КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

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

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Цель лекции: дать представление о сущности и классификации ядерных реакций, их энергетических характеристиках и вероятностных параметрах, а также о законах сохранения, лежащих в основе процессов ядерных превращений.

Введение: Рассмотрим физику процессов столкновений ядер, при которых происходят превращения ядер одних химических элементов в другие, а также рождение вышележащих структур материи – атомов. Общее название этих процессов – «ядерные реакции». Имеется в виду, что энергичная налетающая частица взаимодействует с каким-либо ядром-мишенью, в результате этого взаимодействия рождаются: новая вторичная частица (или частицы) и ядро-остаток. Классификация ядерных реакций может быть выполнена по нескольким параметрам, характеризующим их. Это энергия налетающих частиц, тип налетающих частиц, масса ядра-мишени, механизм ядерной реакции, механизм образования составной ядерной системы.

Классификация по энергии:

1. малые (низкие) энергии 1 ÷ 10 МэВ;
2. средние энергии 10 ÷ 200 МэВ;
3. высокие энергии >200 МэВ.

Классификация по типу налетающих частиц:

1. ядерные реакции, вызванные гамма-квантами;
2. ядерные реакции, вызванные электронами;
3. ядерные реакции, вызванные нейтронами;
4. ядерные реакции, вызванные заряженными частицами;
5. ядерные реакции, вызванные тяжелыми ионами.

Классификация по массе ядра-мишени:

1. легкие ядра с Z= 3 ÷ 20;
2. средние ядра с Z= 21 ÷ 40;
3. тяжелые ядра с Z= 41 ÷ 100;
4. сверхтяжелые ядра с Z> 101.

Классификация по механизмам ядерной реакции:

1. реакция упругого рассеяния;
2. реакция неупругого рассеяния;
3. ядерная реакция срыва;
4. ядерная реакция подхвата;
5. ядерная реакция деления;
6. ядерная реакция синтеза;
7. ядерная реакция с вылетом нуклонного кластера.

Классификация по механизмам образования составной ядерной системы:

1. ядерные реакции, идущие через стадию образования составного ядра;

2. предравновесные ядерные реакции;

3. прямые ядерные реакции.

Из классификации видно, что для создания общей теории ядерных реакций необходимо выполнить измерения *всех* характеристик ядерных реакций, во *всех* диапазонах энергии, для *всех* групп частиц и для *всех* ядер-мишеней. Понятно, что научные исследования должны вестись не только в направлении поиска новых характеристик ядерных реакций, но и в систематическом изучении уже имеющихся характеристик.

Основная часть:

В результате столкновений ядра с ядром или ядра с элементарной частицей происходят *ядерные реакции* (рис.1).

ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ – это превращение атомного ядра, вызванное его взаимодействием с элементарными частицами или другим ядром

$$a+A \rightarrow {}^*C \rightarrow b+B \text{ или кратко } A(a,b)B. \qquad (1)$$

Примеры:

- Ядерная реакция - это любой процесс, начинающийся столкновением двух или нескольких микрочастиц, простых (элементарных) или сложных ядер. Идет, как правило, с участием сильных (ядерных) взаимодействий с преобразованием сталкивающихся микрочастиц, рождением новых частиц: $p+{}^7Li_3 \rightarrow \rightarrow \alpha+\alpha$.
- В природе реализуются с подавляющей вероятностью столкновения двух микрочастиц. В общем виде процесс ядерной реакции между частицами a_1 и a_2 с образованием частиц b_1, b_2, b_3,… записывается в форме: $a_1+a_2 \rightarrow b_1+b_2+b_3+\ldots$: например, $\gamma+{}^{40}Ca_{20} \rightarrow {}^{38}K_{19}+p+n$.

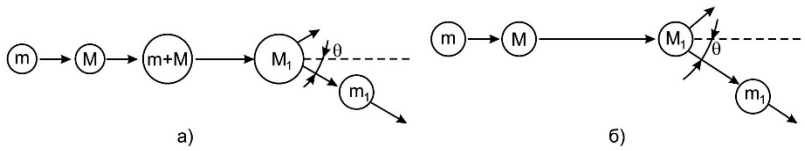

Рис.1. *Общая схема ядерной реакции: а) с образованием составного ядра; б) без стадии образования составного ядра*

Классификация, указанная выше, не случайна и вполне физически обоснована. Так, граница в 1 МэВ обосновывается тем, что при этой энергии де-бройлевская длина волны налетающего нуклона по порядку величины уже равна размеру ядер среднего атомного веса. При энергии 10 МэВ де-бройлевская длина волны налетающего нуклона по порядку величины равна его собственному размеру. Граница в 200 МэВ обосновывается тем, что при этой энергии, лежат пороги рождения мезонов на ядрах (внутриядерных нуклонах). В этом случае реакцию нельзя назвать ядерной, фактически - это реакции с элементарными частицами.

Ядерные реакции в природе идут непрерывно: в недрах звезд осуществляется синтез ядер; в недрах Земли идут реакции спонтанного деления и различные типы ядерных распадов; в недрах и атмосфере Земли, в веществе звезд и планет – ядерные реакции, вызываемые космическими лучами.

Закономерности ядерных реакций познаются с помощью естественных и искусственных радиоактивных источников, ускорителей и реакторов. В подавляющем числе физических экспериментов используются и пучки налетающих частиц и ядра-мишени, состоящие из стабильных ядер. Но для изучения экзотических процессов и аномальных ядер в последнее время используются и *радиоактивные пучки*.

Перейдем к описанию общих характеристик ядерных реакций.

ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ Q – это энергия Q, преобразующаяся в результате реакции и равная разности внутренних энергий конечной и исходной пар частиц в реакции.

Примеры:

- Энергия реакции $a+A \rightarrow B+b$ есть разность энергетических эквивалентов масс частиц во входном и выходном каналах реакции: $Q=(m_a+M_A-m_b-M_B)c^2 = (E_B+E_b)-(E_A+E_a)$, где E - внутренняя энергия частиц; c - скорость света; mc^2 и Mc^2 - энергетические эквиваленты масс покоя частиц. Это уравнение следует из закона сохранения энергии в ядерной реакции: $m_ac^2+ E_{a0}+ M_Ac^2 + E_{A0} = m_bc^2+ E_{b1}+ M_Bc^2+ E_{B1}$, где E_{a0}, E_{A0}, E_{b1}, E_{B1} – кинетические энергии.
- Энергия реакции равна разности полных энергий в выходном и входном каналах реакций и определяется разностью дефектов масс в этих каналах: $(E_B+E_b)-(E_A+E_a)=(\Delta m_a+\Delta M_A)-(\Delta m_b+\Delta M_B)$, где Δm и ΔM - дефекты масс в МэВ; mc^2 = A[аем]·931,481[МэВ/аем].

ЭНДОТЕРМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ – это реакция, идущая с поглощением энергии: $Q < 0$.

В нижеприведенной таблице 1 даны энергетические соотношения для некоторых ядерных реакций.

Таблица 1. **Энергии ядерных реакций.**

Реакция	Эквивалент масс входного канала $(m_a+M_A)c^2$, МэВ	Эквивалент масс выходного канала $(m_b+M_B)c^2$, МэВ	Энергия реакции Q $Q=(m_a+M_A-m_b-M_B)c^2=(\Delta m_a+\Delta M_A)-(\Delta m_b+\Delta M_B)$, МэВ
$p+{}^7Li_3 \rightarrow {}^7Be_4+n$	(1,008+7,016)·931,481 =7474,044	(7,017+1,009)·931,481 =7475,689	- 1,645
$\gamma+{}^9Be_4 \rightarrow \alpha+\alpha+n$; $\gamma+{}^9Be_4 \rightarrow {}^8Be_4+n$	(0+9,012)·931,481 =8394,677 (0+9,012)·931,481= 8394,677	(2·4,003+1,009)·931,481 =8396,250 (8,005+1,009) 931,481 =8396,342	- 1,573 - 1,665
$\gamma+{}^2H_1 \rightarrow p+n$	(0+2,014)·931,481 =1876,097	(1,008+1,009)·931,481 =1878,322	- 2,225
$n+{}^{32}S_{16} \rightarrow {}^{32}P_{15}+p$	(1,009+31,972)·931,481 =30720,93	(31,972+1,008)·931,481 =30721,858	- 0,928
$\alpha+{}^{14}N_7 \rightarrow {}^{17}O_8+p$	(4,003+14,003)·931,481 =16771,946	(16,999+1,008)·931,481 =16773,139	- 1,193

Дадим определение понятию *экзотермическая реакция*.

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ – это реакция, идущая с выделением энергии: $Q > 0$. Примеры экзотермических реакций приведены в таблице 2.

Таблица 2. – **Экзотермические реакции.**

Реакция	Эквивалент масс входного канала $(m_a+M_A)c^2$, МэВ	Эквивалент масс выходного канала $(m_b+M_B)c^2$, МэВ	Энергия реакции Q $Q=(m_a+M_A-m_b-M_B)c^2=(\Delta m_a+\Delta M_A)-(\Delta m_b+\Delta M_B)$, МэВ
${}^2H_1+{}^2H_1 \rightarrow {}^3He_2+n$	(2,014+2,014)·931,481 =3752,195	(3,016+1,009)·931,481=3749,927	+ 3,270
${}^2H_1+{}^3H_1 \rightarrow \alpha+n$	(2,014+3,016)·931,481 =4685,491	(4,003+1,009)·931,481 =4667,901	+ 17,590
$n+{}^{112}Sn_{50} \rightarrow {}^{56}Mn_{25}+{}^{57}Mn_{25}$	(1,009+111,505)·931,481 =105170,77	(55,939+56,938)·931,481 =105142,81	+ 33,960

РЕАКЦИЯ УПРУГОГО РАССЕЯНИЯ – это реакция, идущая с энергией Q = 0.

Примеры:

- В такой реакции сохраняется полная кинетическая энергия сталкивающихся частиц и полная масса и заряд частиц. Происходит только перераспределение кинетической энергии между частицами в лабораторной системе координат.
- При неупругом рассеянии возбудиться могут лишь отдельные квантовые уровни ядра-мишени с энергией E*. При этом энергия реакции в точности равна энергии уровня, взятой со знаком минус: Q = - E*.
- Одним из ярких примеров реакции упругого рассеяния является дифракционное рассеяние нейтронов и заряженных частиц. Этот тип рассеяния убедительно демонстрирует волновую природу процессов столкновения частиц в микромире.

ПОРОГ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ П – это минимальная кинетическая энергия сталкивающихся частиц, начиная с которой реакция становится энергетически возможной.

Примеры:

- **Порог П задается в лабораторной системе координат** и поэтому его величина всегда больше энергии эндотермической реакции П›Q за счет учета энергии движения центра инерции системы сталкивающихся частиц. Т.е. энергия относительного движения частиц будет не меньше значения |Q|. Пороговая энергия в этом случае определяется соотношением

$$E_{пор} = |Q|\cdot(1+m_a/M_A). \qquad (2)$$

Таким образом, **энергия реакции Q – это порог в системе центра масс**.

- Экзотермическая реакция происходит при сколь угодно малой относительной энергии сталкивающихся частиц и не обладает порогом.
- При упругом рассеянии порог строго равен нулю.

Ядерные реакции количественно описываются в рамках квантовой механики, т.е. статистически. Поэтому извлекаемые из экспериментов и расчетов параметры ядерных реакций носят вероятностный характер. В первую очередь, это – различные виды сечений ядерных реакций.

Единицей сечения является *1 барн = 10^{-24} см^2* [англ. barn – амбар; ироническое название ничтожно малой мишени].

СЕЧЕНИЕ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ – это величина, характеризующая вероятность осуществления ядерной реакции.

Примеры:

- Взаимодействие сталкивающихся частиц *a* и A имеет статистический характер вследствие того, что при одних и тех же начальных условиях во входном канале ядерная реакция проходит различными способами. При этом образуются различные конечные состояния в выходных каналах

$$a+A \rightarrow [a+A;\ a+A^*;\ b+B;\ c+C,\ \ldots]. \qquad (3)$$

- Осуществление заданной реакции $a+A\rightarrow b+B$ имеет определенную вероятность W_{ab}, характеризуемую отношением числа N_b событий появления состояний (B+b) к полному числу

частиц N_a, испытавших столкновения в канале (a+A). Эта вероятность в пространственном объеме их взаимодействия с площадью поперечного сечения S_a равна

$$W_{ab} = N_b/ N_a=I_b/I_a=J_b/J_aS_a, \quad (4)$$

где $J_b=N_b/t$ - интенсивность появления событий (B+b), $J_a=N_a/tS$ - поток частиц a, проходящих через область взаимодействия, в которой находятся частицы A.

- Величина

$$\sigma_{ab}=W_{ab}S_a \quad (5)$$

определяет площадь поперечного эффективного сечения области взаимодействия частиц, которая ответственна за достоверное осуществление данного вида реакции a+A→b+B. Это поперечное сечение является частью поперечного сечения S_a полного объема области взаимодействий и характеризует область взаимодействия частиц a и A с образованием только конечных состояний (B+b) в выходном канале реакции: $\sigma_{ab}= I_b/J_a$ - эффективное поперечное сечение реакции a+A → b+B; $W_{ab}= \sigma_{ab}/S_a$ - вероятность осуществления этой реакции.

ВЫХОД РЕАКЦИИ W – это доля ΔN налетающих на мишень частиц от пучка N, вызвавших данную реакцию на ядрах мишени

$$W= \Delta N/N. \quad (6)$$

Примеры:

- Выход реакции измеряется обычно без выделения числа событий, идущих с возбуждением определенного квантового уровня конечного ядра.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССАХ – это требования равенства во входном и выходных каналах ядерных процессов следующих ядерных параметров: сохранение электрического заряда, барионного и лептонного чисел, момента количества движения, изотопического спина и четности.

1. Закон сохранения импульса;
2. Закон сохранение энергии;
3. Закон сохранения электрического заряда
4. Закон сохранения числа барионов.
5. Закон сохранения лептонного заряда.
6. Закон сохранения полного момента количества движения.
7. Закон сохранения четности в сильных взаимодействиях.
8. Закон сохранения изотопического спина.
9. Закон сохранения квантовых чисел.
10. Закон сохранения зарядового сопряжения (С-инвариантность).

Заключение:

Ядерные реакции являются фундаментальными процессами, лежащими в основе преобразований вещества и источниками ядерной энергии во Вселенной. Они позволяют понять строение и свойства атомных ядер, механизмы их взаимодействий и превращений. Классификация ядерных реакций по типу частиц, энергии, массе мишени и механизму протекания помогает систематизировать разнообразие наблюдаемых процессов. Энергетические и вероятностные характеристики, такие как энергия реакции, порог и сечение, дают количественное описание этих явлений. Изучение ядерных реакций имеет не только теоретическое значение, но и большое практическое применение – в энергетике, медицине, астрофизике и ядерных технологиях.

Контрольные вопросы:

1) Что называется ядерной реакцией?
2) Классификация ядерных реакций. Приведите примеры.
3) В чем различие между упругим и неупругим рассеянием?
4) Что такое энергия ядерной реакции Q и как она определяется?
5) Что называется порогом ядерной реакции и как он рассчитывается?
6) Каково физическая сущность сечения ядерной реакции?
7) Какие основные законы сохранения выполняются в ядерных реакциях?

Список использованных источников:

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 384 с.
3. Гурачевский В.Л. Радиационный контроль: физические основы и приборная база: метод. пособие. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Минск : Институт радиологии, 2014. – 160 с.
4. Ишханов Б.С., Кэбин Э.И. Ядерные реакции. – М.: Университетская книга МГУ, 2014 г. – http://nuclphys.sinp.msu.ru/react/index.html
5. Касьяненко А. А. Радиоэкологическая экспертиза и радиационные измерения . – Москва: Российский университет дружбы народов, 2016. – 252 с.