

2. Bulang et al. Z. Phys. Chemie, 24, 249 (1960).
3. Е. М. Кузнецова и др. ЖФХ, XXXV, № 9 (1961).
4. G. Bouligand. CEA Rep. 2622, U.K. AEA Prod. Group, inform. ser. 16, 1965.
5. J. Takashima. Bull. Tokyo Inst. of Technol., No. 69 (1965).
6. A. Apelblat, J. Ilamed-Lehrer. J. Nucl. Energy, 22, No. 1 (1968).
7. K. Cohen. The theory of isotope separation. New York, 1951.
8. Р. Я. Кучеров, В. П. Миненко. «Атомная энергия», 19, 360 (1965).

## Получение $Sr^{85}$ на циклотроне

Н. Н. КРАСНОВ, П. П. ДМИТРИЕВ, В. П. ЕРЛЫЧЕНКО, И. О. КОНСТАНТИНОВ,  
Н. А. КОНЯХИН, Ю. Г. СЕВАСТЬЯНОВ, В. М. ТУЕВ; И. ГРУБЫ,  
В. КНОБЛОХ, Б. МУДРОВА \*

УДК 621.039.8.002:621.039.6

Изотоп  $Sr^{85}$  ( $T_{1/2} = 64$  дня) распадается в результате электронного захвата с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 514 кэв. Этот изотоп широко применяется в медицине.

Разработка метода получения любого радиоактивного изотопа на циклотроне сводится в основном к решению трех проблем: 1) выбор наиболее эффективной ядерной реакции, приводящей к образованию требуемого изотопа; 2) создание мишеней для облучения соответствующего материала на достаточно высоком уровне мощности; 3) разработка метода выделения радиоактивного изотопа из облученной мишени, обеспечивающего высокой химический выход и минимальные примеси.

Авторы настоящей работы исследовали выходы  $Sr^{85}$  и способы его получения без носителя. Результаты исследований использованы при производстве  $Sr^{85}$  на циклотроне Института ядерных исследований Академии наук Чехословацкой Социалистической Республики [1] и на циклотроне Физико-энергетического института Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР [2].

Опубликовано очень мало данных по выходам  $Sr^{85}$ . В работе [3] измерен выход  $Sr^{85}$  при облучении RbCl протонами и дейтонами энергией 15 Мэв, а в работе [4] приводится расчетное значение выхода  $Sr^{85}$  при облучении металлического рубидия протонами с энергией 22 Мэв.

Все возможные способы получения на циклотроне радиоактивного изотопа  $Sr^{85}$  указаны в таблице. Три первых способа позволяют получать  $Sr^{85}$  без носителя, а два последних — с носителем. Производство на циклотроне  $Sr^{85}$  с носителем не представляет особого интереса, так как он может быть получен в ядерном реакторе более дешевым способом [5]. Получение  $Sr^{85}$  путем облучения криптона  $\alpha$ -частица-

Значения выходов  $Sr^{85}$  при различных способах его получения

Способы получения  $Sr^{85}$

Способ получения	Реакция образования	Содержание изотопа в естественной смеси, %	Данные по выходам		Ссылка						
			энергия частиц, Мэв	выход, мкюри/мка·ч							
Rb+d	Rb <sup>85</sup> (d2n)	72,2	22	116	*						
			22	75 (RbCl)	*						
			12,5	16 (RbCl)	*						
			15	16 (RbCl)	[3]						
Rb+p	Rb <sup>85</sup> (pn)	72,2	23	168	*						
			23	109 (RbCl)	*						
			15	23 (RbCl)	[3]						
			22	63	[4]						
Kr+ $\alpha$	Kr <sup>82</sup> ( $\alpha n$ ) Kr <sup>83</sup> ( $\alpha 2n$ ) Kr <sup>84</sup> ( $\alpha 3n$ )	11,56 11,52 56,9	42	10	**						
						Sr+p	Sr <sup>86</sup> (pn) Sr <sup>86</sup> (ppn)	9,86 9,86	23	20	**

\* Экспериментальные данные, полученные авторами настоящей работы.

\*\* Оценка авторов настоящей работы, полученная путем сравнения с выходами аналогичных реакций в данной области масс.

ми нецелесообразно из-за сложности изготовления криптоновой мишени и выделения из нее  $Sr^{85}$ .

Таким образом, наиболее целесообразно получать  $Sr^{85}$  путем облучения рубидия протонами или дейтонами. Именно эти два способа и были тщательно исследованы.

\* Авторы И. Грубы, В. Кноблех, Б. Мудрова — сотрудники Института ядерных исследований АН ЧССР.



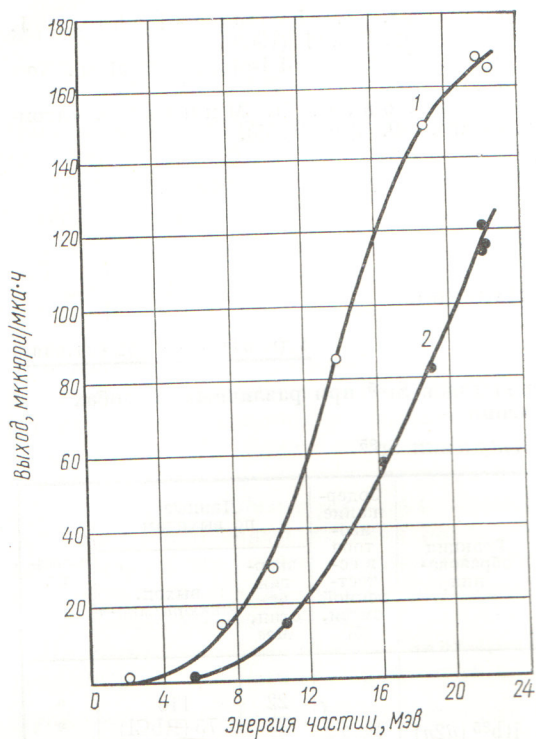


Рис. 1. Выход  $Sr^{85}$  в зависимости от энергии частиц при облучении металлического рубидия протонами и дейтронами (кривые 1 и 2 соответственно).

Зависимость выхода  $Sr^{85}$  от энергии дейтронов и протонов при облучении металлического рубидия представлена на рис. 1.

Металлический рубидий облучался в герметичных капсулах, передняя стенка которых представляла собой никелевую фольгу толщиной 20 мк. Энергия бомбардирующих частиц изменялась с помощью поглощающих фольг. Количество микроампер-часов при облучении определялось с помощью медных мониторинговых фольг по наведенной активности  $Zn^{65}$  [6].

Для определения активности  $Sr^{85}$  в облученных мишенях применялась следующая методика. К aliquотной части исходного раствора облученного материала мишени добавлялось известное количество носителя — стронция. Разделение стронция и рубидия проводилось осаждением карбоната стронция. В отфильтрованном карбонате стронция определялось количество стронция химическим методом (комплексометрическое титрование) и измерялась активность  $Sr^{85}$ . Точное знание химического выхода стронция позволило исключить ошибку в определении активности  $Sr^{85}$  в исходном растворе за счет возможных потерь при разделении.

Активность измерялась на однокристалльном сцинтилляционном  $\gamma$ -спектрометре по площади фотопика  $E_{\gamma} = 514$  кэв. Фотоэффективность кристаллов NaJ(Tl) определялась с помощью эталонных излучателей.

Общая погрешность в определении значений выхода  $Sr^{85}$  составляла  $\pm 12\%$ .

Из рис. 1 видно, что выход  $Sr^{85}$  при облучении рубидия протонами выше, чем при облучении дейтронами.

### Мишени для производства $Sr^{85}$

При производстве  $Sr^{85}$  наиболее подходящими для облучения материалами являются металлический рубидий и хлористый рубидий. Другие химические соединения рубидия менее эффективны как по выходу  $Sr^{85}$ , так и по технологическим свойствам.

В Институте ядерных исследований АН СССР  $Sr^{85}$  производится путем облучения хлористого рубидия, а в Физико-энергетическом институте ГК ИАЭ СССР получение  $Sr^{85}$  основано на облучении металлического рубидия.

Мишень для металлического рубидия (рис. 2, а) представляет собой кассету, которая состоит из никелевого корпуса 1, имеющего полость, заполненную рубидием 2. Защитная фольга 3 из никеля толщиной 50 мк приваривается к корпусу кассеты методом диффузионной сварки в вакууме. Мишень заполняется рубидием в инертной среде (гелий или аргон) при температуре  $60^{\circ}C$  через специальные каналы, которые затем герметизируются с помощью резбовых пробок 4. Облучаемая поверхность мишени (на рисунке она заштрихована) составляет около  $6\text{ см}^2$  (размер  $1 \times 60\text{ см}$ ). Охлаждение осуществляется проточной водой, омывающей внутреннюю оребренную поверхность кассеты.

Кассеты с металлическим рубидием облучаются с помощью головки циклотронной мишени для отклоненного пучка [7]. После облучения мишень выводится из камеры циклотрона, кассета автоматически снимается и транспортируется в радиохимическую лабораторию на переработку. Управление механизмами движения мишени и съема облученной кассеты осуществляется дистанционно.

Мишени с металлическим рубидием выдерживают длительные облучения (несколько десятков часов) мощностью до  $1\text{ квт}$ , что при энергии дейтронов  $21\text{ Мэв}$  соответствует току  $\sim 50\text{ мкА}$ .

Мишень из хлористого рубидия, схематически изображенная на рис. 2, б, представляет собой круглую подложку из серебра или



меди 5, на внешнюю поверхность которой наплавляется хлористый рубидий 6. Для лучшего сцепления и увеличения контактной поверхности подложка мишени со стороны расплава имеет несколько концентрических пазов глубиной 0,3 мм. Наплавление RbCl на подложку производится в инертной среде (очищенный аргон) с предварительным обезгаживанием при температуре не более 100°С в вакууме ~10<sup>-4</sup> мм рт. ст. Охлаждение мишени после расплавления RbCl происходит с определенной скоростью, обеспечивающей получение мелкокристаллической структуры в наплавленном слое.

Хлористый рубидий облучается открыто (без защитной фольги) на внешнем пучке циклотрона дейтонами с энергией 12,5 Мэв. Облучаемая поверхность составляет 12 см<sup>2</sup> (круг диаметром ~4 см), причем около 80% тока приходится на 6 см<sup>2</sup>. Охлаждение осуществляется проточной водой, омывающей заднюю поверхность мишени.

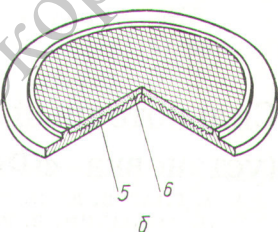
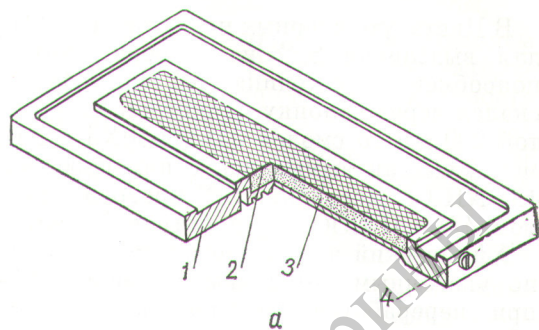
Наилучший режим облучения достигается при токе 30 мка (мощность ~400 вт) и времени облучения 12 ч. В этом случае потери активности вследствие испарения при облучении не превышают 2%.

При использовании в качестве облучаемого материала хлористого рубидия выход Sr<sup>85</sup> снижается по сравнению с металлическим рубидием за счет присутствия атомов хлора. Измеренные авторами выходы Sr<sup>85</sup> при облучении хлористого рубидия оказались равными 65% от выходов для металлического рубидия, что соответствует расчетному значению снижения выхода. Измерения проводились на дейтонах при 12,5 и 21 Мэв и на протонах при 22 Мэв (см. таблицу).

Из сравнения описанных выше двух типов мишеней очевидно, что мишени с металлическим рубидием обеспечивают большую производительность при получении Sr<sup>85</sup>, чем мишени с хлористым рубидием. Однако из-за специфических свойств металлического рубидия технология изготовления мишени и растворение рубидия после облучения оказываются более сложными по сравнению с мишенью из хлористого рубидия.

#### Выделение Sr<sup>85</sup> без носителя

Растворение металлического рубидия в этиловом и метиловом спирте на воздухе сопровождается воспламенением. Для предотвращения этого явления мишени с металлическим рубидием растворяются в боксе с инертной



Р и с. 2. Циклотронные мишени для получения Sr<sup>85</sup>:  
а — с металлическим рубидием; б — с хлористым рубидием.

атмосферой или на воздухе в изопропиловом спирте. Проведенные опыты показали, что наиболее удобно проводить растворение мишеней с металлическим рубидием в изопропиловом спирте. Применяемая методика заключалась в следующем.

Мишень помещалась в ванночку и заливалась охлажденным в ледяной бане изопропиловым спиртом. Защитная никелевая фольга надрезалась. По мере замедления реакции растворения металлического рубидия в спирте, что можно наблюдать по прекращению выделения пузырьков водорода, делался новый надрез и так до полного растворения металла. Полученный раствор алкоголята рубидия сливался в стакан. Кассета, фольга и ванночка обмывались 50—70 мл 0,1 н. HNO<sub>3</sub> и промывные воды присоединялись к основному раствору. Объединенный раствор подкислялся концентрированной азотной кислотой до 0,1 н. по HNO<sub>3</sub> и упаривался на водяной бане (для удаления изопропилового спирта) до объема ~40—50 мл.

Мишени, изготовленные из хлористого рубидия, растворялись в горячей воде (t° ≈ 70 ÷ ÷ 80°С) в объеме около 100 мл.

Выделение радиоактивного изотопа Sr<sup>85</sup> в Физико-энергетическом институте проводилось с помощью методов, основанных на соосаждении с изоморфным носителем Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> [3], либо на гидроксиде железа, при осаждении последней карбонатом аммония из органико-водяных смесей [8].



В Институте ядерных исследований АН ЧССР для выделения  $Sr^{85}$  из мишени применялась ионообменная методика (раствор  $RbCl$  пропустился через колонку диаметром 15 мм и высотой 200 мм со смолой дауэкс-50X4 в  $NH_4$ -форме). Рубидий вымывался с помощью  $\sim 100$  мл 1M  $NH_4Cl$ . Десорбция  $Sr^{85}$  проводилась раствором 4M  $CH_3COONH_4$  в объеме 50 мл.

Химический выход изотопа  $Sr^{85}$  без носителя по указанным методикам составляет 90—95% при переработке производственных мишеней обоих типов.

Получила в Редакцию 2/IX 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Věst. CSAV, 69, 233 (1960).
2. Н. Н. Краснов и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 22 (1965).
3. J. Gruverman, P. Kruger. Intern. J. Appl. Rad. and Isotopes, 5, 21 (1969).
4. J. Martin et al. Nucleonics, 13, No. 3, 28 (1955).
5. Radioactive Materials Catalog and Price List, NSEC. Pittsburgh, 1965.
6. Н. Н. Краснов, П. П. Дмитриев. «Атомная энергия», 20, 57, 154 (1966).
7. Е. Н. Алексеев и др. «Бюллетень изобретений», № 12, 1967.
8. Ан. Н. Несмеянов, А. Б. Лапицкий, Н. П. Руденко. Получение радиоактивных изотопов. М., Госхимиздат, 1954.

## Сильноточный фазотрон ОИЯИ на 700 Мэв (установка «Ф»)

А. А. ГЛАЗОВ, Ю. Н. ДЕНИСОВ, В. П. ДЖЕЛЕПОВ, В. П. ДМИТРИЕВСКИЙ, Б. И. ЗАМОЛОДЧИКОВ,  
Н. Л. ЗАПЛАТИН, В. В. КОЛЬГА, М. М. КОМОЧКОВ, А. А. КРОПИН,  
Л. И. ЛАПИДУС, А. И. МУХИН, В. С. РОГАНОВ

УДК 621.384.633.4

В последнее время в физике высоких энергий и элементарных частиц особенно отчетливо выявилась необходимость получения более точных данных о всех основных типах взаимодействий обычных частиц: слабых, сильных и электромагнитных. Решение этой проблемы возможно только при существенном увеличении интенсивности действующих ускорителей.

В настоящей статье описывается эскизный проект реконструкции синхроциклотрона ОИЯИ в малую мезонную фабрику с энергией протонов 700 Мэв и средним током пучка до 50 мка (т. е.  $3 \cdot 10^{14}$  р/сек). Ожидается, что интенсивности мезонных пучков возрастут примерно в 50—100 раз, а выведенного протонного пучка — в 100—200 раз (благодаря применению высокоэффективного метода вывода). В этом проекте так же, как и в проекте релятивистского циклотрона [1, 2], предполагается использовать магнитное поле с пространственной вариацией, однако рост среднего значения напряженности поля с радиусом выбран меньшим, чем это требуется для изохронного движения. В связи с этим необходимость изменения частоты ускоряющего напряжения остается, но диапазон ее изменения меньше, чем в обычном синхроциклотроне.

Увеличение интенсивности пучка путем изменения пространственной вариации магнитного поля. Повышение интенсивности пучка путем увеличения амплитуды ускоряющего напряжения в обычном синхроциклотроне сопряжено со значительными техническими трудностями

при создании вариатора частоты. Лучшие конструкции вариаторов синхроциклотронов с энергией 600—700 Мэв не позволяют получить напряжение на дуанте выше 10—15 кэв.

Трудности, связанные с повышением ускоряющего напряжения в синхроциклотроне, могут быть смягчены, если уменьшить (для заданной энергии) диапазон изменения частоты путем применения растущего по радиусу магнитного поля с пространственной вариацией. Для такого модифицированного синхроциклотрона (в дальнейшем называемого фазотроном с вариацией магнитного поля) ожидаемое увеличение интенсивности по сравнению с обычным синхроциклотроном можно оценить, сравнив объем фазового пространства в этих случаях при одинаковой для центральной области аксиальной жесткости ( $Q_z$ ), высоте пучка ( $\Delta z$ ) и равновесной фазе ( $\varphi_s$ ) в предположении, что интенсивность ограничивается дефокусирующим действием объемного заряда пучка [2]:

$$\frac{i_{0\Phi}}{i_{0c}} = \left( \frac{V_{\Phi}}{V_c} \right)^{3/2} \left( \frac{K_{0c}}{K_{0\Phi}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $V$  — амплитуда ускоряющего напряжения на дуанте;  $K = 1 - \frac{n}{1+n} \cdot \frac{1}{\beta^2} \left( n = \frac{dH}{dr} \cdot \frac{r}{H} \right)$ ;  $H$  — напряженность магнитного поля;  $r$  — радиус ускорения);  $i_0$  — интенсивность в центральной области; индекс «Ф» относится к случаю фазотрона с вариацией магнитного поля; индекс «с» — к случаю обычного синхроциклотрона;