КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Основные ядерно-физические термины и определения.

Лекция 2. Общие физико-химические свойства радиоактивных соединений.

Лекция 3. Радиоактивность и закон радиоактивного распада.

Лекция 4. Основы ядерных реакций.

Лекция 5. Радиоактивное мечение химических соединений.

Лекция 6. Производство радионуклидов на циклотроне.

Лекция 7. Производство радионуклидов на реакторе.

Лекция 8. Применение медицинских генераторов радионуклидов.

Лекция 9. Контроль качества радиоактивных изотопов.

Лекция 10. Применение радиоактивных изотопов.

Лекция 11. Радиационная безопасность и обращение с радиоактивными материалами.

Лекция 4. Основы ядерных реакций.

Цель лекции: дать представление о механизмах и типах ядерных реакций и показать их значение в производстве радионуклидов для ядерной медицины.

Введение: Ядерные реакции лежат в основе большинства процессов, используемых при производстве радионуклидов для медицины, промышленности и научных исследований. Понимание механизмов ядерных взаимодействий, типов реакций и их закономерностей необходимо для выбора оптимальных условий получения нужного изотопа, а также для обеспечения безопасности и эффективности ядерных технологий. В медицинской физике ядерные реакции лежат в основе:

- производства радионуклидов для ПЭТ и ОФЭКТ-диагностики;
- создания терапевтических изотопов (например, ^{177}Lu, ^{131}I, ^{90}Y);
- контроля дозы и радиационной безопасности в ядерной медицине.

Понимание механизмов ядерных реакций позволяет медицинскому физику:

- выбирать оптимальный способ получения нужного изотопа;
- рассчитывать активность и время облучения мишени;
- оценивать изотопные примеси и радиационные потоки;
- обеспечивать качество и безопасность радиофармпрепаратов

Основная часть:

Ядерная реакция – это процесс, при котором атомное ядро взаимодействует с другим ядром или элементарной частицей, приводя к изменению состава, энергии или состояния исходного ядра.

$$a+A \rightarrow b+B$$

где a – налетающая частица (нейтрон, протон, α-частица, γ-квант и др.); A – исходное (мишенное) ядро; B – продукт реакции (новое ядро); b – вылетающая частица. Во время ядерной реакции происходит перераспределение энергии и импульса частиц, которое приводит к образованию других частиц, вылетающих из места взаимодействия.

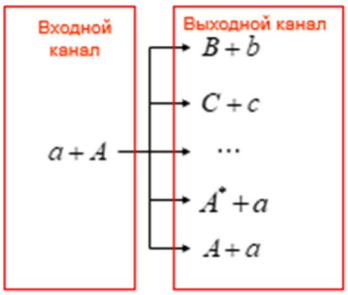
В 1914 году Марсден изучал прохождение альфа-частиц через емкость с водородом, которое приводило к «выбиванию» атомов этого газа во внешнее пространство. В этом не было ничего необычного, такой эффект и ожидался. Однако в следующей серии опытов альфа-частицы проходили уже не через водород, а через обычный воздух. Можно было ожидать, что во второй серии число таких вспышек резко упадет, поскольку содержание водорода в воздухе составляет малые доли процента. Поскольку этого не случилось,

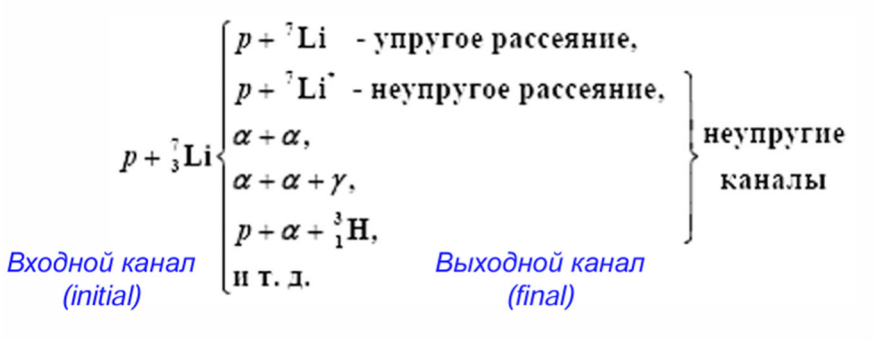
Марсден решил, что здесь работает какой-то новый механизм генерации частиц водорода – какой именно, он не знал. Он предположил, что какую-то роль в замеченной Марсденом аномалии могут играть атомы основного компонента воздуха, то есть азота. Придя к этой мысли, Резерфорд осуществил в своей манчестерской лаборатории простой, но очень эффективный эксперимент, который подтвердил его гипотезу. В итоге он пришел к заключению, что при прохождении альфа-частиц, испущенных так называемым веществом □aC (в современной терминологии, это был радиоактивный изотоп висмута) через емкость с азотом молекулы этого газа порождают, как это сформулировал Резерфорд, «*либо атомы водорода, либо другие атомы с массовым числом 2*». В то время подобный результат выглядел весьма парадоксально. Сейчас мы знаем, что великий физик осуществил ядерную реакцию превращения азота в кислород

$$\alpha + {}^{14}N \rightarrow {}^{17}O + p$$

.

Как правило, ядерная реакция может идти несколькими конкурирующими путями:





Ядерными реакциями управляют законы сохранения, и действует правило − все, что не запрещено, может произойти. Будем рассматривать реакции, происходящие при столкновении двух частиц.

1. Закон сохранения электрического заряда.

$$Z_a + Z_A = Z_b + Z_B$$

2. Закон сохранения числа барионов.

$$A_a + A_A = A_b + A_B$$

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов
${}_1H^2 + {}_1H^2 \to {}_2He^3 + n$	$1+1=2+0$	$2+2=3+1$
$p + {}_3Li^7 \to {}_4Be^7 + n$	$1+3=4+0$	$1+7=7+1$
$\gamma + {}_4Be^7 \to 2\,{}_2He^4 + n$	$0+4=2\cdot 2+0$	$0+9=2\cdot 4+1$
$\gamma + {}_1H^2 \to p + n$	$0+1=1+0$	$0+2=1+1$
$n + {}_{16}S^{32} \to {}_{15}P^{32} + p$	$0+16=15+1$	$1+32=32+1$
$\alpha + {}_7N^{14} \to {}_8O^{17} + p$	$2+7=8+1$	$4+14=17+1$

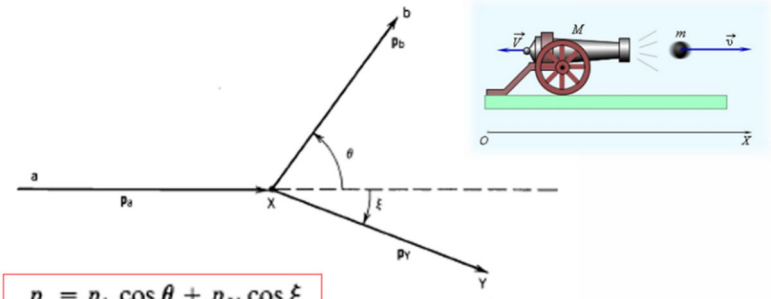
3. Закон сохранения энергии.

$$a + X \to Y + b \qquad X(a,b)Y$$

$$m_X c^2 + T_X + m_a c^2 + T_a = m_Y c^2 + T_Y + m_b c^2 + T_b$$

$$Q = T_{final} - T_{initial} = T_Y + T_b - T_X - T_a \quad \Leftrightarrow \quad Q = (m_{initial} - m_{final})c^2 = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2$$

4. Закон сохранения импульса.



$$p_a = p_b \cos\theta + p_Y \cos\xi$$
$$0 = p_b \sin\theta - p_Y \sin\xi$$

5. Закон сохранения лептонного заряда.

6. Закон сохранения полного момента количества движения.

$$\vec{J}_a + \vec{J}_A + \vec{l}_{aA} = \vec{J}_b + \vec{J}_B + \vec{l}_{bB}.$$

7. Закон сохранения четности в сильных взаимодействиях.

$$P_a P_A (-1)^{l_{Aa}} = P_B P_b (-1)^{l_{Bb}}$$

8. Закон сохранения изотопического спина.

$$\vec{I}_a + \vec{I}_A = \vec{I}_b + \vec{I}_B$$

9. Закон сохранения квантовых чисел.

10. Закон сохранения зарядового сопряжения (С-инвариантность).

Имеем ускоритель, который дает какое-то число частиц J – это поток частиц через $см^2$ поверхности мишени. Есть мишень, ускоритель, этот ускоритель дает поток частиц. В

зависимости от того, какое число частиц в кубическом см N: число вылетающих частиц будет тем больше, чем больше N. Одно дело, когда у вас газовая мишень, там мало частиц, другое дело, когда твердая. L – толщина мишени (чем толще мишень, тем больше частиц вылетает), площадь облучаемой мишени – потому что стоит j, поток через $см^2$ мишени. Если облучаю 1 $см^2$ мишени, то число частиц будет одно, если 2 $см^2$, то число частиц будет в 2 раза больше. Основная величина, которая характеризует, что происходит в ядре, это сечение реакции. Это вероятность процесса.

$$N = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \sigma$$

Обычно эксперимент делаем таким образом: имеется мишень, на нее налетает поток частиц, под каким-то углом устанавливаю детектор. Он перекрывает какой-то телесный угол, и частицы вылетают под этим телесным углом. Наряду с полным числом частиц, которое вылетает в результате ядерной реакции, мы видим дифференциальное сечение: частицы, которые вылетают внутри телесного угла под углом (θ,φ), и их видит детектор:

$$\frac{dN(\theta,\varphi)}{d\Omega} = j \cdot n \cdot l \cdot s \cdot \frac{d\sigma(\theta,\varphi)}{d\Omega}$$

Прямые ядерные процессы можно назвать срывом и захватом. Имеем дейтрон (протон и нейтрон) и ядро А:



Дейтрон подлетает к протону, в результате ядро А захватило нейтрон, образовалось составное ядро А и нейтрон, а протон полетел. Это называется реакция срыва. С дейтрона сорвали нейтрон и поместили сюда. Одновременно может быть такой процесс.



Основные типы ядерных реакций в медицине:

1. Реакции с нейтронами (в реакторе) – (n,γ) – захват нейтрона и образование радионуклида с испусканием γ-кванта. Пример: $^{59}Co(n,\gamma)^{60}Co$ – источник гамма-излучения в радиотерапии (аппараты «Кобальт-60»).

- (n, p), (n, α) – замещение частиц, получение лёгких изотопов (например, ^{14}C).

2. Реакции с заряженными частицами (на ускорителе):

Используются циклотроны в медицинских центрах.

- (p,n) – получение β^+-излучателей для ПЭТ: $^{18}O(p,n)^{18}F$.
- (d,n), (α,n) – получение β^--излучателей для терапии: $^{176}Yb(d,2n)^{176}Lu$.

3. Деление ядер – используется для получения продуктов деления (например, $^{99}Mo \rightarrow {}^{99m}Tc$). Этот изотоп лежит в основе более 80% всех радиофармпрепаратов в ядерной медицине.

Сечение ядерной реакции:

Сечение (σ) – вероятность того, что реакция произойдёт. Измеряется в барнах. 1 барн = 10^{-24} см². Для медицинского физика важно знать:

- σ зависит от энергии облучающей частицы,
- при слишком высокой энергии образуются ненужные радионуклиды (примеси),
- оптимум σ(E) определяет эффективность и чистоту синтезируемого изотопа.

Для $^{18}O(p,n)^{18}F$, например, максимум сечения – при энергии протонов 10-15 МэВ, поэтому большинство медицинских циклотронов работают именно в этом диапазоне.

Заключение:

Для медицинского физика знание основ ядерных реакций – это не абстрактная физика, а инструмент управления качеством и безопасностью в ядерной медицине.

Оно позволяет:

- выбирать оптимальные условия облучения мишеней,

- прогнозировать выход нужных изотопов,

- оценивать радиационные поля и защиту,

-участвовать в производственном цикле радиофармпрепаратов.

Контрольные вопросы:

1. Что называется ядерной реакцией?
2. Перечислите основные законы сохранения, выполняющиеся при ядерных реакциях.
3. Что такое сечение ядерной реакции и в каких единицах оно измеряется?
4. От каких факторов зависит величина сечения ядерной реакции?

5. Какие реакции используются для получения радионуклида ^{18}F, применяемого в ПЭТ-диагностике?

6. Какие радионуклиды получают при делении ядер урана или молибдена, используемые в медицине?

7. Почему важно учитывать энергию облучающих частиц при производстве медицинских изотопов?

Список использованных источников:

1. Gopal S. Fundamentals of Nuclear Pharmacy. – Springer International Publishing, 2018. – 428 p.

2. Борисенко А. Ядерная медицина. Том 1. – Алматы: ИЯФ, 2006. – 200 с.

3. Cherry S., Sorenson J., Phelps M. Physics in Nuclear Medicine. – Elsevier Inc., 2012. – 523 p.

4. Денисов Е. И. Производство радиоактивных изотопов для медицинского применения: учебное пособие. – Издательство Уральского университета, 2017. – 94 с.