

Probing high-momentum protons and neutrons in neutron-rich nuclei

CLAS collaboration

30 AUGUST 2018 | VOL 560 | NATURE | 617

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0400-z>

28 сентября 2018

История атомного ядра

1896 г. А.Беккерель. Открытие явления радиоактивности.

1911 г. Э.Резерфорд. Открытие атомного ядра

1919 г. Э.Резерфорд. Открытие протона.

1932 г. Д.Чедвик. Открытие нейтрона.

1932 г. В.Гейзенберг, Д.Иваненко, Э.Майорана. Создание протон-нейтронной модели ядра.

Модель жидкой капли

1935 г Формула Бете-Вайцзеккера

$$B(A,Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A} + \zeta A^{-3/4}$$

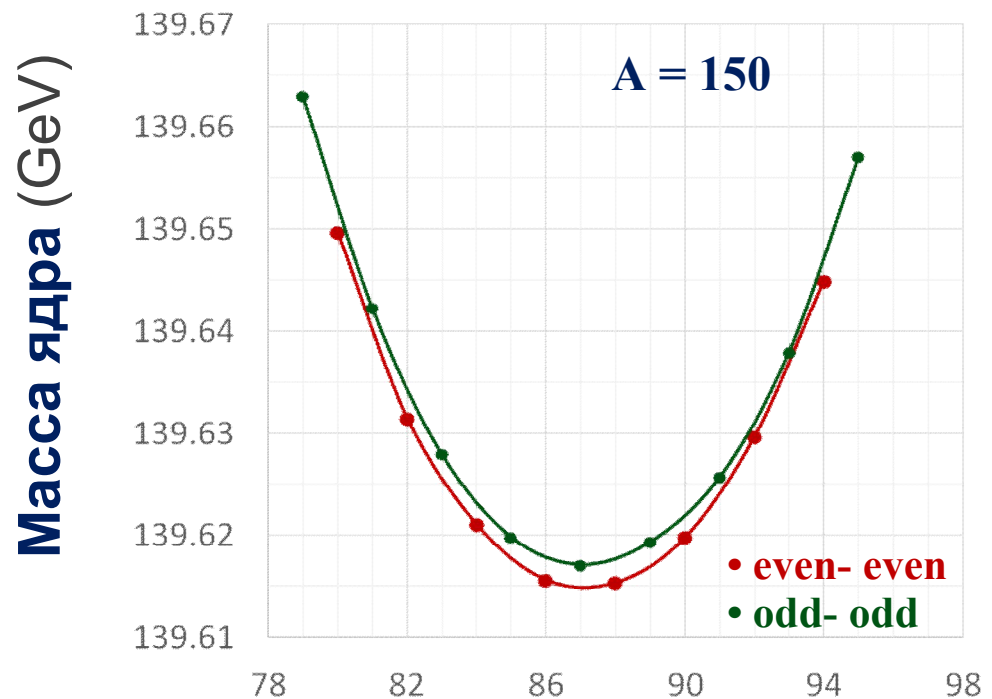
$$\alpha = 15.56 \text{ MeV}$$

$$\beta = 17.23 \text{ MeV}$$

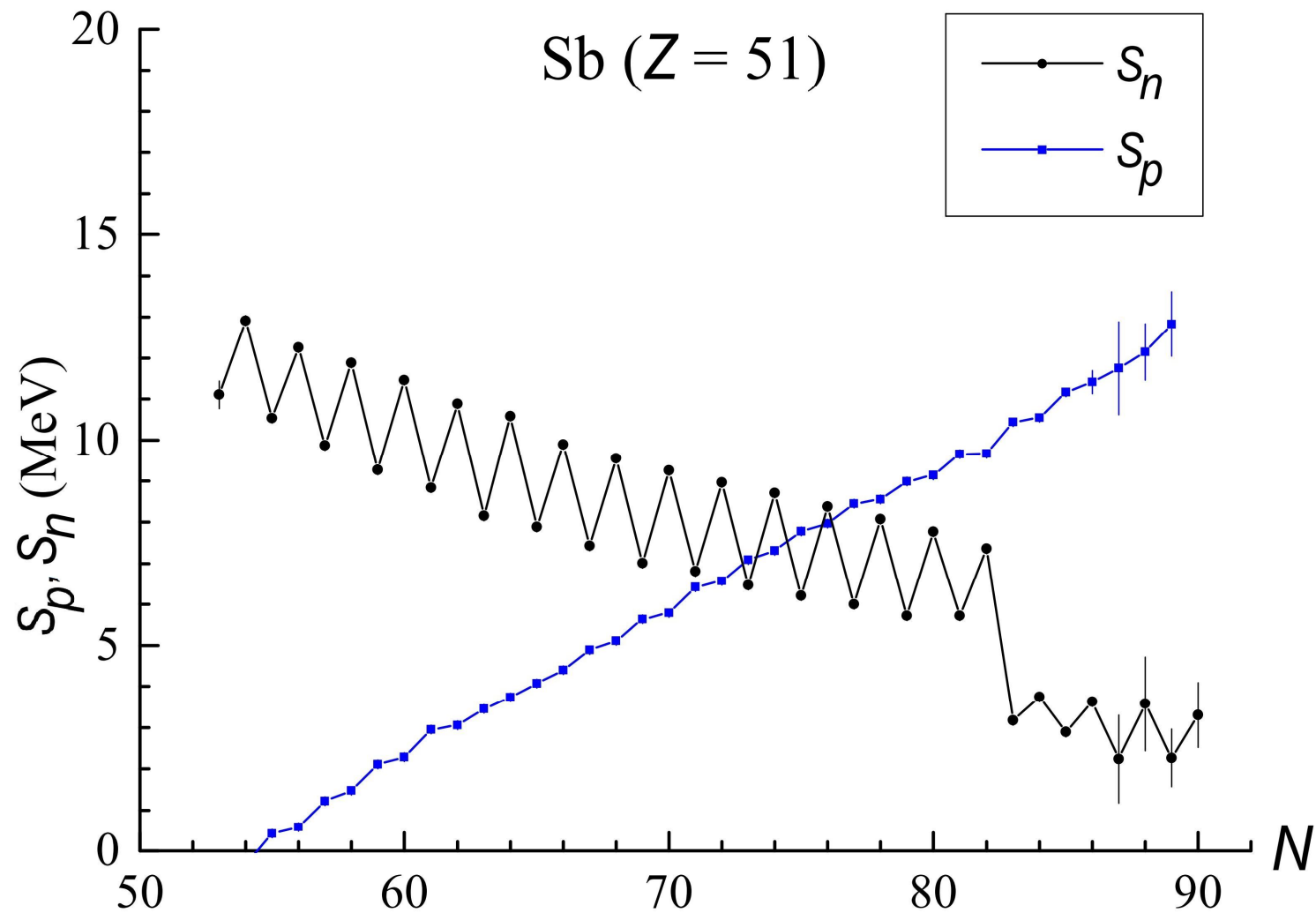
$$\gamma = 0.7 \text{ MeV}$$

$$\delta = 23.285 \text{ MeV}$$

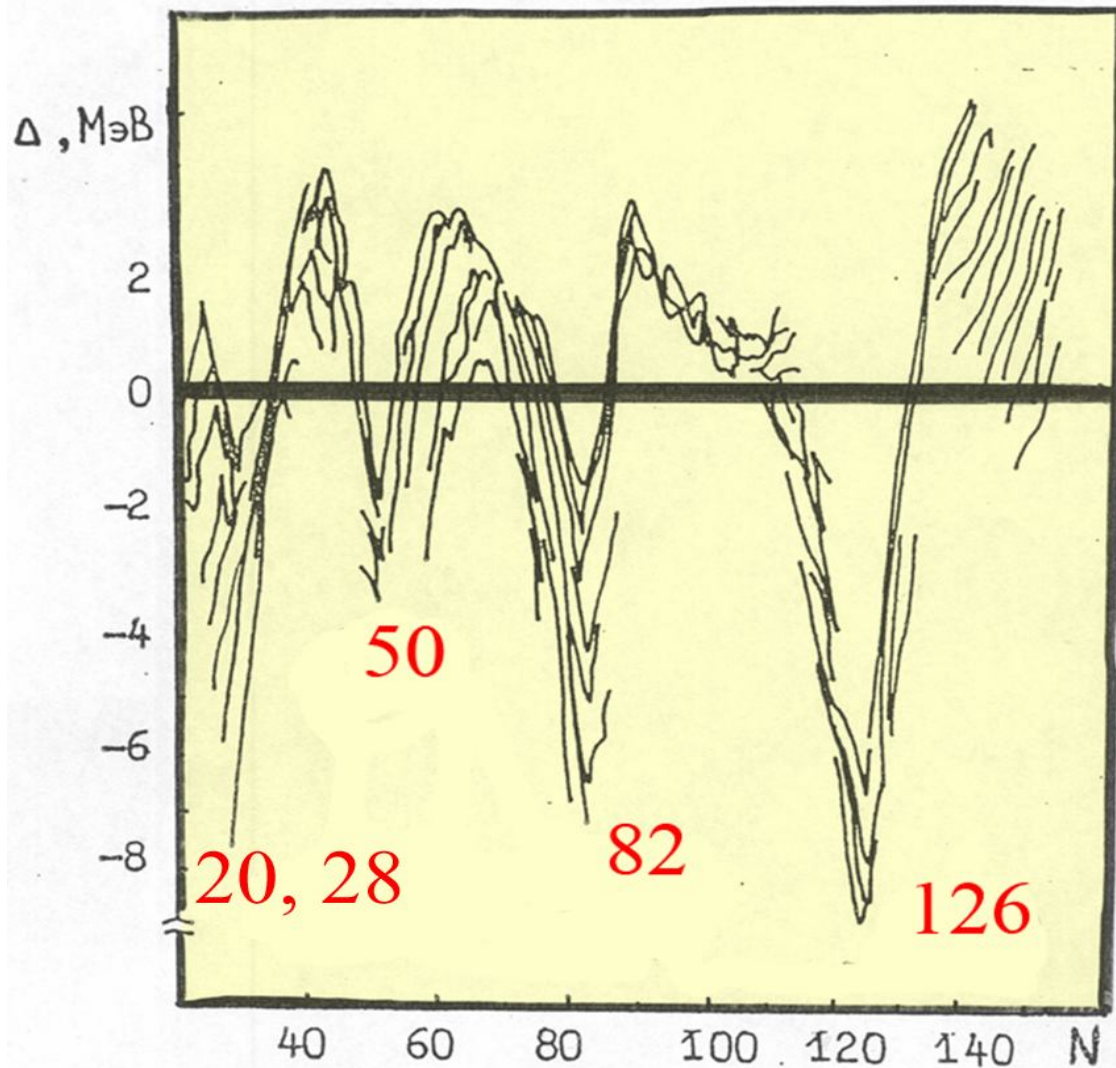
$$\zeta = \begin{cases} 34 \text{ MeV} \\ 0 \\ -34 \text{ MeV} \end{cases}$$



Энергии отделения нейтрона и протона в изотопах Sb



Магические числа



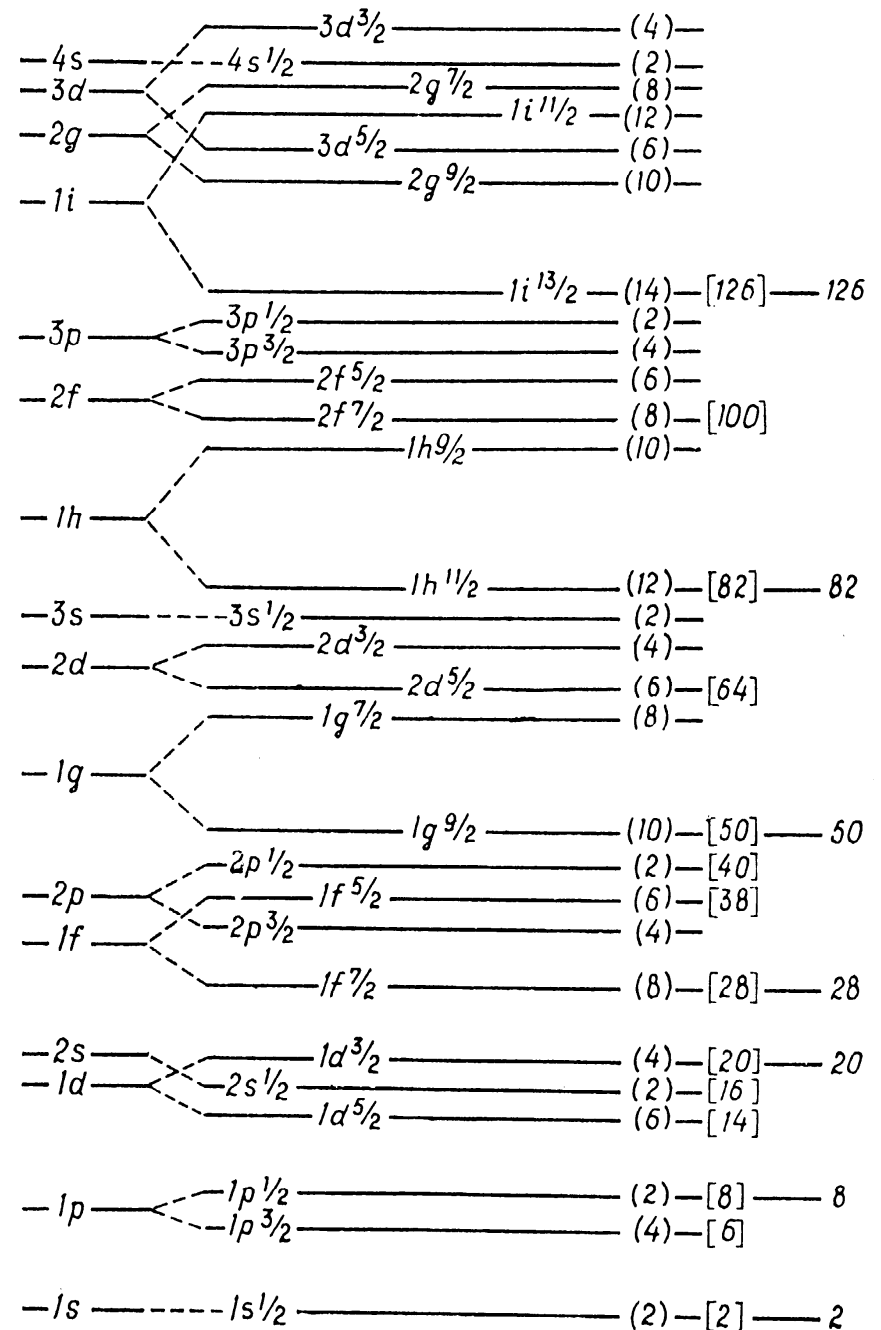
Магические числа
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Δ – разница между экспериментально измеренной энергией связи ядра и результатами расчета по формуле Бете-Вайцзеккера.

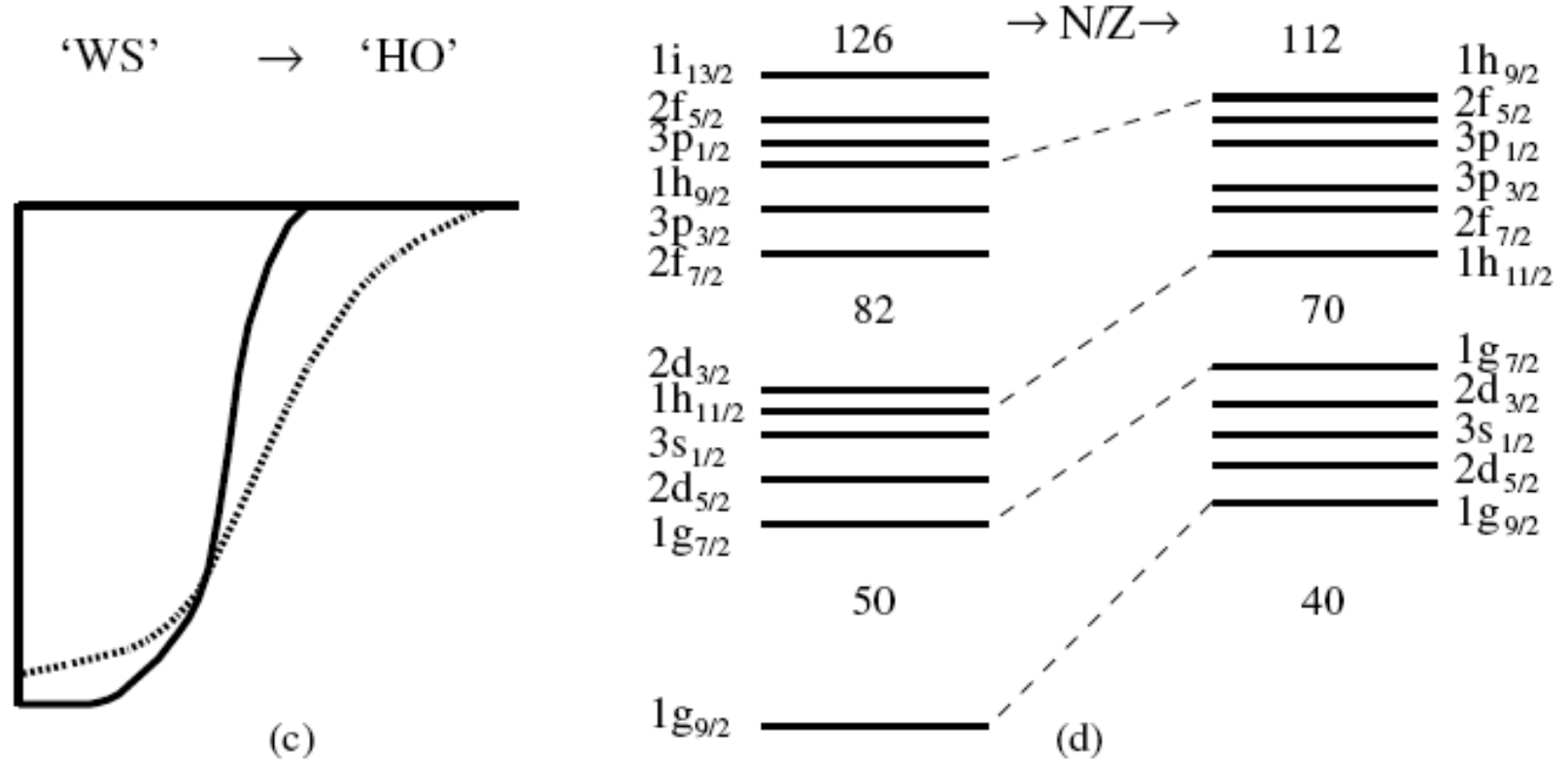
1948 г. Модель оболочек

Одночастичные уровни
в сферически-симметричном
потенциале.

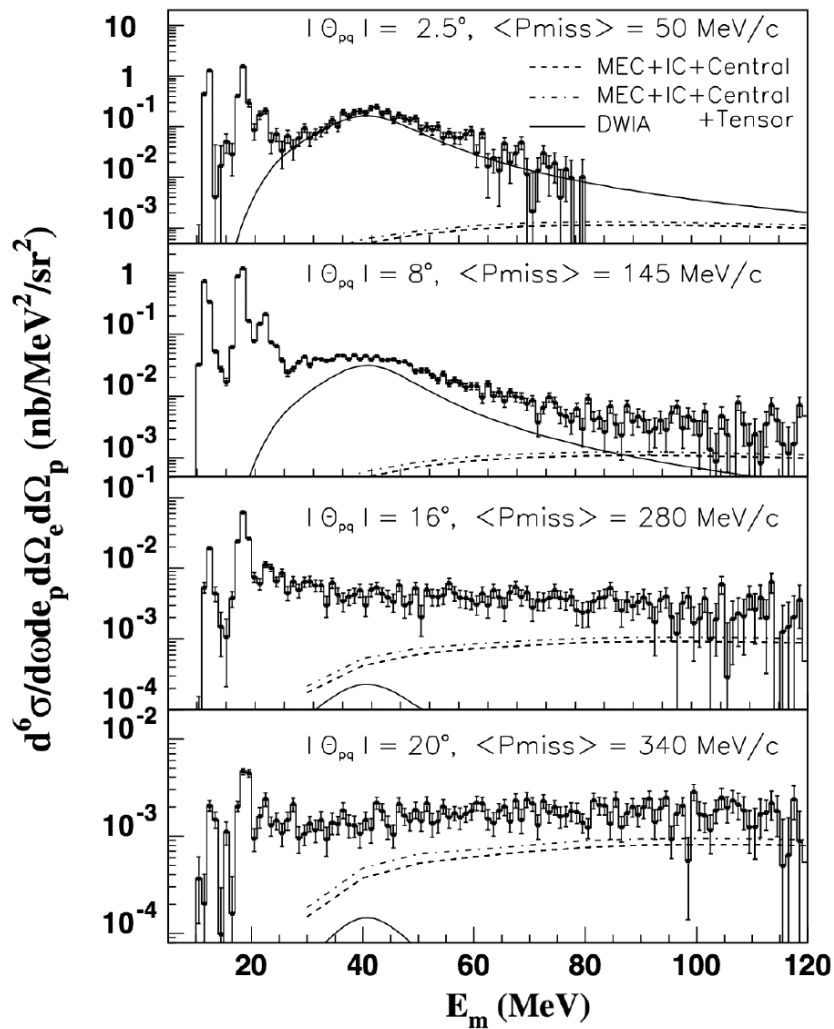
$$|nljj_z\rangle$$



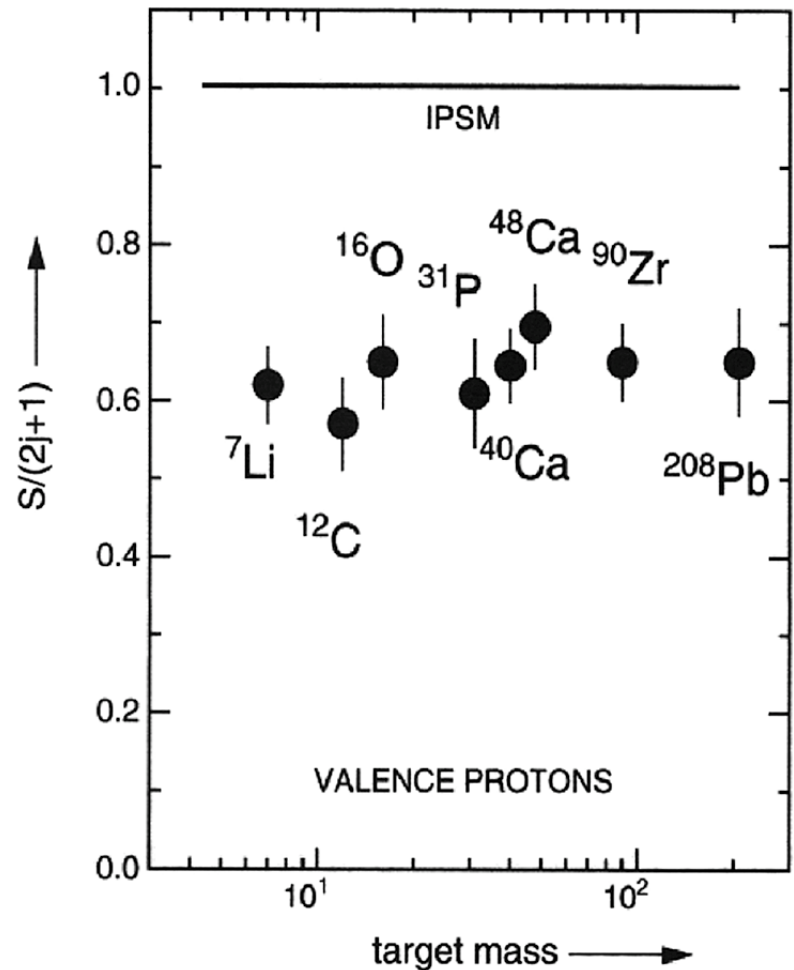
Evolution of neutron SPE from $N = Z$ to $N/Z \gg 1$



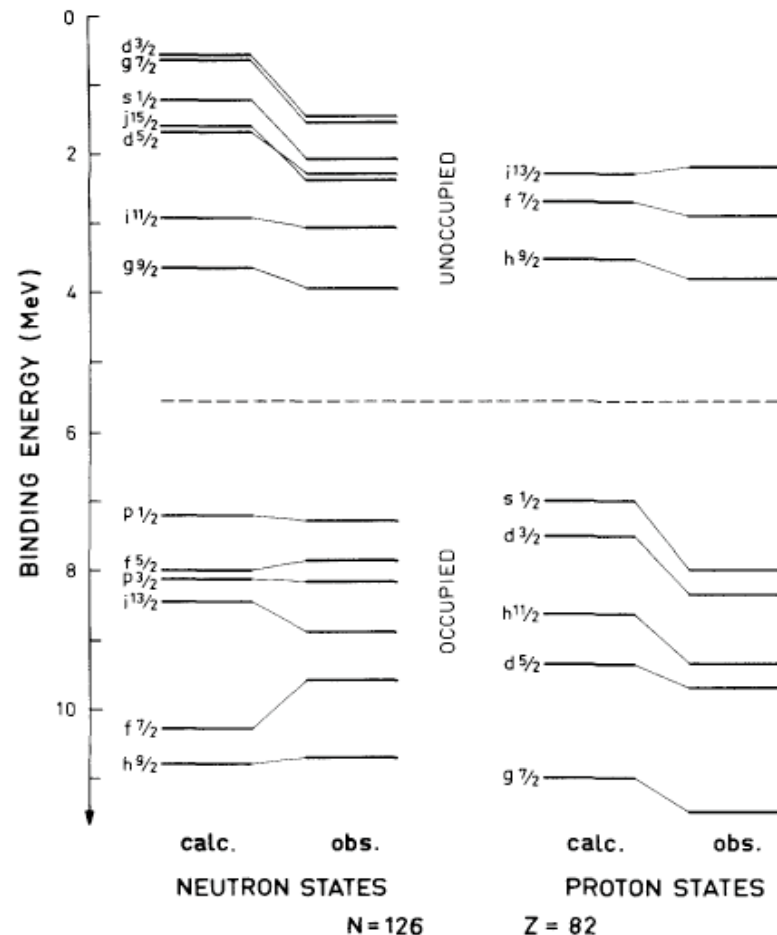
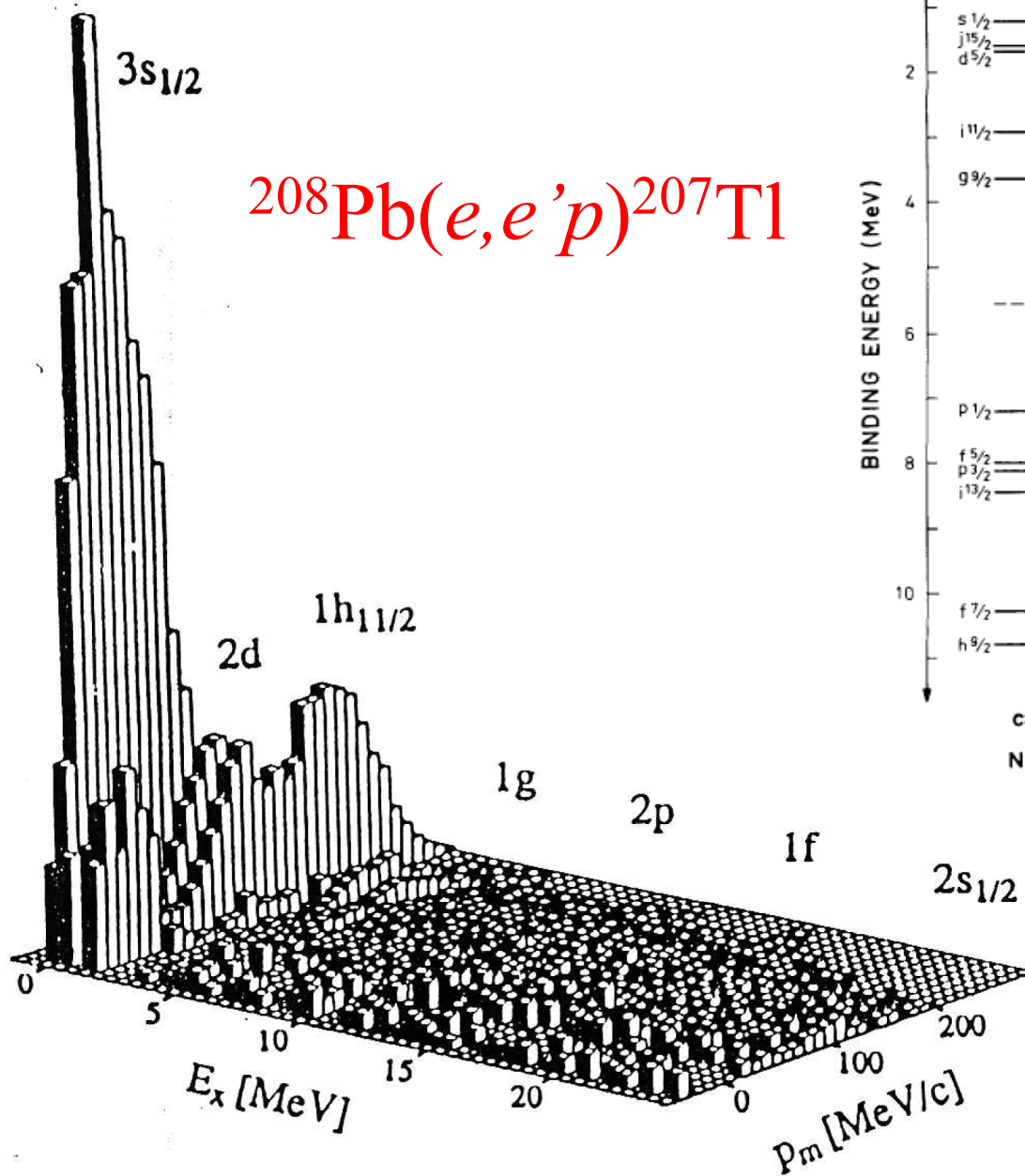
The picture shows schematically the evolution of SPE from a Woods–Saxon (WS) to a harmonic oscillator type (HO) potential when progressing from $N = Z$ towards $N \gg Z$ as indicated for the $l = 4$ and $l = 5$ orbitals.



The $O(ee'p)$ cross section plotted vs missing energy at $Q^2 = 0.8$ GeV² and $\nu = 0.439$ GeV for different angles θ_{pq} between the proton spectrometer and $\mathbf{q}$.

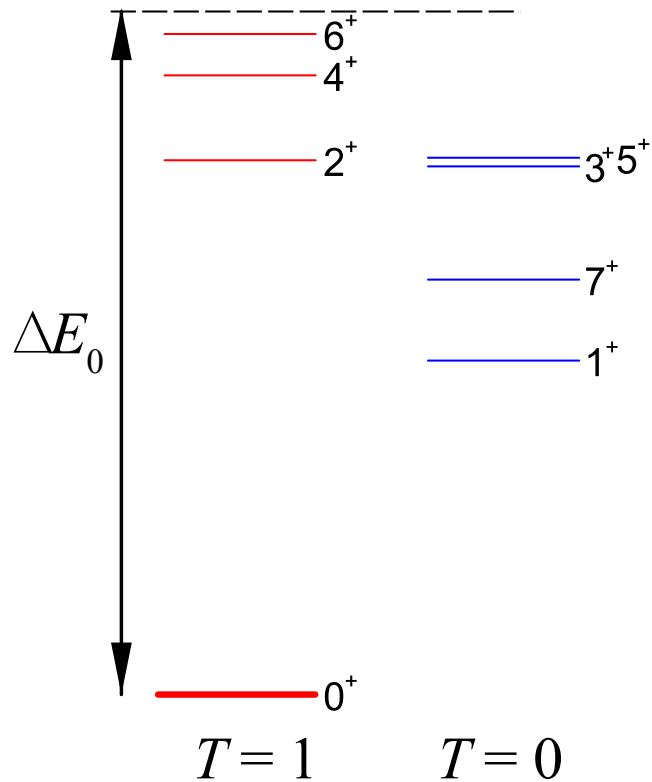


The fractional spectroscopic factors (the ratio of measured cross sections to those calculated with the independent particle shell model) for valence nucleon knockout ($ee'p$).



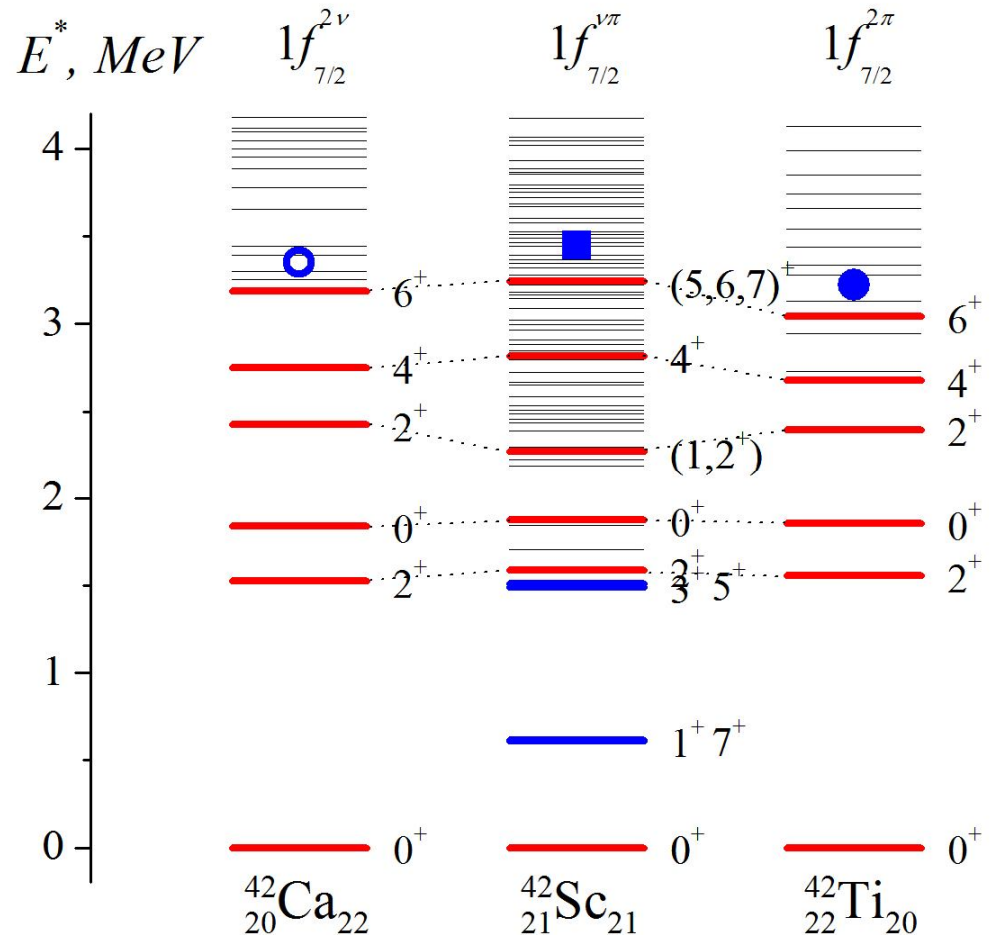
Мультиплет основного состояния

$$1f_{7/2}^{v\pi}$$



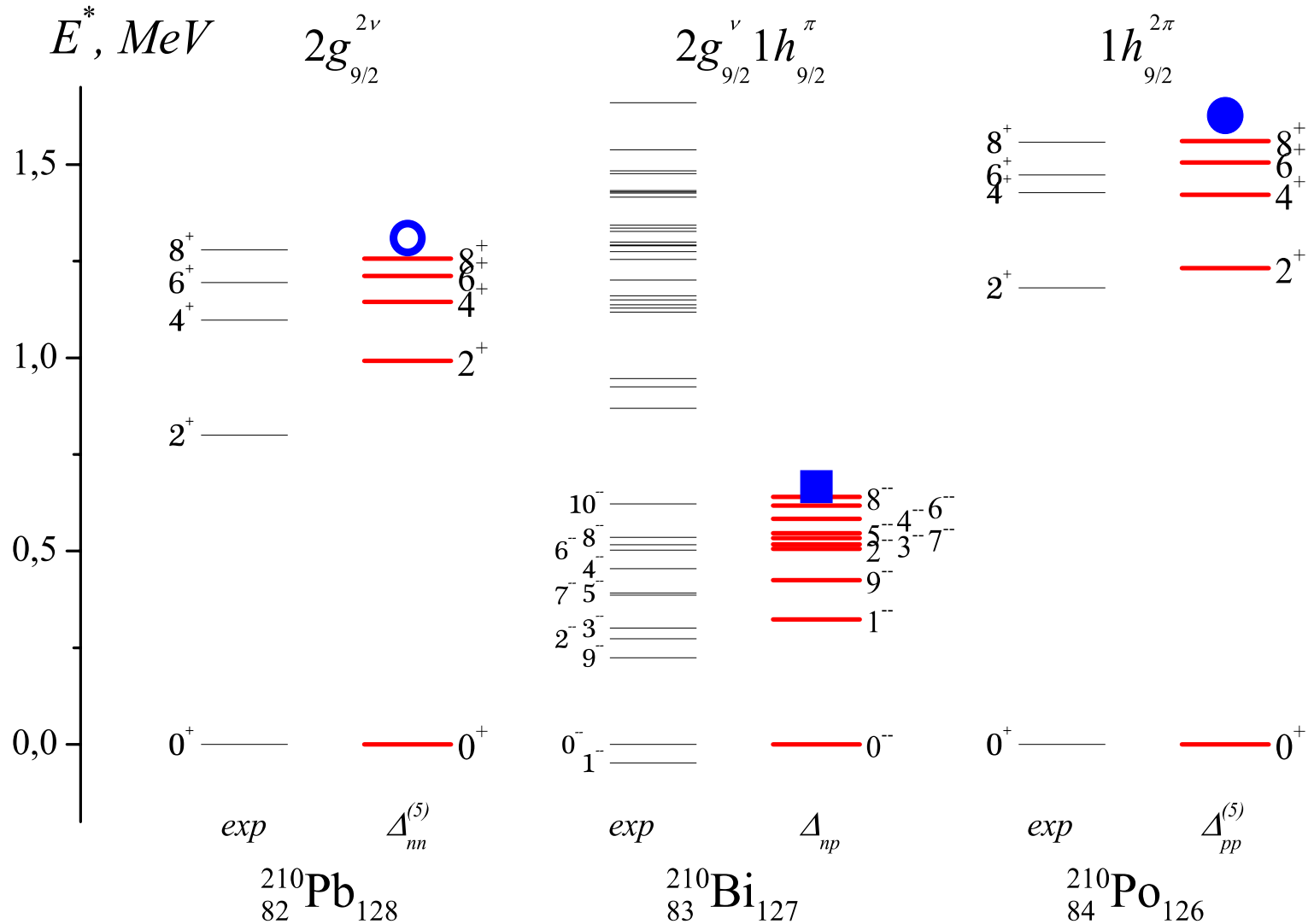
Мультиплет основного состояния двух нуклонов в $1f_{7/2}$.
Расчет в приближении δ -сил

Изобар-аналоговые состояния
 $A = 42$



Мультиплет основного состояния

A = 210. Pb – Bi – Po



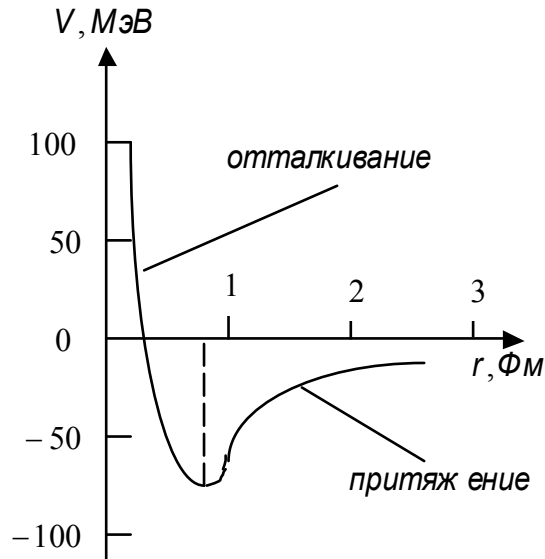
Фундаментальный вопрос в ядерной физике:

Почему оболочечная модель ядра успешно объясняет большое число свойств атомных ядер, несмотря на то, что существует сильное короткодействующее взаимодействие между нуклонами.

$$r_N \approx 0,85 \text{ фм}$$

$$d \approx 1,5 \text{ фм}$$

1932 г. NN - взаимодействие



Радиальная зависимость
нуклон-нуклонного потенциала

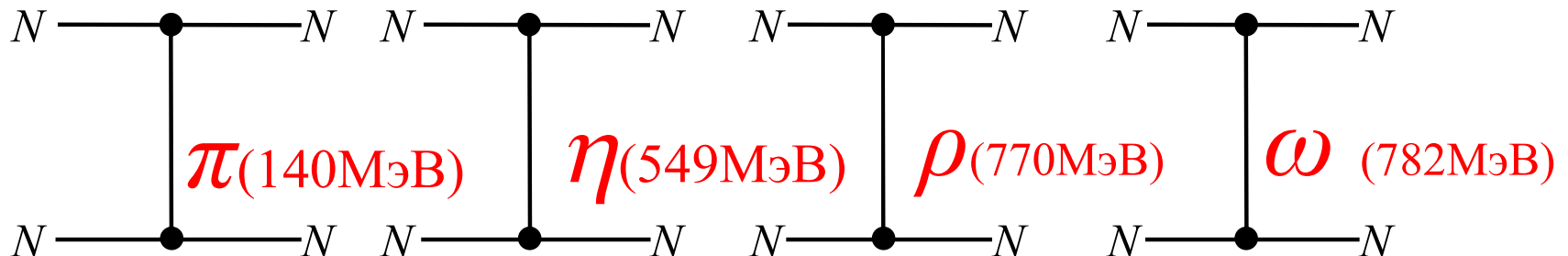
Потенциал, создаваемый облаком
испускаемых нуклоном мезонов,
носит название **потенциала Юкавы**

$$V(r) = g_N \frac{e^{-\frac{r}{a}}}{r}$$

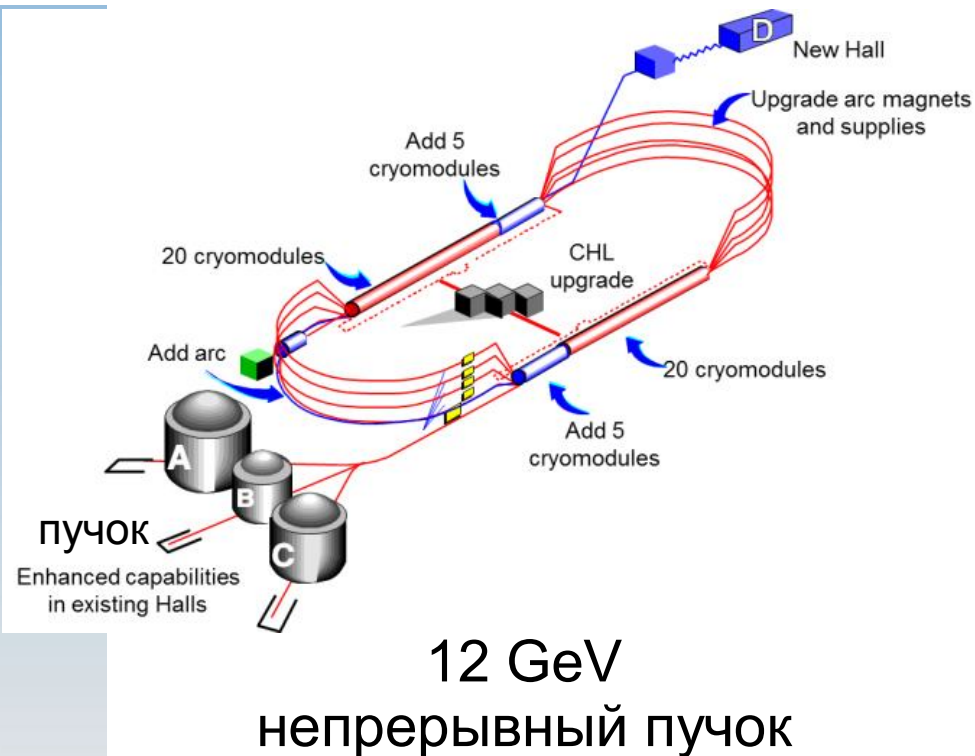
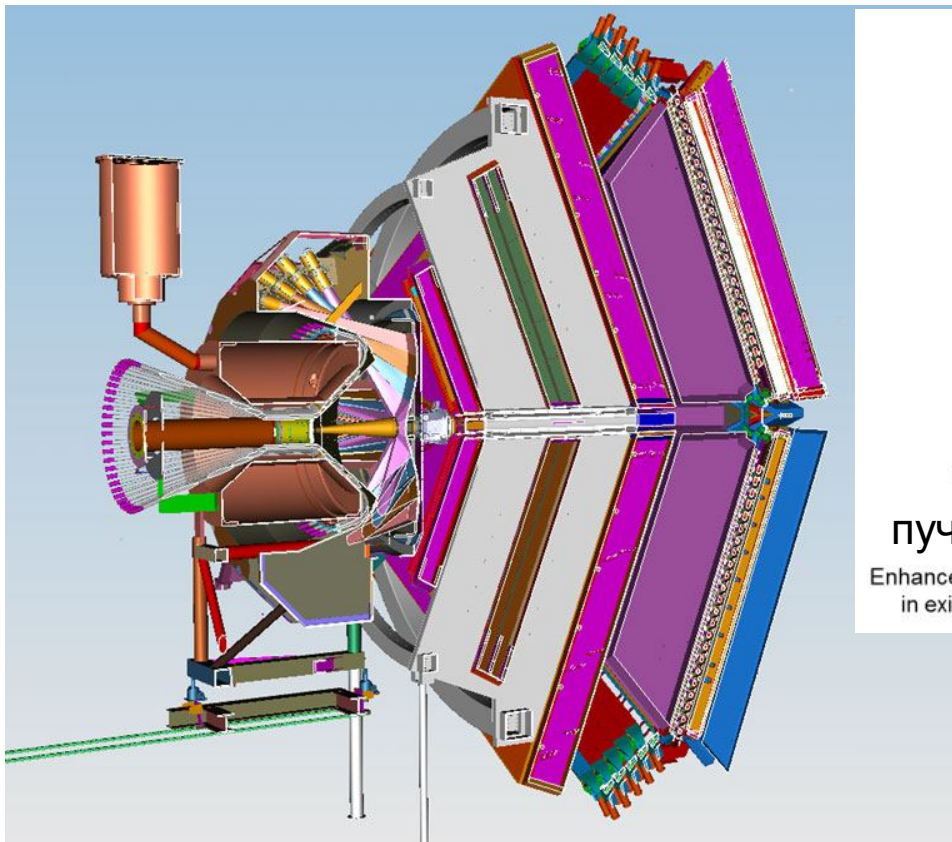
$$a = \frac{\hbar}{mc}$$



Хидэки Юкава
1907 - 1981

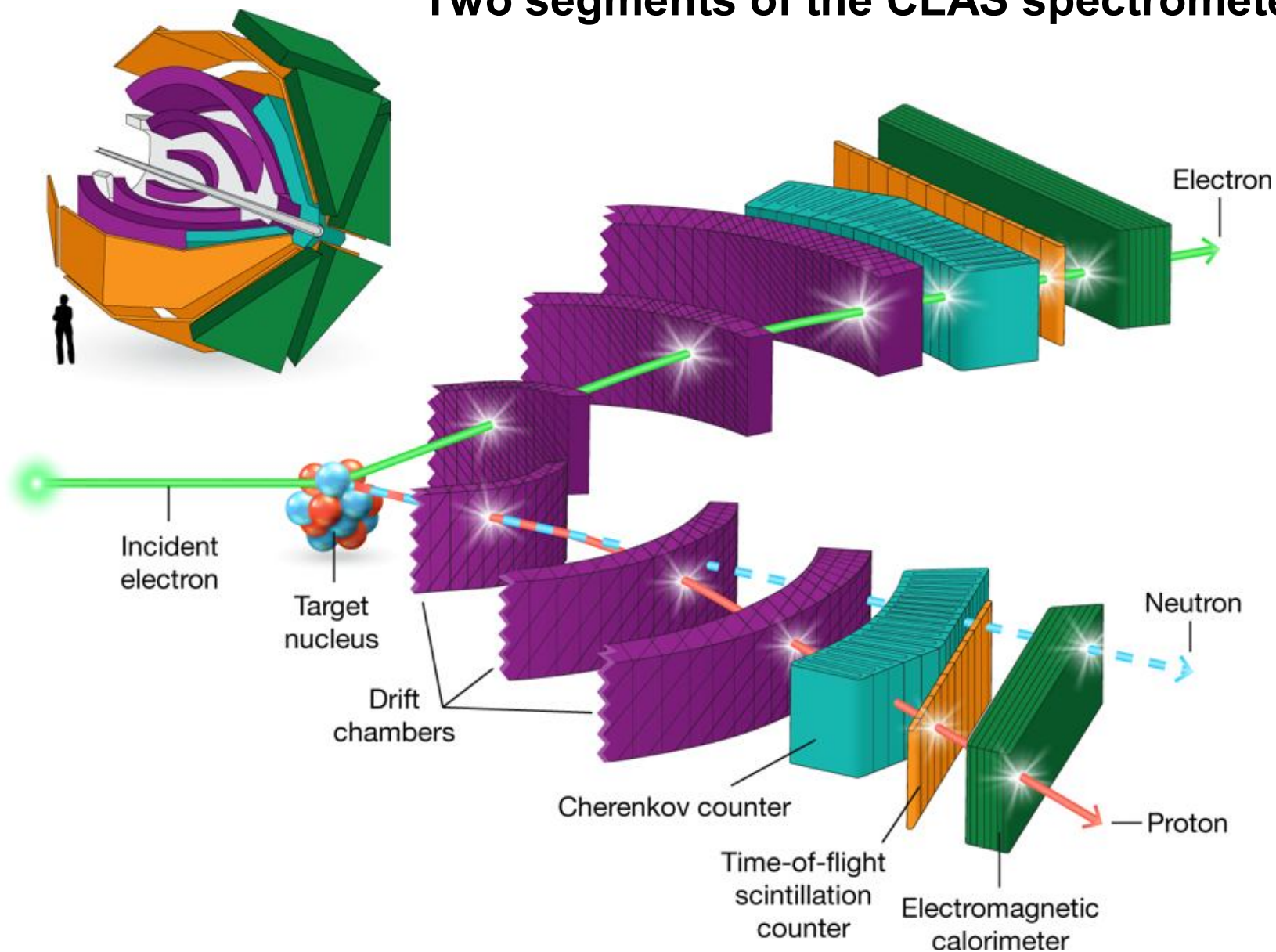


ДЕТЕКТОР CLAS12 В JLAB



Магнитный спектрометр широкой апертуры
Максимальная светимость - $1 \times 10^{36} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Two segments of the CLAS spectrometer

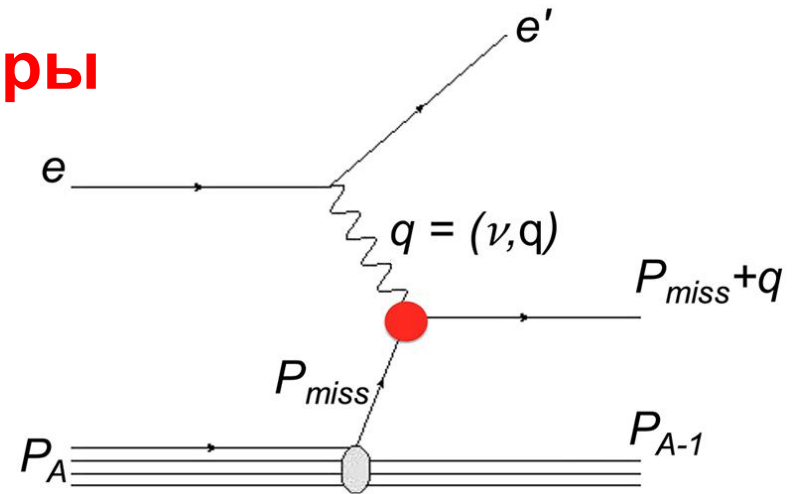


CLAS (1998-2012) → CLAS12 (2017)

	CLAS	CLAS12
Энергия	6 ГэВ	12 ГэВ
Светимость	$1 \times 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$1 \times 10^{36} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Диапазон детектирования частиц по углу θ	$10^\circ - 145^\circ$	$5^\circ - 125^\circ$ и $2.5^\circ - 4.5^\circ$ для электронов

Спектроскопические факторы

Реакция $A(e, e'p)$ в
плосковолновом импульсном
приближении (PWIA).



$$\frac{d\sigma}{d\nu d\Omega_e dE_{miss} d\Omega_p} = K \sigma_{ep} S(E_{miss}, \mathbf{p}_{miss})$$

$K = E_p p_p / (2\pi)^3$ -- кинематический фактор

E_p, p_p — энергия и импульс вылетающего протона

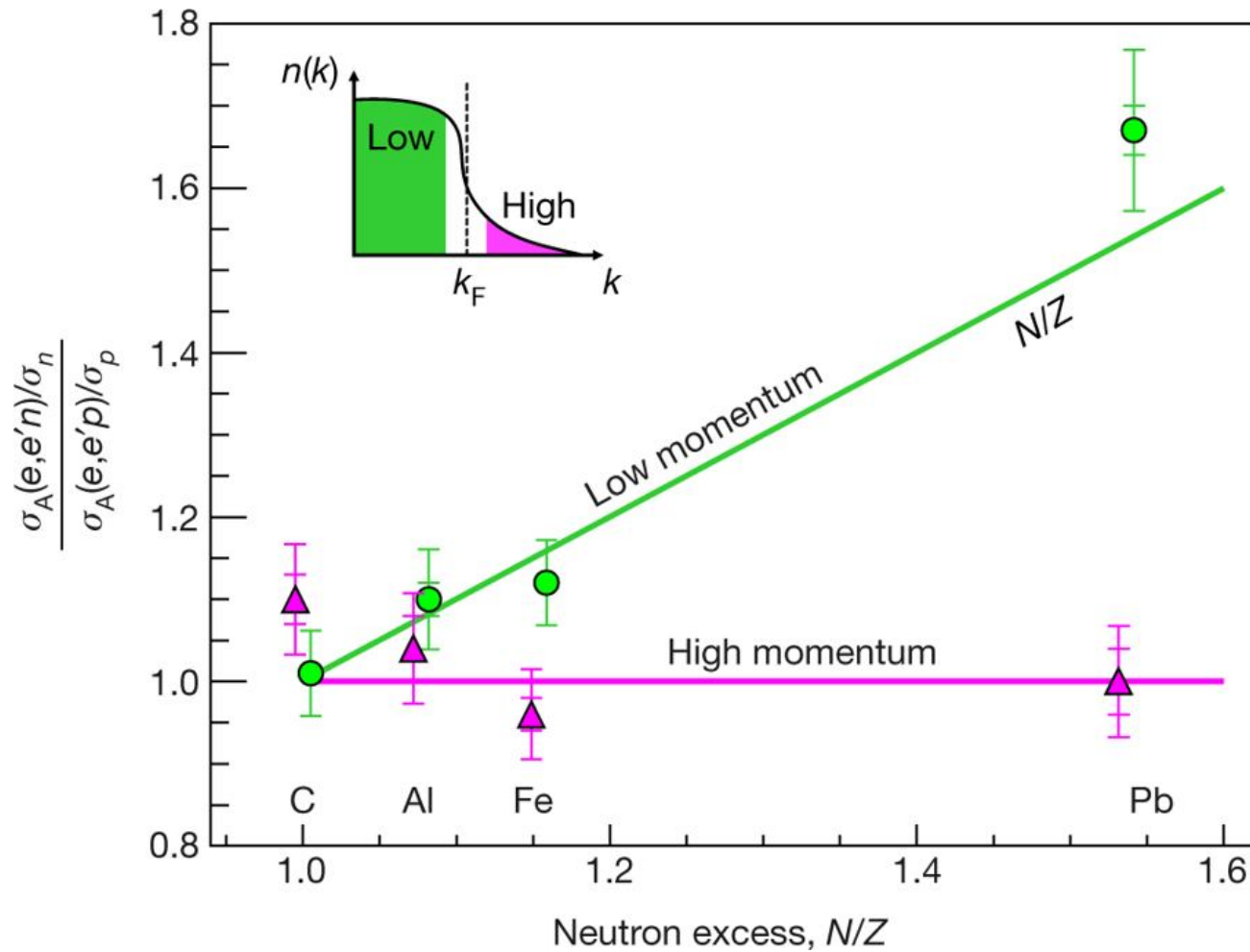
σ_{ep} — сечение рассеяния электрона на связанном протоне

$S(E, \mathbf{p})$ — спектральная функция

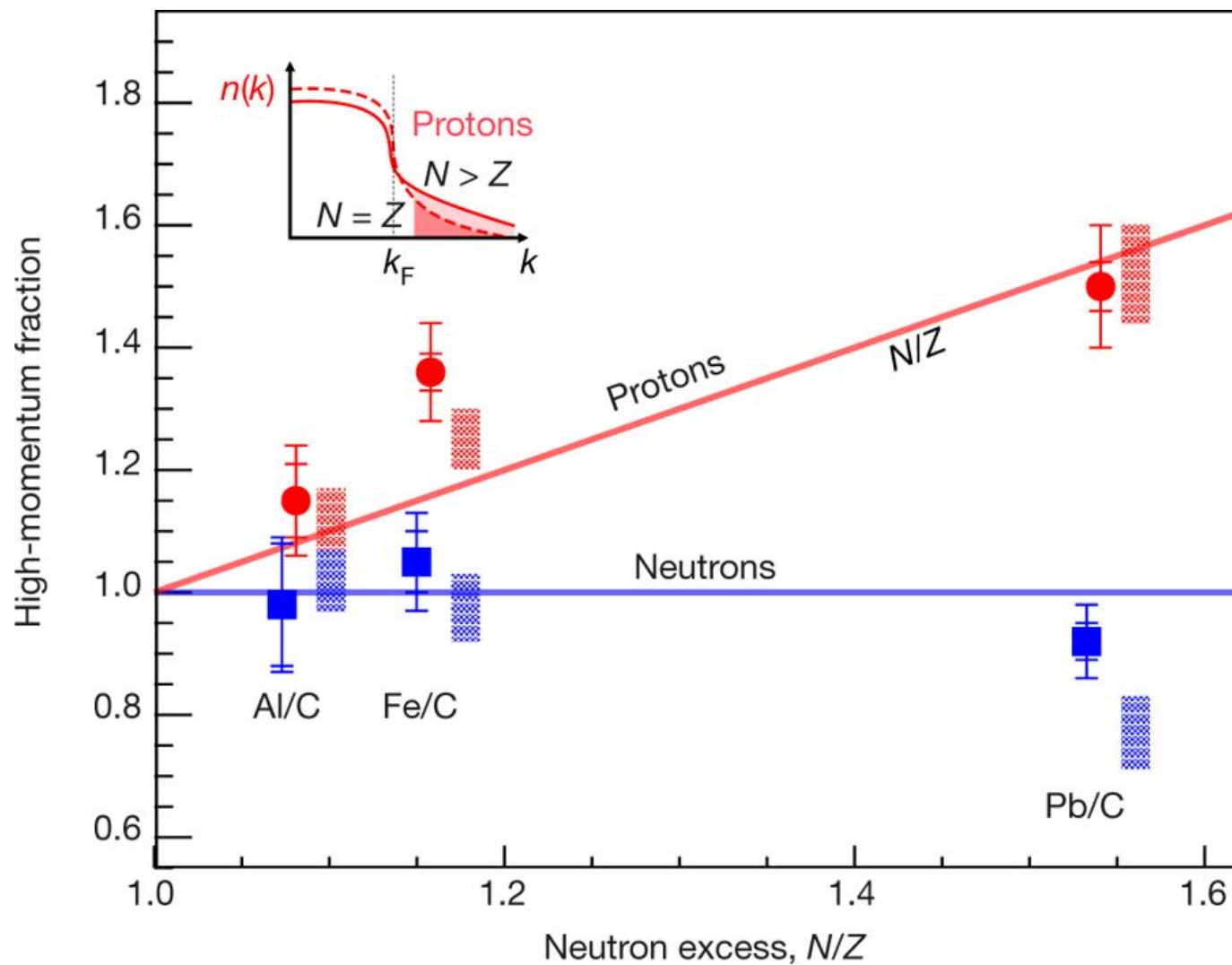
$$\mathbf{p}_{miss} = \mathbf{q} - \mathbf{p}_p$$

$$E_{miss} = \nu - T_p - T_{A-1}$$

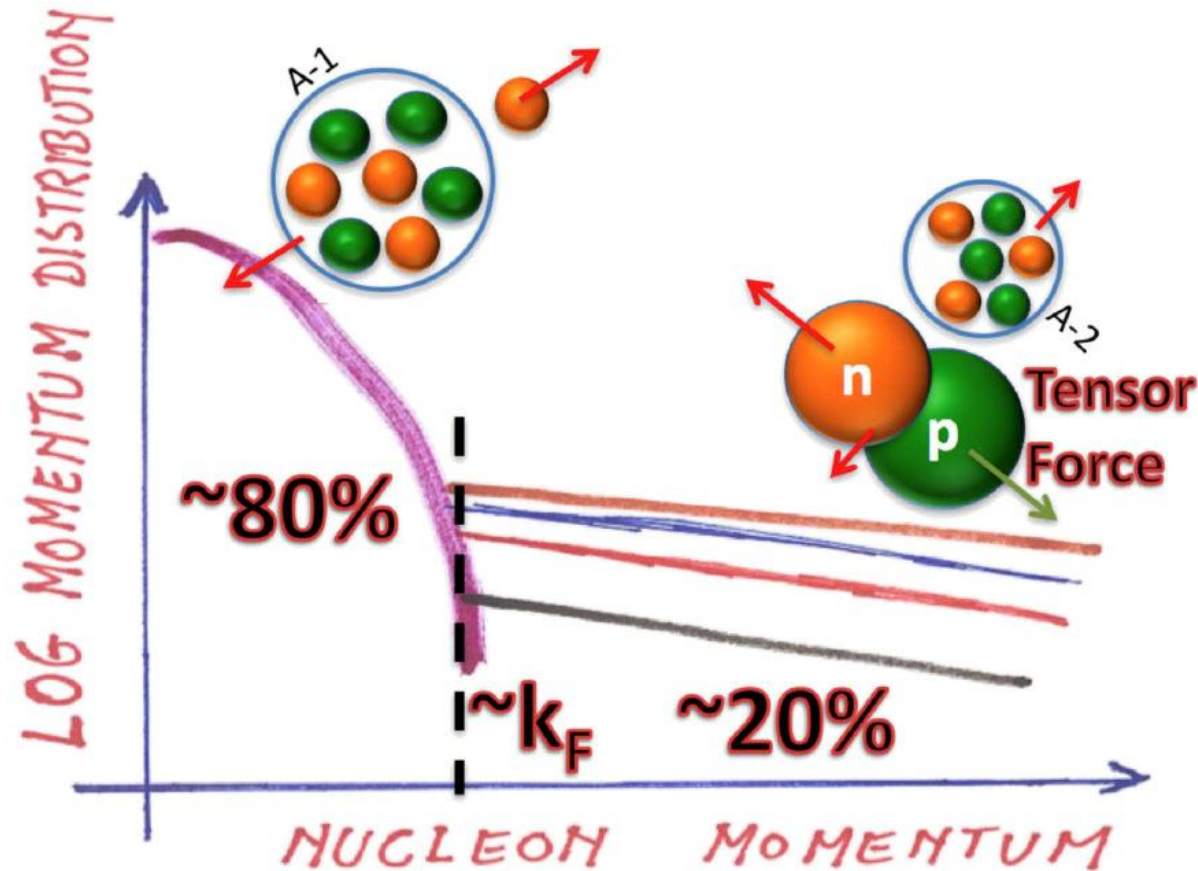
Relative abundances of high- and low-initial-momentum neutrons and protons



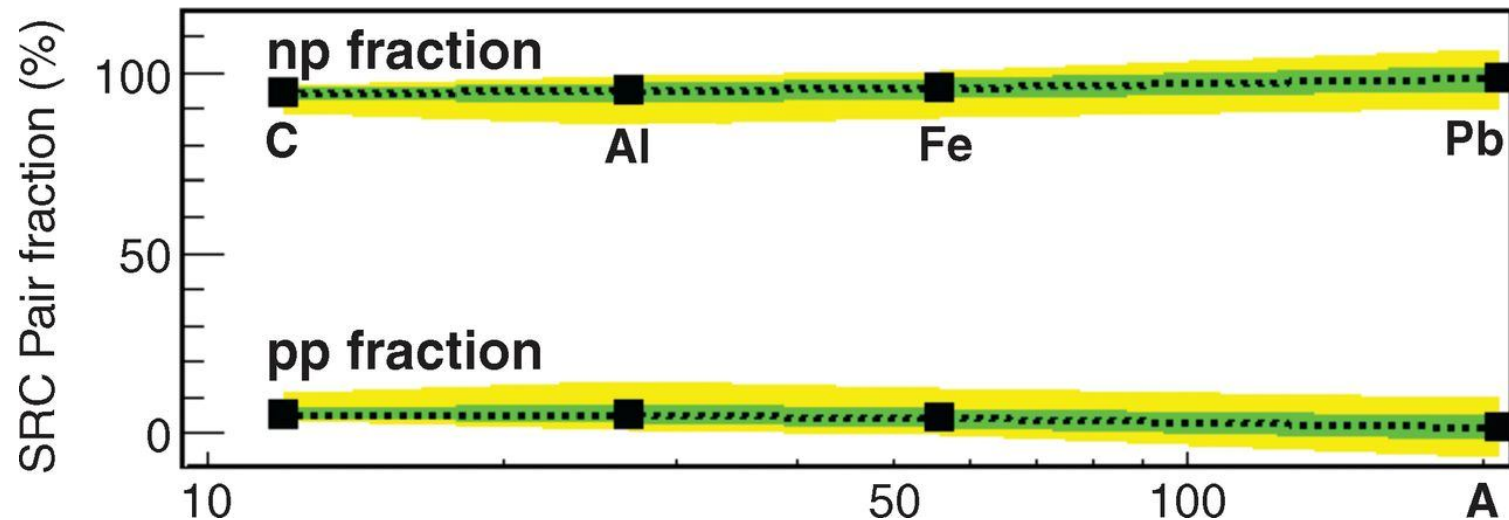
Relative high-momentum fractions for neutrons and protons



Импульсное распределение нуклонов в ядре

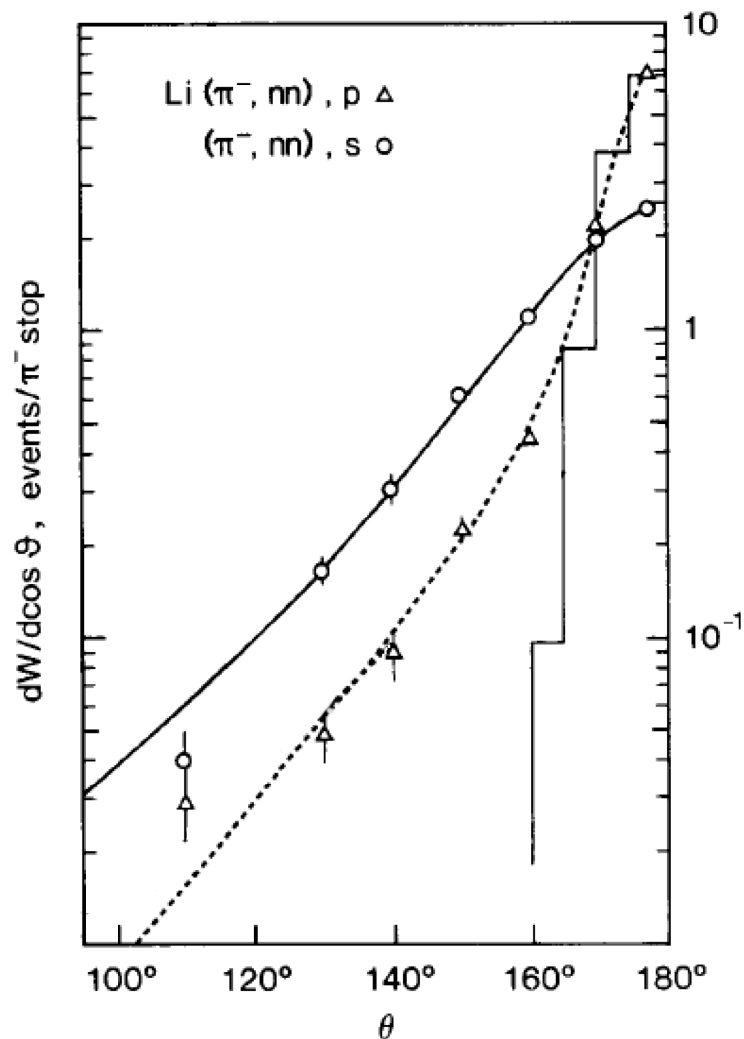


При $k < k_F$ импульс отдельного нуклона сбалансирован остальными $A-1$ нуклонами и описывается в рамках моделей среднего поля.
При $k > k_F$ нуклон принадлежит pn -SRC паре и его момент сбалансирован моментом второго нуклона



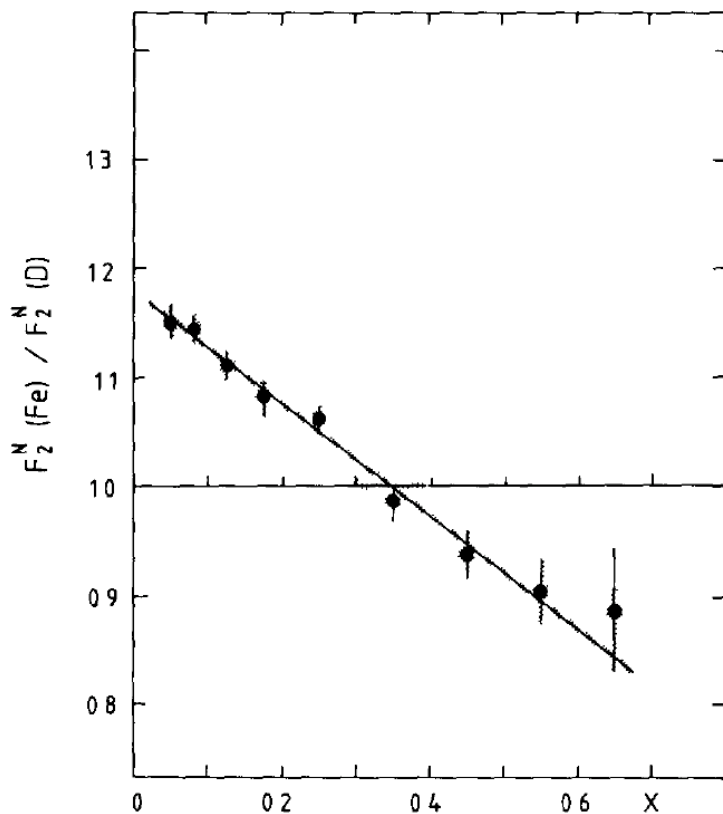
The extracted fractions of np (top) and pp (bottom) SRC pairs (excluding nn pairs) derived from $A(e,e'p)$ and $A(e,e'pp)$ measurements on a range of nuclei.

Распределение по углу разлета двух нейтронов при поглощении остановившегося π^- -мезона np -парой в ядре ${}^6\text{Li}$.

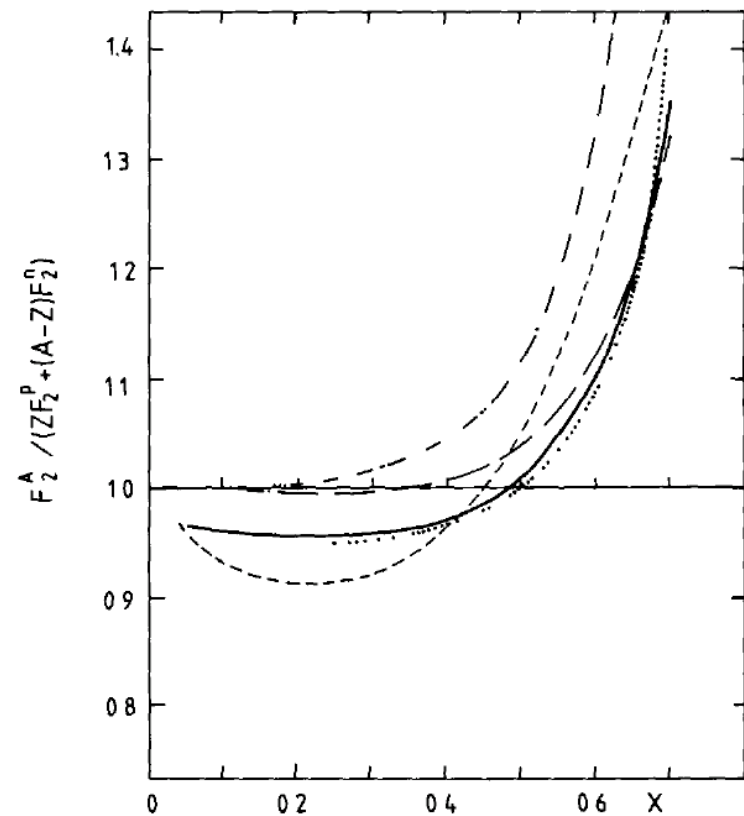


Треугольники – поглощение внешней (находящейся в $1p$ -состоянии) np -парой, кружки – случай, когда один из поглощающих пион нуклонов находится в $1p$, а другой – в $1s$ -состоянии. Отклонения от угла 180° характеризуют импульсное распределение нуклонов. Видно, что импульс $1s$ -нуклона в среднем значительно больше.

Гистограмма -- расчеты с гауссовским импульсным распределением дейтронного кластера. Ширина распределения определена из данных по квазиупругому выбиванию дейтронов из ${}^6\text{Li}$. Данная модель сильно занижает высокоимпульсную часть распределения.



ЕМС-эффект впервые наблюдался в CERN около 35 лет назад в глубоко-неупругом рассеянии мюонов на ядрах. На рисунке показано отношение структурных функций нуклона в ядрах железа и дейтерия как функция фейнмановской переменной. Видно, что структура нуклона модифицируется в сложном ядре по сравнению с «почти свободным» нуклоном в дейтроне.



Отличие отношения от единицы не может быть объяснено одночастичным фермиевским движением нуклона в ядре. На рисунке показаны расчеты отношения структурных функций в различных моделях фермиевского движения.

J.J.Aubert et al. Phys.Lett. B123(1983)275

ЕМС-эффект и короткодействующие корреляции (SRC) нуклонов

- ◆ Имеется значительное число свидетельств существования SRC
- ◆ В рамках стандартной ядерной физики нельзя учесть ЕМС-эффект
- ◆ Для учета ЕМС-эффекта модель должна включать модификацию нуклонов. Возможны разные варианты модификаций:
 - ◆ Преимущественно нуклоны, находящиеся в среднем поле, модифицируются за счет взаимодействий, не зависящих от импульса
 - ◆ Преимущественно нуклоны принадлежат SRC парам
 - ◆ Оба варианта модификации
- ◆ Существует феноменологическая связь между величиной ЕМС-эффекта и вероятностью того, что нуклон принадлежит нуклонной SRC паре
- ◆ В отличие от статических моделей ЕМС, включение SRC подразумевает временную модификацию нуклона только в момент его флуктуаций в SRC паре
- ◆ Оба эффекта (ЕМС и SRC) определяются сильно-виртуальными нуклонами
- ◆ Сильно-виртуальные нуклоны включают не-нуклонные конфигурации. Интерференция между нуклонными и не-нуклонными компонентами приводит к ЕМС-эффекту.
- ◆ Модифицированные нуклоны содержат небольшую примесь барионов, не являющихся нуклонами. Амплитуды для таких барионов существуют в короткодействующих корреляциях и являются источником ЕМС-эффекта

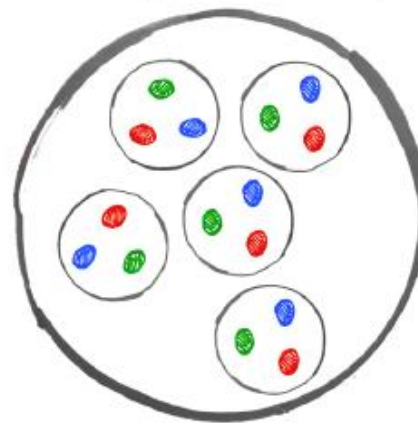
Данные результаты показывают, что высоко-импульсные нуклоны и коротко-действующие двухчастичные токи универсальны и не зависят от оболочечной модели. Это заключение указывает на то, что ядра необходимо рассматривать в подходе, зависящем от масштаба: структура ядер при больших значениях импульса и на малых расстояниях должна описываться учитывая физику двухчастичных взаимодействий, которые отсутствуют в оболочечной модели независимых частиц, использующей одночастичные операторы.

Эволюция представлений ядерной физики

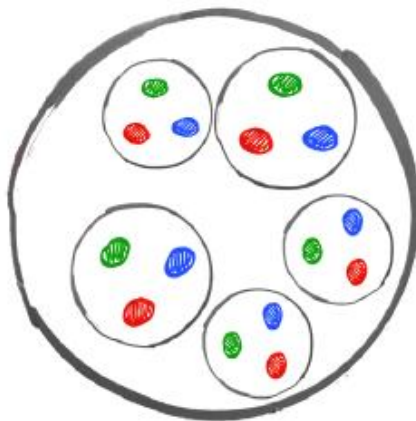
1947 – Independent Nucleons



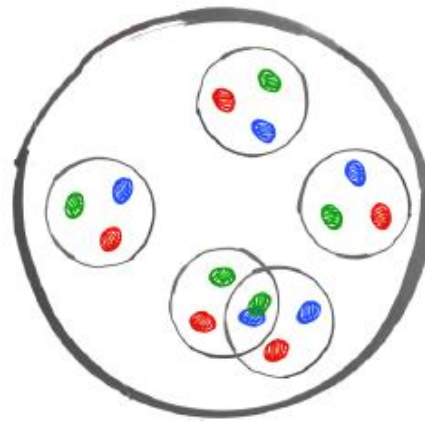
1970 – Independent 3-quark Nucleons



2017 – Modified Nucleons



Or



Существует несколько фундаментальных вопросов в ядерной физике, остающихся без ответа:

- 1 Действительно ли ядра состоят только из нуклонов и мезонов?
- 2 Как из КХД, теории кварков и глюонов, вытекает существование атомных ядер?
- 3 Насколько партонный состав атомного ядра отличается от N свободных нейтронов плюс Z свободных протонов?

Заключение

Получено доказательство, что наличие высоко-импульсных нуклонов связанных в SRC пары, приводит к изменению кваркового распределения внутри нуклонов, связанных в атомном ядре. EMC эффект может быть результатом двухчастичных короткодействующих взаимодействий, проявляющихся как флуктуации высокой плотности нуклонных пар в ядре, в результате которых внутренняя структура нуклонов может изменяться.

В основном протоны в нейтронно-избыточных ядрах принадлежат SRC парам и тем самым в среднем модифицированы сильнее чем нейтроны. Наблюдение такого усиленного изменения структуры протонов в ядрах с нейтронным избытком может дать новую информацию о пока неизвестной природе изменений функций распределения нуклонов в ядре.

Доминирование *np* SRC пар в тяжелых ядрах имеет большое значение для многих областей физики частиц и атомного ядра:

- корреляционные функции
- скорость двойного бета-распада в атомных ядрах,
- природа отталкивающего кора в NN-взаимодействии
- взаимодействие нейтрино и ядра

Поиск новой физики за рамками Стандартной Модели требует детального описания основного и возбужденных состояний атомных ядер.

Спасибо за внимание!