

**Нуклон - нуклонное взаимодействие и
свойства ядерных сил.**

Открытие атомного ядра

- **1887 г.**, Д. Томсон, изучая характеристики газового разряда, открыл **электрон**.
- **1904 г.**, Д. Томсон, атом - нейтральная система - из заряженного шара с зарядом $+Ze$, внутри Z отрицательно заряженных электронов. Размер атома $\sim 10^{-8}$ см.
- **1911 г.**, Э. Резерфорд: положительно заряженное атомное ядро с радиусом $< 10^{-12}$ см и электронная оболочка с радиусом $\sim 10^{-8}$ см. 99.98% массы в ядре.
- **1919 г.**, Э. Резерфорд, первая ядерная реакция, открытие протона.
- **1932 г.**, Д. Чедвик, открытие нейтрона.
- **1932 г.**, Д. Иваненко и В. Гейзенберг: протон-нейтронная модель ядра.

Что уже понятно?

- Атомы состоят из ядер и электронных оболочек.
- Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов.
- A – массовое число – суммарное число протонов и нейтронов в ядре,
- Z – заряд ядра – число протонов в ядре,
- число электронов = Z (положение в таблице Д.И. Менделеева),
- обозначения: ^{48}Ca , ^{257}Fm , ^{272}Rg , ^{277}Cn ; $^{294}118$.

Характеристики протона, нейтрона и электрона

| Характеристика | Протон | Нейтрон | Электрон |
|---|--------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Масса mc^2 , МэВ | 938.272 | 939.565 | 0.511 |
| Электрический заряд (в единицах элементарного заряда) | +1 | 0 | -1 |
| Спин (в единицах \hbar) | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ |
| Чётность | +1 | +1 | |
| Статистика | Ферми-Дирака | | |
| Магнитный момент (для нуклонов - в ядерных магнетонах, для электрона - в магнетонах Бора) | +2.79 | -1.91 | +1.001 |
| Время жизни | $> 10^{32}$ лет | 885.7 ± 0.8 с | $> 4.6 \cdot 10^{26}$ лет |
| Тип распада | | $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ | |

- **Нейтрон нестабилен!**
- **Атомные ядра существуют!**

Периодическая таблица элементов

Д.И. Менделеева (2012)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| IA | | | | | | | | | | | | | | | | | | VIII A | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Водород ¹ ₁ H 1,00794 Hydrogen Литий ³ ₃ Li 6,941 Lithium Натрий ¹¹ ₁₁ Na 22,989768 Sodium Калий ¹⁹ ₁₉ K 39,0983 Potassium Рубидий ³⁷ ₃₇ Rb 85,4678 Rubidium Цезий ⁵⁵ ₅₅ Cs 132,90543 Cesium Франций ⁸⁷ ₈₇ Fr [223] Francium | | | | | | | | | | | | | | | | | | Гелий ² ₂ He 4,0026 Helium Неон ¹⁰ ₁₀ Ne 20,1797 Neon Аргон ¹⁸ ₁₈ Ar 39,948 Argon Криптон ³⁶ ₃₆ Kr 83,80 Krypton Xenon ⁵⁴ ₅₄ Xe 131,29 Xenon Радон ⁸⁶ ₈₆ Rn [222] Radon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| IIA | | | | | | | | | | | | | | | | | | IIIA | | IVA | | VA | | VIA | | VIIA | | | | | | | | | | | |
| Бериллий ⁴ ₄ Be 9,01218 Beryllium Магний ¹² ₁₂ Mg 24,3050 Magnesium Стронций ²⁰ ₂₀ Sr 87,62 Strontium Барий ⁵⁶ ₅₆ Ba 137,327 Barium Радий ⁸⁸ ₈₈ Ra [226,025] Radium | | Бор ⁵ ₅ B 10,811 Boron Кремний ¹³ ₁₃ Al 26,981539 Aluminum Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium Индий ⁴⁹ ₄₉ In 114,818 Indium | | Углерод ⁶ ₆ C 12,011 Carbon Кремний ¹⁴ ₁₄ Si 28,0855 Silicon Германий ³² ₃₂ Ge 72,61 Germanium Олово ⁵⁰ ₅₀ Sn 118,710 Tin | | Азот ⁷ ₇ N 14,0067 Nitrogen Фосфор ¹⁵ ₁₅ P 30,97376 Phosphorus Мышьяк ³³ ₃₃ As 74,92159 Arsenic Висмут ⁸³ ₈₃ Bi [208,980] Bismuth | | Кислород ⁸ ₈ O 15,9994 Oxygen Сера ¹⁶ ₁₆ S 32,066 Sulfur Селен ³⁴ ₃₄ Se 78,96 Selenium Теллур ⁵² ₅₂ Te 127,60 Tellurium Полоний ⁸⁴ ₈₄ Po [209] Polonium | | Фтор ⁹ ₉ F 18,9984 Fluorine Хлор ¹⁷ ₁₇ Cl 35,4527 Chlorine Бром ³⁵ ₃₅ Br 79,904 Bromine Иод ⁵³ ₅₃ I 126,90447 Iodine Астат ⁸⁵ ₈₅ At [216] Astatine | | Неон ¹⁰ ₁₀ Ne 20,1797 Neon Аргон ¹⁸ ₁₈ Ar 39,948 Argon Криптон ³⁶ ₃₆ Kr 83,80 Krypton Xenon ⁵⁴ ₅₄ Xe 131,29 Xenon Радон ⁸⁶ ₈₆ Rn [222] Radon | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ванадий ²¹ ₂₁ V 50,9415 Vanadium Хром ²⁴ ₂₄ Cr 51,9961 Chromium Марганец ²⁵ ₂₅ Mn 54,93805 Manganese Железо ²⁶ ₂₆ Fe 55,847 Iron Кобальт ²⁷ ₂₇ Co 58,93320 Cobalt Никель ²⁸ ₂₈ Ni 58,6934 Nickel Медь ²⁹ ₂₉ Cu 63,546 Copper Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc | | | | | | | | | | | | | | | | | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium | | Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | |
| Скандий ²¹ ₂₁ Sc 44,95591 Scandium Титан ²² ₂₂ Ti 47,88 Titanium Vanadium ²³ ₂₃ V 50,9415 Vanadium Хром ²⁴ ₂₄ Cr 51,9961 Chromium Марганец ²⁵ ₂₅ Mn 54,93805 Manganese Железо ²⁶ ₂₆ Fe 55,847 Iron Кобальт ²⁷ ₂₇ Co 58,93320 Cobalt Никель ²⁸ ₂₈ Ni 58,6934 Nickel Медь ²⁹ ₂₉ Cu 63,546 Copper Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc | | | | | | | | | | | | | | | | | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium | | Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | |
| Ниобий ⁴¹ ₄₁ Nb 92,90638 Niobium Молибден ⁴² ₄₂ Mo 95,94 Molybdenum Технеций ⁴³ ₄₃ Tc [98] Technetium Рутений ⁴⁴ ₄₄ Ru 101,07 Ruthenium Родий ⁴⁵ ₄₅ Rh 102,90550 Rhodium Палладий ⁴⁶ ₄₆ Pd 106,42 Palladium Серебро ⁴⁷ ₄₇ Ag 107,8682 Silver Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | | | | | | | | | | | | | | | | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium | | Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | |
| Тантал ⁷³ ₇₃ Ta 180,9479 Tantalum Вольфрам ⁷⁴ ₇₄ W 183,84 Tungsten Рений ⁷⁵ ₇₅ Re 186,207 Rhenium Осмий ⁷⁶ ₇₆ Os 190,23 Osmium Иридий ⁷⁷ ₇₇ Ir 192,22 Iridium Платина ⁷⁸ ₇₈ Pt 195,08 Platinum Золото ⁷⁹ ₇₉ Au 196,96654 Gold Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | | | | | | | | | | | | | | | | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium | | Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | |
| Франций ⁸⁷ ₈₇ Fr [223] Francium Радий ⁸⁸ ₈₈ Ra [226,025] Radium Актиний ⁸⁹ ₈₉ Ac [227] Actinium Радерфордий ¹⁰⁴ ₁₀₄ Rf [261] Rutherfordium Дубний ¹⁰⁵ ₁₀₅ Db [261] Dubnium Сиборгий ¹⁰⁶ ₁₀₆ Sg [266] Seaborgium Борей ¹⁰⁷ ₁₀₇ Bh [262] Bohrium Хассий ¹⁰⁸ ₁₀₈ Hs [265] Hassium Мейтнерий ¹⁰⁹ ₁₀₉ Mt [268] Meitnerium Дармштадтий ¹¹⁰ ₁₁₀ Ds [268] Darmstadtium Рентгений ¹¹¹ ₁₁₁ Rg [269] Roentgenium Коперниций ¹¹² ₁₁₂ Cn [277] Copernicium | | | | | | | | | | | | | | | | | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Галлий ³¹ ₃₁ Ga 69,723 Gallium | | Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium Ртуть ⁸⁰ ₈₀ Hg 200,59 Mercury | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | | Цинк ³⁰ ₃₀ Zn 65,39 Zinc Кадмий ⁴⁸ ₄₈ Cd 112,411 Cadmium | |

Лантаноиды Lanthanides

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|---|--|---|--|--|--|--|--|---|
| Церий ⁵⁸ ₅₈ Ce 140,115 Cerium | Прометий ⁵⁹ ₅₉ Pr 140,90765 Promethium | Неодим ⁶⁰ ₆₀ Nd 144,24 Neodymium | Прометий ⁶¹ ₆₁ Pm [145] Promethium | Самарий ⁶² ₆₂ Sm 150,36 Samarium | Европий ⁶³ ₆₃ Eu 151,965 Europium | Гадолиний ⁶⁴ ₆₄ Gd 157,25 Gadolinium | Тербий ⁶⁵ ₆₅ Tb 158,92534 Terbium | Диспрозий ⁶⁶ ₆₆ Dy 162,50 Dysprosium | Гольмий ⁶⁷ ₆₇ Ho 164,93032 Holmium | Эрбий ⁶⁸ ₆₈ Er 167,26 Erbium | Тулий ⁶⁹ ₆₉ Tm 168,93421 Thulium | Иттербий ⁷⁰ ₇₀ Yb 173,04 Ytterbium | Лютеций ⁷¹ ₇₁ Lu 174,967 Lutetium |
|---|--|--|--|--|---|--|---|--|--|--|--|--|---|

Актиноиды Actinides

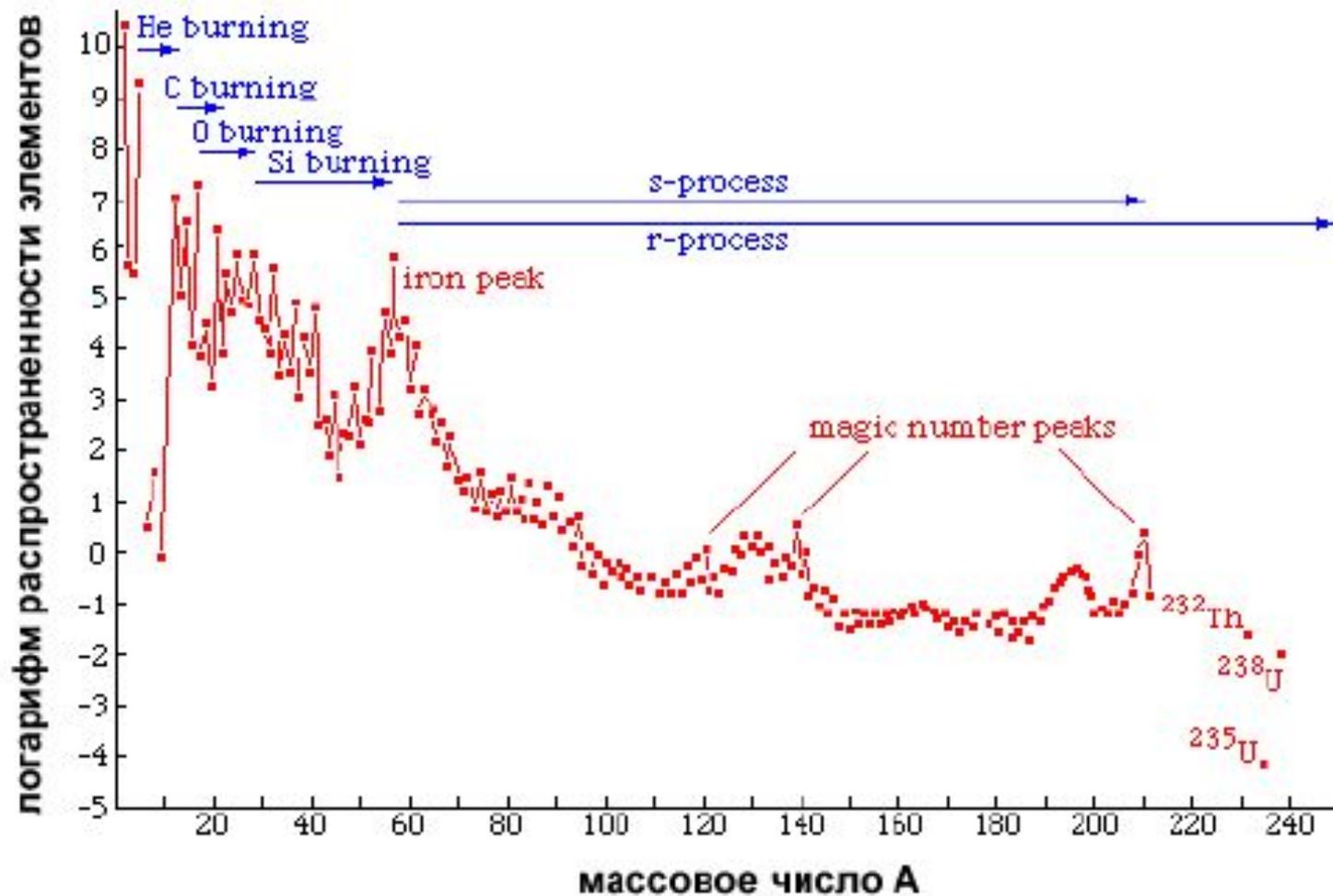
| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Торий ⁹⁰ ₉₀ Th 232,0381 Thorium | Протактиний ⁹¹ ₉₁ Pa 231,03688 Protactinium | Уран ⁹² ₉₂ U 238,0289 Uranium | Нептуний ⁹³ ₉₃ Np [237] Neptunium | Плутоний ⁹⁴ ₉₄ Pu [244] Plutonium | Америций ⁹⁵ ₉₅ Am [243] Americium | Кюрий ⁹⁶ ₉₆ Cm [247] Curium | Бергелий ⁹⁷ ₉₇ Bk [247] Berkelium | Калифорний ⁹⁸ ₉₈ Cf [251] Californium | Эйнштейний ⁹⁹ ₉₉ Es [252] Einsteinium | Фермий ¹⁰⁰ ₁₀₀ Fm [257] Fermium | Менделеев ¹⁰¹ ₁₀₁ Md [258] Mendeleevium | Нобелий ¹⁰² ₁₀₂ No [259] Nobelium | Лоуренсий ¹⁰³ ₁₀₃ Lr [262] Lawrencium |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

| |
|--|
| Водород ¹ ₁ H 1,00794 Hydrogen |
|--|

H - символ
 1,00794 - атомный номер
 1s² - электронная конфигурация
 13,59844 - 1-й потенциал ионизации, эВ
 0,0899 - плотность, г/см³
 -259,34 - температура плавления, °C
 -252,87 - температура кипения, °C

■ s-элементы ■ d-элементы
 ■ p-элементы ■ f-элементы

Распространенность нуклидов во Вселенной



- Распространенность Si принята равной 10^6 .

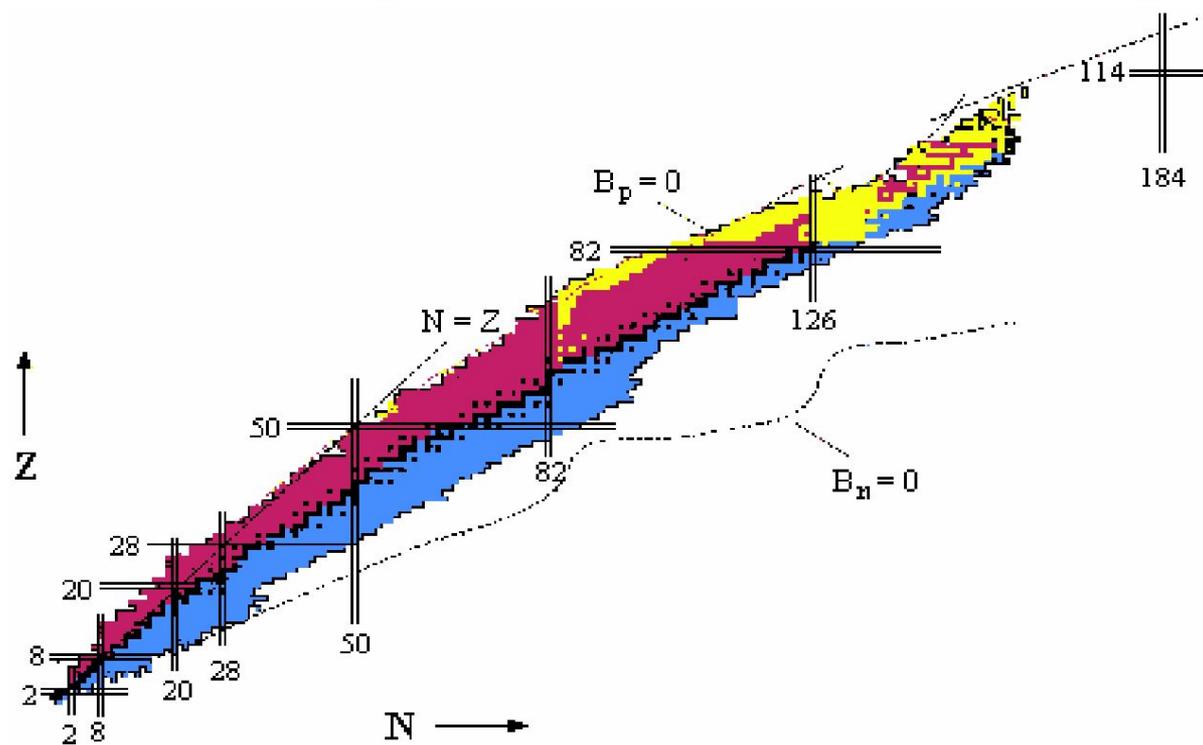
Распространенность элементов

- Элементное вещество Вселенной в основном состоит из водорода – 91% всех атомов.
- Гелий составляет $\approx 9\%$ всех атомов.
- Существует глубокий минимум, соответствующий литию, бериллию и бору.
- Сразу за этим минимумом следует резкий подъём повышенной распространённости углерода и кислорода.
- За кислородным максимумом идёт скачкообразное падение вплоть до скандия ($Z=21$, $A=40$).
- Наблюдается повышенная распространённость элементов в районе железа («железный пик»).
- После $A \approx 60$ уменьшение распространённости происходит более плавно, причём наблюдаются локальные максимумы в районе чисел протонов или нейтронов 50, 82, 126 (магические числа).
- Как правило, распространённость чётно-чётных нуклидов (чётные Z и N) выше, чем соседних нуклидов с нечётным числом нуклонов.

Атомные ядра

- Существуют ли ограничения на массу атомов (A) ?
- Стабильные ядра - известно около 300;
- Что такое стабильные ядра?
- Радиоактивные ядра - известно около 3500;
- Изотопы – ядра с одинаковым Z ;
- Изотоны – ядра с одинаковым N ;
- Изобары – ядра с одинаковым A ;
- Стабильные и долгоживущие ядра образуют узкую полосу, называемую линией или долиной стабильности;
- Где границы $B_n=0$, $B_p=0$?

N-Z диаграмма атомных ядер

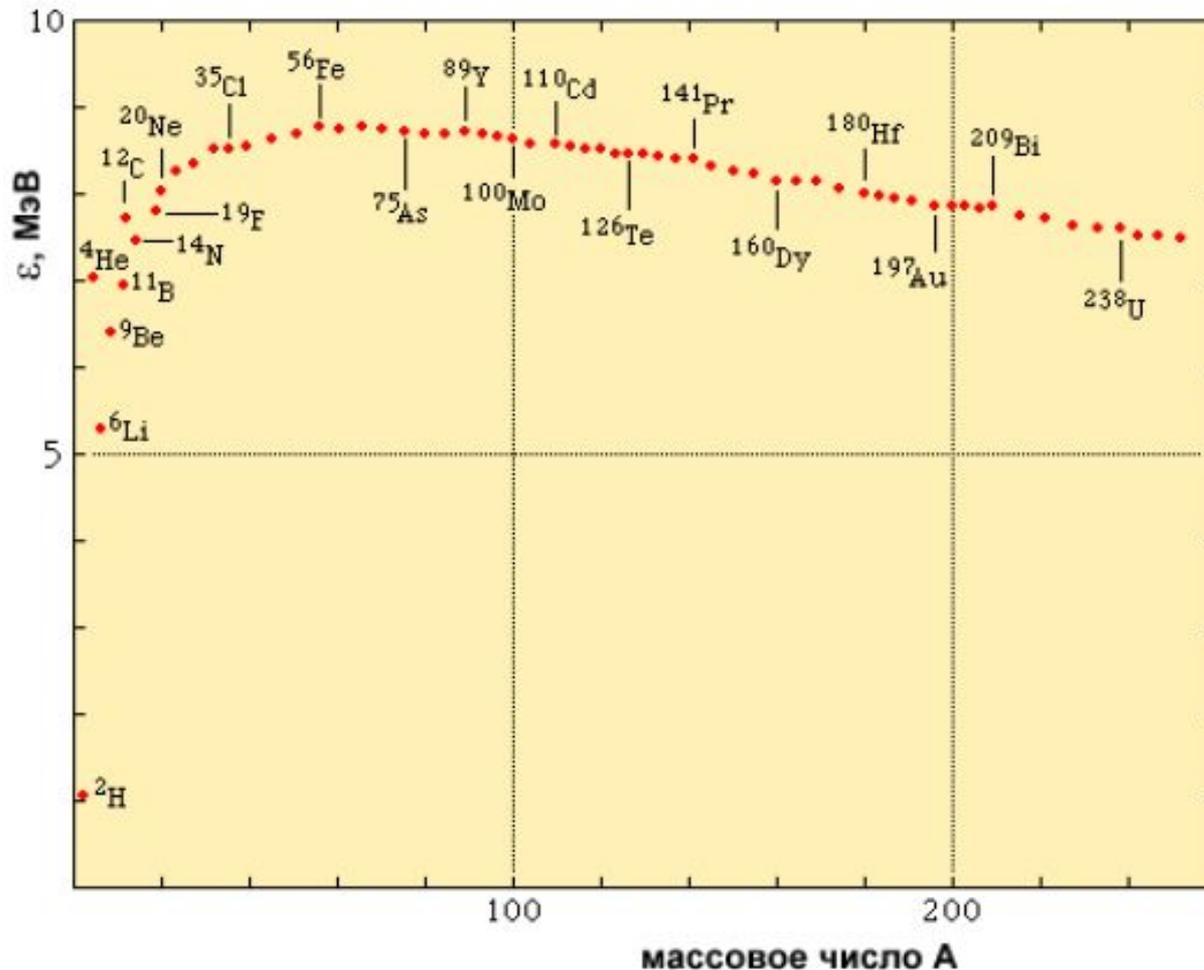


Каждое атомное ядро, имеющее Z протонов и N нейтронов, занимает определенное положение на N-Z диаграмме атомных ядер. Стабильные ядра, образующие узкую полосу, показаны тёмным цветом. Известно порядка 300 стабильных ядер. Красным цветом показаны β^+ -радиоактивные ядра, синим — β^- -радиоактивные ядра, желтым — α -радиоактивные ядра. Известно около 3500 радиоактивных ядер. Это только часть радиоактивных ядер. Всего их может быть порядка 7000.

Что уже понятно?

- Ядра существуют → существуют ядерные силы;
- Ядерные силы – силы притяжения и отталкивания.
- Ядра очень маленькие → ядерные силы имеют маленький радиус действия $<10^{-12}$ см.
- Электроны не падают в ядро → ядерные силы не действуют на электроны.

Удельная энергия связи ядра $\varepsilon(A, Z)$



- $\varepsilon = \Delta W/A \approx 8 \text{ МэВ} \rightarrow$ большая интенсивность в $> 10^2$ больше, чем кулоновское взаимодействие.
- $\Delta W \sim A \rightarrow$ насыщение ядерных сил.

Атомная единица массы

- Атомная единица массы (а.е.м.) равна $1/12$ массы атома углерода ^{12}C .
- $1 \text{ а.е.м.} = 1,658210 \text{ г} = 931,44 \text{ МэВ}$.

Дефект массы

- Разность Δ между массой ядра в атомных единицах массы и его массовым числом называется дефектом массы:

$$\Delta = \frac{M}{\frac{1}{12}M(^{12}\text{C})} - A$$

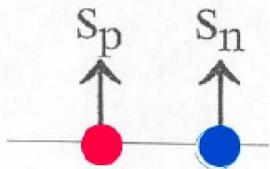
Простейшее ядро - дейтрон $D \equiv {}^2_1\text{H}$

- Дейтрон — связанная система, состоящая из одного протона и одного нейтрона.
- Энергия связи дейтрона $W = \varepsilon_p = \varepsilon_n = 2,2 \text{ МэВ}$
- Спин J , чётность P дейтрона $J^P = 1^+$
- Магнитный момент дейтрона $\mu = 0,86 \mu_{\text{яд}}$
- Квадрупольный момент дейтрона $Q_0 = +0,28 \text{ Фм}^2$

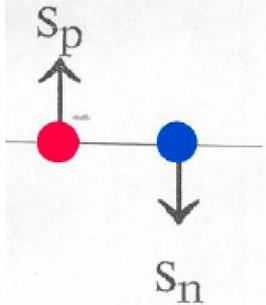
Спиновая зависимость

У дейтрона:

$$\vec{J} = \vec{L}_p + \vec{L}_n + \vec{S}_p + \vec{S}_n$$

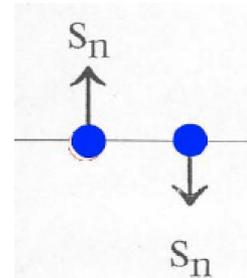


$$L = 0, \quad I = 1$$



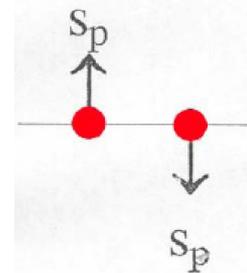
$$L = 0, \quad I = 0$$

Состояние отсутствует



$$L = 0, \quad J = 0$$

Динейтрон не существует

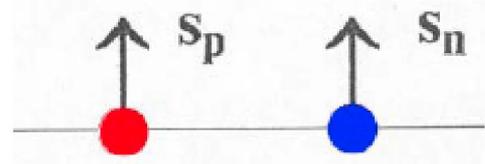


$$L = 0, \quad J = 0$$

Дипротон не существует

Магнитный момент дейтрона

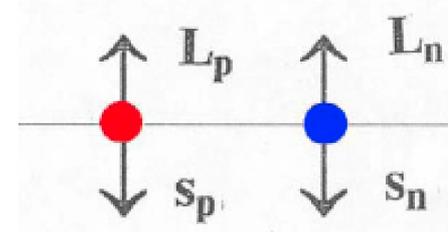
$$L = 0$$



$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \left(g_L(p)\bar{L}_p + g_L(n)\bar{L}_n + g_s(p)\bar{s}_p + g_s(n)\bar{s}_n \right) = \\ &= \mu_0 \left[0 + 0 + 2 \cdot 2,79 \cdot 1/2 + 2 \cdot (-1,91) \cdot 1/2 \right] = 0,88\mu_0 \end{aligned}$$

$$\mu_{\text{теор}} = 0,88\mu_0 \neq \mu_{\text{эксп}} = 0,86\mu_0$$

Есть примесь $L=1$

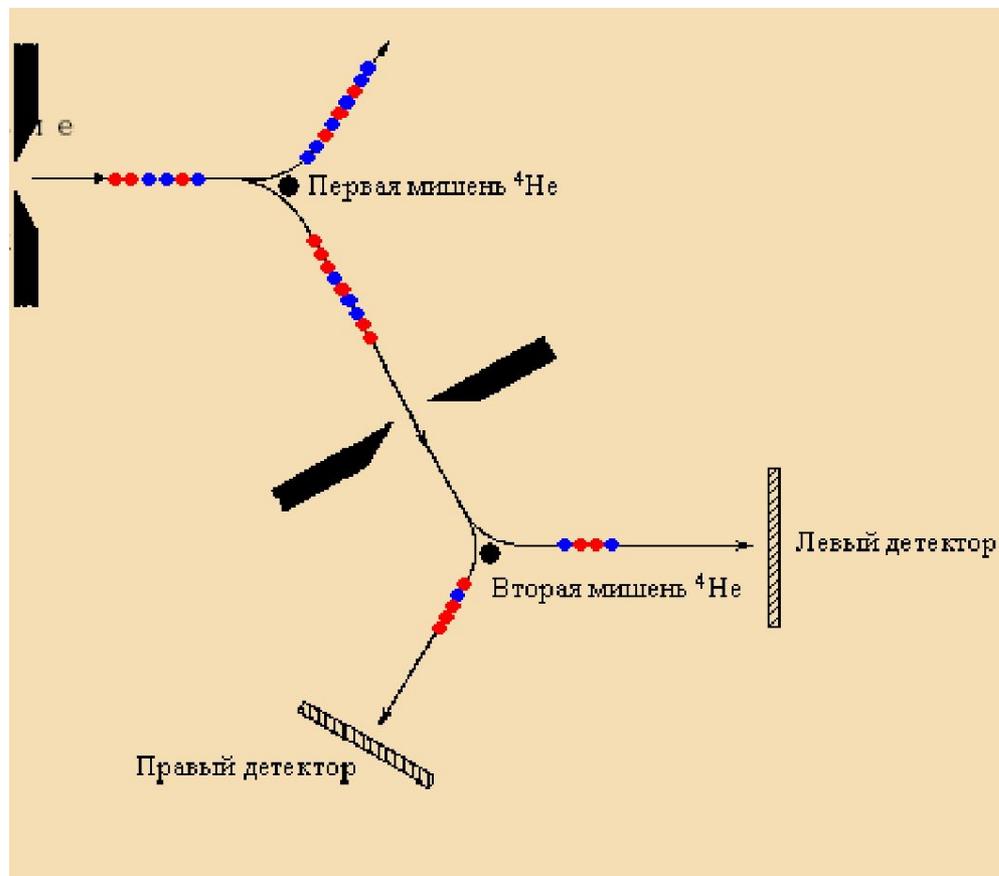


$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \left(g_L(p)\bar{L}_p + g_L(n)\bar{L}_n + g_s(p)\bar{s}_p + g_s(n)\bar{s}_n \right) = \\ &= \mu_0 \left[1 + 0 - 2 \cdot 2,79 \cdot 1/2 - 2 \cdot (-1,91) \cdot 1/2 \right] = 0,12\mu_0 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \alpha_1^2 \cdot 0,88 + \alpha_2^2 \cdot 0,12 = 0,86 \\ \alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1 \end{cases} \quad \alpha_1^2 = 0,96$$

Нецентральность (тензорный) характер ядерных сил

- Квадрупольный момент дейтрона: $Q_0 = +0,28 \text{ Фм}^2$
- Примесь компоненты $L=1$ в основное состояние дейтрона и положительная величина квадрупольного момента означает, что дейтрон имеет форму отличную от сферически симметричной, и что ядерные силы между нуклонами зависят от того, как направлены спины нуклонов \vec{s}_1, \vec{s}_2 относительно вектора \vec{n} , направленного от одного нуклона к другому, т.е. ядерные силы – нецентральные (тензорные).
- Спин-орбитальное взаимодействие проявляется в особенностях рассеяния частиц с ненулевым спином на неполяризованных и поляризованных мишенях и в рассеянии поляризованных частиц.



$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Эффект симметрии

- Для лёгких ядер $Z \approx N \approx A/2$.
- Для тяжёлых ядер $N \approx 1.5 \cdot Z$.

Парные взаимодействия

- Удельная энергия связи ε особенно велика у чётно – чётных ядер (Z – чётное, N – чётное). У ч-ч ядер больше всего изотопов, они более распространены во Вселенной.
- «Магические» ядра.
- Известно только 4 нечётно-нечетных β -стабильных изотопа: ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$.

Зарядовая симметрия

Энергии связи зеркальных ядер

$$\Delta W(^3\text{H}(1p2n)) - \Delta W(^3\text{He}(2p1n)) = e^2/\delta = 0.75 \text{ МэВ.}$$

Так же для

$$^7\text{Li}(3p4n) - ^7\text{Be}(4p3n);$$

$$^{13}\text{C}(6p7n) - ^{13}\text{N}(7p6n);$$

$$(p - p)_{\text{яд}} = (n - n)$$

Изоспиновая инвариантность

- $^{10}\text{Be}(4p+4n)+(n-n);$
- $^{10}\text{B}(4p+4n)+(n-p);$
- $^{10}\text{C}(4p+4n)+(p-p);$

$$(p - p)_{\text{яд}} = (n - n) = (n - p)$$

Обменный характер нуклон-нуклонного взаимодействия

проявляется при рассеянии нейтронов высоких энергий (несколько сот МэВ) на протонах.

Дифференциальное сечение рассеяния нейтронов имеет максимум при рассеянии назад в с.ц.м., что объясняется обменом заряда между протоном и нейтроном.

Свойства ядерных сил

- Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов.
- Ядерные силы - силы притяжения и отталкивания. Притяжение между нуклонами на больших расстояниях ($r > 1$ Фм) сменяется отталкиванием на малых ($r < 0.5$ Фм);
- имеют малый радиус действия 10^{-12} см;
- большая интенсивность в $> 10^2$ больше, чем кулоновское взаимодействие;
- ядерные силы не действуют на электроны;
- ядерные силы насыщаются;
- отношение протонов и нейтронов в ядре не может быть произвольным;
- проявляются чётно – нечётные эффекты;
- проявляются магические числа;
- зависят от спина нуклонов;
- зависят от спин – орбитального взаимодействия;
- зарядовая независимость;
- изоспиновая независимость;
- имеют нецентральный (тензорный) характер;
- ...

Потенциал нуклон-нуклонного взаимодействия

$$V = V_1(r) + V_2(r)(\vec{s}_1\vec{s}_2) \\ + V_3(r)(\vec{s}_1\vec{n})(\vec{s}_2\vec{n}) \\ + V_4(r)(\vec{L}\vec{S})$$

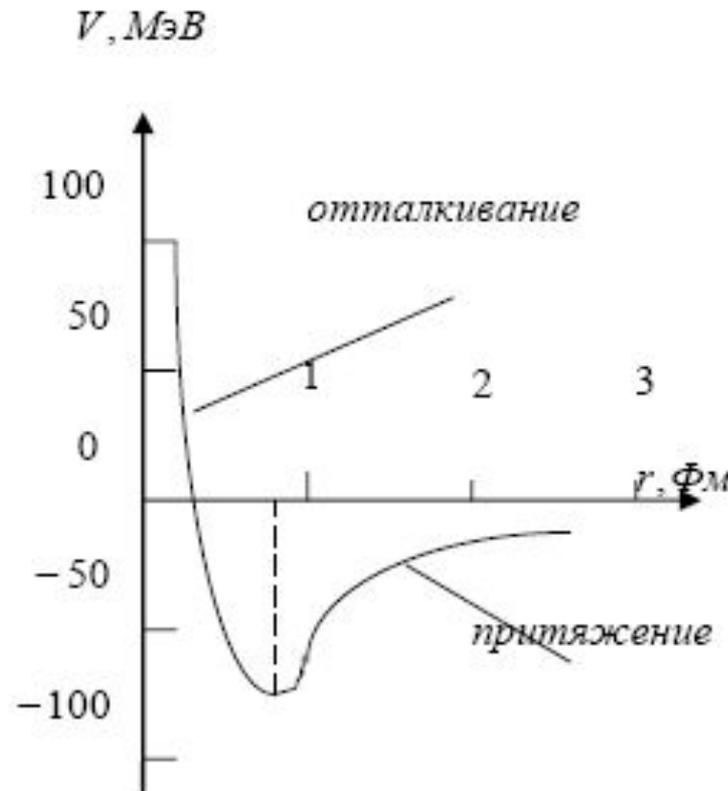
N – N потенциал зависит от:

- расстояния между нуклонами,
- взаимной ориентации спинов нуклонов,
- нецентрального характера ядерных сил,
- величины спин-орбитального взаимодействия.

Мезонная теория ядерных сил (модель Юкавы)

- За время ядерного взаимодействия Δt вблизи нуклона образуется виртуальный мезон с массой m .
- $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$;
- Масса виртуального мезона: $m = \Delta E / c^2 = \hbar / (\Delta t c^2)$;
- Время ядерного взаимодействия $\Delta t = a/c = 1.5 \cdot 10^{-13} / 3 \cdot 10^{10} = 0.5 \cdot 10^{-23}$ с,
- $mc^2 = \hbar / \Delta t = 6.6 \cdot 10^{-22} / 0.5 \cdot 10^{-23} \simeq 130$ МэВ

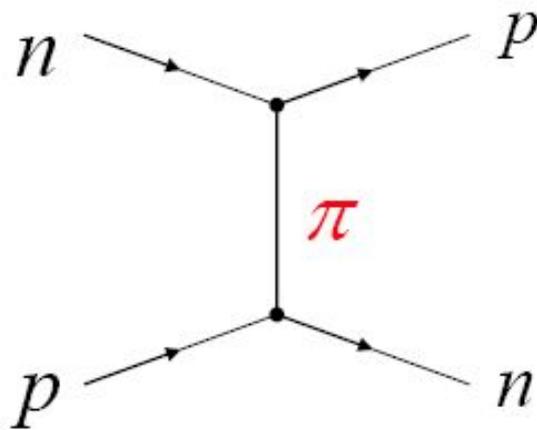
Потенциал Юкавы: $V(r) = g_N \frac{e^{-\frac{r}{a}}}{r}$



где $a = \hbar/mc$, а g_N – ядерный заряд нуклона (аналог элементарного заряда e в электромагнитном взаимодействии).

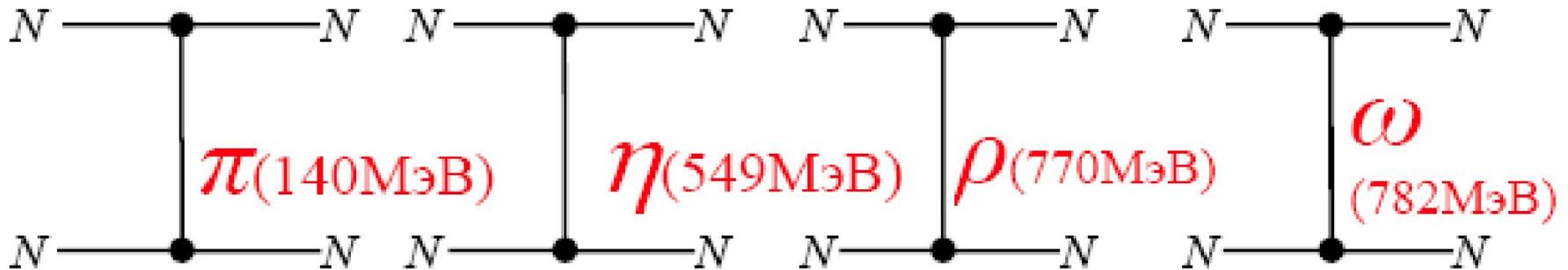
Нуклон-нуклонные взаимодействия можно описать как обмен виртуальными мезонами.

Положительные, отрицательные и нейтральные пионы (π^- , π^+ , π^0) описывают взаимодействие между nn -, pr -, pp -парами на характерных внутриядерных расстояниях 1.5-2.0 Фм.



Однопионное pr -взаимодействие

Диаграммы N-N взаимодействий



Характер взаимодействия зависит от спина частицы, переносящей взаимодействие.

Обмен векторными частицами $J=1$ приводит к отталкиванию между нуклонами.