



Рождение и жизнь атомных ядер

Элементарные частицы

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

1932 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Исходный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)				
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)															5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)															13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)				
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.29(6)				
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]				
87	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103																			

* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	59 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.96681(1)
--	---	---	--	---	--	---	--	--	---	--	---	--	--	---

** Actinoids

89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03588(2)	92 U uranium 238.02891(3)
---	--	---	---

Электрон

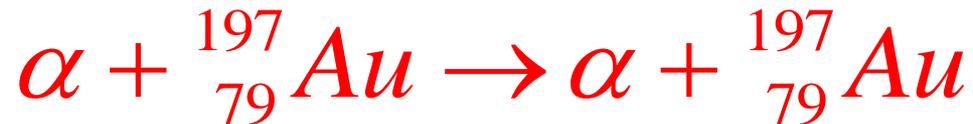
1897 - Дж. Дж. Томсон. Открытие электрона

$$Q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; m_e = 1/2000 M(^1\text{H})$$

1904 - Дж. Дж. Томсон. Модель атома

Протон

1911 – Э. Резерфорд. Открытие атомного ядра



1919 – Э. Резерфорд. Открытие протона

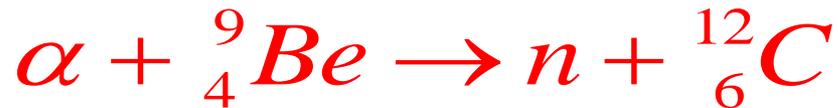
$$Q_p = -q_e; m_p = M(^1\text{H})$$



Нейтрон

1932 г. Дж. Чадвик. Открытие нейтрона

$$Q_n = 0; \quad m_n = m_p$$



Нейтрино

1930 г. В. Паули. Гипотеза нейтрино



$$Q_\nu = 0; \quad m_\nu \sim 0$$



		Заряд, q_e	Масса, МэВ/ c^2
Электрон	e	-1	0,511
Протон	p	+1	938,3
Нейтрон	n	0	939,6
“Нейтрино”	ν	0	0

Элементарный заряд $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

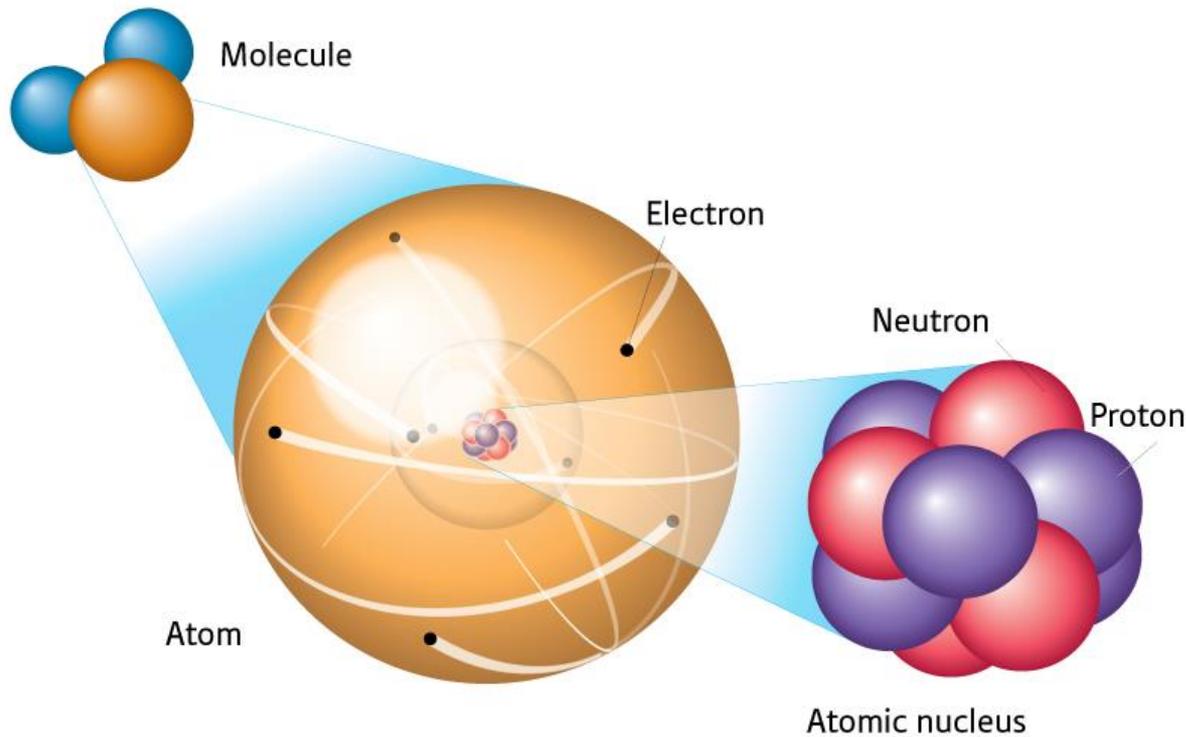
1 эВ (электрон-Вольт) – энергия, которую приобретает электрон, проходя разность потенциалов 1 Вольт

1 кэВ (кило) = 10^3 эВ

1 МэВ (мега) = 10^3 кэВ = 10^6 эВ

1 ГэВ (гига) = 10^3 МэВ = 10^9 эВ

1 ТэВ (тера) = 10^3 ГэВ = 10^{12} эВ



$^{208}_{82}\text{Pb}$

$$Z = 82$$

$$N = 126$$

$$A = 208$$

Z – заряд ядра, число протонов в ядре

N – число нейтронов в ядре

$A = N + Z$ – массовое число

Периодическая система элементов Менделеева

ГРУППА

ПЕРИОД

2006 г.

Категории

Alkali metals	Actinoids	Halogens
Alkaline earth metals	Post-transition metals	Noble gases
Transition metals	Metalloids	Properties unknown
Lanthanoids	Nonmetals	

Происхождение

-  Изначальный
-  Радиоактивный распад
-  Искусственный синтез

Состояние

-  Твердое
-  Жидкое
-  Газообразное

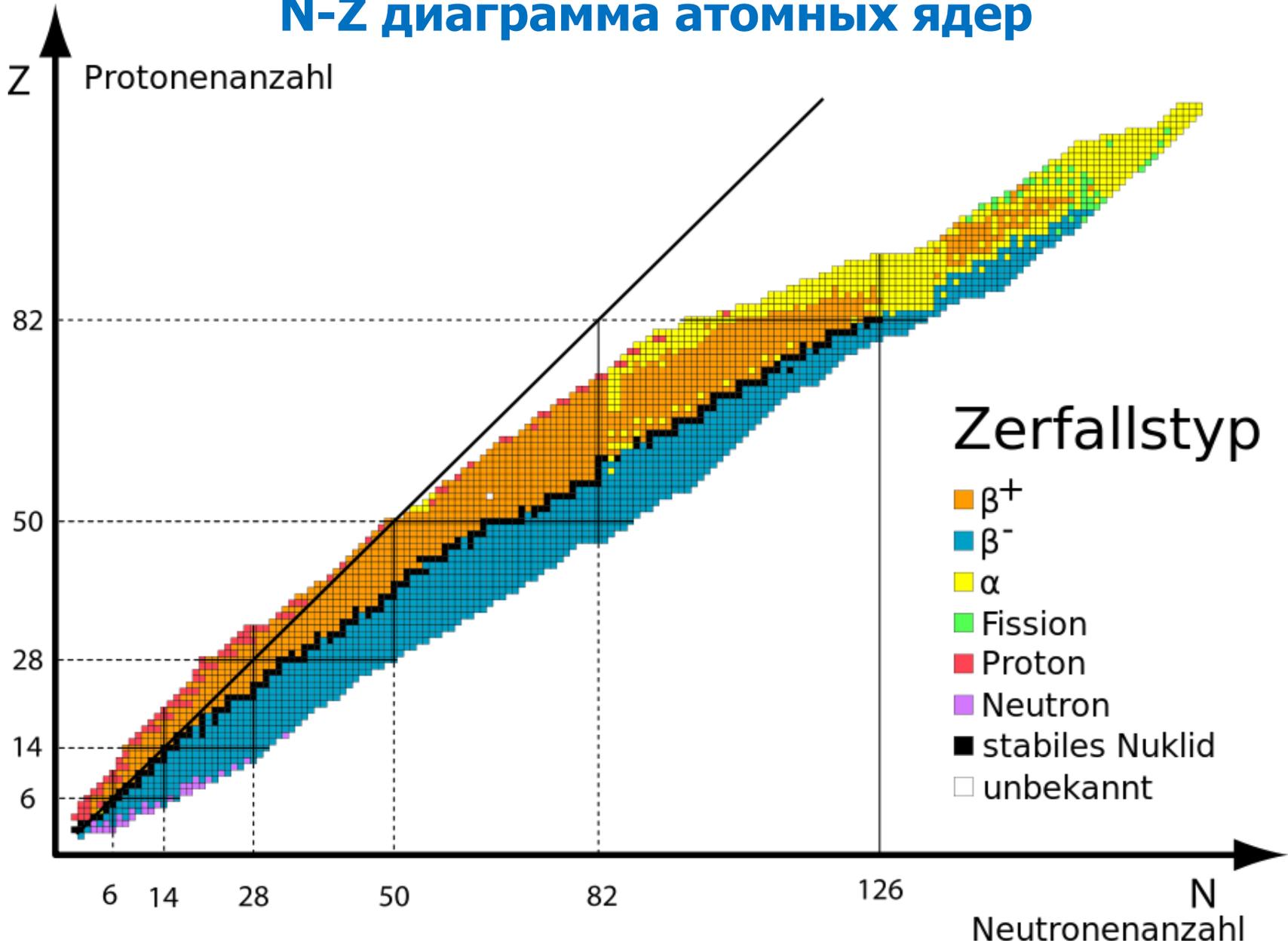
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H hydrogen 1.00794(7)																	2 He helium 4.002602(2)
3 Li lithium 6.941(2)	4 Be beryllium 9.012182(3)											5 B boron 10.811(7)	6 C carbon 12.0107(8)	7 N nitrogen 14.0067(2)	8 O oxygen 15.9994(3)	9 F fluorine 18.9984032(5)	10 Ne neon 20.1797(6)
11 Na sodium 22.98976928(2)	12 Mg magnesium 24.3050(6)											13 Al aluminium 26.9815386(8)	14 Si silicon 28.0855(3)	15 P phosphorus 30.973762(2)	16 S sulfur 32.065(5)	17 Cl chlorine 35.453(2)	18 Ar argon 39.948(1)
19 K potassium 39.0983(1)	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.955912(6)	22 Ti titanium 47.867(1)	23 V vanadium 50.9415(1)	24 Cr chromium 51.9961(6)	25 Mn manganese 54.938045(5)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933195(5)	28 Ni nickel 58.6934(4)	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723(1)	32 Ge germanium 72.64(1)	33 As arsenic 74.92160(2)	34 Se selenium 78.96(3)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.798(2)
37 Rb rubidium 85.4678(3)	38 Sr strontium 87.62(1)	39 Y yttrium 88.90585(2)	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.90638(2)	42 Mo molybdenum 95.96(2)	43 Tc technetium [98.9063]	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.90550(2)	46 Pd palladium 106.42(1)	47 Ag silver 107.8682(2)	48 Cd cadmium 112.411(8)	49 In indium 114.818(3)	50 Sn tin 118.710(7)	51 Sb antimony 121.760(1)	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90447(3)	54 Xe xenon 131.29(6)
55 Cs caesium 132.9054519(2)	56 Ba barium 137.327(7)	* Lanthanoids 57-71	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.9479(1)	74 W tungsten 183.84(1)	75 Re rhenium 186.207(1)	76 Os osmium 190.23(3)	77 Ir iridium 192.217(3)	78 Pt platinum 195.084(9)	79 Au gold 196.966569(4)	80 Hg mercury 200.59(2)	81 Tl thallium 204.3833(2)	82 Pb lead 207.2(1)	83 Bi bismuth 208.98040(1)	84 Po polonium [208.9824]	85 At astatine [209.99]	86 Rn radon [222.02]
87 Fr francium [223.0197]	88 Ra radium [226.0254]	** Actinoids 89-103	104 Rf rutherfordium [261.12]	105 Db dubnium [268.13]	106 Sg seaborgium [271.13]	107 Bh bohrium [278]	108 Hs hassium [277.15]	109 Mt meitnerium [276.15]	110 Ds darmstadtium [281.16]	111 Rg roentgenium [280.16]	112 Cn copernicium [285.17]	113 Uut ununtrium [284.18]	114 Fl flerovium [289.19]	115 Uup ununpentium [288.19]	116 Lv livermorium [293]	117 Uus ununseptium [294]	118 Uuo ununoctium [294]

* Lanthanoids

57 La lanthanum 138.90547(7)	58 Ce cerium 140.116(1)	58 Pr praseodymium 140.90765(2)	60 Nd neodymium 144.242(3)	61 Pm promethium [144.91]	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.964(1)	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.92535(2)	66 Dy dysprosium 162.500(1)	67 Ho holmium 164.93032(2)	68 Er erbium 167.259(3)	69 Tm thulium 168.93421(2)	70 Yb ytterbium 173.054(5)	71 Lu lutetium 174.9668(1)
89 Ac actinium [227.03]	90 Th thorium 232.03806(2)	91 Pa protactinium 231.03588(2)	92 U uranium 238.02891(3)	93 Np neptunium [237.0432]	94 Pu plutonium [244.0642]	95 Am americium [243.0614]	96 Cm curium [247.0704]	97 Bk berkelium [247.0703]	98 Cf californium [251.0796]	99 Es einsteinium [252.0829]	100 Fm fermium [257.0951]	101 Md mendelevium [258.0986]	102 No nobelium [259.1009]	103 Lr lawrencium [262.11]

** Actinoids

N-Z диаграмма атомных ядер

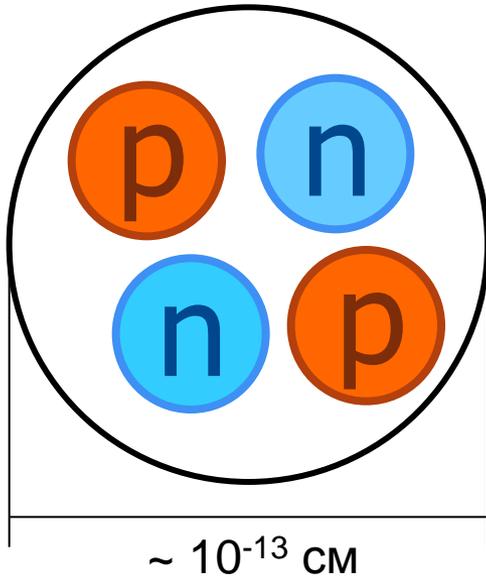


Как устроен Мир. 30-е годы XX века



В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — **электрона**, **протона** и **нейтрона**. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

α -частица



α -частица – ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$

Какие силы связывают протоны и нейтроны в атомные ядра?

1. Сильное взаимодействие между нуклонами

$$\frac{F_{NN}}{F_{Coul}} \sim 40$$

2. Конечность радиуса действия ядерных сил

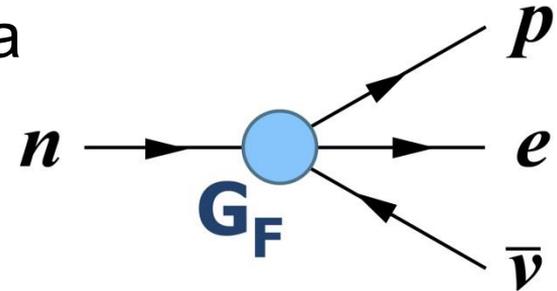
$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

Теория Ферми

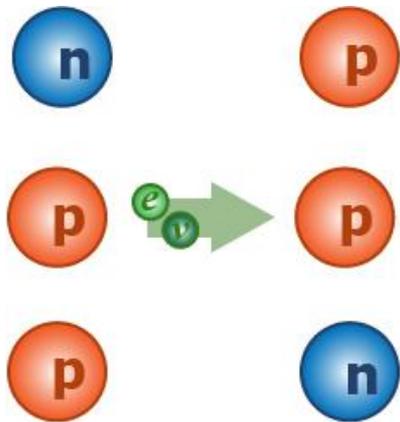
1934 – Э. Ферми. Теория β -распада

$$\tau_n \approx \frac{1}{G_F^2} \frac{1}{(m_n - m_p)^5} \sim 885,7 \text{ сек}$$

$$G_F \sim \frac{10^{-5}}{m_p^2} - \text{константа } \mathbf{слабого} \text{ взаимодействия}$$



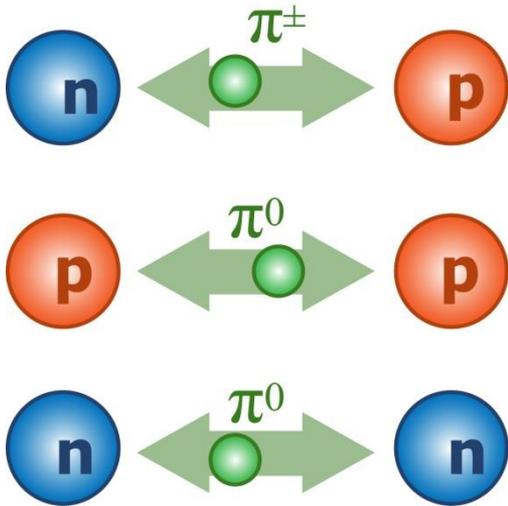
Для $E_\nu \sim 1 \text{ МэВ}$ $\sigma_\nu \sim 10^{-43} \text{ см}^2$, $L_\nu \sim 10^{20} \text{ см}$



Для ядерных сил
радиус взаимодействия

$$r_{NN} \sim \frac{hc}{m_e} \sim 10^3 \text{ ФМ}$$

Теория Юкавы



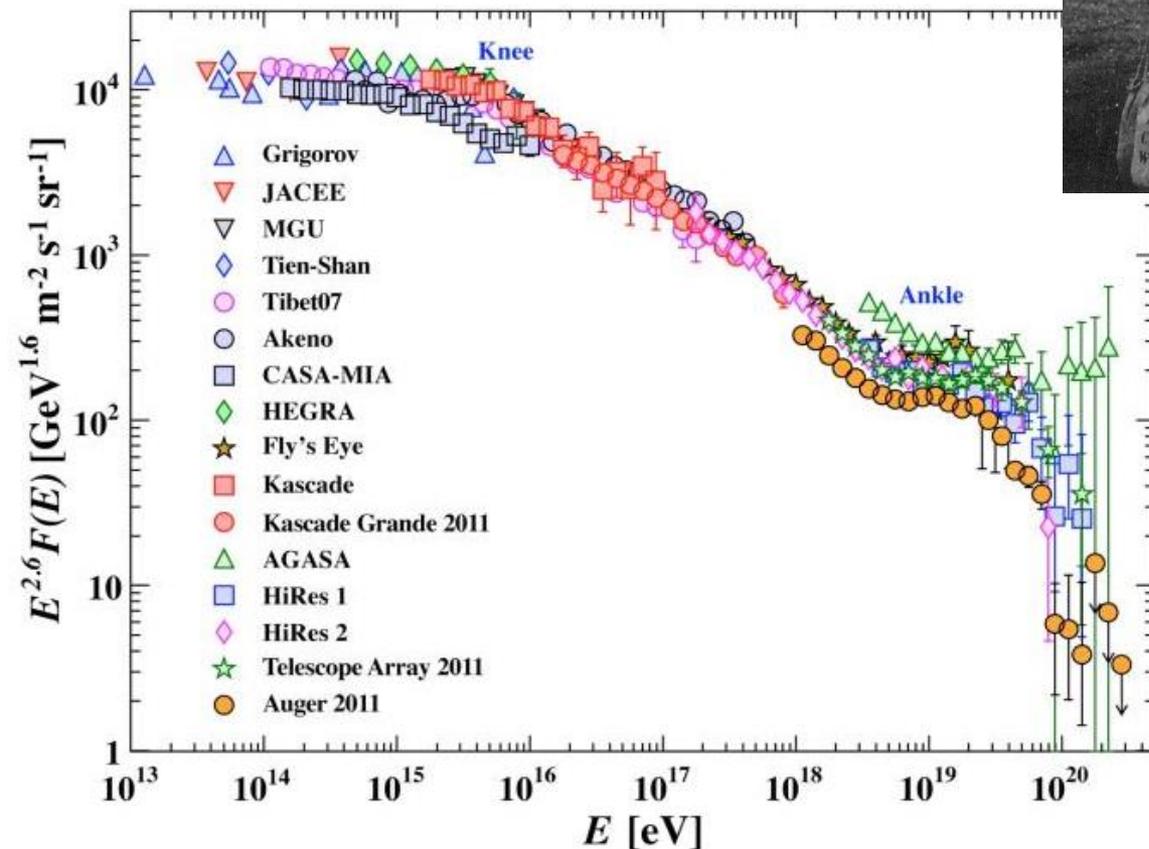
1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

$$m_\pi \sim 200 m_e$$

1912 г. Космические лучи

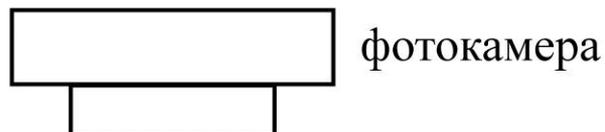
CR



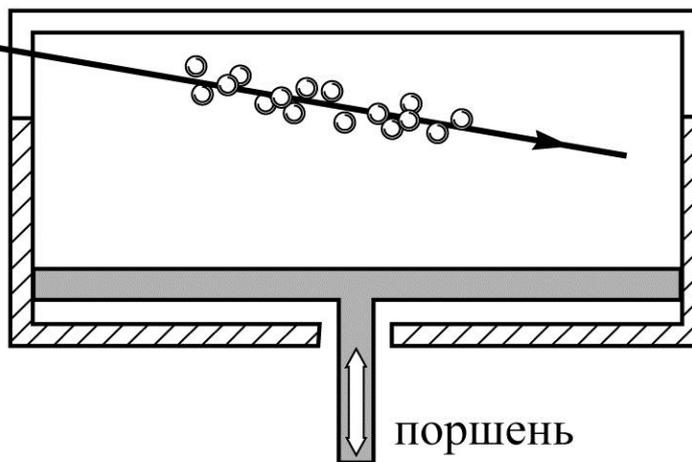
1936 г В. Гесс
За открытие
космического
излучения

Предел Грайзена-Зацепина-
Кузьмина $\approx 10^{19}$ эВ

1912 г Камера Вильсона



траектория
частицы

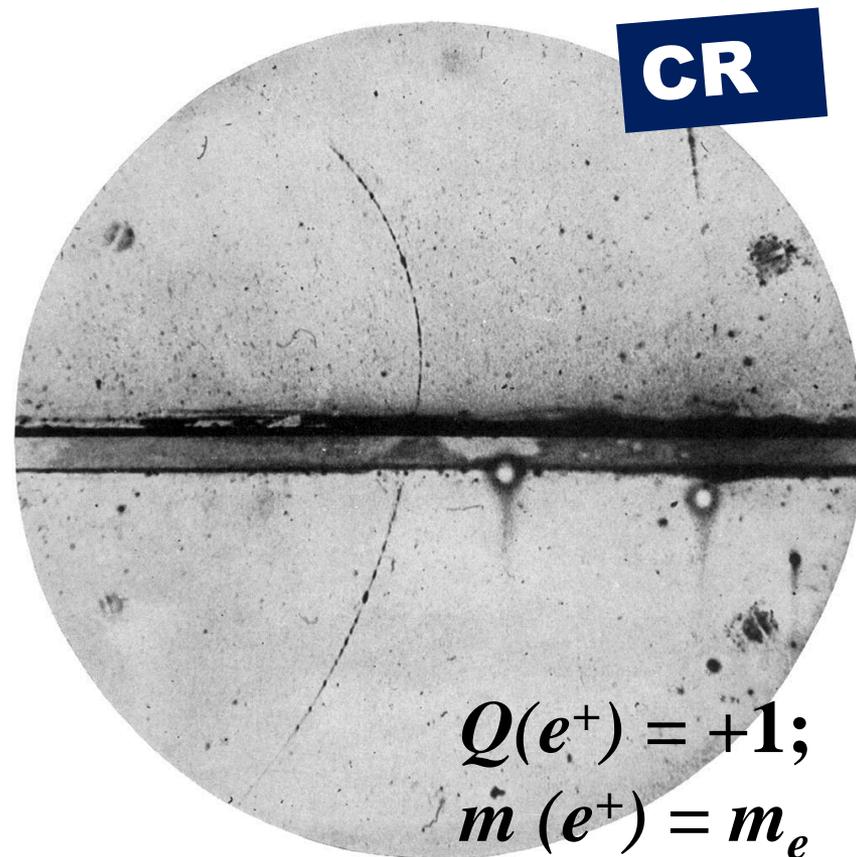
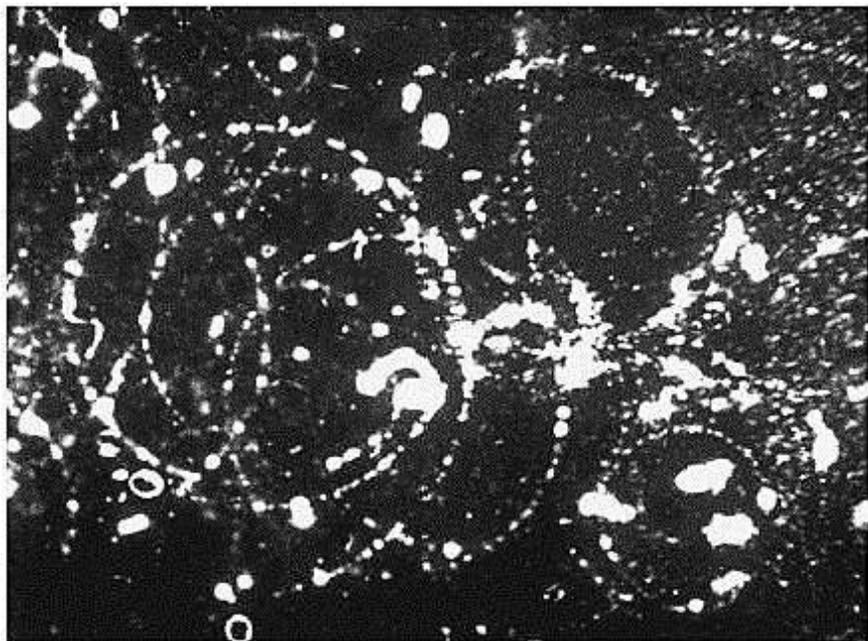


1927

$\Delta L \approx 0.3$ мм
 $\Delta t \approx 1$ мин

Космические лучи

1927 г. – Д.В. Скобельцын
Наблюдение электронов
космических лучей

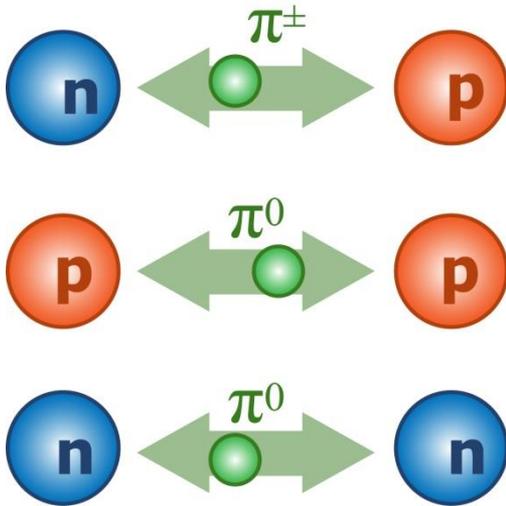


1932 г. Позитрон



1936 г К. Андерсон
За открытие позитрона

Теория Юкавы



1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.



1949

$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

$$m_{\pi} \sim 200 m_e$$

CR

1937 г. К. Андерсон, С.Неддермейер. Открытие мюона.

$$Q_{\mu} = q_e; \quad m_{\mu} = 200 m_e \quad J=1/2$$

1947 г. С.Пауэлл. Открытие заряженных пионов.

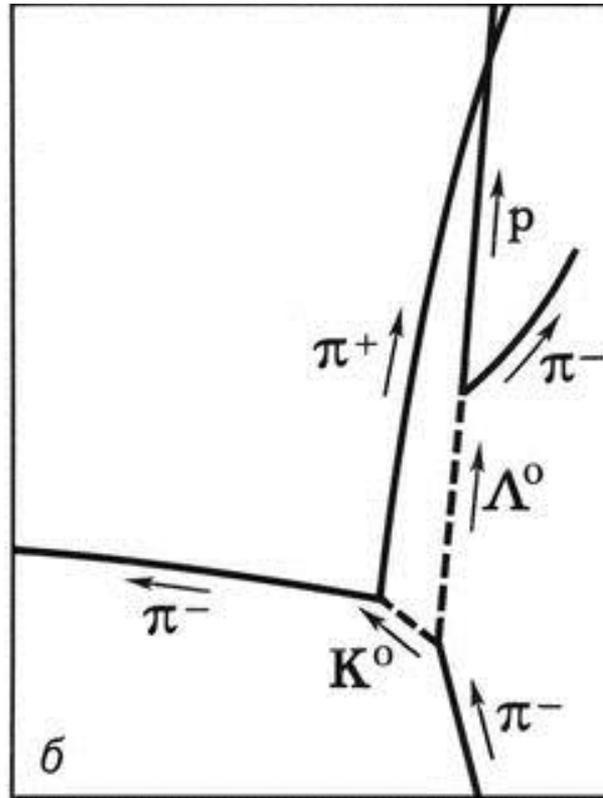
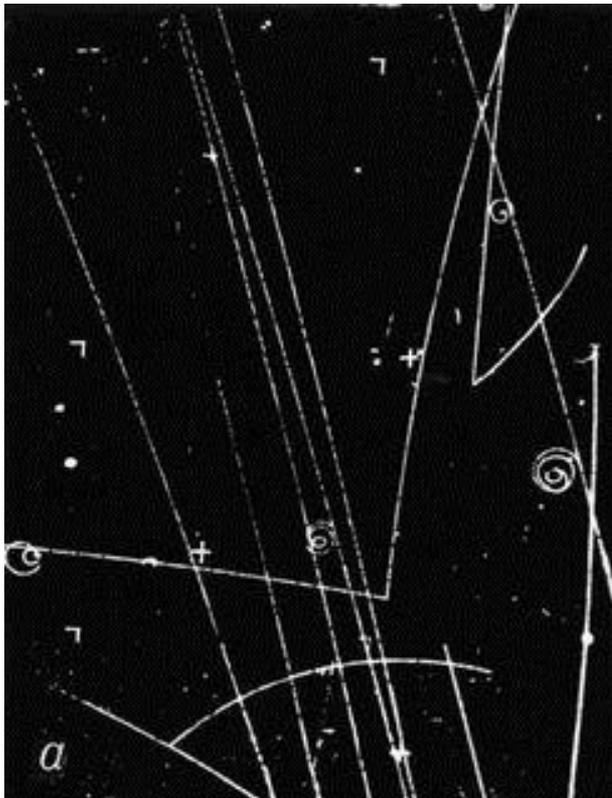
$$Q_{\pi} = \pm q_e; \quad m_{\pi} = 140 \text{ МэВ} \quad J=0$$



1950

Странные частицы

1947 – 1953 г. Открытие в космических лучах
K-мезонов и гиперонов: Λ , Σ , Ξ



$$\Delta L \approx 0.3 \text{ мм}$$

$$\Delta t \approx 1 \text{ сек}$$

Пузырьковая камера



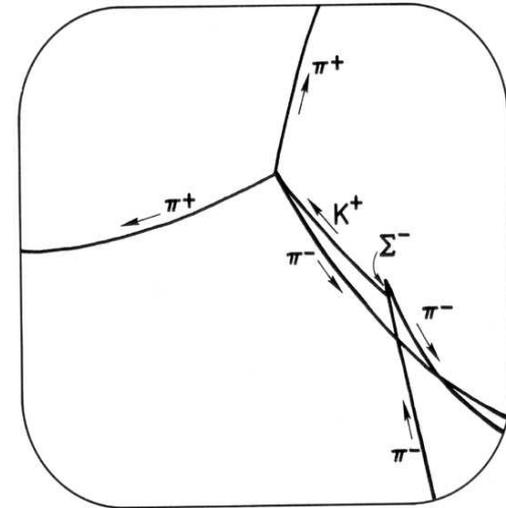
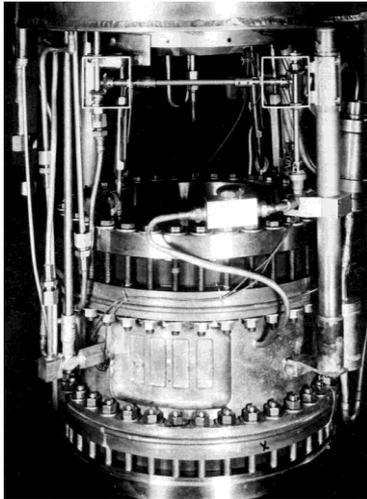
1960 г Д. А. Глазер

За изобретение пузырьковой камеры (1952 г.)

$\Delta L \approx 0.3 \text{ мм}$

$\Delta t \approx 1 \text{ сек}$

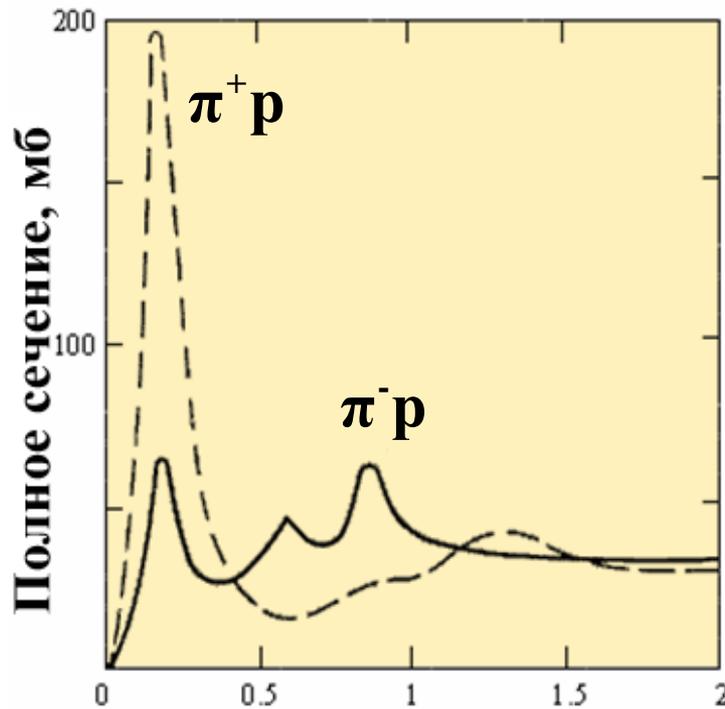
В пузырьковой камере используется свойство чистой перегретой жидкости вскипать (образовывать пузырьки пара) вдоль траектории заряженной частицы. Перегретая жидкость – это жидкость, нагретая до температуры большей температуры кипения для данных условий. Вскипание жидкости происходит при появлении центров парообразования, например, ионов. Таким образом, если в камере Вильсона заряженная частица инициирует на своём пути превращение пара в жидкость, то в пузырьковой камере заряженная частица вызывает превращение жидкости в пар.



Перегретое состояние достигается быстрым (5–20 мс) уменьшением внешнего давления. На несколько миллисекунд камера становится чувствительной и способна зарегистрировать заряженную частицу. После фотографирования треков давление поднимается до прежней величины, пузырьки «схлопываются» и камера вновь готова к работе.

Нуклонные резонансы

1952 г. Э. Ферми. Открытие Δ -резонанса



$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

$$100 \text{ МэВ} \rightarrow 10^{-23} \text{ с}$$

Частица	Масса, Mc^2 (МэВ)	J^P
$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$	~ 1232	$3/2^+$
N^+, N^0, N^-	~ 1440	$1/2^+$

Кинетическая энергия пиона, ГэВ



Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

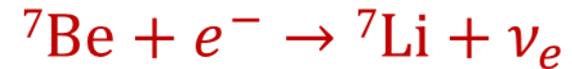
Барионное число



$$B = 1 + 1 = 1 + 1 + 1 - 1$$



$$B = 1 + 1 = 1 + 1 + 0 + 0$$



$$B = 7 + 0 = 7 + 0$$

$$L_e = 0 + 1 = 0 + 1$$

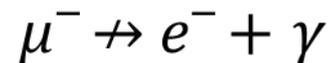
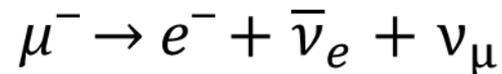
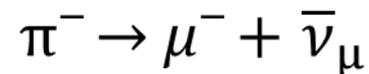
Лептонные числа

$$L_e(e^-, \nu_e) = 1$$

$$L_e(e^+, \bar{\nu}_e) = -1$$

$$L_\mu(\mu^-, \nu_\mu) = 1$$

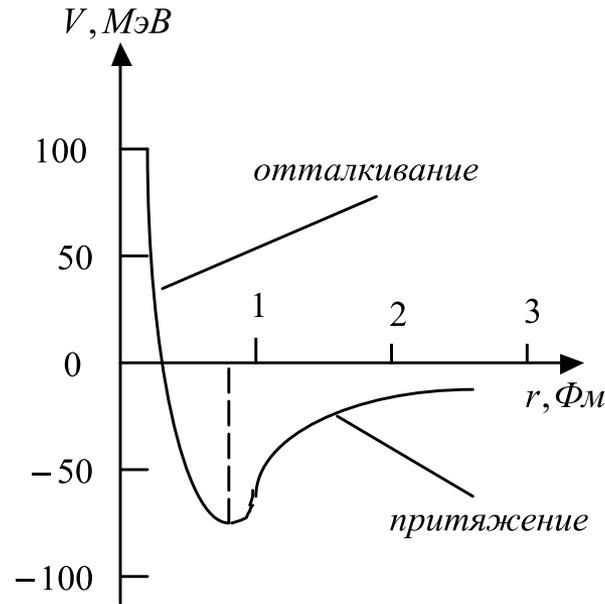
$$L_\mu(\mu^+, \bar{\nu}_\mu) = -1$$



Гиперядра

Ядра странного мира

NN - взаимодействие



Радиальная зависимость
нуклон-нуклонного потенциала



Хидэки Юкава
1907 - 1981

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

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

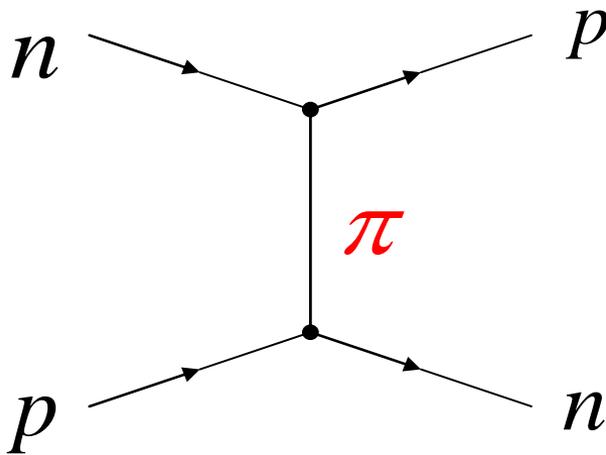
где $a = \frac{\hbar}{mc}$, g_N – ядерный заряд нуклона.

NN - взаимодействие

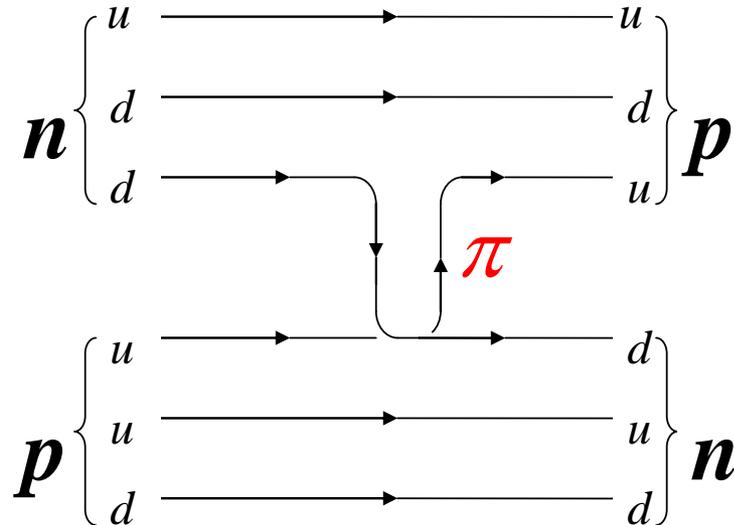
$$R = \frac{\hbar}{mc} \approx 1,5 - 2,0 \text{ ФМ.}$$

$$m_{\pi}c^2 = \frac{\hbar c}{R} \approx \frac{200 \text{ МэВ} \cdot \text{ФМ}}{1.5 \text{ ФМ}} \approx 130 \text{ МэВ.}$$

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

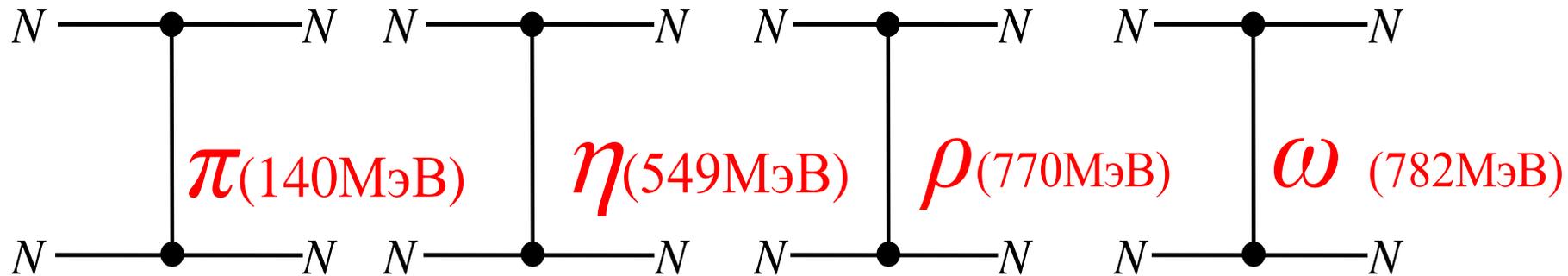


Однопионное pn -взаимодействие



Кварковая диаграмма pn -взаимодействия

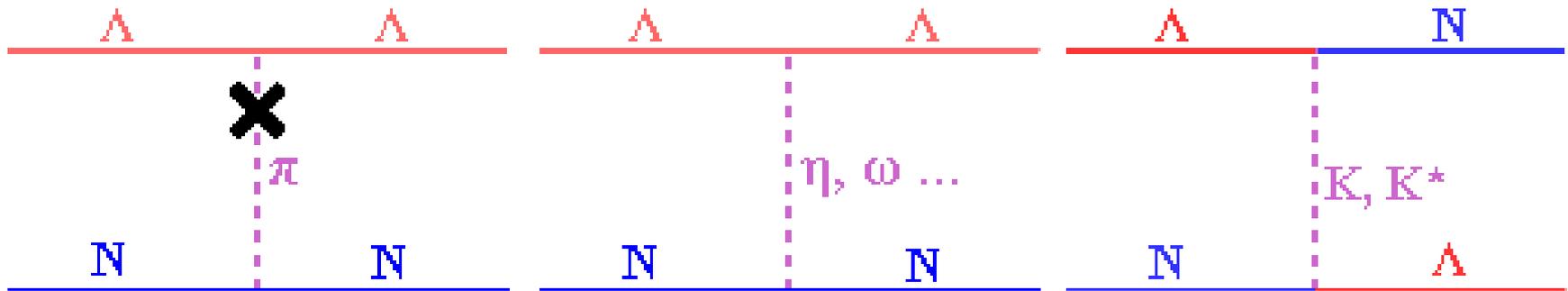
NN - взаимодействие



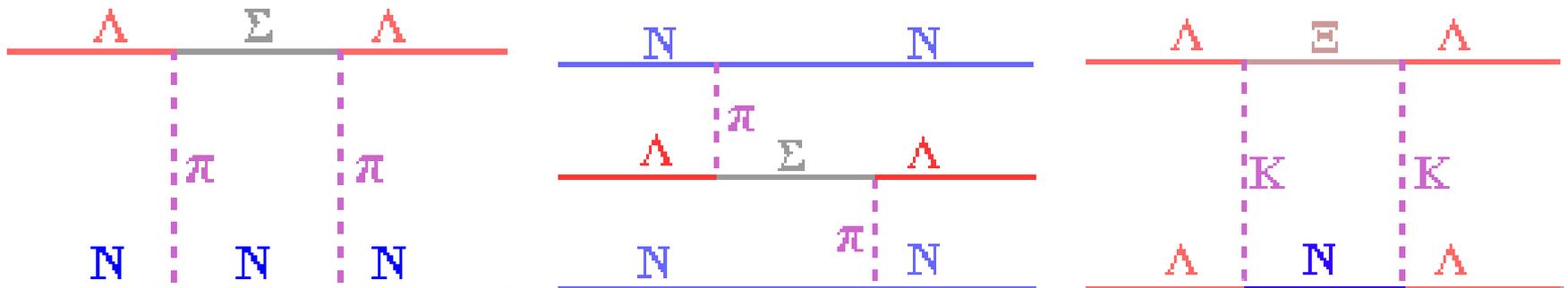
Взаимодействие между нуклонами зависит от спина частицы, переносящей взаимодействие. Обмен векторными частицами $J=1$ приводит к отталкиванию между нуклонами. Это отталкивание является аналогом отталкивания двух одноимённых зарядов в электростатике. Обмен скалярными мезонами $J=0$ приводит к притяжению между нуклонами.

МЕЗОН	π	η	ρ	ω
$J^P(I)$	$0^-(1)$	$0^-(0)$	$1^-(1)$	$1^-(0)$

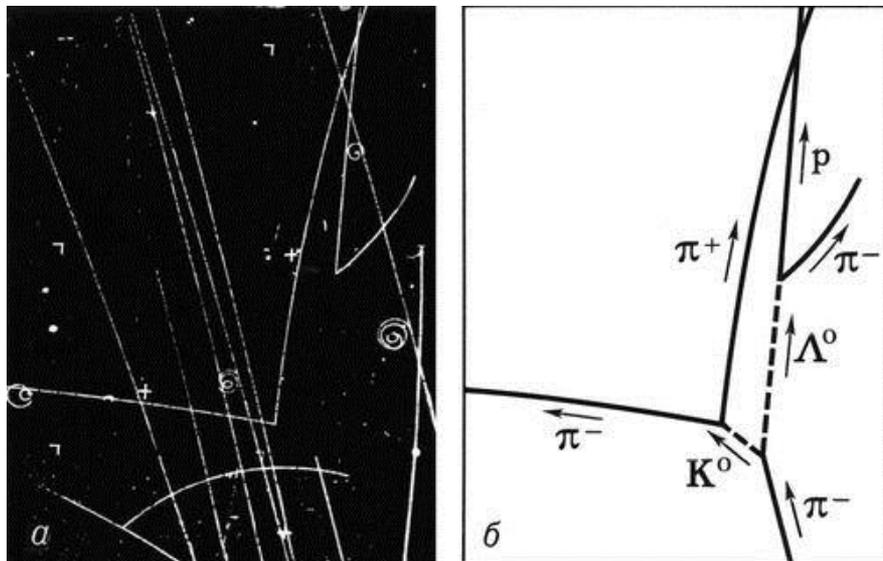
ΛN - взаимодействие



Однопионный обмен в системе ΛN запрещен по изоспину. Возможен обмен мезонами с нулевым изоспином (η , ω), а также обмен странными мезонами (K - мезоны). Поскольку пион - легчайший из мезонов, запрет однопионного обмена означает, что радиус ΛN -взаимодействия меньше, чем нуклон-нуклонного. Кроме того, возрастает роль двухпионного обмена с виртуальным Σ -гипероном в промежуточном состоянии.



Гипероны



Изоспин I , странность S :

Λ (лямбда)-гиперон: $I = 0, S = -1$

Σ (сигма)-гипероны ($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$):

$I = 1, S = -1$

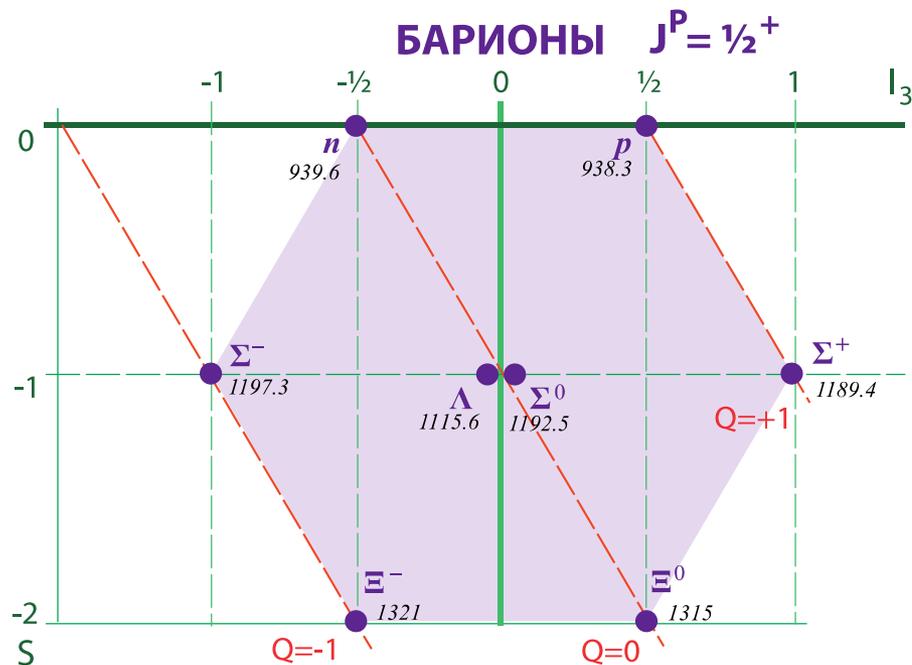
Каскадные гипероны

Ξ (кси)-гипероны (Ξ^0, Ξ^-):

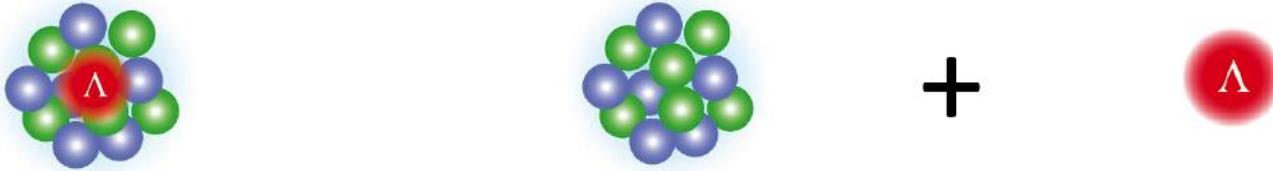
$I = 1/2, S = -2$

К-мезоны (каоны): $I = 1/2, S = \pm 1$

$$\tau(\Lambda) = 2.6 \cdot 10^{-10} \text{ с}$$



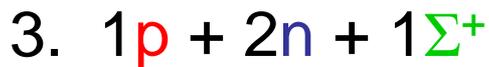
Гиперядра



A
 Z
 Λ

- A : Полное число барионов (нуклоны и гипероны)
- Z : Полный заряд (**Не число протонов!**)
- Λ : hyperon (other examples -- Σ , Ξ , ...)

• Примеры:



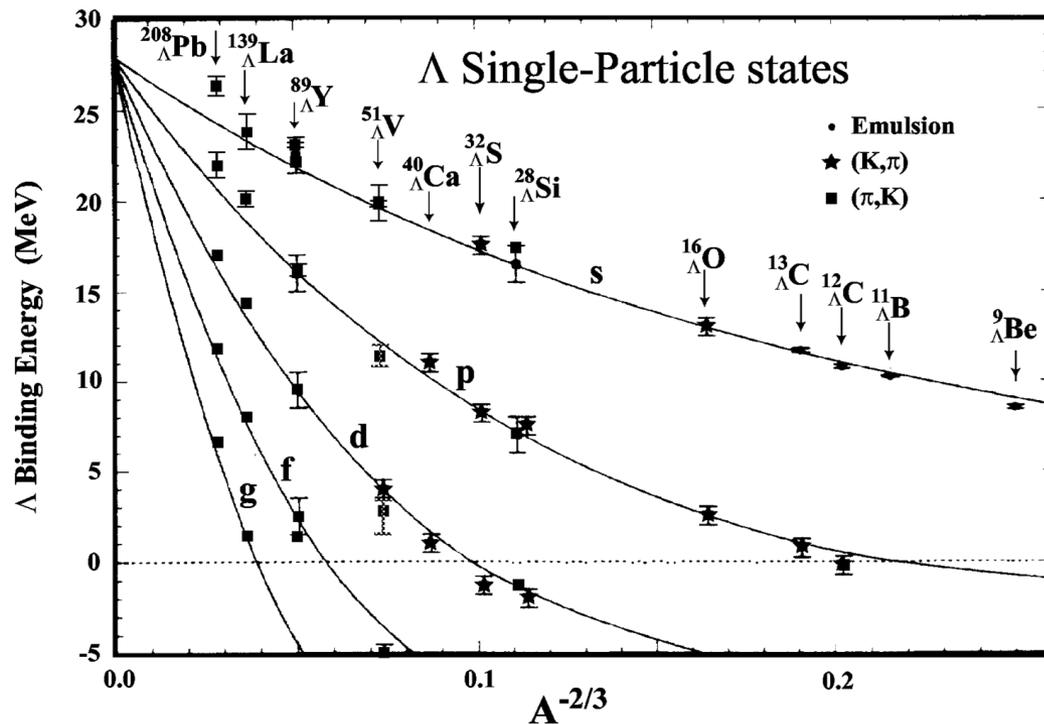
(неразличимы)

CR

Гиперядра

Энергия связи Λ -гиперона – энергия, необходимая для того, чтобы оторвать гиперон от гиперядра

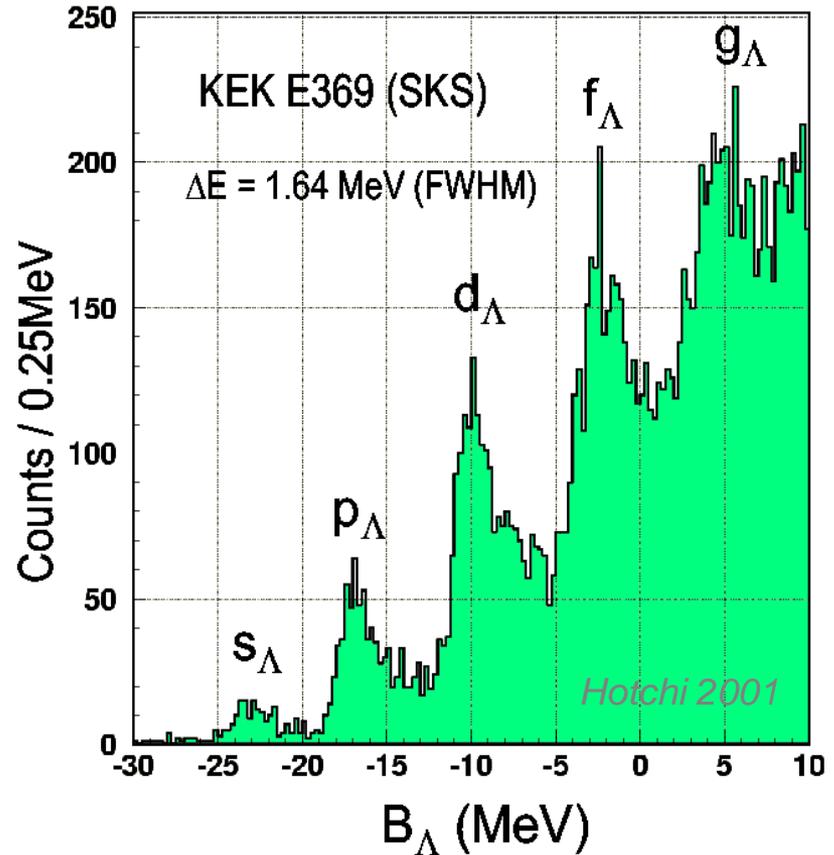
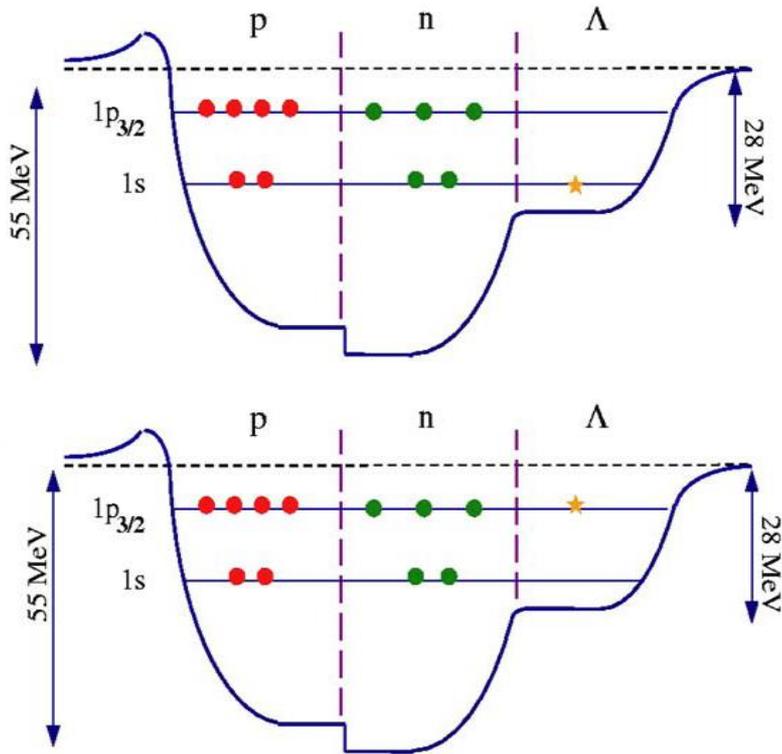
$$B_{\Lambda}(^{A+1}_{\Lambda}Z) = E_{CB}(^{A+1}_{\Lambda}Z) - E_{CB}(^AZ)$$



M. Danysz, J. Pniewski,
Delayed Disintegration
of a Heavy Fragment Emitted
in Nuclear Explosion,
Bull. Acad. Pol. Sci. 1, 42 (1953)

Гиперядра

Гиперон, находясь в окружении
 нетождественных частиц (нуклонов),
не подвержен действию принципа Паули.



**Гиперон-нуклонное притяжение
 слабее, чем нуклон-нуклонное**

Странные ядра

$N_u \sim N_d \sim N_s$



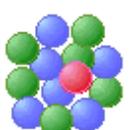
“Stable”

Странность в нейтронных звездах ($\rho > 3 - 4\rho_0$)

Странность адронной материи ($A \rightarrow \infty$)

$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$

Рост
плотности



Λ



p

n

Странность

$\Lambda\Lambda, \Xi$ Гиперядра

Λ, Σ Гиперядра

N

3-D карта изотопов

by M. Kaneta inspired by HYP06 conference poster

Адронная материя в нейтронных звездах

Фракция барионов: зависит от YN, YY взаимодействия

-> Максимальная масса звезды, скорость остывания

Для более реалистичных расчетов нужны

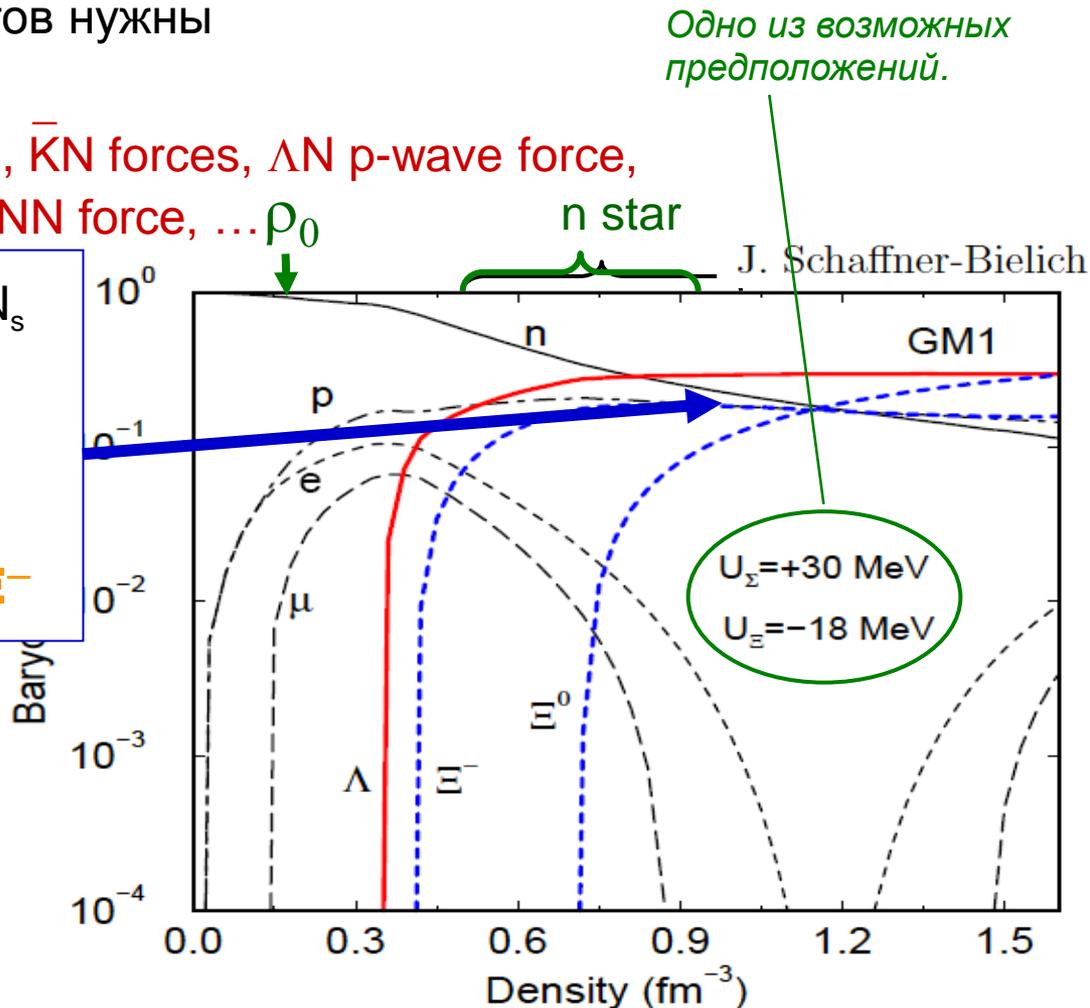
данные по гиперядрам



$\Xi N, \Lambda\Lambda, \Sigma N, \bar{K}N$ forces, ΛN p-wave force, NNN and YNN force, ... ρ_0

$N_u \sim N_d \sim N_s$

$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$



ВОПРОСЫ

Тяжелые ($M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$)

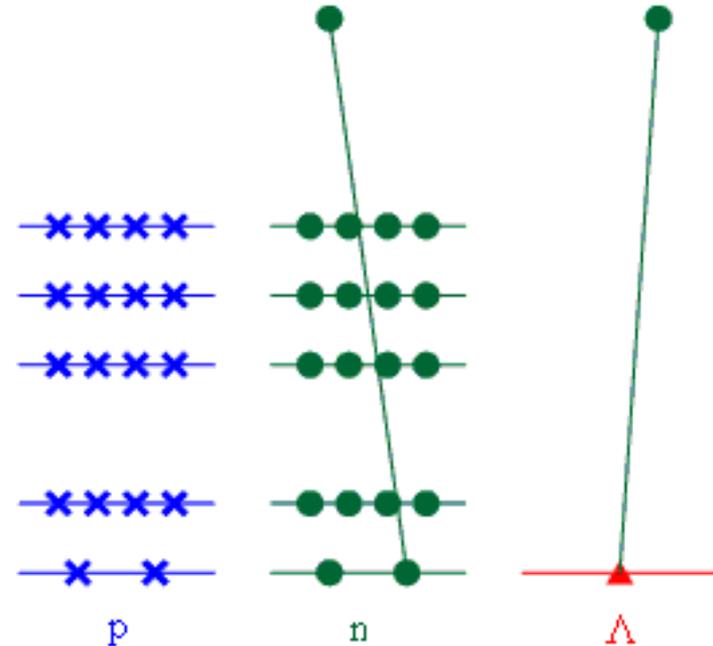
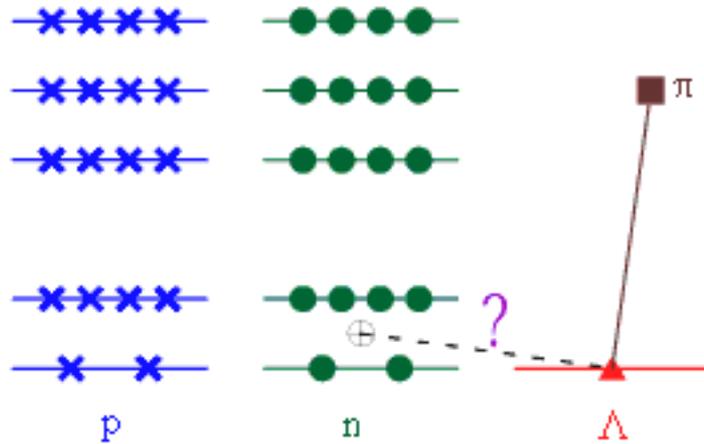
нейтронные звезды

Появление Σ, K^{bar}

Существование странной материи

Время жизни гиперядра

$$\Lambda \rightarrow N + \pi + 40 \text{ МэВ}; E_N = 5 \text{ МэВ}$$



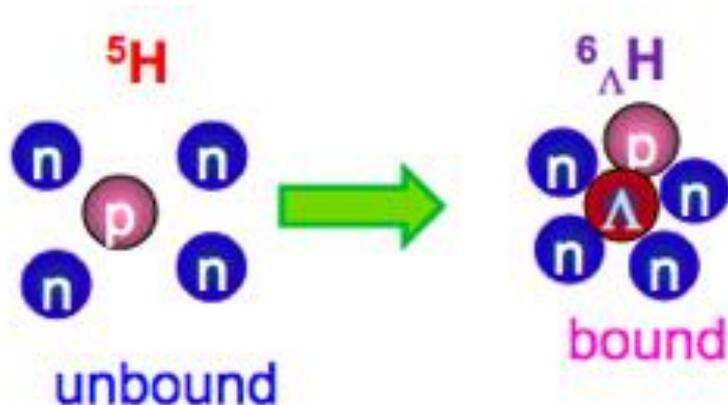
Свободный распад Λ -гиперона в гиперядрах сильно запрещен принципом Паули. **Однако времена жизни Λ -гиперядер в действительности несколько меньше τ_Λ**

$$\Lambda + N \rightarrow N + N + 175 \text{ МэВ.}$$

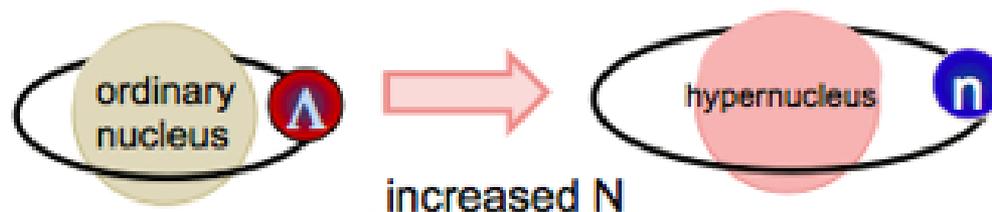


Безмезонный распад с нарушением странности

Гиперядра с нейтронным избытком



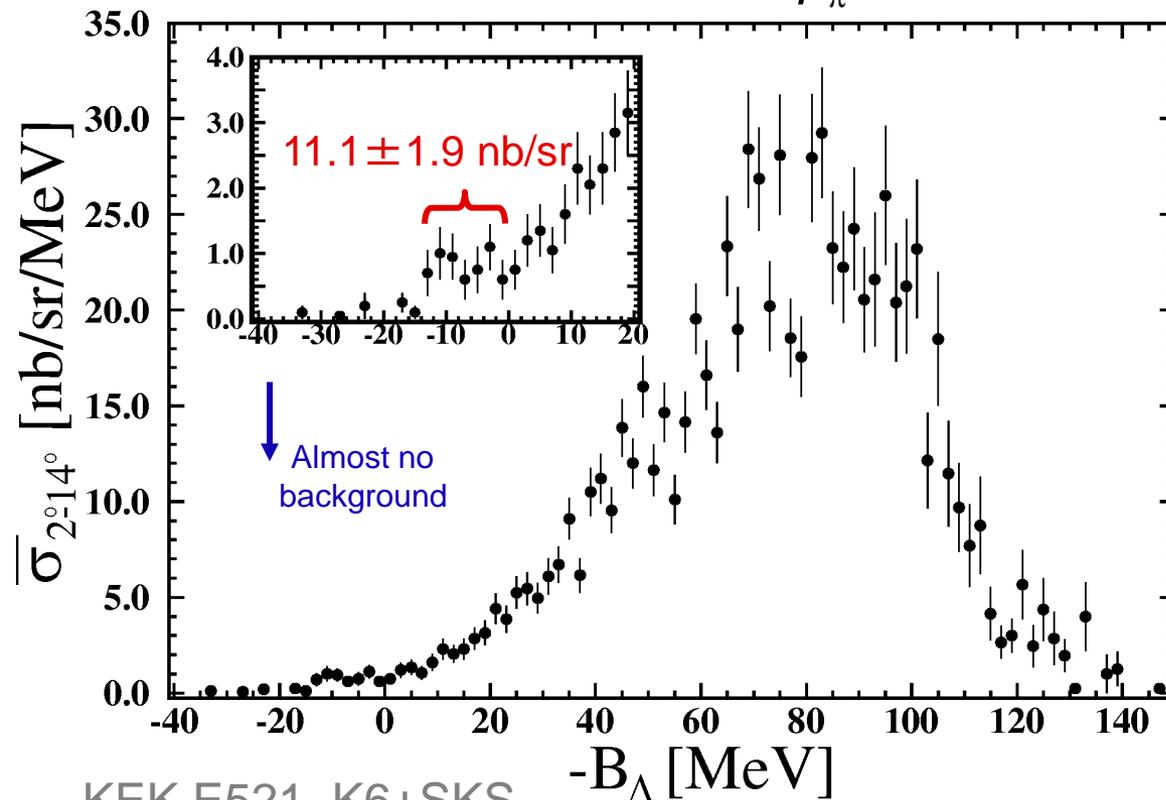
Λ -гипероны играют роль «клея», связывая нуклоны. При добавлении Λ -гиперона несвязанное ядро ${}^5\text{H}$ становится связанным ${}^6_{\Lambda}\text{H}$



Структура гиперядер меняется с увеличением числа нейтронов. Обычные гиперядра, в которых $N_p \sim N_n$, хорошо описываются в модели, где гиперон добавлен к нуклонному остову. В нейтронноизбыточных гиперядрах картина меняется: нейтронное гало движется вокруг гиперядерного остова

Гиперядра с нейтронным избытком

$^{10}\text{B} (\pi^-, \text{K}^+) ^{10}_{\Lambda}\text{Li}$ $p_{\pi} \sim 1.2 \text{ GeV}/c$

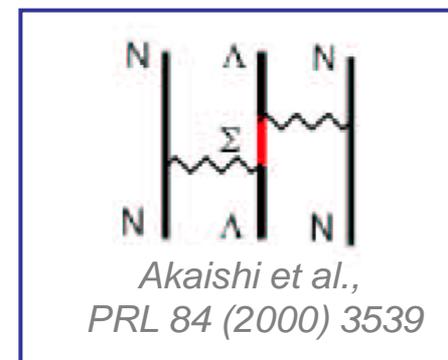


KEK E521, K6+SXS

Saha et al., PRL 94 (2005) 052502

Вопросы

- Λ - Σ связь
-> Λ NN притяжение.

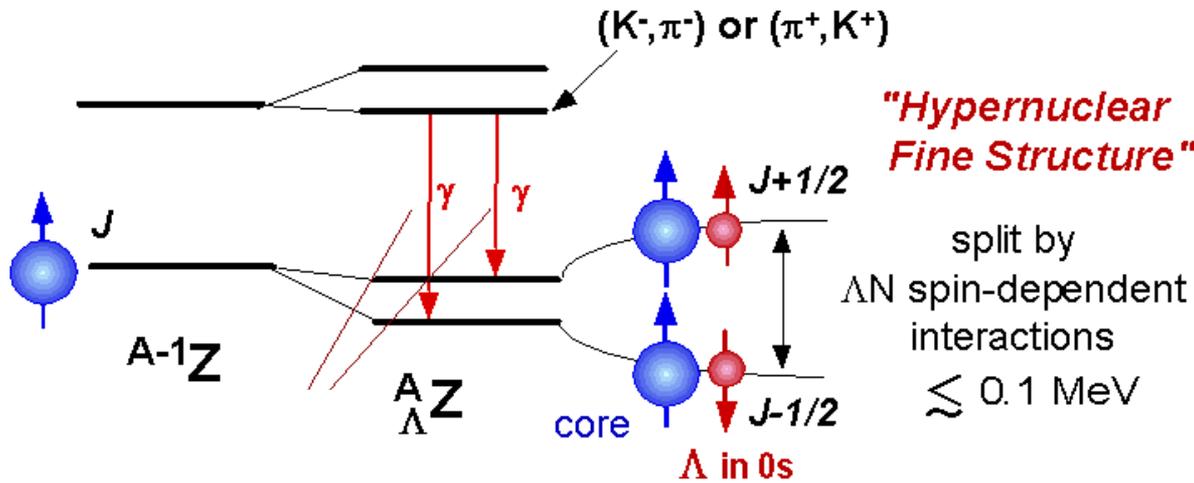


важно для n-звезд

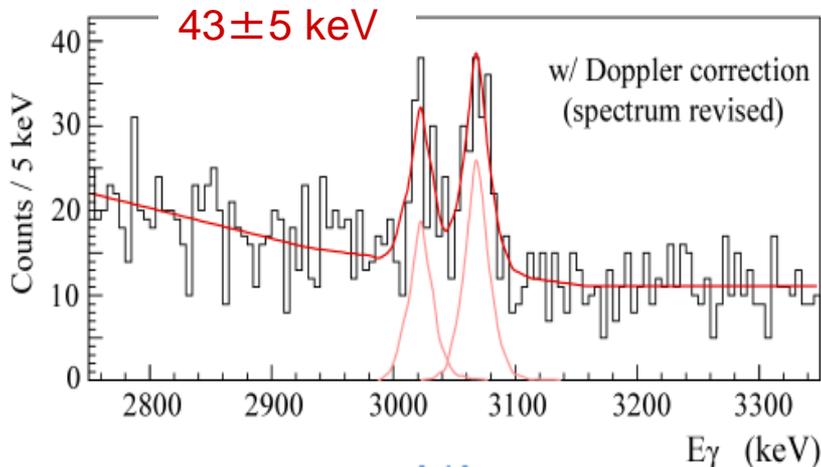
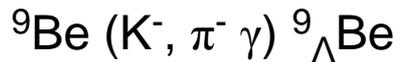
- Сечение зависит от примеси Σ^- в Λ гиперядре.
- n-гало исчезает при добавлении Λ ?

Первые данные по нейтронноизбыточным гиперядрам

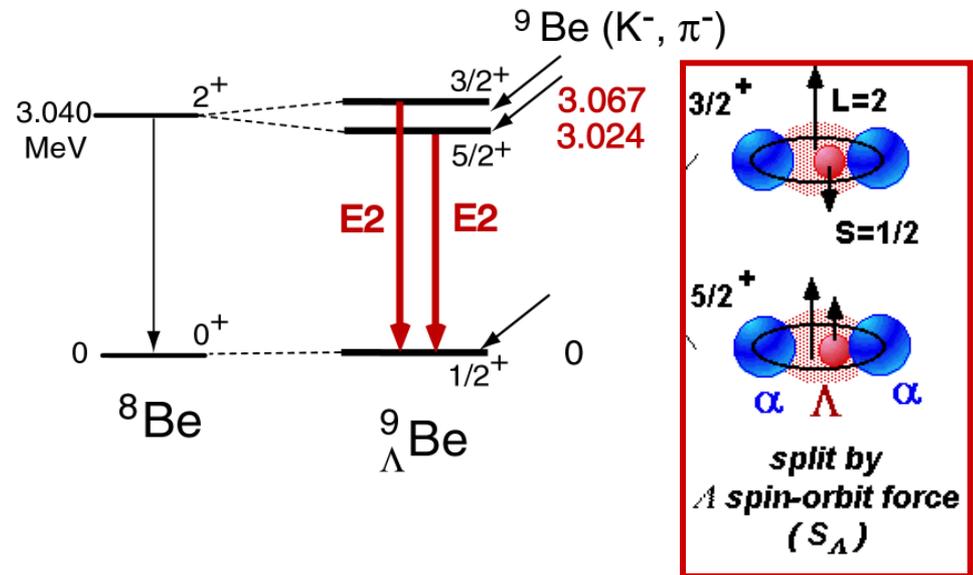
Спектроскопия гиперядер



При J_0 (спин остова) не равном нулю возникает дублет гиперядерных состояний с $J_0 \pm 1/2$, причем состояние с $J_0 - 1/2$ лежит ниже по энергии и является основным

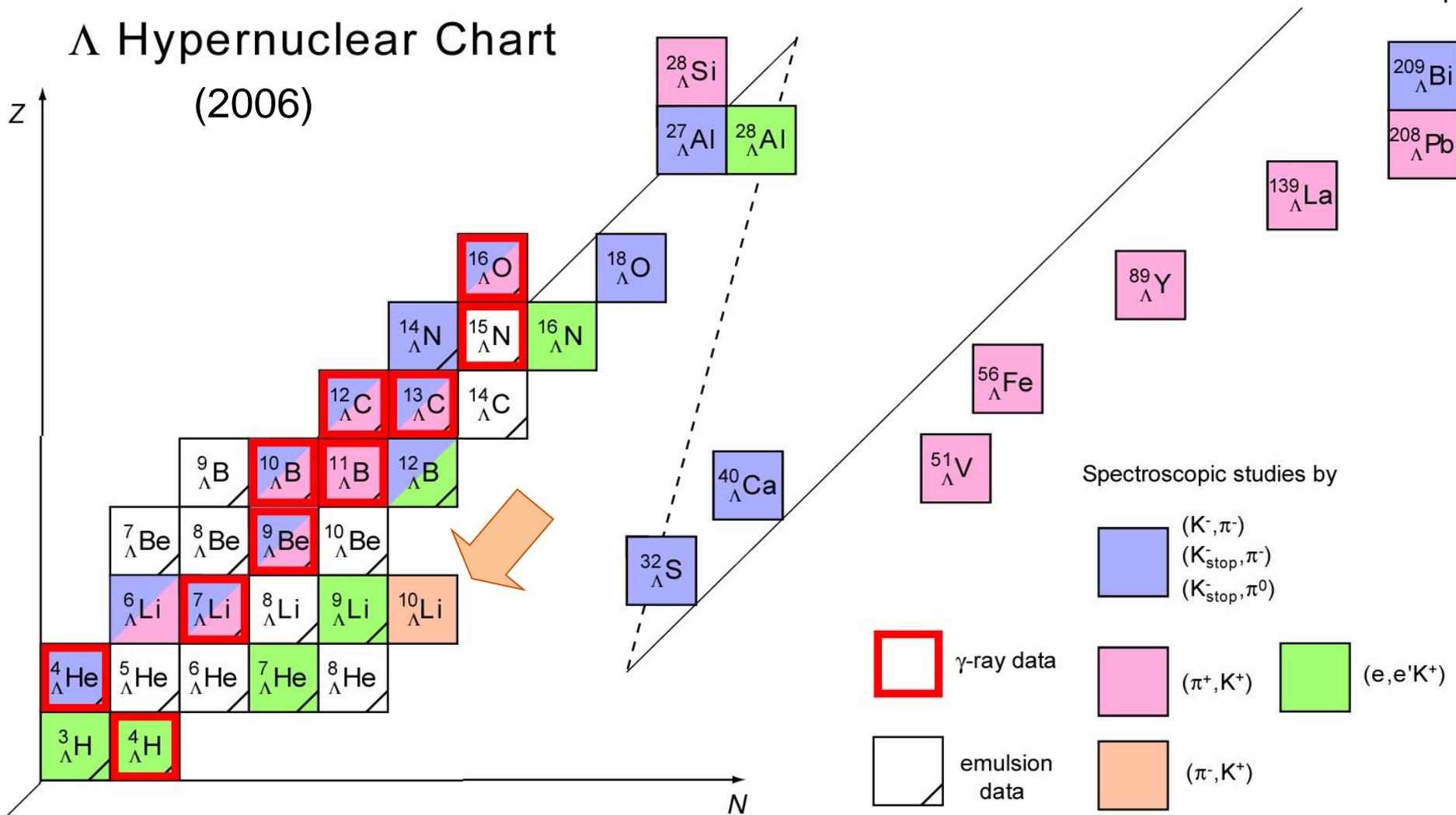


PRL 88 (2002) 082501



Спектроскопия гиперядер

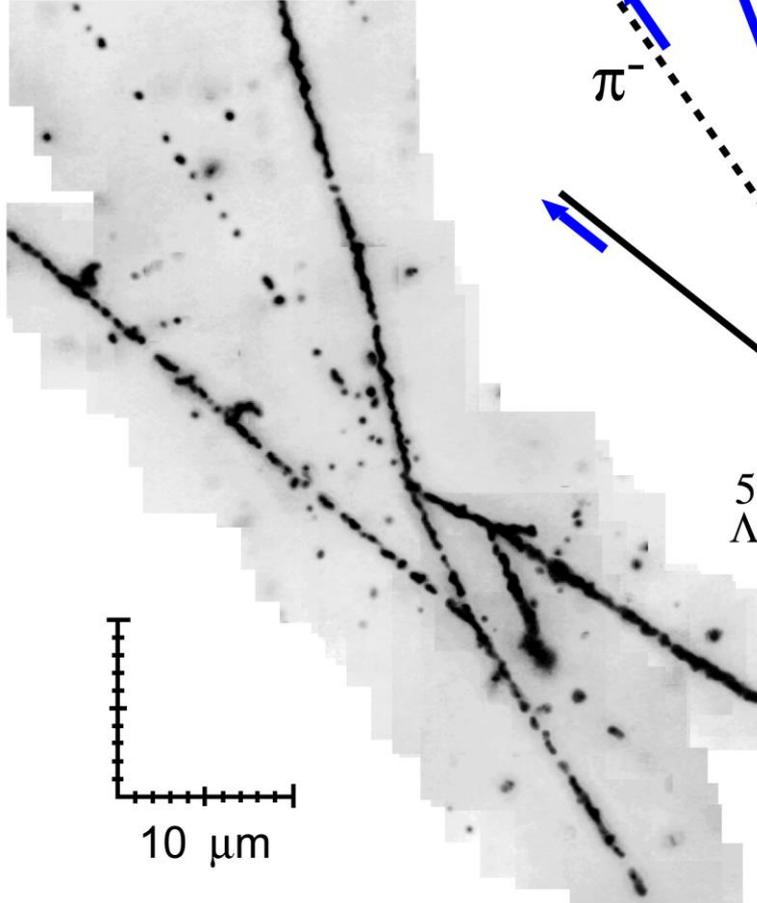
Λ Hypernuclear Chart
(2006)



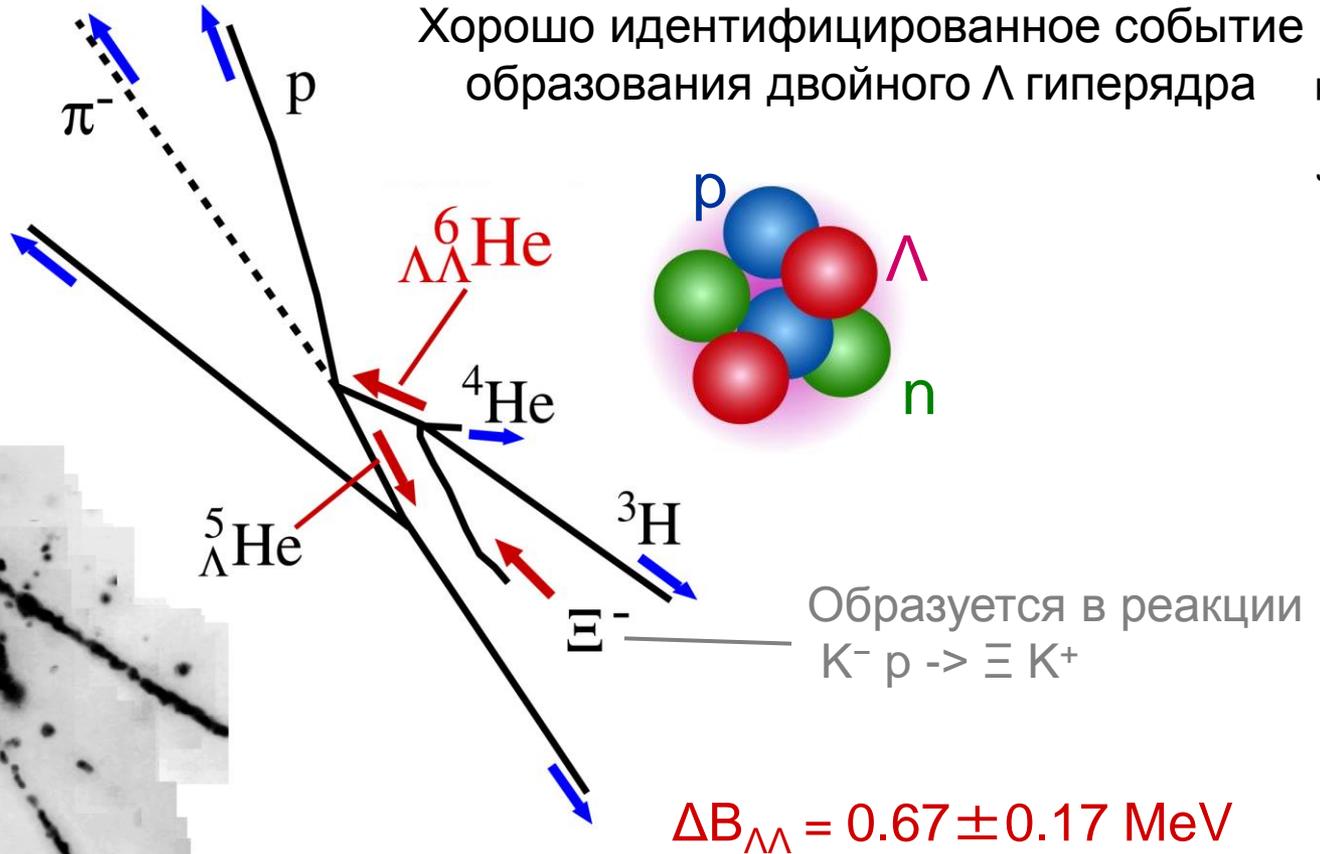
Updated from: O. Hashimoto and H. Tamura, Prog. Part. Nucl. Phys. 57 (2006) 564.

Двойные гиперядра

Nagara event



Takahashi et al., PRL 87 (2001) 212502



$\Lambda\Lambda$ взаимодействие слабо притягивающее
Связанного Н дибариона не существует.

