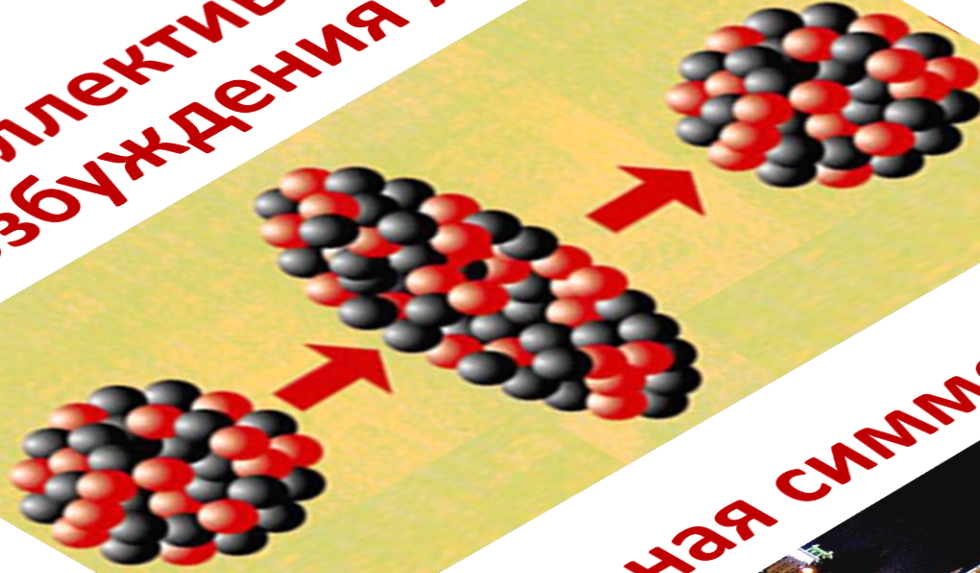


**Коллективные  
возбуждения ядер**



**Зеркальная симметрия**

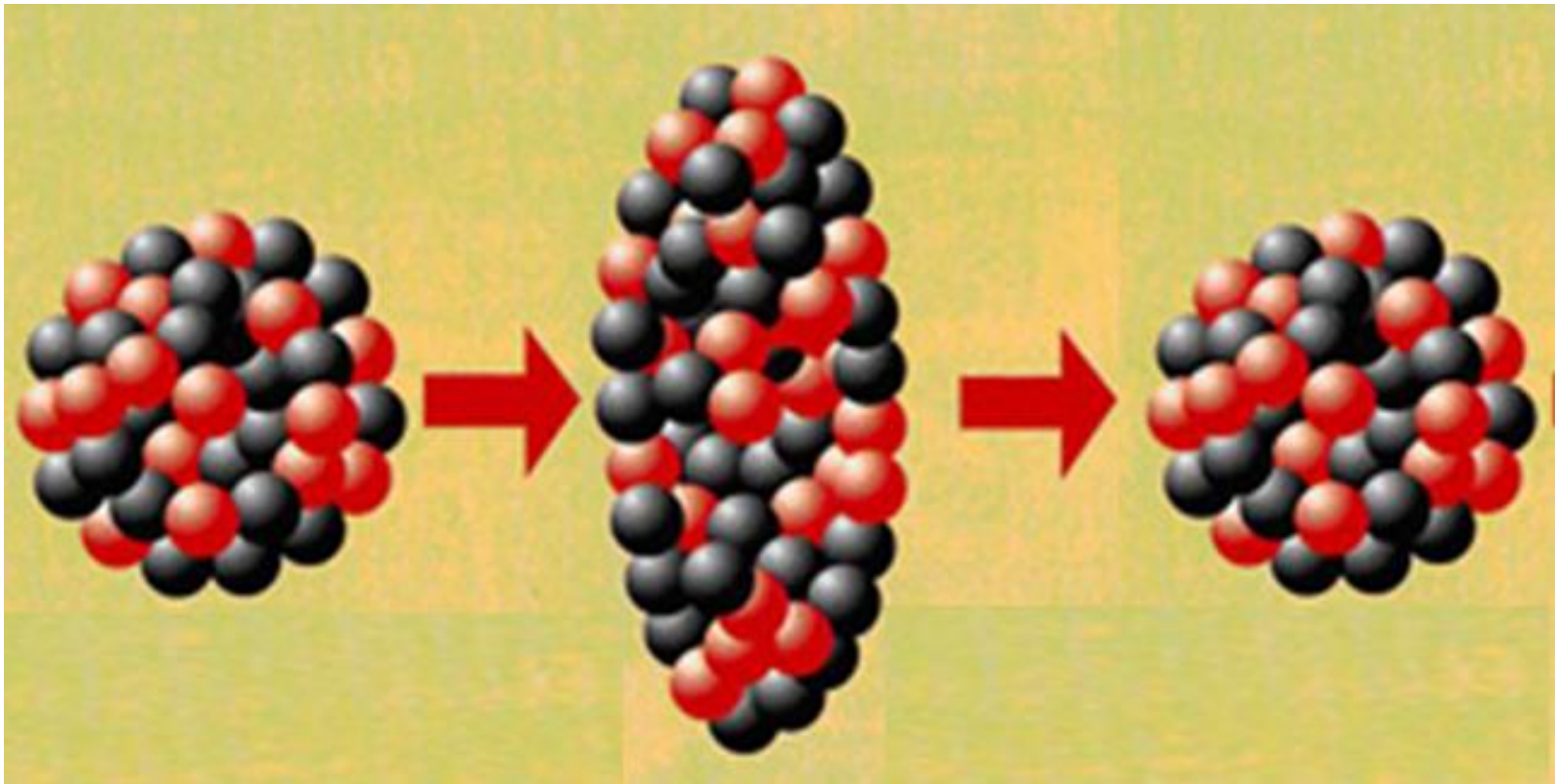


# Темы лекции

1. Недостаточность модели оболочек для объяснения спектра возбуждений ядра.
2. Типы коллективных возбуждений ядер. Аналогия с молекулой.
3. Вращательные возбуждения несферических ядер. Спектр этих возбуждений у чётно-чётных ядер. Как вращается ядро.
4. Колебательные (вибрационные) уровни ядер. Аналогия с каплей жидкости.
5. Типы электрических и магнитных колебаний низшей мультипольности в ядрах.
6. Спектр электрических квадрупольных колебаний чётно-чётных ядер.
7. Комбинация индивидуальных и коллективных движений частиц в атомном ядре.
8. Поляризационные колебания в атомных ядрах. Гигантский ( $E1$ ) резонанс. Ножничные колебания.
9. Зеркальная симметрия. Её нарушение в слабых взаимодействиях. Опыт  $\nu\mu$ .
10. Поляризация частиц. Спиральность. Спиральность фотонов, нейтрино и других релятивистских лептонов.

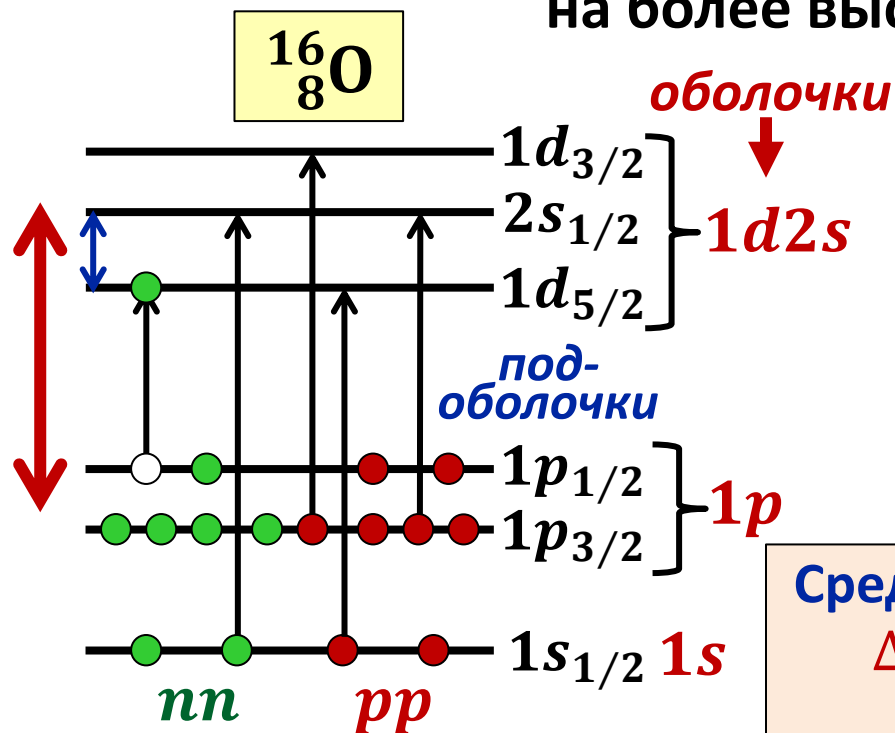
# Коллективные возбуждения атомных ядер

В коллективных ядерных возбуждениях  
большие группы нуклонов совершают  
согласованное (скоррелированное) движение



# Недостаточность модели оболочек для объяснения спектра ядерных возбуждений

Возбуждённые состояния ядер в модели оболочек возникают при переходе одного, двух или нескольких нуклонов на более высокие свободные подоболочки.



Энергии таких возбуждений – мегаэлектронвольты.

Опыт показывает, что у ядер есть множество возбуждений с существенно меньшими энергиями, которые нельзя объяснить в рамках модели оболочек.

Среднее расстояние между оболочками

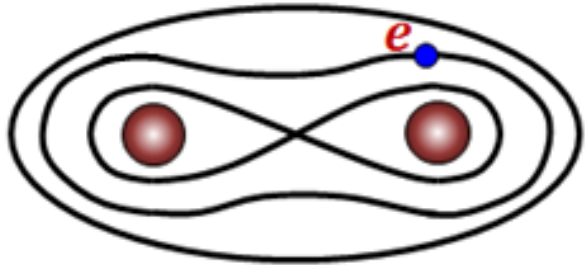
$$\Delta E_{\text{оболочек}} = \hbar\omega \approx 41 \cdot A^{-1/3} \text{ МэВ,}$$

т.е.  $\approx 15 \text{ МэВ}$  для  $^{16}_8\text{O}$   
и  $\approx 7 \text{ МэВ}$  для  $^{208}_{82}\text{Pb}$ .

У тяжёлых ядер расстояние между подоболочками  $\approx 1 \text{ МэВ}$ .

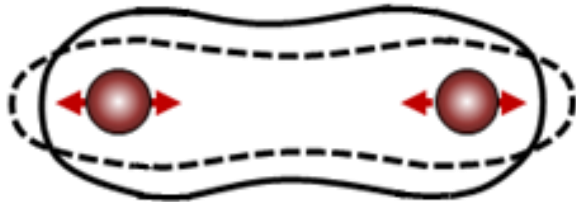
Анимация на Лекции

Для объяснения многообразия ядерных возбуждений удобно использовать аналогию с молекулярной спектроскопией (двухатомная молекула):



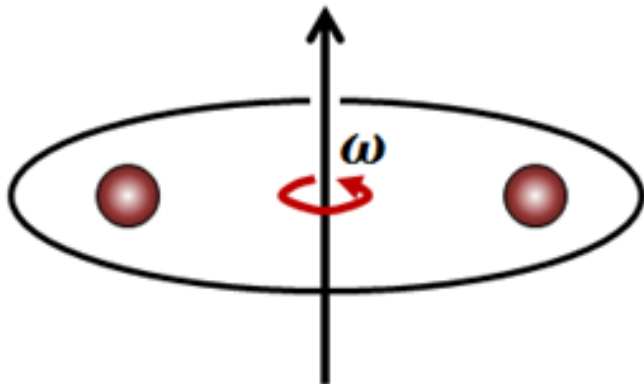
Электронные  
состояния  
(орбитали)

$$\Delta E_e \approx 1 \text{ эВ}$$



Колебательные  
состояния  
(vibrations)

$$\Delta E_{\text{кол}} \approx 0,1 \text{ эВ}$$



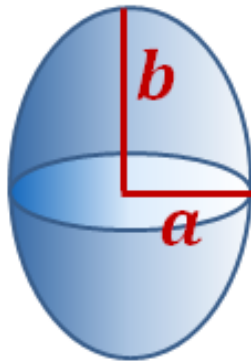
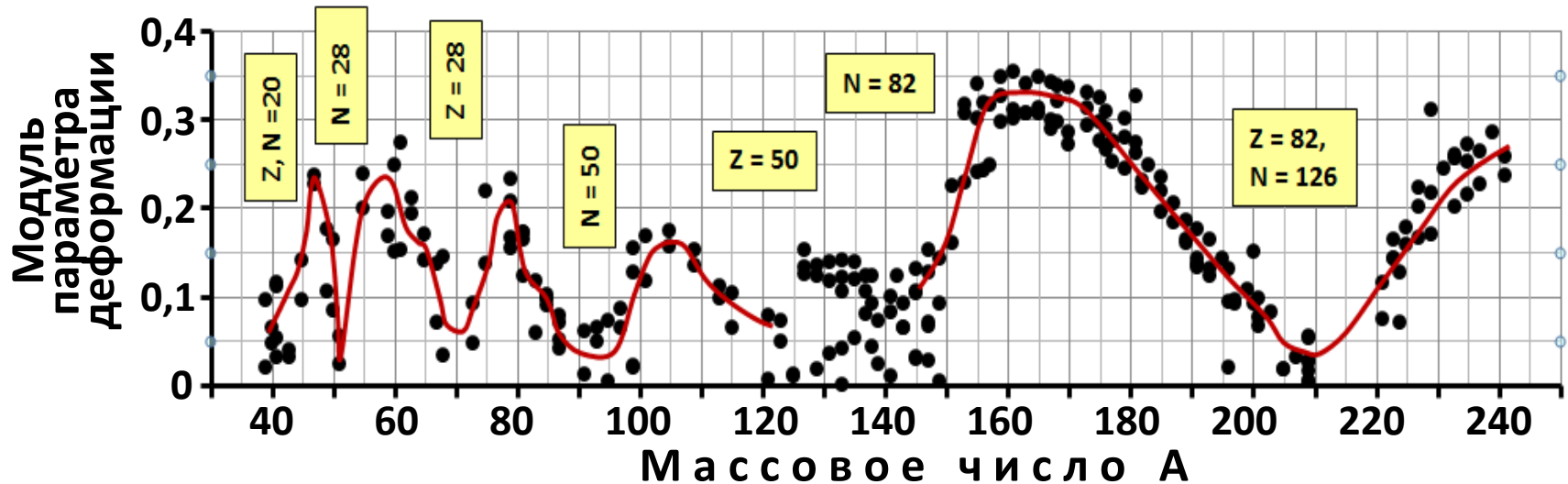
Вращательные  
состояния  
(rotations)

$$\Delta E_{\text{вращ}} \approx 10^{-3} \text{ эВ}$$

**В молекулах (и атомных ядрах!) возникают три накладывающиеся ветви возбуждений, из которых одна одночастичная (оболочечная) и две коллективных (вибрации и вращения). Энергии коллективных возбуждений могут быть существенно меньше энергии одночастичных.**

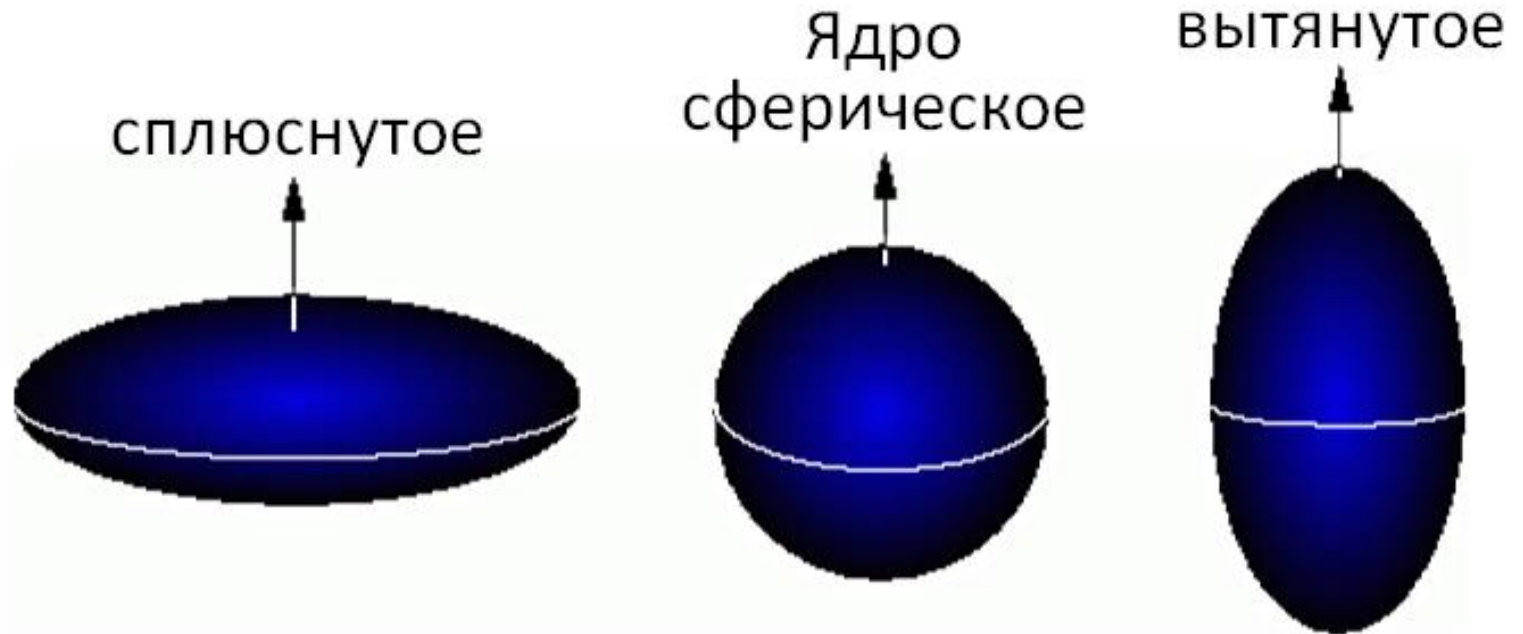
# Данные о степени несферичности (деформируемости) ядер

Модули параметров деформации ядер с  $A = 39 \div 241$



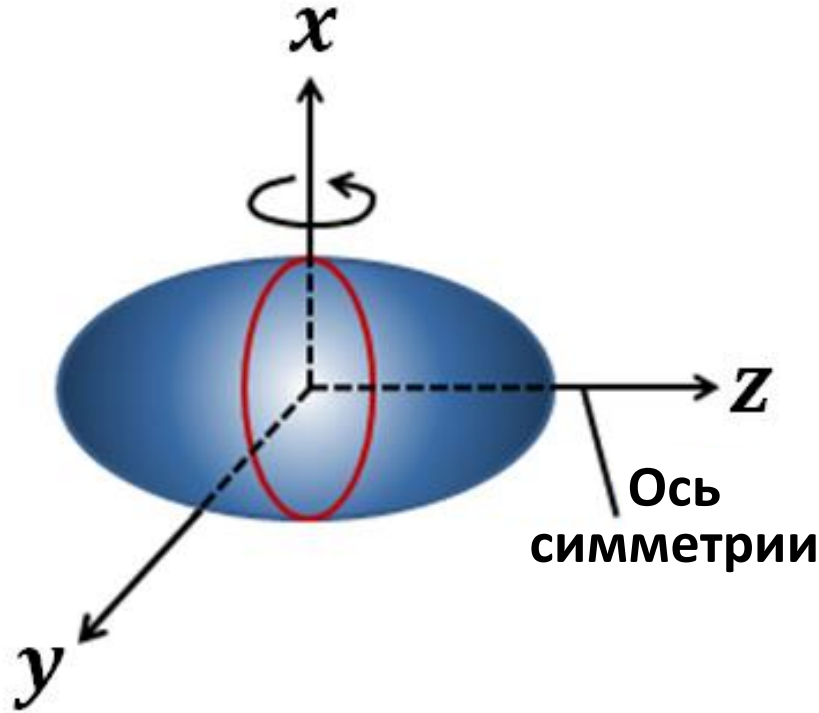
Параметр деформации  $\beta = \frac{b-a}{\bar{R}}$ ,  
где  $\bar{R} = \frac{1}{2}(b+a)$ .

# Типичные формы ядер





# Вращательные уровни чётно-чётных несферических ядер:



Классическая энергия вращения:

$$E_{\text{вр}} = \frac{G\omega^2}{2} = \frac{L^2}{2G},$$

где  $G$  – момент инерции,  $L$  – орбитальный момент. В основном состоянии (ground state) чётно-чётного ядра (т.е. при отсутствии вращения)  $J_{gs}^P = 0^+$ .

Если ядро вращается, его спин целиком обусловлен этим вращением и  $J = L$ . В квантовой механике  $J^2 = \hbar^2 J(J + 1)$  и получаем:

$$E_{\text{вр}} = \frac{\hbar^2 J(J + 1)}{2G}$$

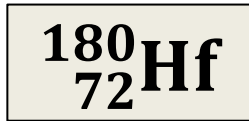
**Квантовая механика запрещает вращение ядра вокруг оси симметрии, в том числе сферического ядра вокруг любой оси, проходящей через его центр**

**В сферически симметричном ядре ядерный потенциал, действующий на нуклоны, при повороте вокруг любой оси, проходящей через его центр, не меняется и, следовательно, не возникает сил, заставляющих нуклоны такого ядра согласованно участвовать во вращательном движении. Аналогично этому не имеет смысла говорить о вращении деформированного ядра, имеющего форму аксиально-симметричного эллипсоида, вокруг оси симметрии  $Z$ .**

**Возможно лишь вращение вокруг осей перпендикулярных оси симметрии**

# Вращательные уровни

$J^P$   $E, \text{ МэВ}$   
 $8^+ \text{ ————— } 1,085 \text{ (1,120)}$



$6^+ \text{ ————— } 0,642 \text{ (0,653)}$

$4^+ \text{ ————— } 0,309 \text{ (0,311)}$

$2^+ \text{ ————— } 0,093$   
 $0^+ \text{ ————— } 0$

$$E_{\text{вр}} = \frac{\hbar^2 J(J+1)}{2G}$$

$\sim J(J+1)$   
 $E_{\text{вр}}$   
 $G = ?$

Вращательные уровни чётно-чётного ядра имеют лишь чётные  $J$ :

$$J = 0, \cancel{1}, \cancel{2}, \cancel{3}, \cancel{4}, \cancel{5}, \cancel{6}, \cancel{7}, 8, \dots$$

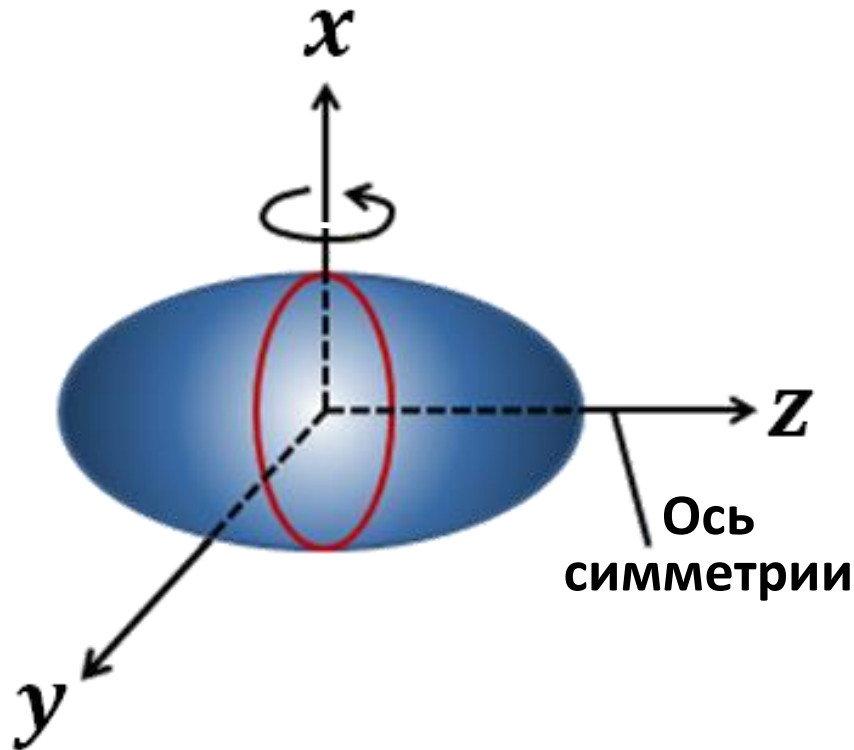
Нечётные  $J$  исключаются *соображениями симметрии*. При этом чётность состояний с  $J = 0, 2, 4, 6, 8, \dots$  положительна (+1).

Поэтому чётность вращательных состояний также положительна.

Таким образом, вращательные уровни чётно-чётного ядра с ростом энергии образуют следующий ряд значений  $J^P$ :

$$0^+, 2^+, 4^+, 6^+, 8^+, \dots$$

**Несферическое ядро может вращаться только вокруг осей перпендикулярных оси симметрии ядра (пусть это ось  $z$ ), например вокруг оси  $x$ :**

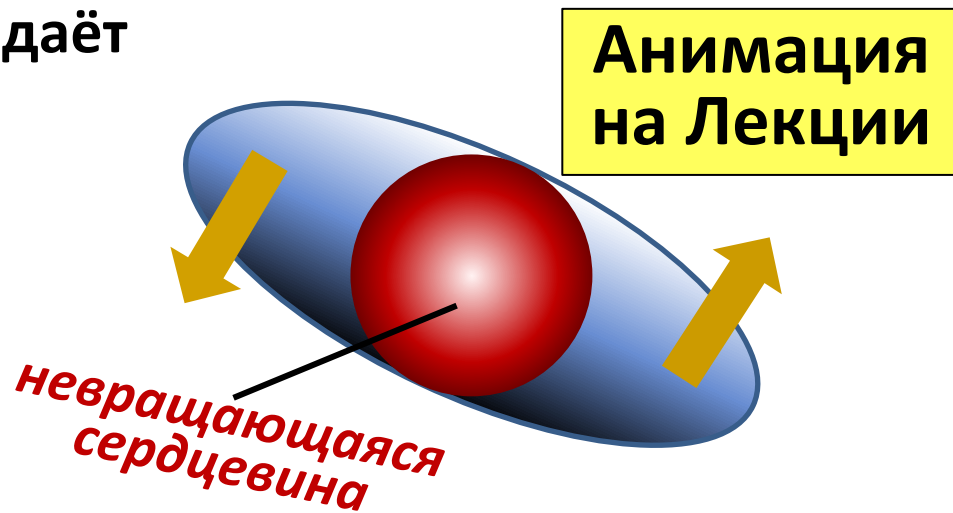


## Как выглядят вращательные возбуждения ядра?

При вращательных возбуждениях ядро не может вращаться как единое с неизменным внутренним строением тело (например, как твёрдое тело), поскольку у такого ядра нет внутреннего возбуждения, т.е. такому вращению по-прежнему отвечает основное состояние ядра.

При вращении ядра с возбуждением вращательного состояния по его поверхности как бы распространяется круговая волна внешних нуклонов, а сферическая сердцевина ядра (в соответствии с принципами квантовой механики) не участвует во вращении и не даёт вклада в его момент инерции.

Это отличное от основного состояния внутреннее поведение нуклонов и обеспечивает ядерное возбуждение.



Скорость вращения ядра –  $10^{21}$ - $10^{23}$  оборотов в сек

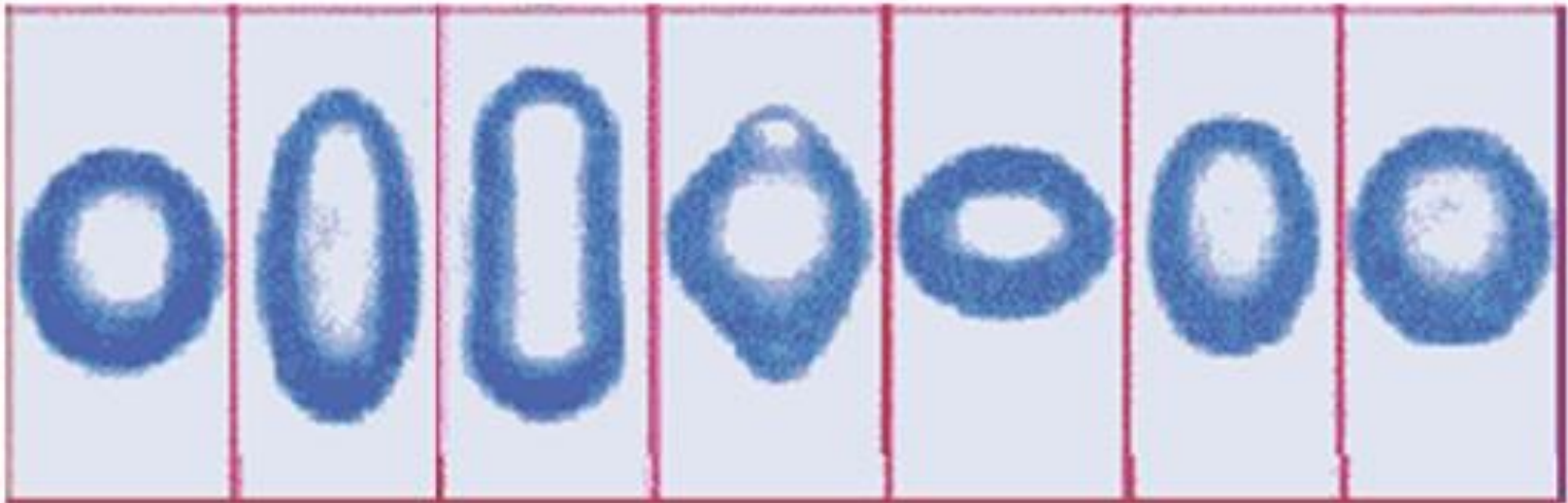
## Колебательные (вибрационные) уровни сферических ядер

В сферических ядрах вращательные состояния отсутствуют и низкоэнергичная часть спектра обусловлена колебаниями формы ядра вокруг равновесной. При рассмотрении таких колебаний помогает аналогия между ядром и каплей жидкости.

Для описания таких колебаний можно использовать (с учётом квантования) математический аппарат, впервые применявшийся Рэлеем (1877 г.) при рассмотрении классических колебаний формы капли жидкости. Эти колебания классифицируются по угловому моменту (мультипольности)  $J$  возбуждения и чётности  $P$ .

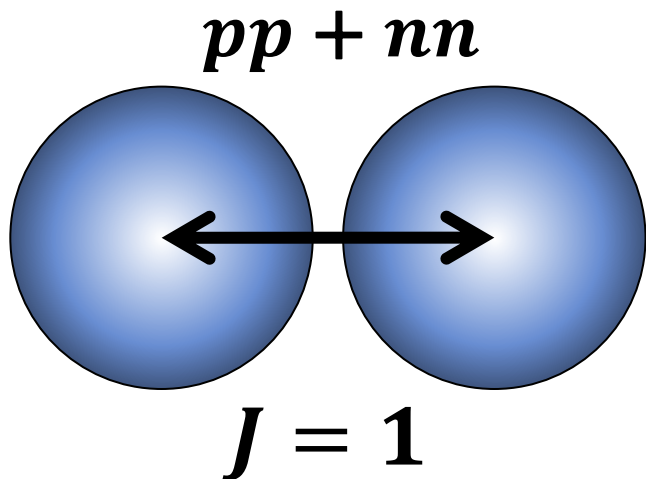
В свободном невозбужденном состоянии капля жидкости принимает сферическую форму. Поэтому легче всего (с наименьшей энергией) возбуждаются малые гармонические колебания вокруг равновесной сферической формы без изменения объёма.

Фото  
последовательных деформаций  
жидкой капли



Последовательность этих деформаций отвечает изменяющимся квадрупольным деформациям, т.е. электрическим квадрупольным ( $J = 2$ ) колебаниям

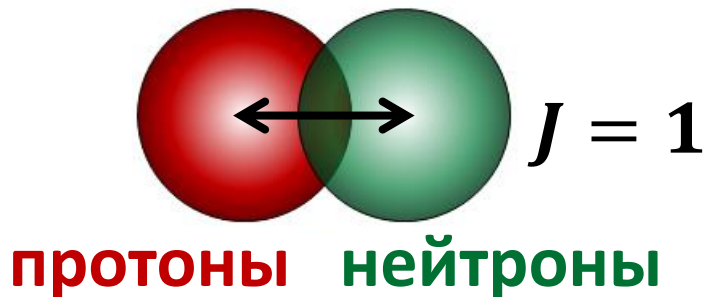
В ядре невозможны электрические дипольные ( $J = 1$ ) колебания, когда нейтроны и протоны двигаются синхронно (синфазно) неразделёнными



При таких движениях ядро перемещается как единое целое без изменения своего внутреннего состояния т.е. без возбуждения.

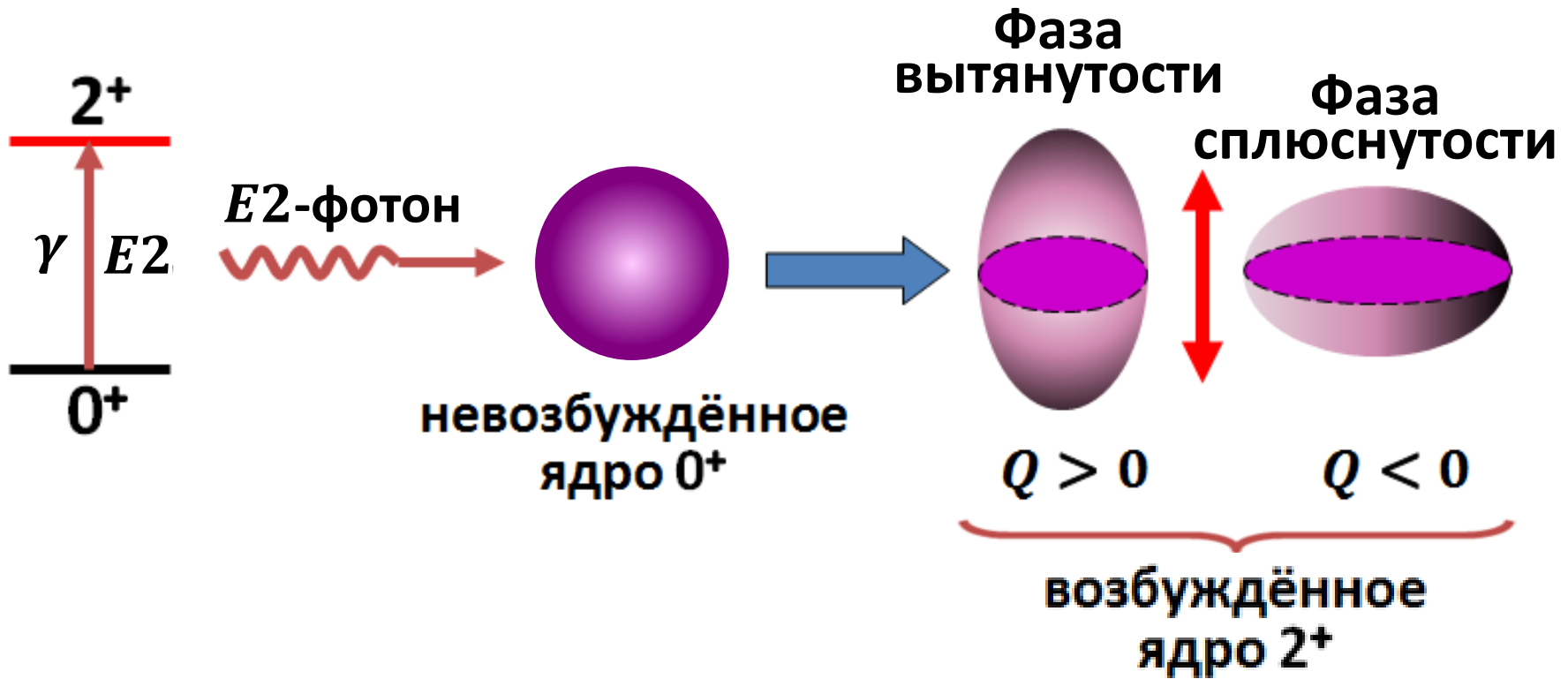
В ядре возможны электрические дипольные ( $J = 1$ ) колебания, когда нейтроны и протоны двигаются противофазно и происходит разделение протонной и нейтронной составляющих ядра (поляризация ядра) без изменения положения его центра тяжести

Анимация  
на Лекции

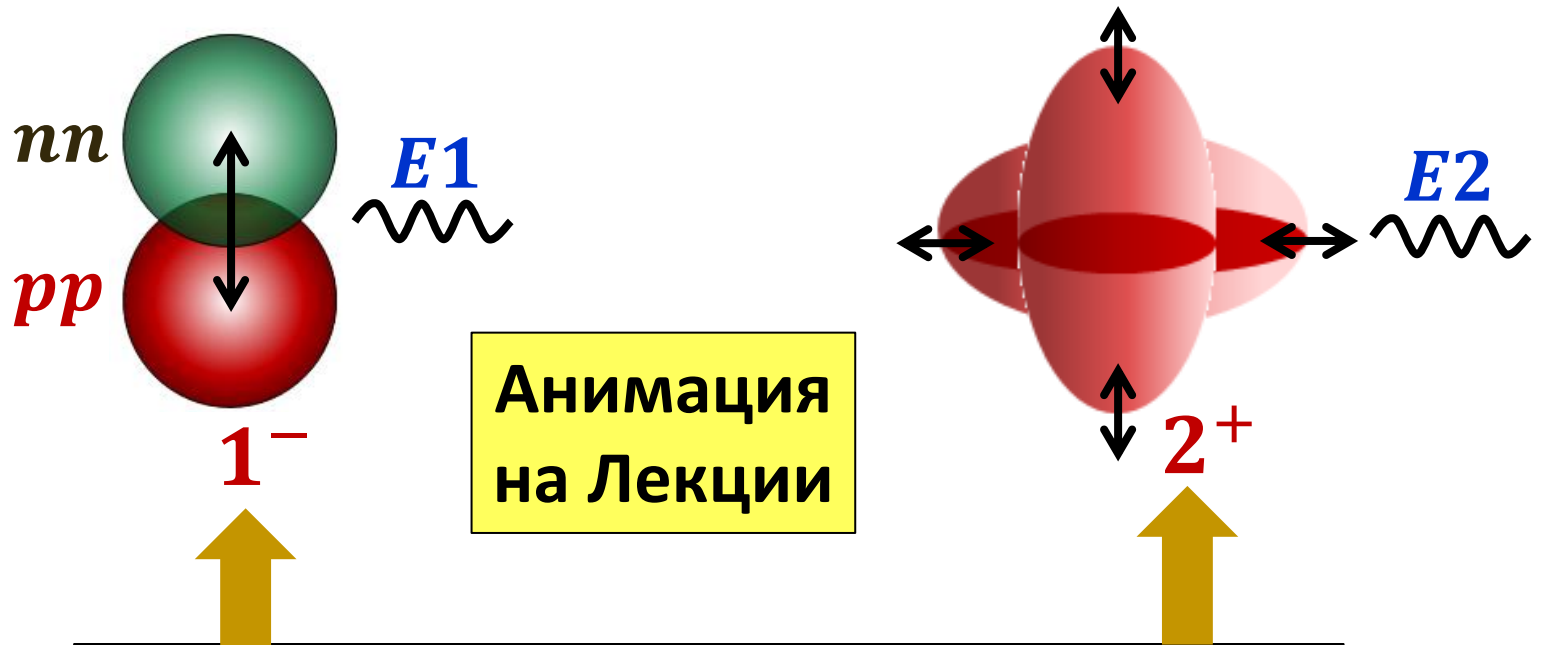




# Синфазные электрические квадрупольные колебания в ядре возможны



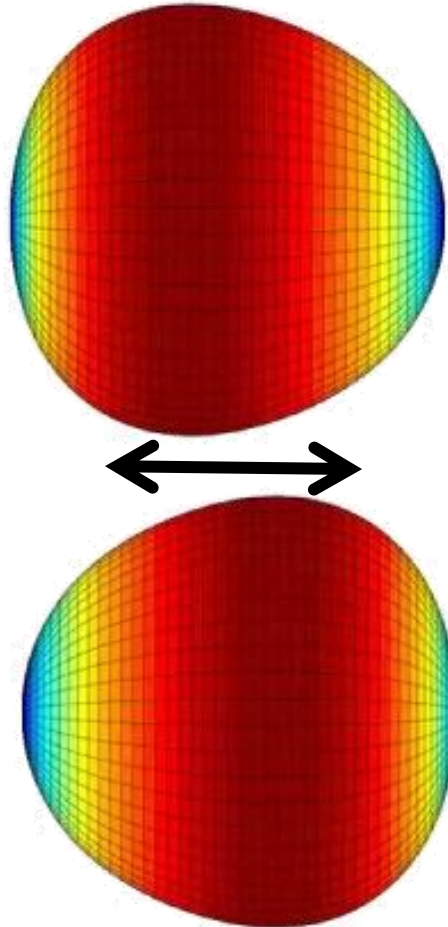
**$E1$ -противофазные и  $E2$ -синфазные колебания (возбуждения) атомных ядер**



Спины-чётности соответствующих  
нижайших возбуждённых состояний  
в чётно-чётных ядрах

Электрические октупольные синфазные колебания системы зарядов, создающие  $E3$ -излучение и возникающие при поглощении  $E3$ -излучения

Видео  
на Лекции

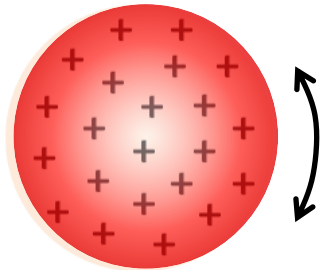


Спин-чётность соответствующего  
нижайшего возбуждённого состояния  
в чётно-чётных ядрах  $3^-$

## Анимация на Лекции

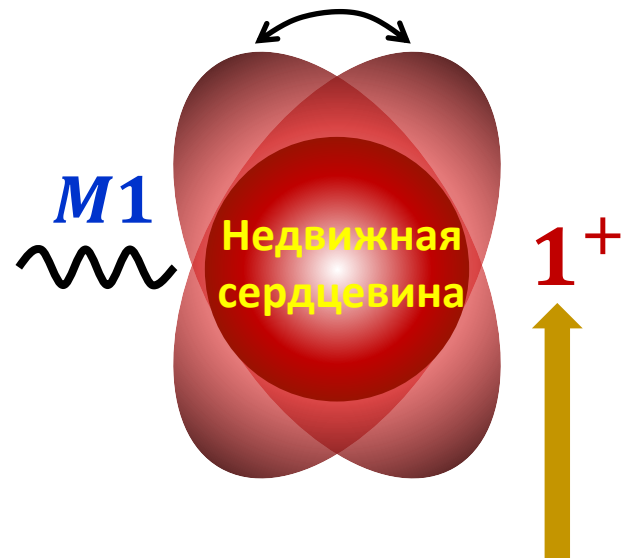
### **$M1$ -синфазные колебания**

Такие  $M1$ -колебания не являются возбуждениями атомных ядер



При таких колебаниях внутренняя структура объекта не меняется и поэтому нет его возбуждения. Объект колеблется (вращается туда-сюда), не меняя внутреннего строения

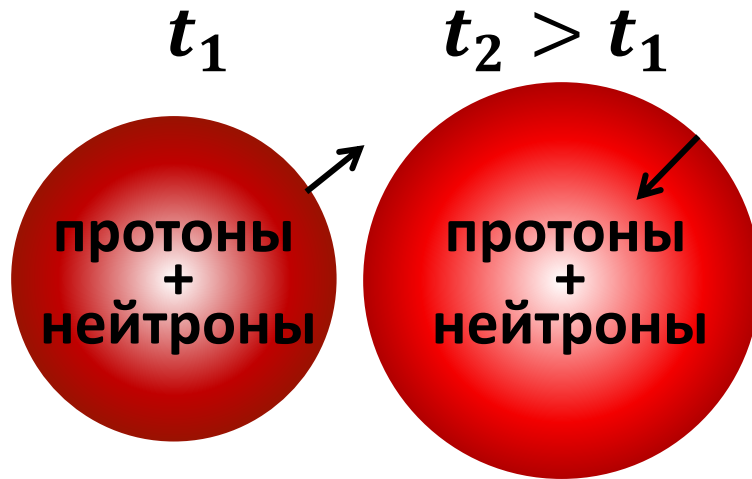
В ядре возможны  $M1$ -колебания (возбуждения) следующего типа:



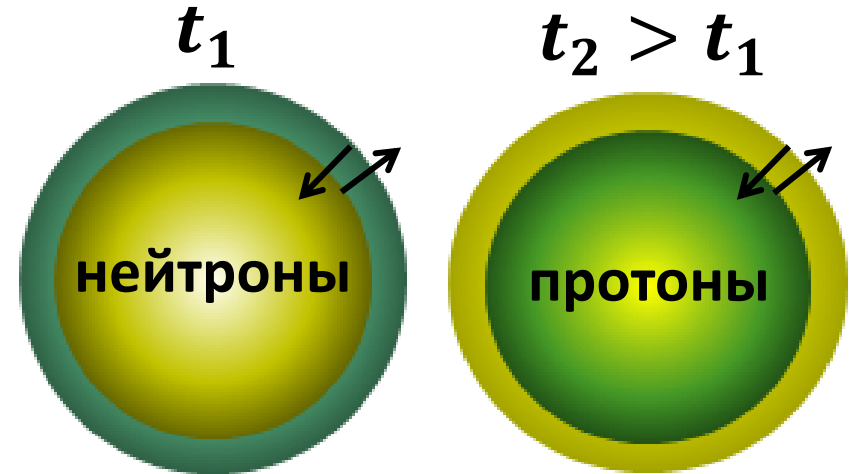
Спин-чётность соответствующего нижайшего возбуждённого состояния в чётно-чётных ядрах

# Электрические монопольные $E0$ -колебания - так называемая «дыхательная мода»

Синфазное  
дыхательное колебание  
протонов и нейтронов



Противофазное  
дыхательное колебание  
протонов и нейтронов



Анимация  
на Лекции

Спин-чётность соответствующих  
нижайших возбуждённых состояний  
в чётно-чётных ядрах  $0^+$

Гармонические колебания каждой мультипольности и частоты  $\omega$  квантуются, т.е. имеется квант энергии  $\hbar\omega$  каждой мультипольности, называемый **фононом** этой мультипольности. В возбуждённом ядре одновременно может быть несколько фононов различной мультипольности.

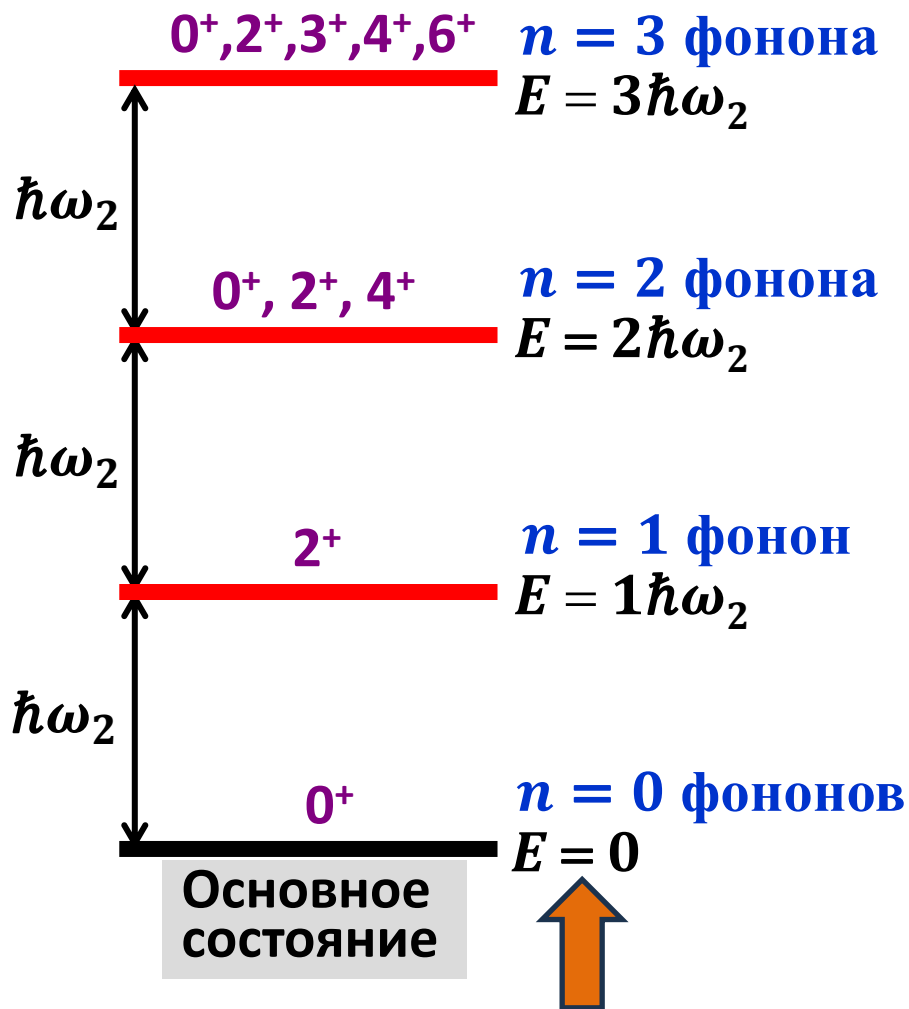
Энергия возбуждения такого ядра даётся выражением:

$$E = \sum_J n_J \cdot \hbar\omega_J,$$

где  $n_J$  — число фононов мультипольности  $J$ , а  $\hbar\omega_J$  — энергия фонона этой мультипольности.

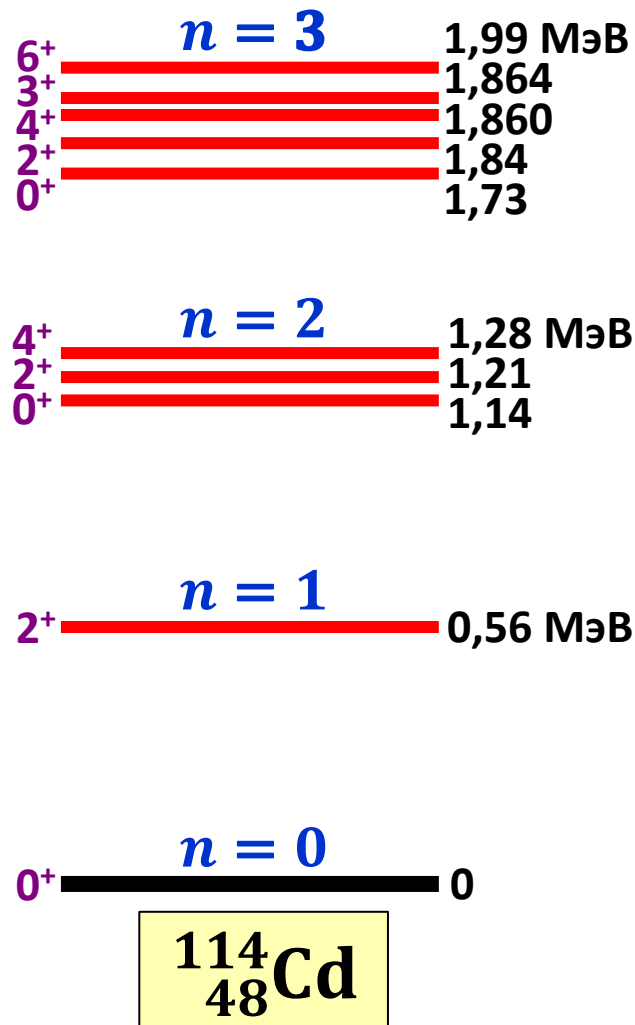
Возбуждения с  $J = 0$  лежат высоко по энергии из-за того, что ядро, как и жидкость, с трудом поддаётся сжатию и растяжению. Нижайшим по энергии и мультипольности колебанием формы ядра, как правило, является синфазное  **$E2$** -колебание ( $J = 2$ ), которому в чётно-чётном ядре отвечает возбуждение со спин-чётностью  $2^+$ .

Идеальный спектр  
квадрупольных  
колебаний  
чётно-чётного ядра:



Энергия квадрупольного  
возбуждения  $E = n \cdot \hbar\omega_2$

Реальный спектр  
квадрупольных колебаний  
чётно-чётного ядра  $^{114}_{48}\text{Cd}$



**В ядре возможно одновременное возбуждение  
одночастичных и коллективных  
степеней свободы**



**Анимация на Лекции**



# Нобелевская премия по физике 1975 г.

за открытие связи между коллективным  
и индивидуальным движением частиц  
в атомном ядре и создание на базе этой связи  
теории структуры ядра



**О. Бор**  
Aage Bohr



**Б. Моттelson**  
Ben Mottelson



**Дж. Рейнуотер**  
James Rainwater

**Д а н и я**

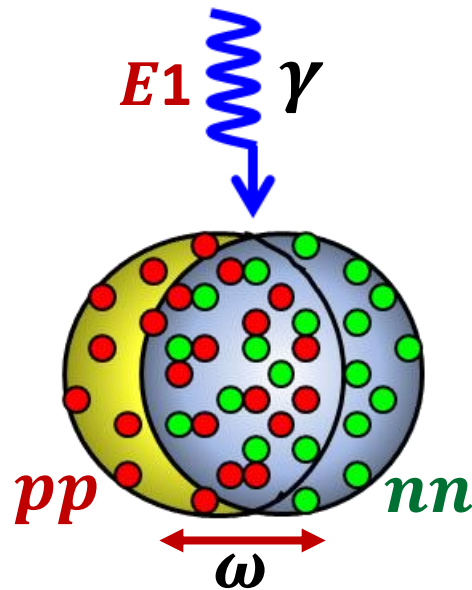
**США**

# Поляризационные колебания атомных ядер

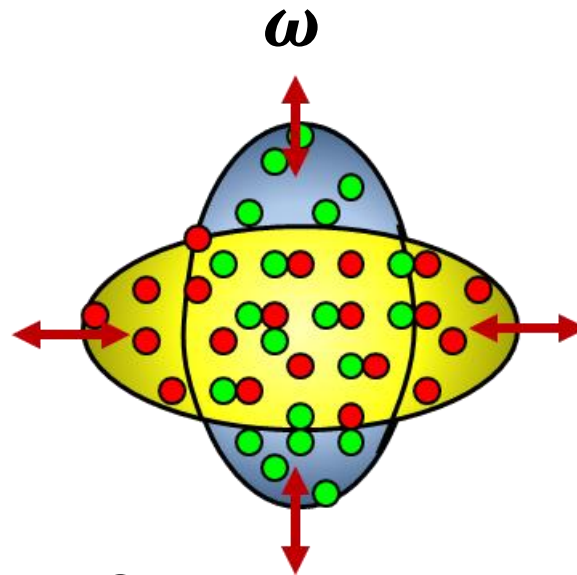
С ростом энергии в ядрах появляются возбуждения, в которые вовлечены внутренние (наиболее сильно связанные) нуклоны. К таким возбуждениям относятся

**поляризационные коллективные возбуждения,**

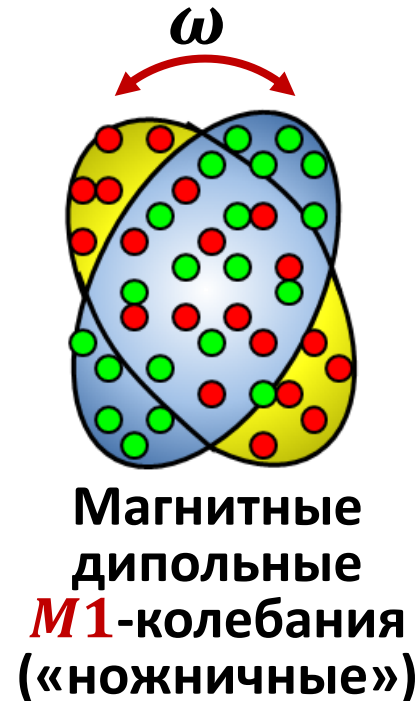
в процессе которых происходит динамическое пространственное разделение протонов и нейтронов ядра и последнее приобретает соответствующий, гармонически меняющийся со временем электромагнитный момент.



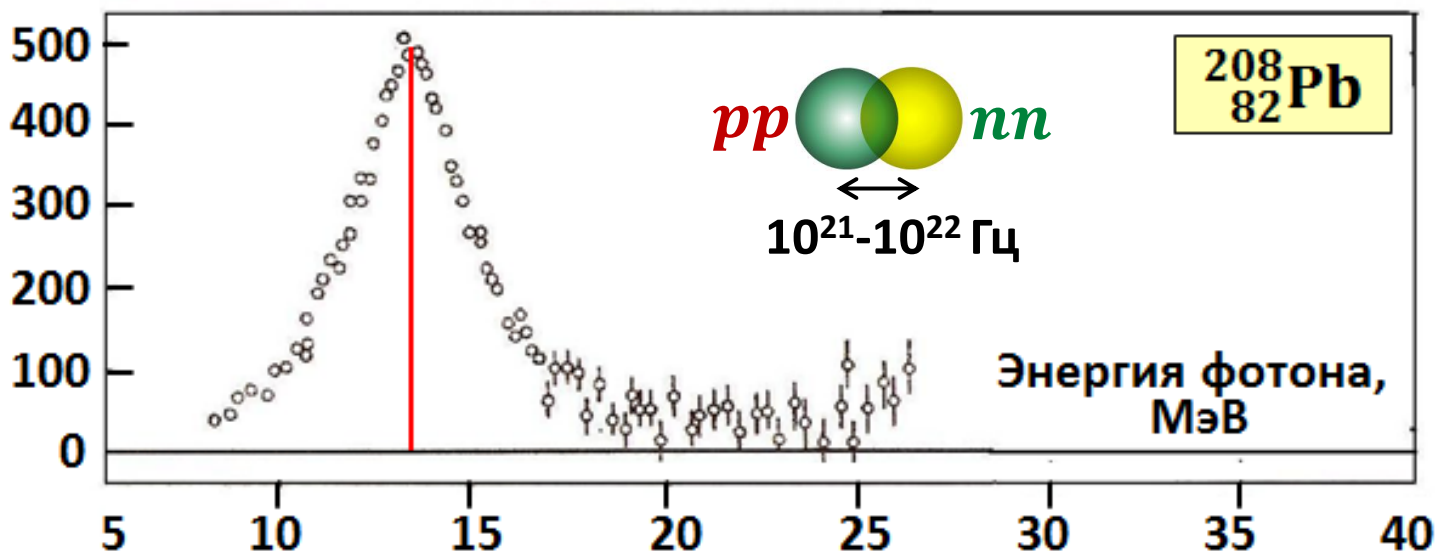
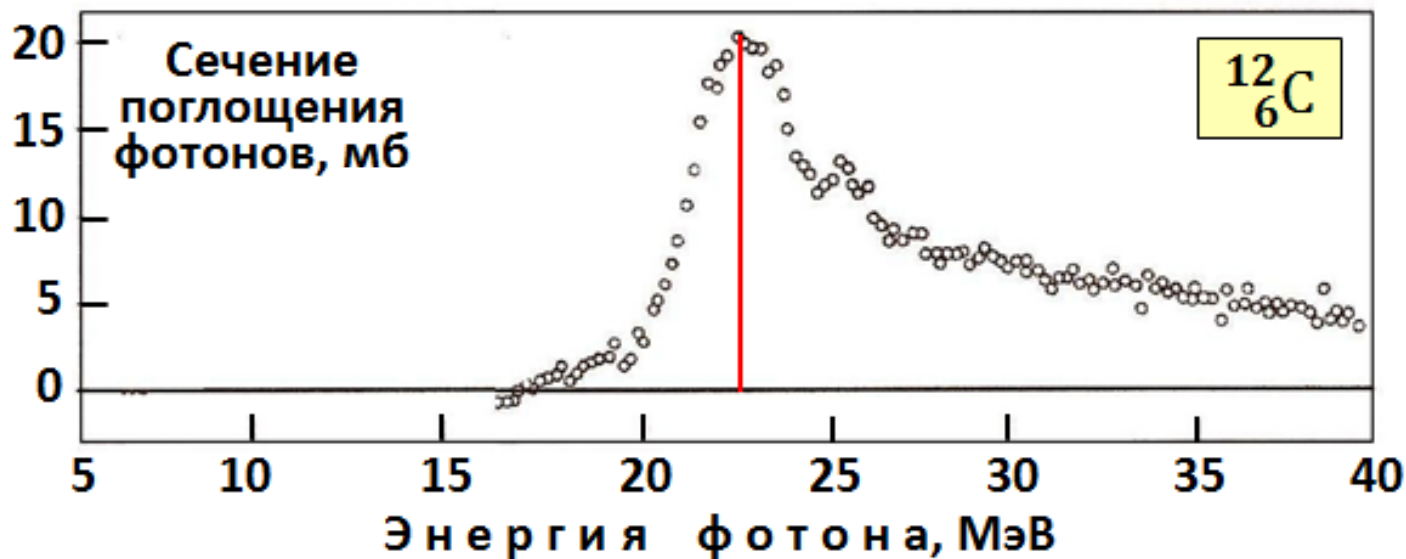
Электрические  
дипольные  
 $E1$ -колебания



Электрические  
квадрупольные  
 $E2$ -колебания



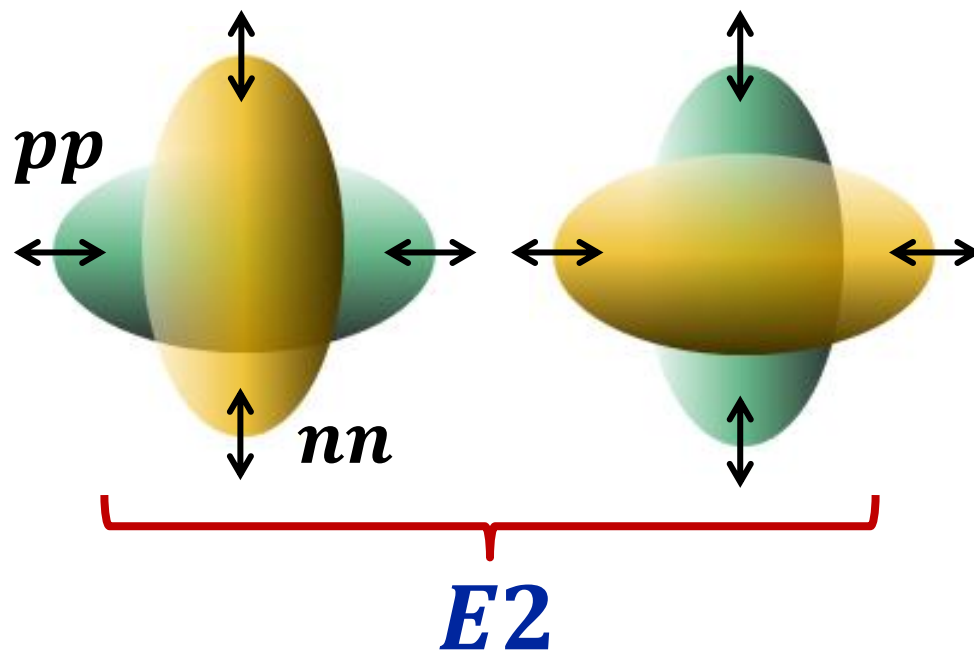
# Гигантский дипольный ( $E1$ ) резонанс в сечениях поглощения фотонов ядрами $^{12}\text{C}$ и $^{208}\text{Pb}$



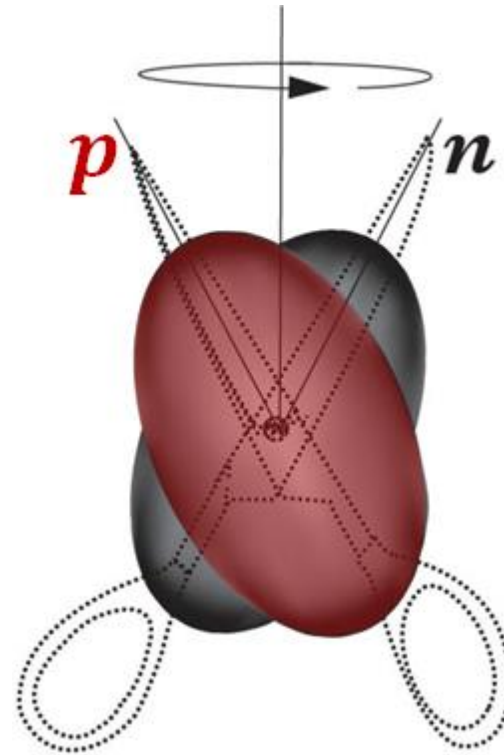
# Анимация на Лекции

## Поляризационные электрические квадрупольные ( $E2$ ) и ножничные ( $M1$ ) колебания

Разделённые половиной периода фазы колебаний:

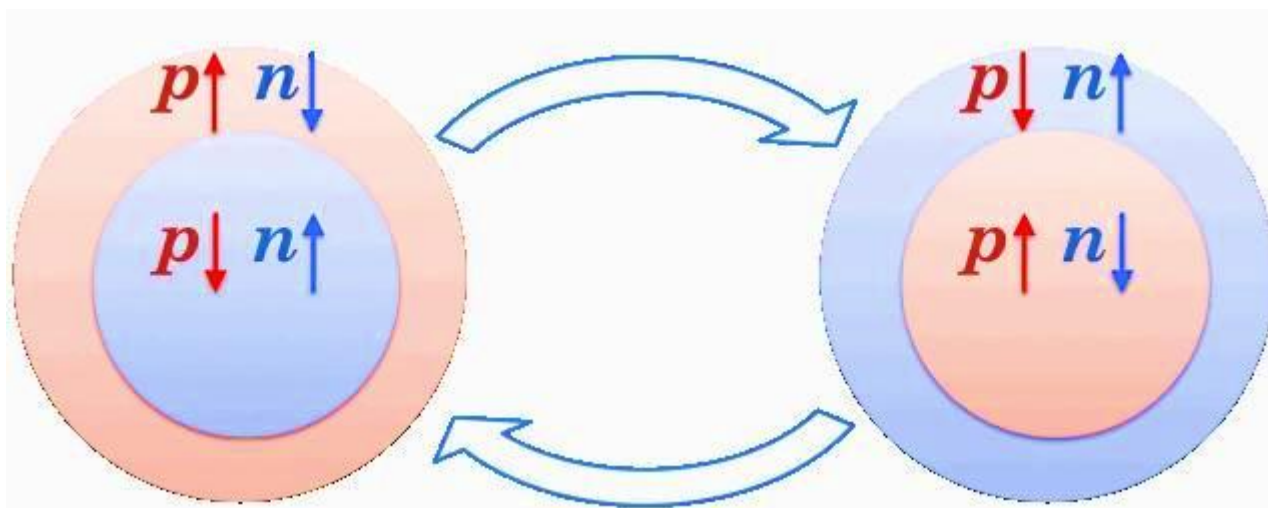


## Ножничные колебания (scissors mode)



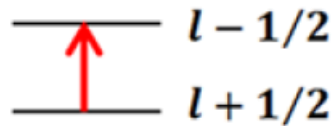
Анимация на Лекции

**Монопольные (дыхательные)  
поляризационные спиновые колебания  
(с переворотом спинов нуклонов)**



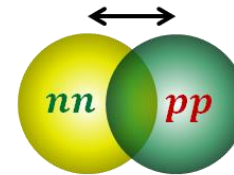
Положение некоторых коллективных поляризационных ядерных возбуждений на энергетической оси в экспериментах с фотонами

Возбуждения с переворотом спина нуклонов:



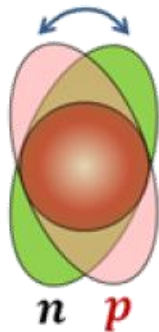
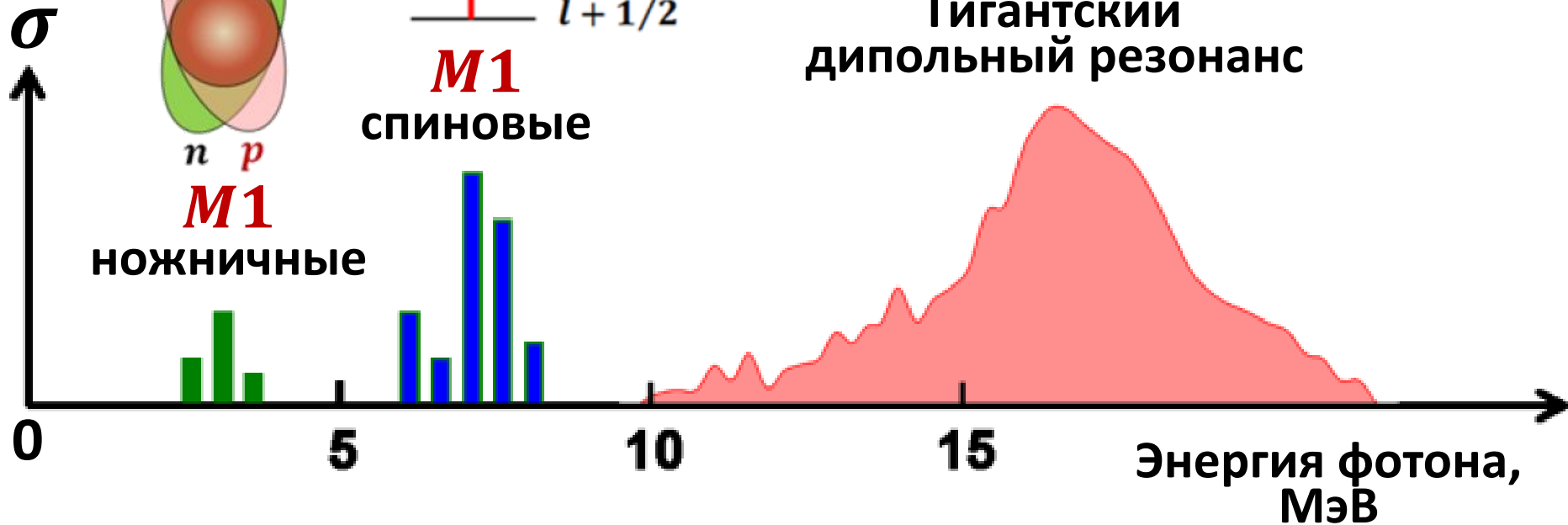
***M1***

спиновые



***E1***

Гигантский дипольный резонанс



*n p*

***M1***

ножничные

# **Заключительные замечания об атомных ядрах**

***Атомное ядро*** –

**единственная квантовая система многих тел,  
подверженная всем видам  
фундаментальных взаимодействий.**

**Ядерная материя – новое, не встречающееся в обычном  
окружающем нас мире состояние вещества, проявляющее  
необычайное разнообразие противоречивых  
(и даже несовместимых) свойств:**

- Она похожа на газ (газ ферми-частиц),**
- Она похожа и на жидкость (ферми-жидкость),**
- Она похожа и на твёрдое тело,**
- Она может вести себя как плазма,**
- Она наделена свойствами сверхтекучести,**
- Она показывает нетривиальные нуклонные корреляции,**
- Она проявляет необычайное разнообразие возбуждений,**
- Она является – неисчерпаемым источником энергии.**

***Изучение атомных ядер далеко от завершения***



**Зеркальная  
или  $P$  (от *Parity*)  
симметрия.  
Закон сохранения  
чётности.  
Несохранение  
чётности  
в слабых  
взаимодействиях.**



**Зеркальное  
отражение**

**Зеркальное  
отражение**

Квантовое число **чётность** ( $P$ ) – следствие зеркальной симметрии.

**Чётность** сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Состояния систем, участвующих в таких взаимодействиях, характеризуются определённой

**чётностью** – **положительной**:  $\psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r})$

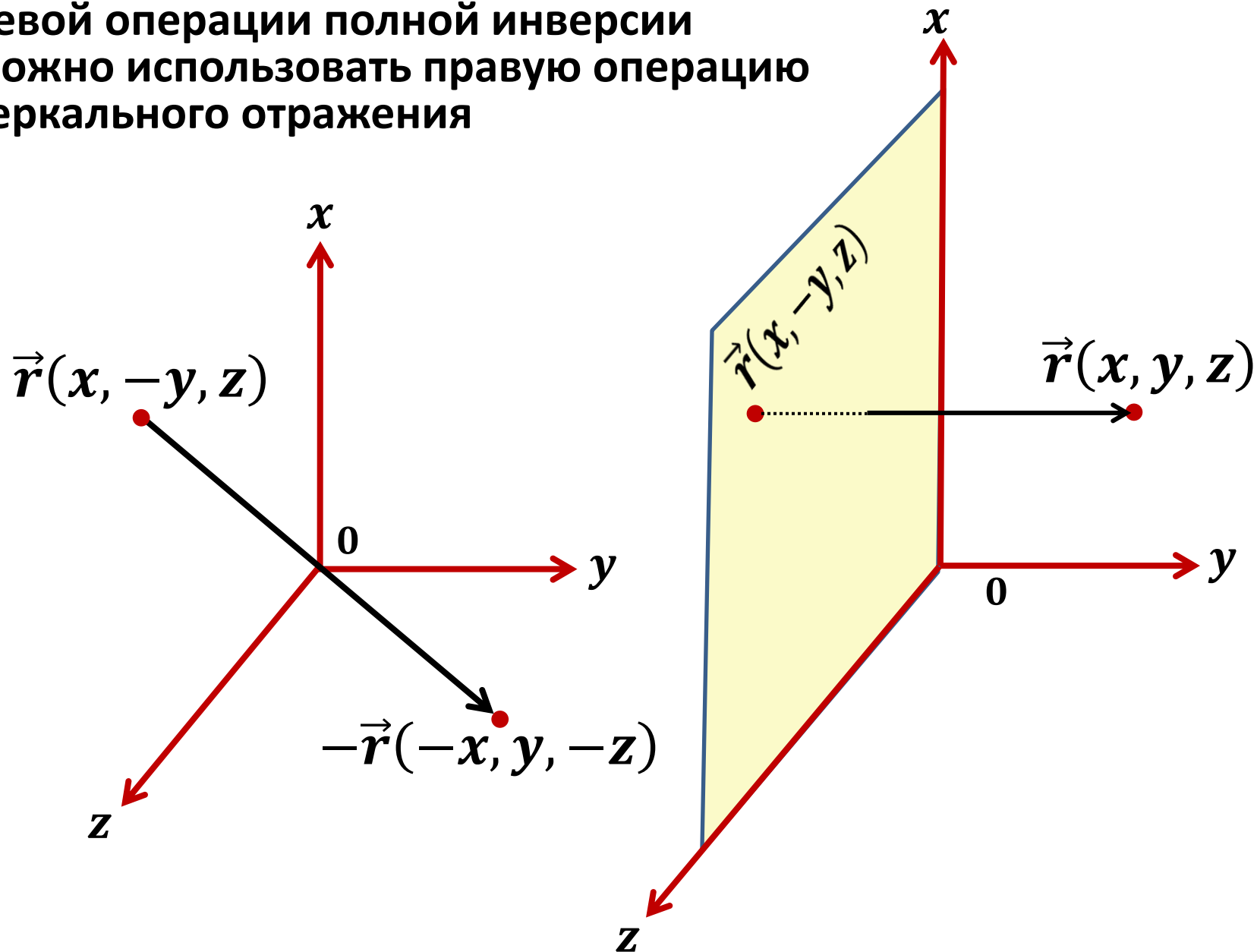
или **отрицательной**:  $\psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r})$ .

Операция пространственной инверсии  $\hat{P}$  сводится к преобразованию координат  $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$  и эквивалентна последовательности двух следующих операций:



Так как физические законы инвариантны к вращениям, то вместо полной пространственной инверсии можно ограничиться **зеркальным отражением**

При пространственной инверсии вместо левой операции полной инверсии можно использовать правую операцию зеркального отражения

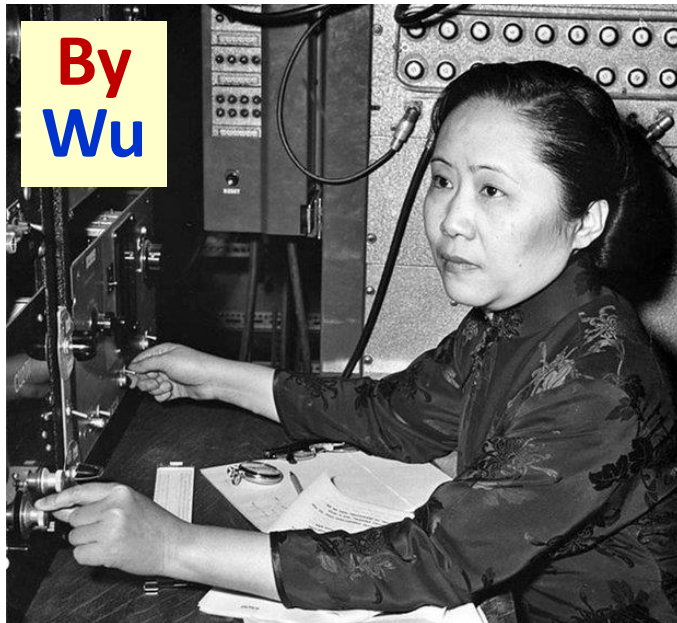


До 1954 г. инвариантность всех физических законов относительно пространственной инверсии не вызывала сомнений. В 1954-1956 гг. появились новые факты, в частности,  $\theta$ - $\tau$  – парадокс:

**Наблюдались следующие слабые распады:**

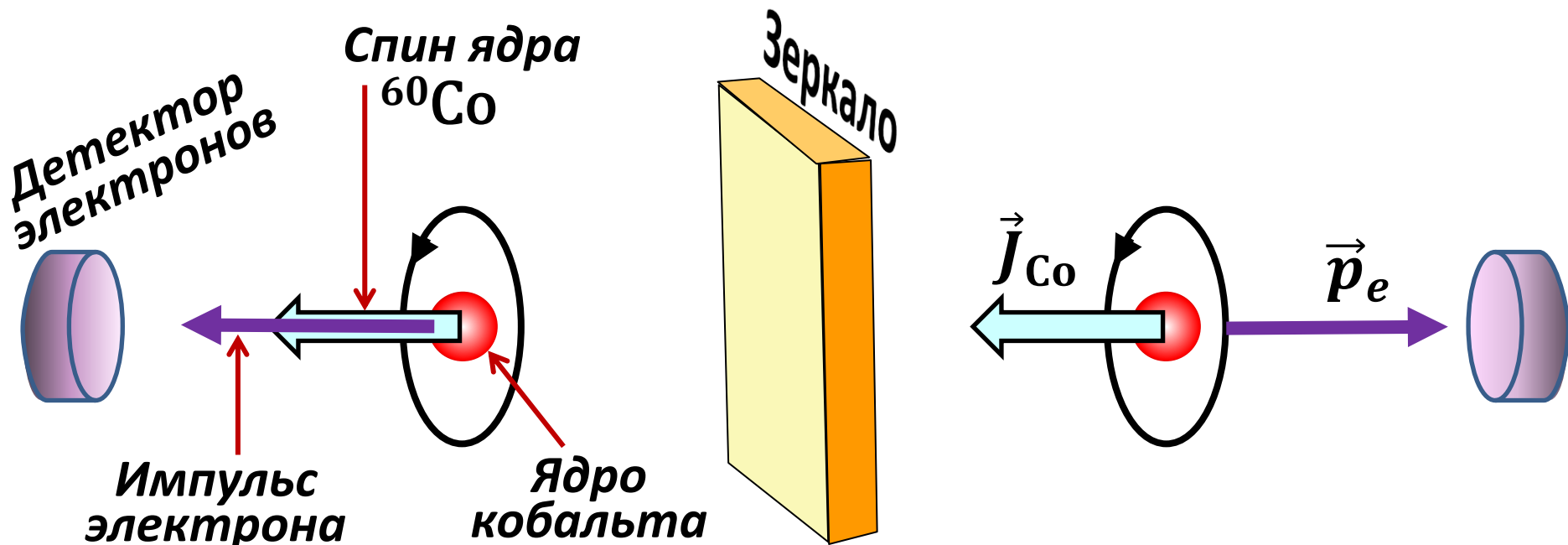
$$K^+ \begin{cases} \theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0 & - 21\%, \text{ чётность положительна,} \\ \tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- & - 5,6\% \text{ чётность отрицательна.} \end{cases}$$

В 1956 г. американские теоретики **Lee** и **Yang** высказали гипотезу о несохранении чётности в слабых взаимодействиях. В 1957 г. в Колумбийском университете (США) под руководством мадам **Wu** выполнен опыт, подтвердивший эту гипотезу.



# Опыт Ву

Изучался распад

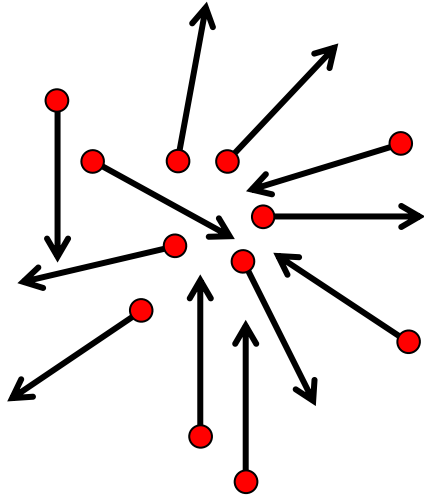


При зеркальном отражении меняется направление импульса электрона и не меняется направление спина ядра кобальта

При зеркальной симметрии число электронов, летящих налево и направо должно быть одинаковым. В опыте Ву число электронов, летящих направо, было больше числа электронов, летящих налево. Зеркальная симметрия оказалась нарушенной.

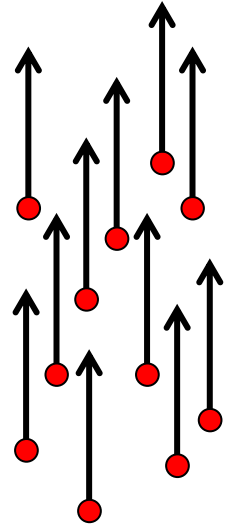
# Поляризация частиц

(выделенность определённого направления их спина)

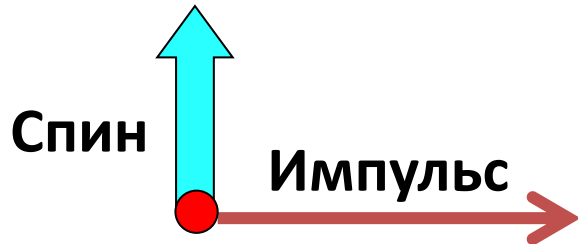


Если в системе частиц вероятности различных направлений спина одинаковы, то **поляризация нулевая**

Если все спины направлены в одну сторону, то поляризация **стопроцентная (единичная)**



Для отдельной частицы говорят о **поперечной** или **продольной** поляризации:



**Поперечная** поляризация



**Продольная** поляризация

Продольную поляризацию частицы характеризуют величиной *спиральности*  $h$ :

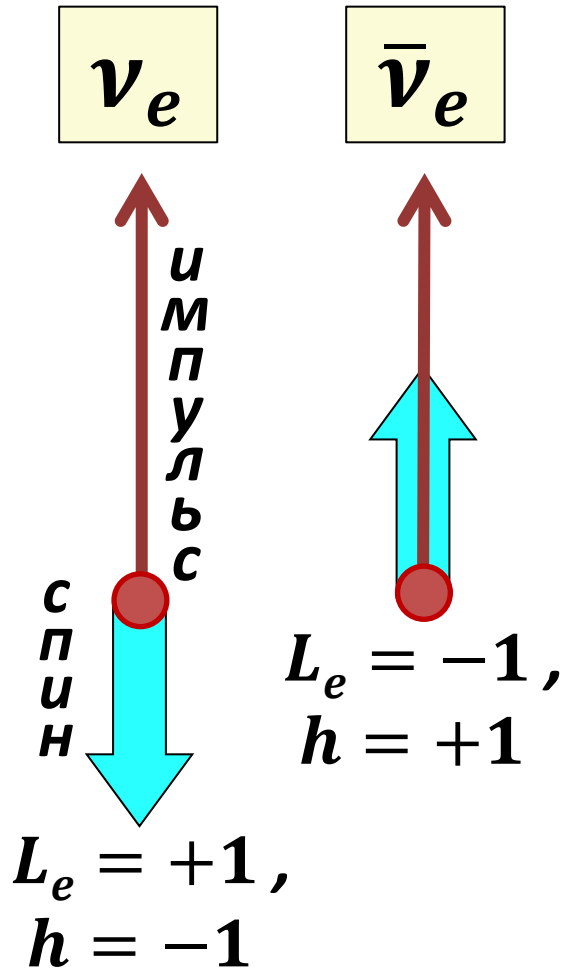
$$h = \frac{\vec{J} \cdot \vec{p}}{|\vec{J}| \cdot |\vec{p}|}$$

где  $\vec{J}$  - вектор спина частицы, а  $\vec{p}$  - её импульс

*Правополяризованные* частицы имеют  $h = +1$ .

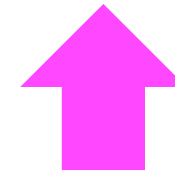
*Левополяризованные* —  $h = -1$ .

В 1958 г. было установлено, что спиральность нейтрино отрицательна ( $h = -1$ ), а антинейтрино – положительна ( $h = +1$ ):



$$\hat{P}\nu_e = |L_e = +1, h = +1\rangle,$$

$$\hat{P}\bar{\nu}_e = |L_e = -1, h = -1\rangle.$$



Таких частиц в природе нет!

Это свидетельствует об отсутствии в слабых взаимодействиях инвариантности к пространственной инверсии и несохранению чётности в этих взаимодействиях

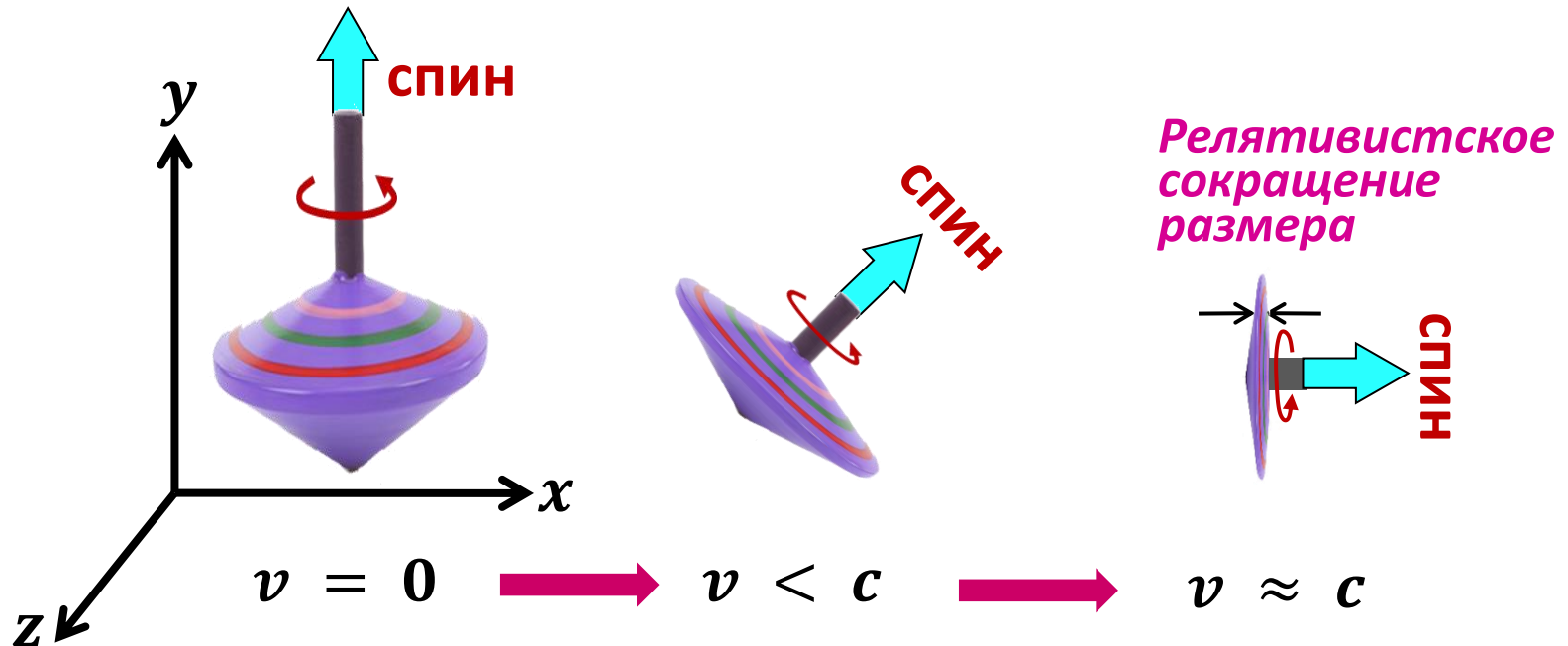


# Продольная поляризация безмассовой частицы

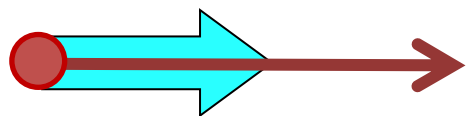
Любая частица с нулевой массой продольно поляризована, т. е. имеет не более двух ориентаций спина – параллельную и антипараллельную её импульсу независимо от величины спина.



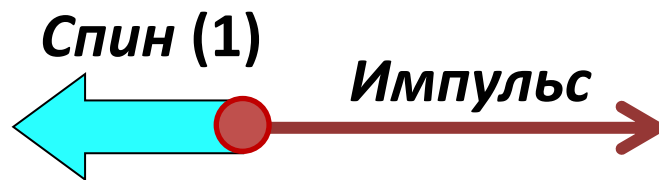
Это следствие релятивистской кинематики:



# Импульс, спиральность и спин фотона



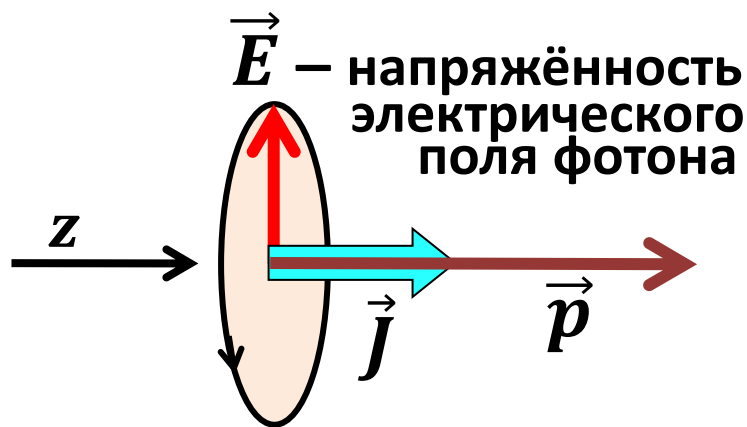
$$h = +1$$



$$h = -1$$

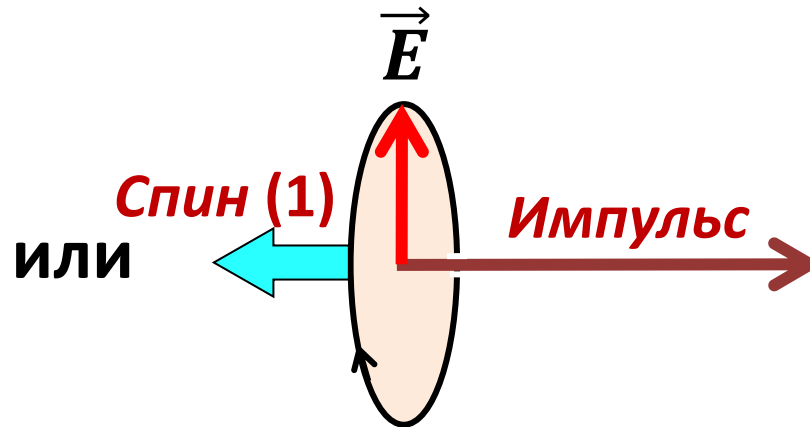
Фотон может быть в обоих этих конфигурациях

*Обоснование продольной поляризации фотона:*



Правый винт

$$(h = +1, J_z = +1)$$



Левый винт

$$(h = -1, J_z = -1)$$

Экспериментально установлено,  
что в слабых процессах  
с *заряженными слабыми токами*  
релятивистские отрицательно заряженные  
лептоны  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$  рождаются преимущественно  
*лево-поляризованными*,  
а их античастицы ( $e^+$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^+$ ) – преимущественно  
*право-поляризованными* с поляризацией  $v/c$   
( $v$  – скорость частицы).

Таким образом, близка к 100%  
продольная поляризация ультрарелятивистских  
( $v \approx c$ ) заряженных лептонов.  
Общее правило, вытекающее из структуры слабого  
взаимодействия, таково:

*ультрарелятивистские фермионы,  
участвующие в любом слабом процессе  
с изменением заряда, могут иметь спиральность  
только  $-1$  для частиц и  $+1$  для античастиц.*