

Лекция №5

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

**Механические, магнитные и
электрические моменты ядер**

Статические свойства атомных ядер

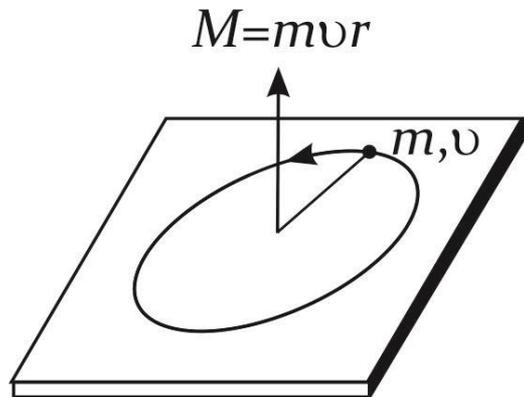
Основные статические свойства ядер

Орбитальный момент количества движения:

Вращательное движение частицы принято характеризовать **моментом количества движения**.

В классической механике он определяется как $\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{p}]$

В простом случае, когда частица движется по окружности радиуса r с постоянной скоростью v , численное значение **момента количества движения** равно $M = mvr$. Эта величина может принимать любые значения.



В микромире относительное движение взаимодействующих частиц характеризуется **моментом количества движения (механическим моментом)**, который **квантуется**. Он может принимать только определенные дискретные значения пропорциональные постоянной Планка.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Орбитальный момент количества движения:

Вектор механического момента условно принято выражать безразмерным числом l (орбитальное квантовое число). В квантовой механике вектор момент обладает своеобразными особенностями:

Во-первых мгновенное значение вектора-момента не имеет смысла. Имеют определенные значения только квадрат модуля и одна из проекций вектора (обычно на ось z) l_z .

Во-вторых квадрат модуля вектора-момента равен $|\vec{M}|^2 = l(l+1)\hbar^2$, в отличие от классического $l^2\hbar^2$.

В-третьих проекция вектора-момента может принимать либо только целочисленные $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ при l целом, либо только полуцелые $\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \dots$ при l полуцелом значения в единицах \hbar .
Здесь знак означает ориентацию вектора-момента.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Орбитальный момент количества движения:

Максимальная по абсолютному значению проекция вектора

$$M_{z \max} = l \cdot \hbar$$

Орбитальное квантовое число показывает сколько единиц \hbar содержит максимальная проекция вектора момента. Это число обычно и принимается за значение момента.

Величина максимальной проекции всегда меньше величины самого момента, из чего следует, что вектор механического момента никогда не ориентирован точно вдоль выбранного направления.

Только при $l \gg 1$ величина проекции стремится к значению момента а свойства микрочастицы приближаются к классическим.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

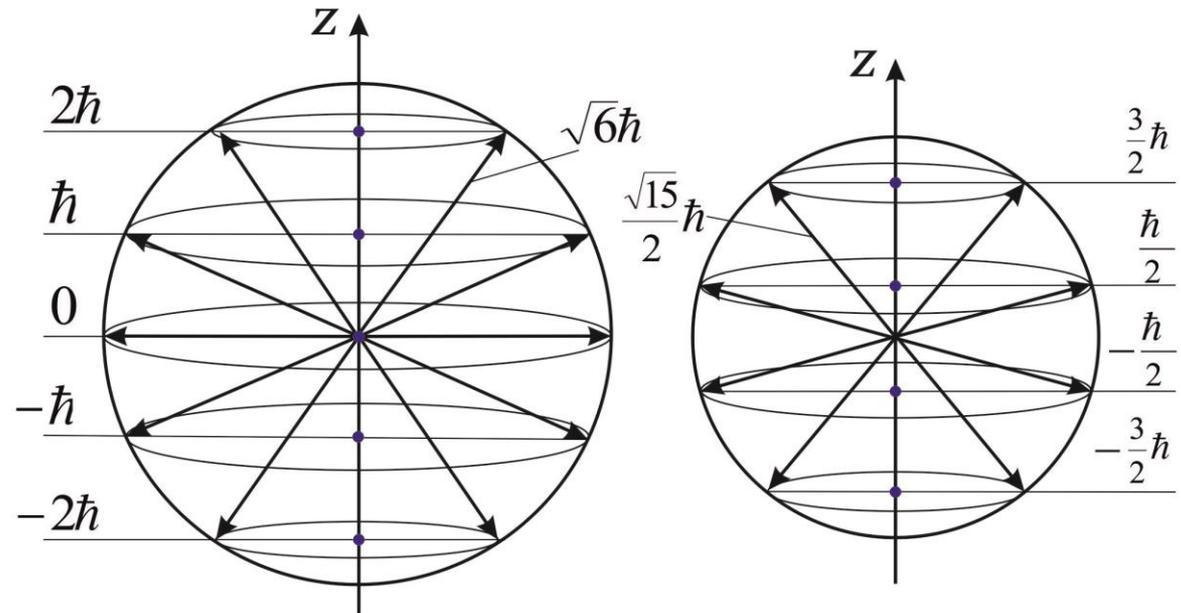
Модель вектора-момента количества движения:

Вектор-момент представляется в виде прецессирующего вокруг оси z обычного вектора, модуль которого равен $\sqrt{l(l+1)}\hbar$ и который ориентируется по или против оси z , так что его проекция равна одному из значений, от $+l\hbar$ до $-l\hbar$.

Полное число
возможных проекций
механического
момента равно

$$(2l + 1)$$

Реализация одной из
возможных проекций
равновероятна



Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Собственный механический момент:

Кроме орбитального момента количества движения большинство микрочастиц обладают собственным моментом количества движения, абсолютная величина которого равна

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s(s+1)}$$

Квантовое число s называют спином частицы.

Спин столь же фундаментальная характеристика как масса и заряд. Наличие спина можно связать с вращением частицы вокруг собственной оси. В отличие от классического «волчка» частицу нельзя удержать от вращения и нельзя его ускорить. **Спин** – неотъемлемое свойство частицы.

Спин может принимать как целые так и полуцелые значения, и обладает такими же квантово-механическими свойствами как и орбитальный механический момент.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Собственный механический момент:

Со спином связаны статические свойства коллектива частиц данного типа – «статистика». Существует два вида статистики:

*Все частицы с полуцелым спином подчиняются статистике **Ферми-Дирака** и называются **фермионами**;*

*Статистике **Бозе-Эйнштейна** подчиняются частицы с целым спином, которые называются **бозонами**;*

Статистикой определяются ограничения на вид возможных коллективных состояний.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Статистика:

В коллективе частиц **фермионов**, выполняется принцип Паули, согласно которому в каждом отдельном квантовом состоянии в связанном ансамбле частиц не может находиться более одной частицы.

Принцип Паули констатирует например, что в атоме не может быть одновременно двух электронов с одинаковым набором квантовых чисел.

Для **бозонов** принцип Паули не выполняется. Вид возможных коллективных состояний ограничивается тем, что совокупная волновая функция системы частиц не должна меняться при перестановке двух частиц между двумя индивидуальными состояниями. В некотором квантовом состоянии может находиться неограниченное число частиц.

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Полный момент количества движения:

Полный момент количества движения частицы состоит из орбитального и спинового моментов, которые суммируются по правилу сложения квантовых векторов.

Например, для протона, спин которого равен s , полный момент может быть равен либо сумме $I = l + s$ или разности $I = l - s$ в зависимости от взаимной ориентации моментов.

Этот результат является следствием квантово-механических свойств спина, в силу которых его проекция на направление орбитального момента может принимать значения

$$\pm \frac{1}{2} \hbar$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Магнитный момент частицы:

Согласно классической электродинамике заряженная частица имеющая механический момент количества движения должна обладать **МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ**.

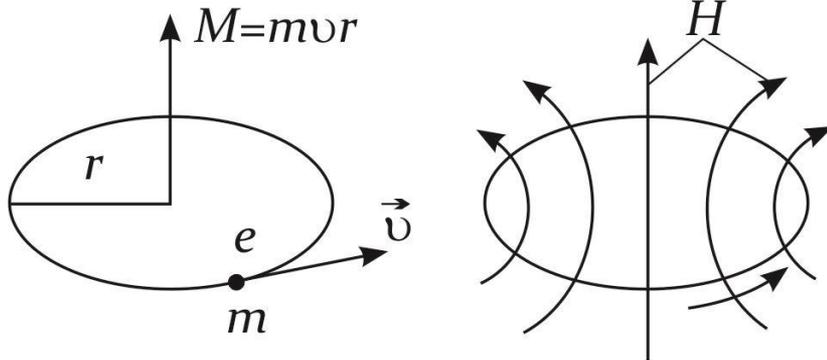
Движение частицы эквивалентно наличию элементарного тока $I = e \cdot \nu$

где ν - частота вращения.

Магнитный момент создаваемый контуром с током в СГСЕ определяется выражением

$$\mu = \frac{I \cdot S_n}{c}$$

где S_n - проекция площади контура тока на нормаль к этому контуру.



Возникновение магнитного момента при движении заряженной частицы по окружности

Статические свойства атомных ядер

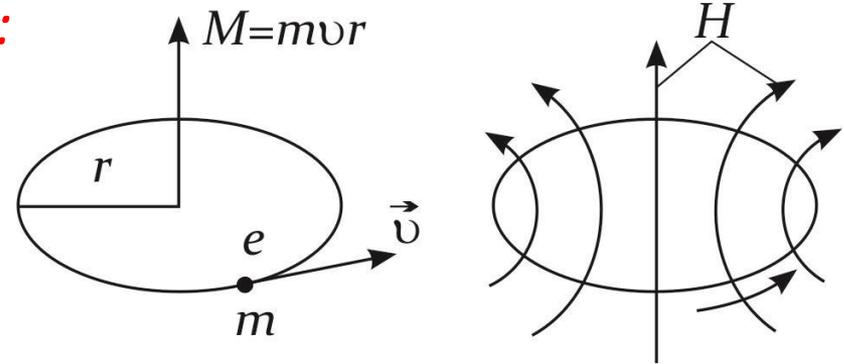
Основные статические свойства ядер

Магнитный момент частицы:

Можно записать: $\mu = \frac{I \cdot \pi \cdot r^2}{c}$,
где r - радиус орбиты.

Умножив и поделив правую часть на 2 массы частицы, получим

$$\mu = \frac{e \cdot v \cdot 2m \cdot \pi \cdot r^2}{2m \cdot c}.$$



Возникновение магнитного момента при движении заряженной частицы по окружности

Так как $v = 2\pi r \nu$, то величина $2m\pi r^2 \nu$ - механический момент M .
Следовательно, магнитный момент частицы всегда пропорционален её механическому моменту:

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2mc} \vec{M}$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Магнитный момент частицы:

Значение модуля вектора магнитного момента обусловленного орбитальным движением частицы, должно быть равно

$$|\vec{\mu}| = \frac{e\hbar}{2mc} \sqrt{l(l+1)}$$

Проекция магнитного момента возникающего за счет орбитального движения всегда антипараллельна орбитальному моменту и численно равна:

$$\mu_l = l \cdot \frac{e\hbar}{2mc}$$

Для протонов: $\frac{e\hbar}{2m_p c} = \mu_{\text{я}} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$

$$\mu_l = l \cdot \mu_{\text{я}}$$

Для электронов: $\frac{e\hbar}{2m_e c} = \mu_{\text{в}} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$

$$\mu_l = l \cdot \mu_{\text{в}}$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Магнитный момент частицы:

Помимо орбитального момента частицы обладают также спином. Поэтому должен появляться магнитный момент связанный с этим механическим моментом μ_s .

Спиновый магнитный момент в два раза больше величины полученной из классических представлений.
$$\vec{\mu}_s = \frac{e\hbar}{mc} \vec{S}$$
 Этот факт объясняется релятивистской квантовой теорией.

Полный магнитный момент частицы равен векторной сумме моментов возникающих за счет орбитального и спинового движений.

$$\vec{\mu}_j = \vec{\mu}_l + \vec{\mu}_s$$

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Спин ядра:

Полный механический момент сложной частицы, складывается из моментов входящих в него частиц, которые обладают собственными и орбитальными моментами. Суммирование моментов производится по правилам векторного сложения.

Известно что спины ядер имеют порядок единиц \hbar .

Это говорит о том, что у большинства пар нуклонов полные механические моменты ориентированы в противоположных направлениях.

В зависимости от четности числа нуклонов суммарный механический момент будет либо целым либо полуцелым.

*Полный момент количества движения называют **спином** ядра, это внутренний момент количества движения ядра рассматриваемого как одна частица.*

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Магнитный момент ядра:

Магнитные моменты ядер обусловлены спиновыми магнитными моментами нуклонов и орбитальными магнитными моментами протонов.

Благодаря магнитному взаимодействию между спиновыми и орбитальными магнитными моментами, результирующий вектор магнитного момента прецессирует относительно спина.

Магнитные моменты ядер имеют значения порядка ядерного магнетона. Для ядер с нулевым спином магнитный момент также равен нулю.

Таким образом четно-четные ядра в основном состоянии имеющие нулевое значение спина, имеют и нулевые магнитные моменты.

Статические свойства атомных ядер

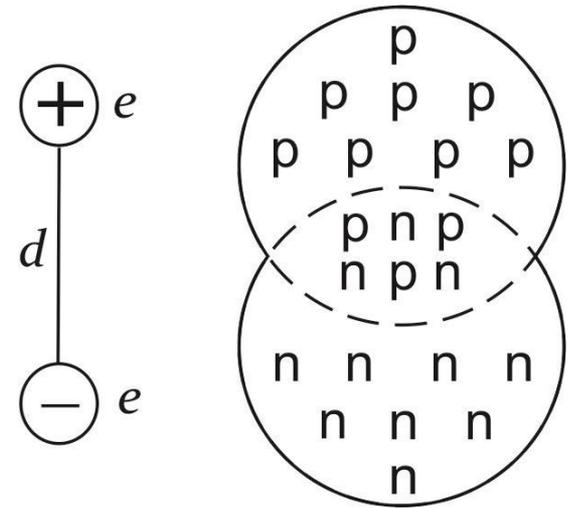
Основные статические свойства ядер

Электрические моменты ядер:

Кроме магнитных моментов атомные ядра обладают еще и электрическими моментами, которые зависят от распределения заряда в ядре.

Если центр тяжести системы не совпадает с центром заряда, то в электрическом поле такая система может обладать свойствами диполя и ориентироваться по направлению поля.

Опыт показывает что у ядер отсутствует дипольный момент, что свидетельствует о том что нейтроны и протоны в ядре «перемешаны» достаточно равномерно.



Возникновение электрического дипольного момента

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

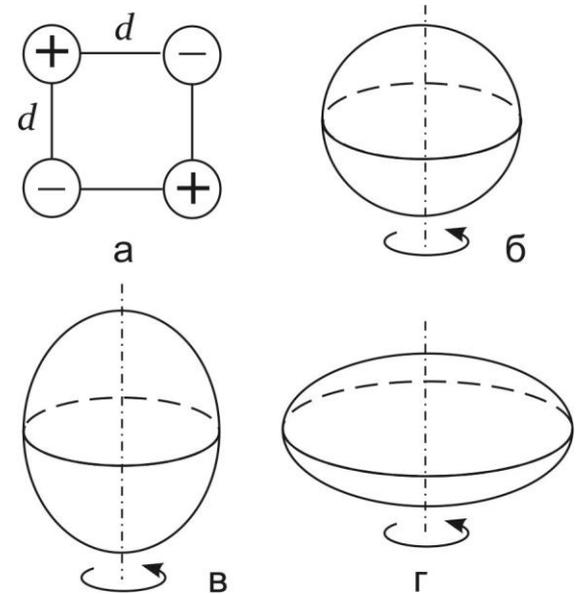
Электрические моменты ядер:

Многие ядра имеют так называемый **квадрупольный электрический момент**. Он возникает вследствие нарушения сферической симметрии зарядов.

При сферической симметрии зарядов (**б**), квадрупольный момент равен нулю.

Положительный знак означает что распределение зарядов вытянуто вдоль спина (**в**). Отрицательный знак момента – распределение сплющено в направлении спина (**г**).

Отклонения от сферичности в распределении зарядов не превышают 10%.



Возникновение квадрупольного электрического момента

Статические свойства атомных ядер

Основные статические свойства ядер

Изотопический спин:

Ядерные силы обладают свойством зарядовой независимости