiopharmaceuticals and Labelled Compounds. Proceed. Symp., Copenhagen 1973, vol. 1, p. 197, 239, 249, 257, 303, 317, 325, 345, IAEA, Vienna, 1973.*
2. *Proceed. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Application, Zürich 1975, Birkhäuser, Basel, 1975.*
3. *Radiopharmaceuticals and Other Compounds Labelled with Short-Lived Radionuclides. Special Issue Int. J. Appl. Rad. Isotopes 28,1/2, 1977.*
4. *Applications of Iodine-123 in Nuclear Medicine. Proceed. Conf. Rockville 1975, Report HEW(FDA) 76-8033, 1976.*

5. Proceed. Panel Disc. Iodine-123 in Western Europe (Production. Application. Distribution), Report Jül-Conf-20, 1976.
6. Goolden A.W.G., Glass H.I. et al. J.Radiology, 1968, 41, p. 20.
7. Алексеев Е.Г. и др. Препринт ЛИЯФ-382, Ленинград, 1978.
8. Godart J. et al. Int.J.Appl. Rad., Isotopes, 1977, 28, p. 967.
9. Syme D.B. et al. AERE-R 8276, Harwell, 1976.
10. O'Brien H.A., Ogard A. J.Nucl.Medicine, 1973, 14, p. 635.
11. Hegedüsh F., Peek N.F. SIN Phys.Report NI, Dec., 1976, p. 71,
12. Bruninx E., High Energy Nuclear Reaction Cross Section, CERN-61-1, 1961.
13. Erdtmann G.E., Soyka W. Die γ -Linien der Radionuklide, vol. 1, Jül-1003-AC, KFA, 1974.
14. Гаджоков В. ПТЭ, 1970, №5, с. 82.
15. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-10414, Дубна, 1977.
16. Экспериментальная ядерная физика под ред. Э.Сегре, ИЛ, М., 1961, т. 3, с. 13.
17. Hegedüsh F., Peek N.F. SIN Report TM-PH-664, 1977.
18. Алексеев Е.Г., Зайцев В.М., Золопов А.М. Препринт ЛИЯФ-191, Л., 1975.
19. Справочник химика т. 1, Госхимиздат. М.-Л., 1962; т. 2 "Химия", М.-Л., 1964.
20. Physico-Chemical Measurements at High Temperatures, Butterworth Sc.Publ., L., 1959, p. 334.
21. Lederer C.M. et al. Table of Isotopes, 6th Edition, John Willey, N.-Y., L., Sydney, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 мая 1979 года.