

Тайны атомных ядер

2017

Элементарные частицы

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

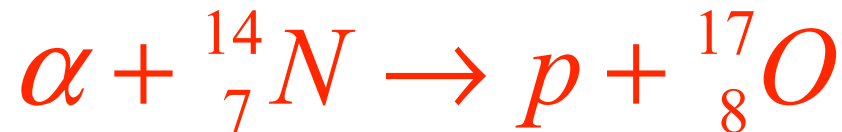
Протон

1911 – Э. Резерфорд. Открытие атомного ядра



1919 – Э. Резерфорд. Открытие протона

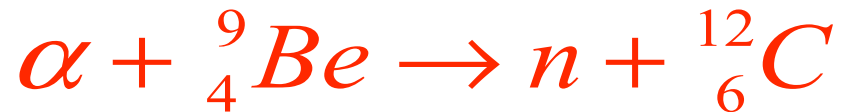
$$Q_p = -q_e; m_p = M(^1\text{H})$$



Нейтрон

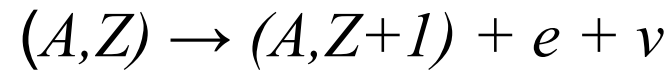
1932 г. Дж. Чадвик. Открытие нейтрона

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



Нейтрино

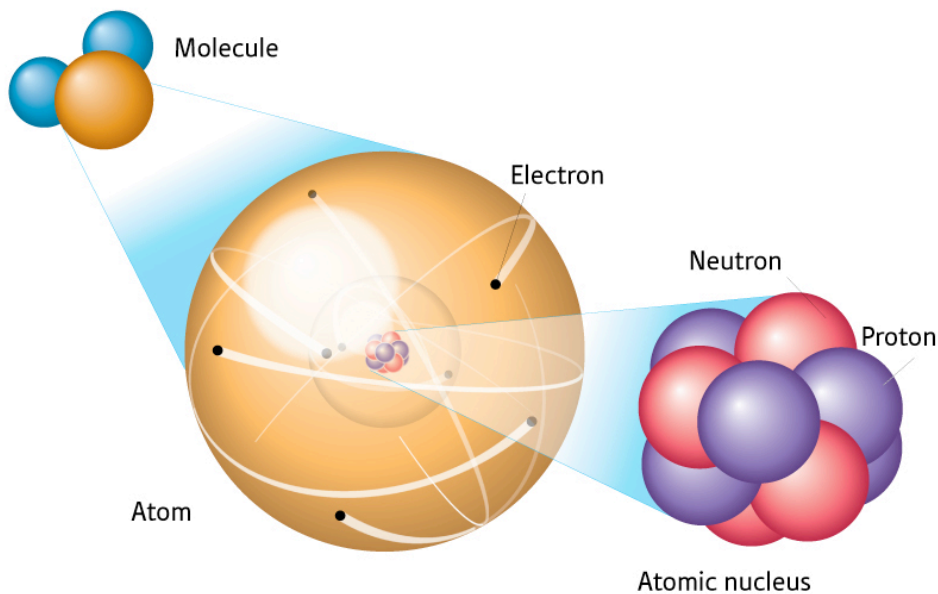
1930 г. В. Паули. Гипотеза нейтрино



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



		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



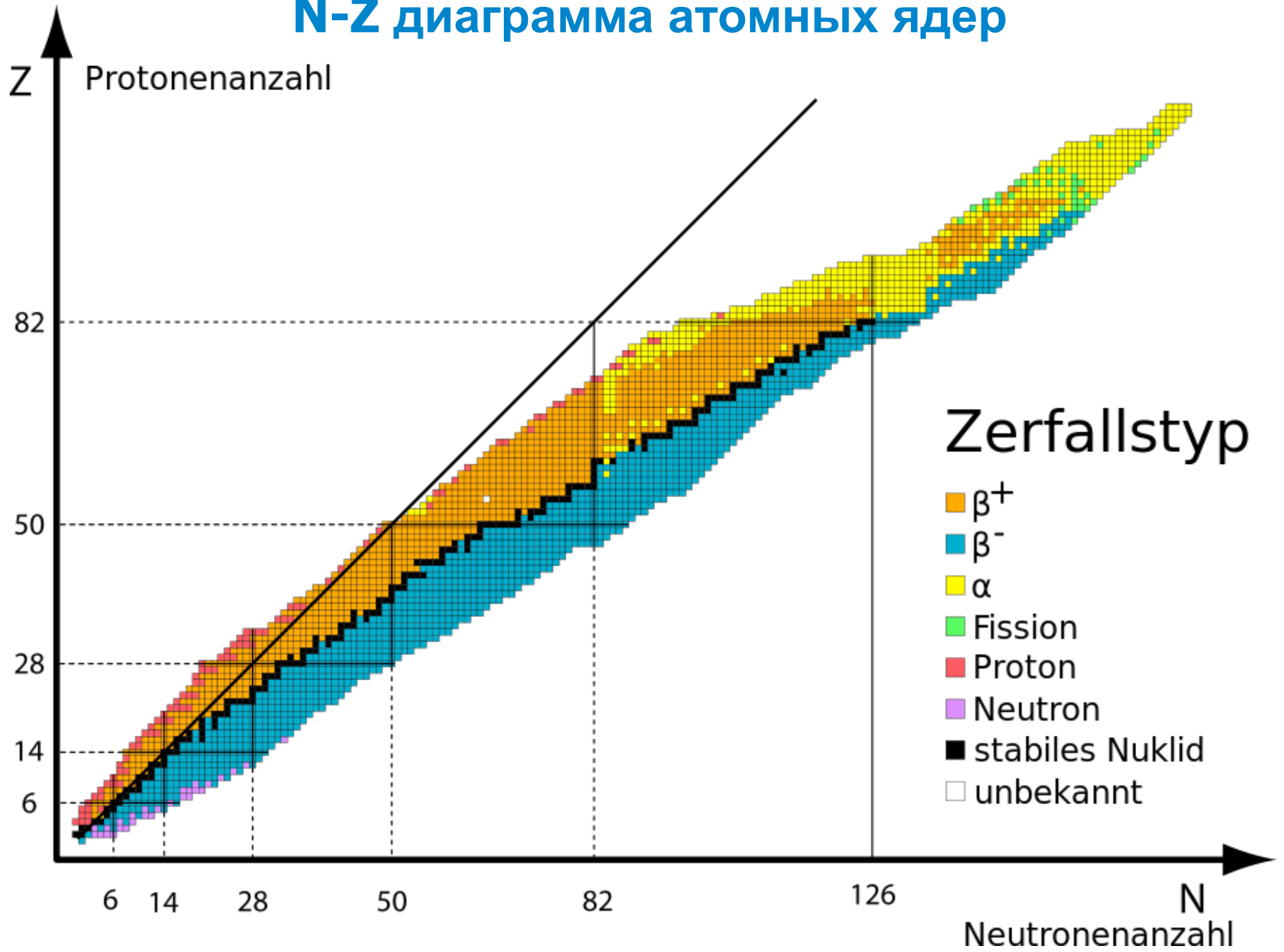
$^{208}_{82}\text{Pb}$

$$Z = 82$$

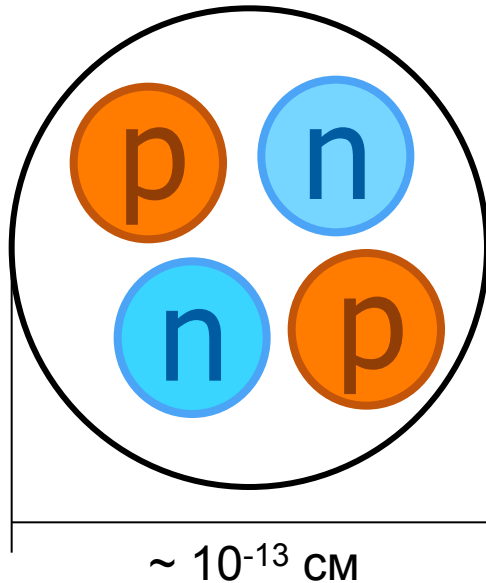
$$N = 126$$

$$A = 208$$

N-Z диаграмма атомных ядер



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

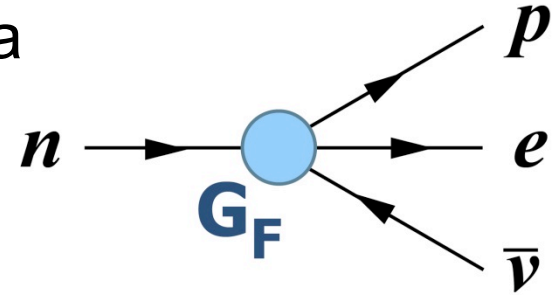
$$r_{NN} \sim 1 \text{ ФМ} (10^{-13} \text{ см})$$

Теория Ферми

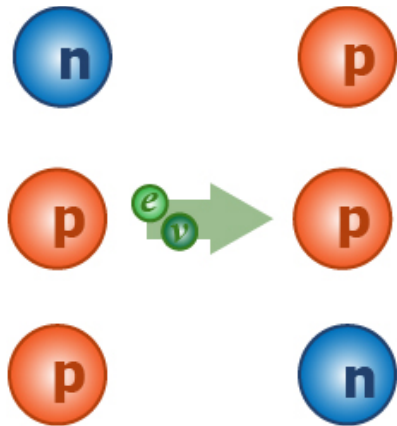
1934 – Э. Ферми. Теория β -распада

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

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



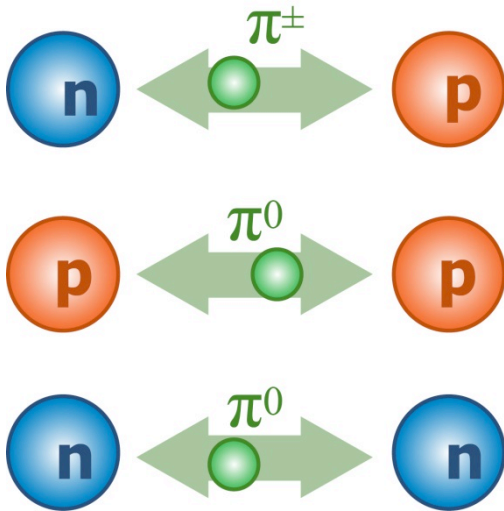
Для $E_\nu \sim 1 \text{ МэВ}$ $\sigma_\nu \sim 10^{-43} \text{ см}^2$, $L_\nu \sim 10^{20} \text{ см}$



Для ядерных сил
радиус взаимодействия

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

Теория Юкавы

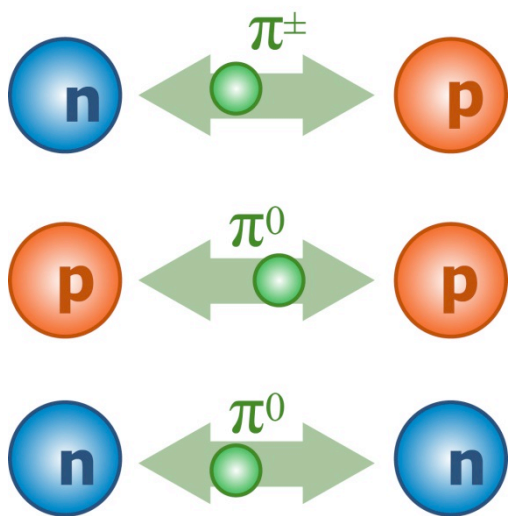


1935 г. Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал мезоны – кванты ядерного поля.

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

$$m_\pi \sim 200 m_e$$

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.

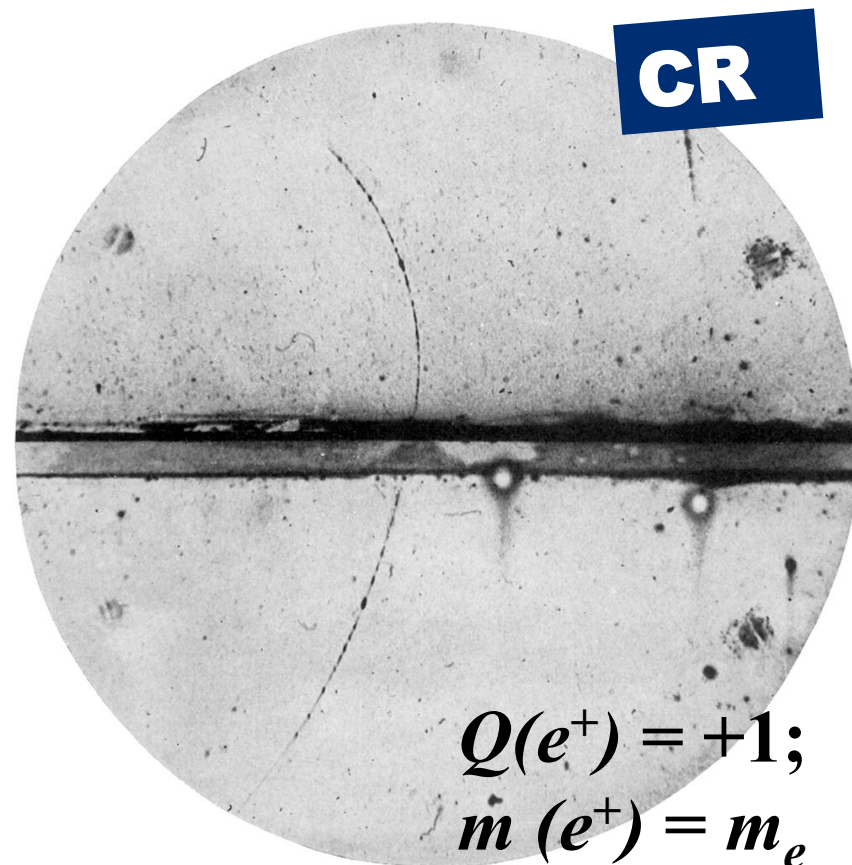
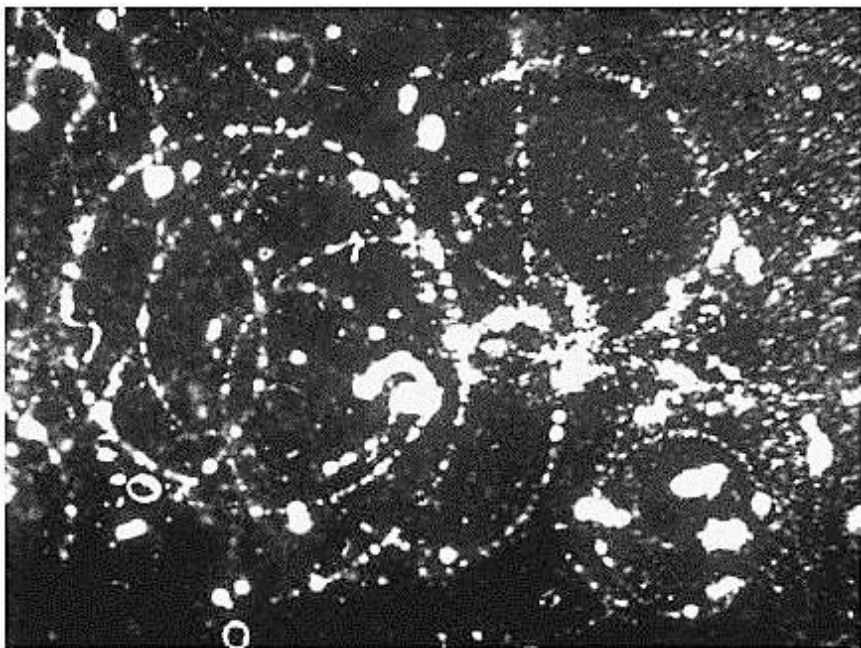
$$Q_{\pi} = \pm q_e; \quad m_{\pi} = 140 \text{ МэВ} \quad J=0$$



1950

Космические лучи

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



1932 г. Позитрон

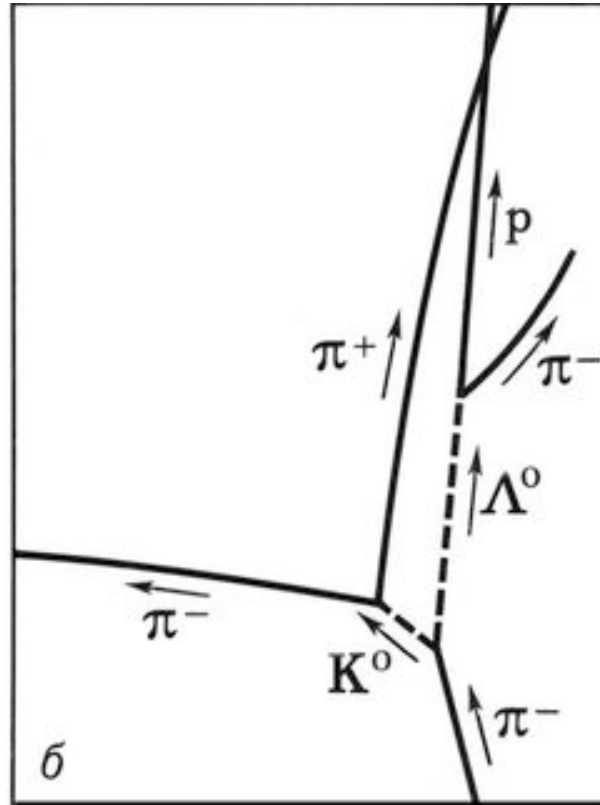


1936 г К. Андерсон
За открытие позитрона

CR

Странные частицы

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

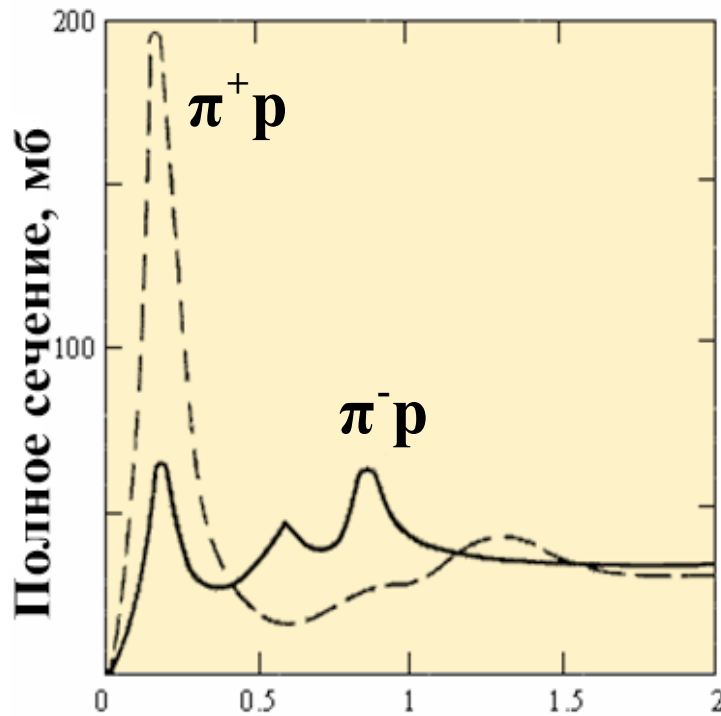


$\Delta L \approx 0.3$ мм

$\Delta t \approx 1$ сек

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

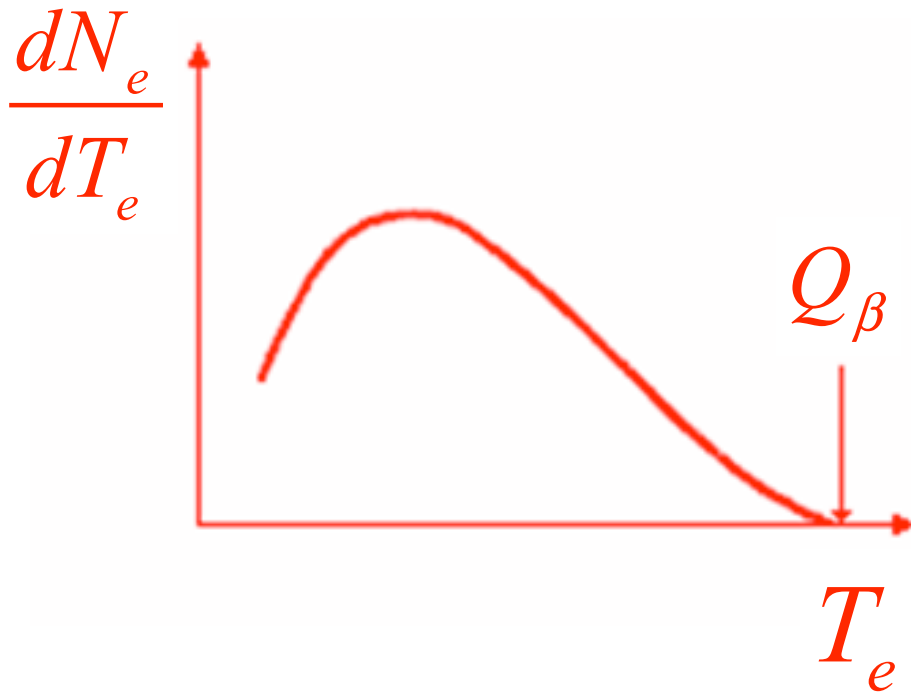
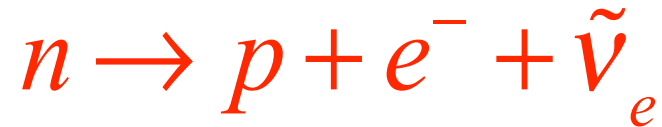


Как устроен Мир. 60-е годы XX века

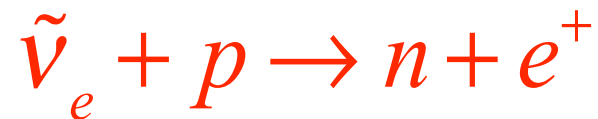
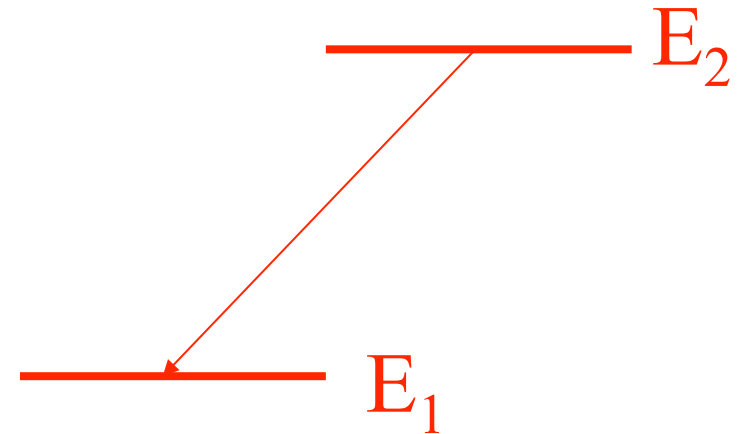
Фермионы $J = 1/2, 3/2, \dots$		Бозоны $J=0, 1, 2 \dots$	
Барионы	Лептоны	Фотон	Мезоны
Нуклоны p, n	Электрон e^-	γ	Пионы π^-, π^+, π^0
Резонансы Δ, N	Мюон μ^-		Странные K -мезоны
Гипероны $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega^-$	Нейтрино ν_e		Нестранные ρ -, ω - мезон
$B = 1$	$L = 1$		$B = 0$

Нейтрино

1931 г. В.Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов β -распада



Алгебра частиц-античастиц

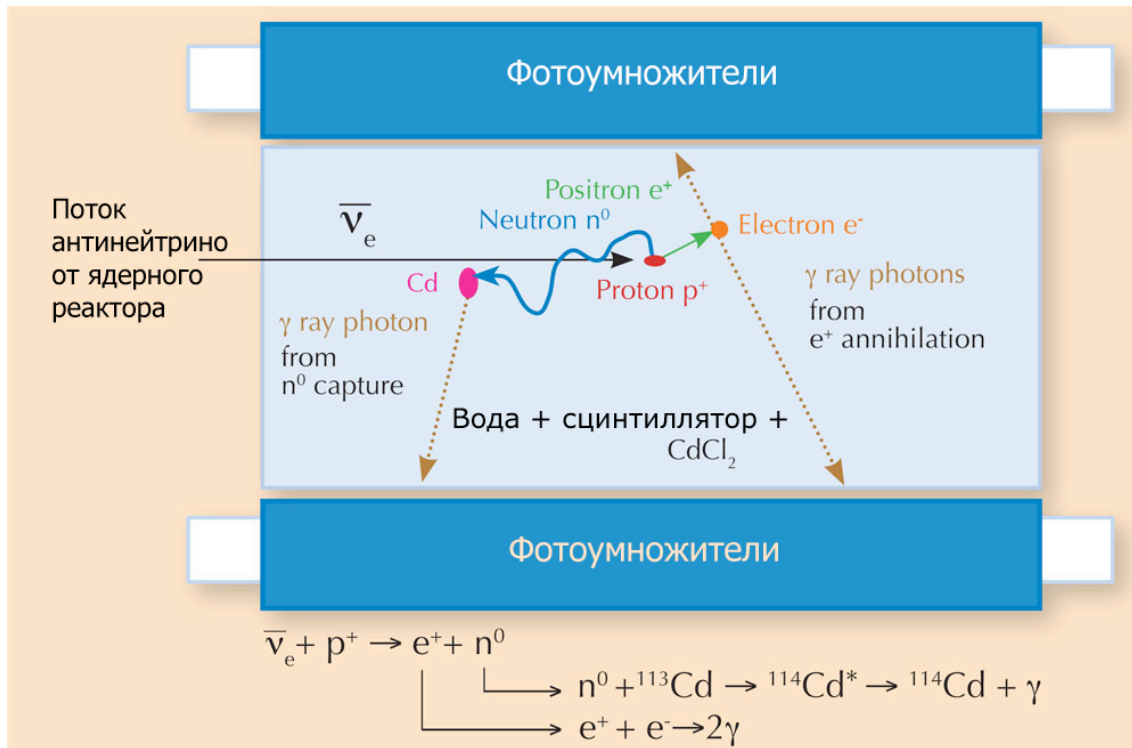


Нейтрино

1956 г. Ф. Райнес, К. Коэн. Регистрация антинейтрино



1995



$$\sigma = 12_{-4}^{+7} \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$$

100 дней измерений
567 событий
(фон 209 событий)

Нейтрино

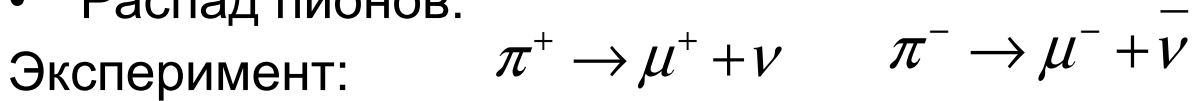
1962 г. Л. Ледерман, М. Шварц, Дж. Стейнбергер.
Открытие мюонного нейтрино



1988

- Идентификация двух типов нейтрино

- Распад пионов:



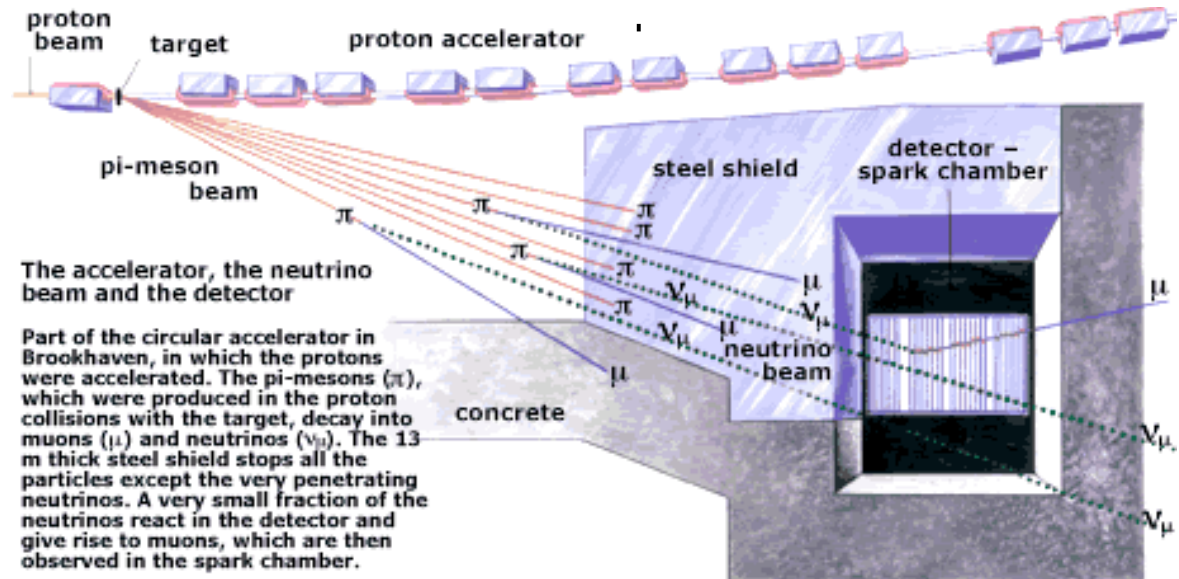
Образуются мюоны ?

Или электроны?



Были зарегистрированы только мюоны, следовательно

$$\nu_e \neq \nu_\mu$$



The accelerator, the neutrino beam and the detector

Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

Лептоны

	Масса МэВ/с ²	Электрический заряд, q	Лептонное число
ν_e	$< 10^{-5}$	0	$L_e = +1$
e^-	0,511	-1	$L_e = +1$
$\bar{\nu}_e$	$< 10^{-5}$	0	$L_e = -1$
e^+	0,511	+1	$L_e = -1$
ν_μ	$< 0,2$	0	$L_\mu = +1$
μ^-	106	-1	$L_\mu = +1$
$\bar{\nu}_\mu$	$< 0,2$	0	$L_\mu = -1$
μ^+	106	+1	$L_\mu = -1$

Лептонные числа

Каждому поколению лептонов следует приписать свой лептонный заряд, соответственно L_e , L_μ . Этот заряд, как и обычный электрический заряд, является **сохраняющимся** и **аддитивным**, т. е. заряд системы лептонов равняется сумме лептонных зарядов отдельных лептонов и должен быть одинаковым до и после завершения любого процесса.

Закон сохранения L_e , L_μ

В процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, каждое лептонное число L_e , L_μ сохраняется порознь.

Лептонные числа

Во всех процессах происходящих в замкнутой системе лептонные числа L_e , L_μ , L_τ сохраняются порознь. Поэтому

наблюдаются процессы

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$

не наблюдаются процессы

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-11},$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+ \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-12}$$

Как устроен Мир

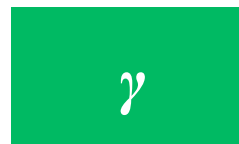
ФЕРМИОНЫ Лептоны

ν_e	ν_μ
e	μ

I

II

БОЗОНЫ



Электромагнитное

Слабое

АДРОНЫ

БАРИОНЫ

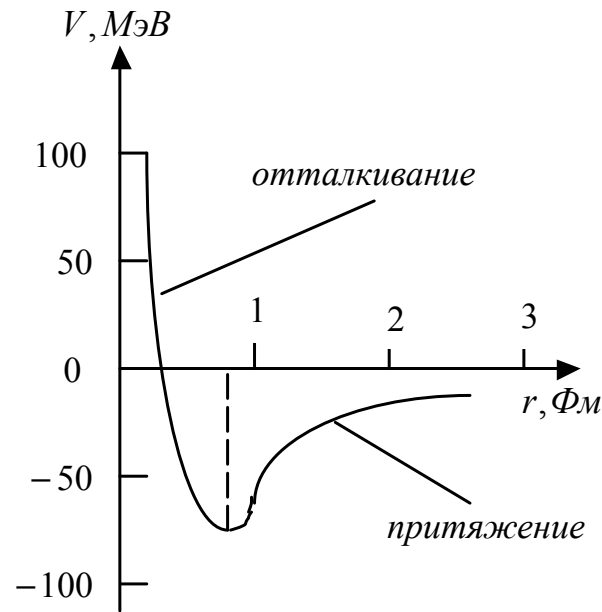
МЕЗОНЫ

нуклоны	p, n	пионы	π^+, π^0, π^-
резонансы	$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ и тд	каоны	K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 и тд
гипероны	$\Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Omega^-$ и тд	«векторные»	$\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$ и тд

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**

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

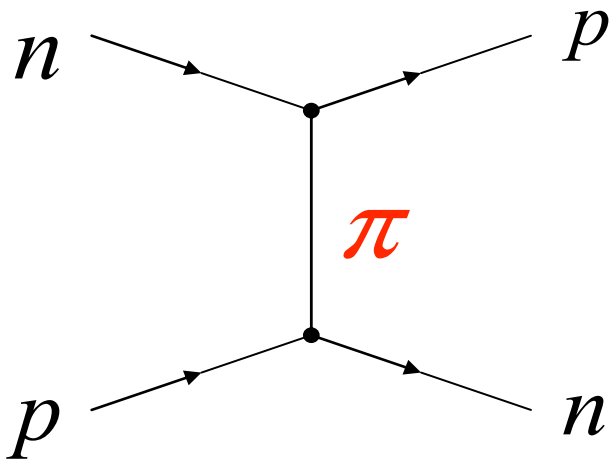
где $a = \frac{\hbar}{mc}$, g_N – ядерный заряд нуклона.

NN - взаимодействие

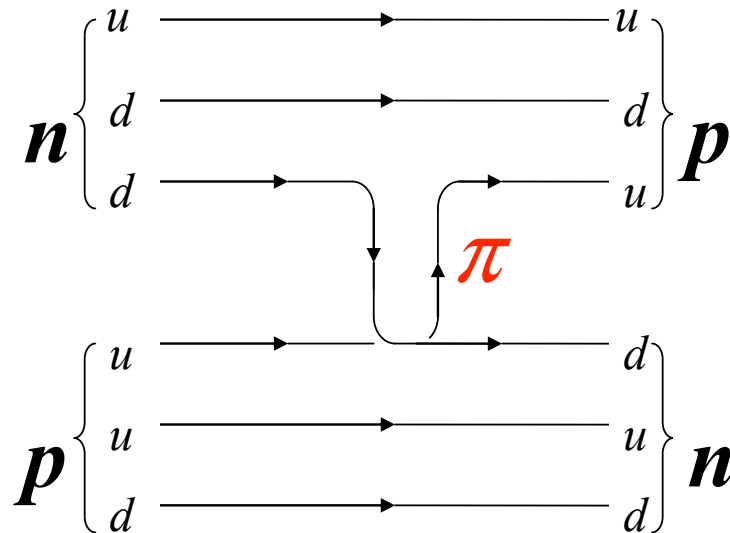
$$R = \frac{\hbar}{mc} \approx 1,5 - 2,0 \text{ ФМ.}$$

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

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.

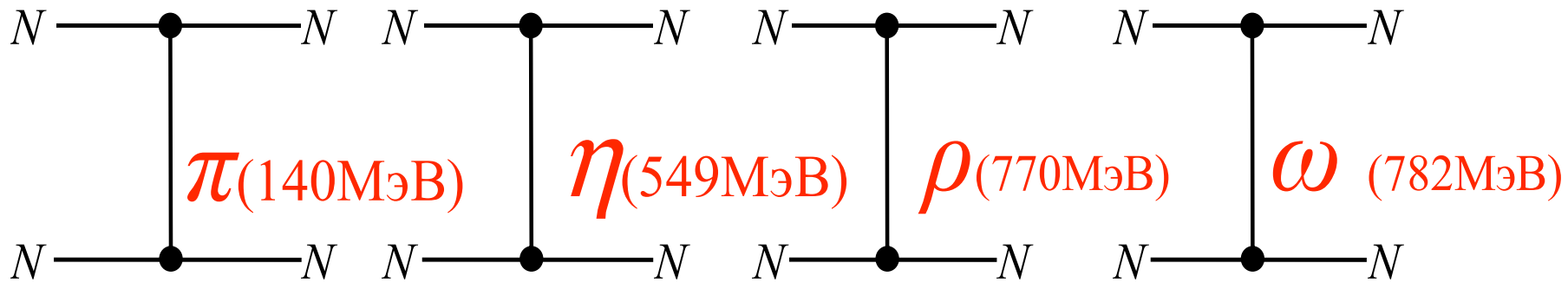


Однопионное pn -взаимодействие



Кварковая диаграмма pn -взаимодействия

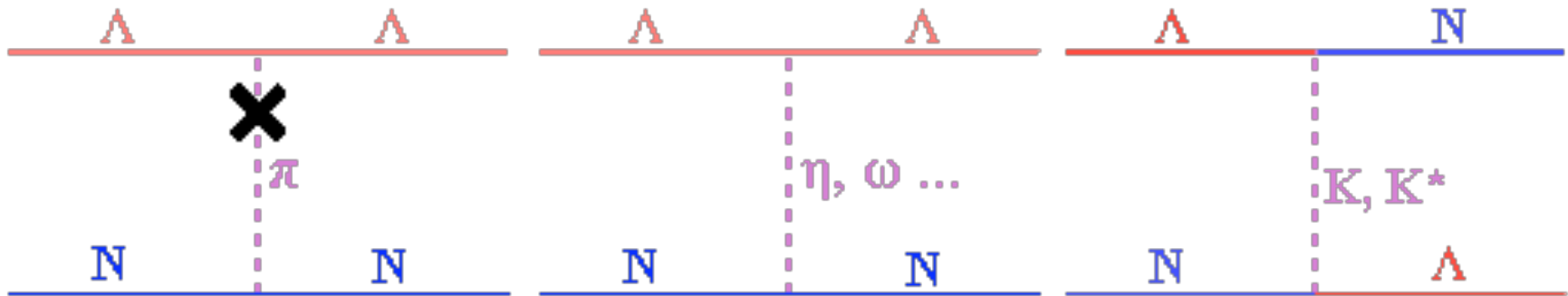
NN - взаимодействие



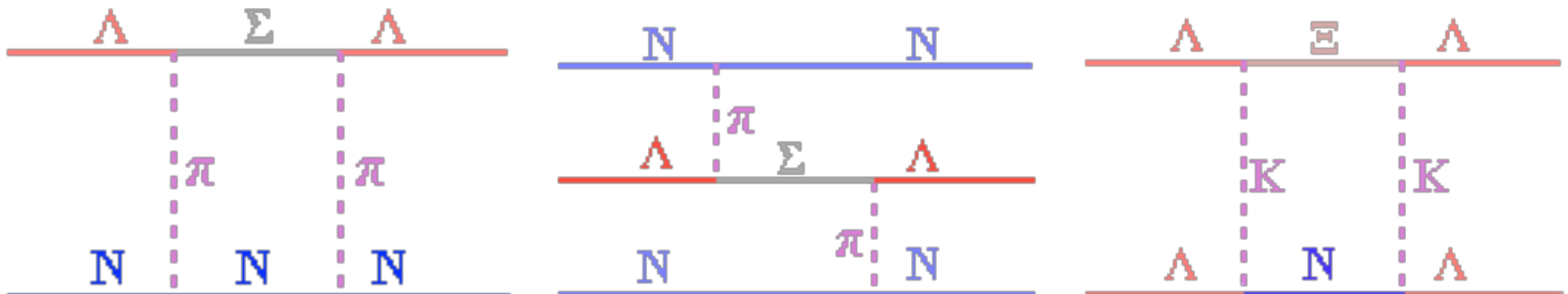
Взаимодействие между нуклонами зависит от спина частицы, переносящей взаимодействие. Обмен векторными частицами $J=1$ приводит к отталкиванию между нуклонами. Это отталкивание является аналогом отталкивания двух одноимённых зарядов в электростатике. Обмен скалярными мезонами $J=0$ приводит к притяжению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

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

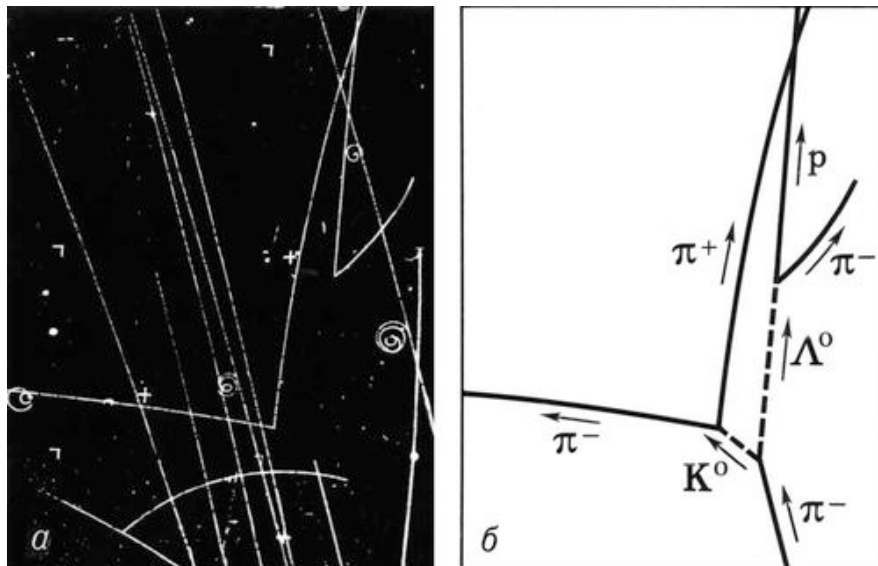
ΛN - взаимодействие



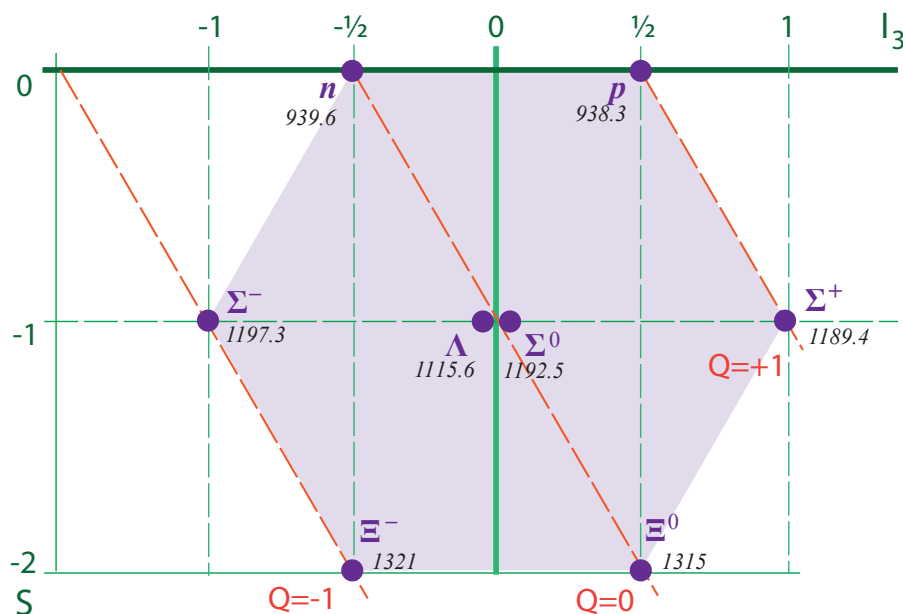
Однопионный обмен в системе ΛN запрещен по изоспину. Возможен обмен мезонами с нулевым изоспином (η , ω), а также обмен странными мезонами (K - мезоны). Поскольку пион - легчайший из мезонов, запрет однопионного обмена означает, что радиус ΛN -взаимодействия меньше, чем нуклон-нуклонного. Кроме того,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



Гипероны



БАРИОНЫ $J^P = \frac{1}{2}^+$



Изоспин I , странность S :

Λ (лямбда)-гиперон: $I = 0, S = 1$

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

$I = 0, S = 1$

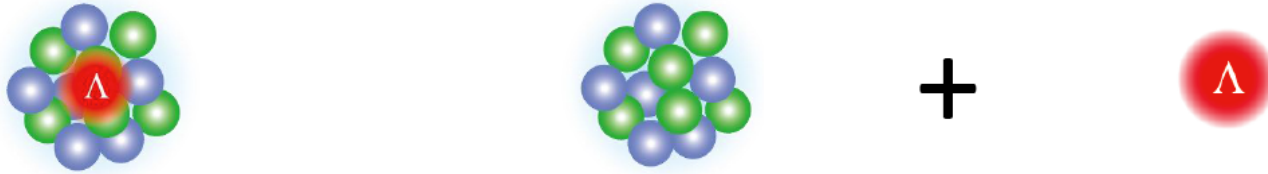
Каскадные гипероны

Ξ (кси)-гипероны (Ξ^0, Ξ^-):

$I = \frac{1}{2}, S = 2$

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

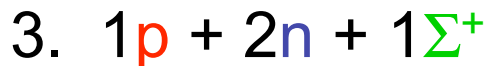
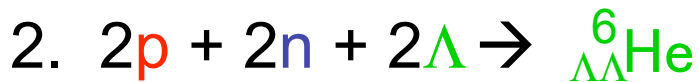
Гиперядра



A
 Z
 Λ

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

• Примеры:



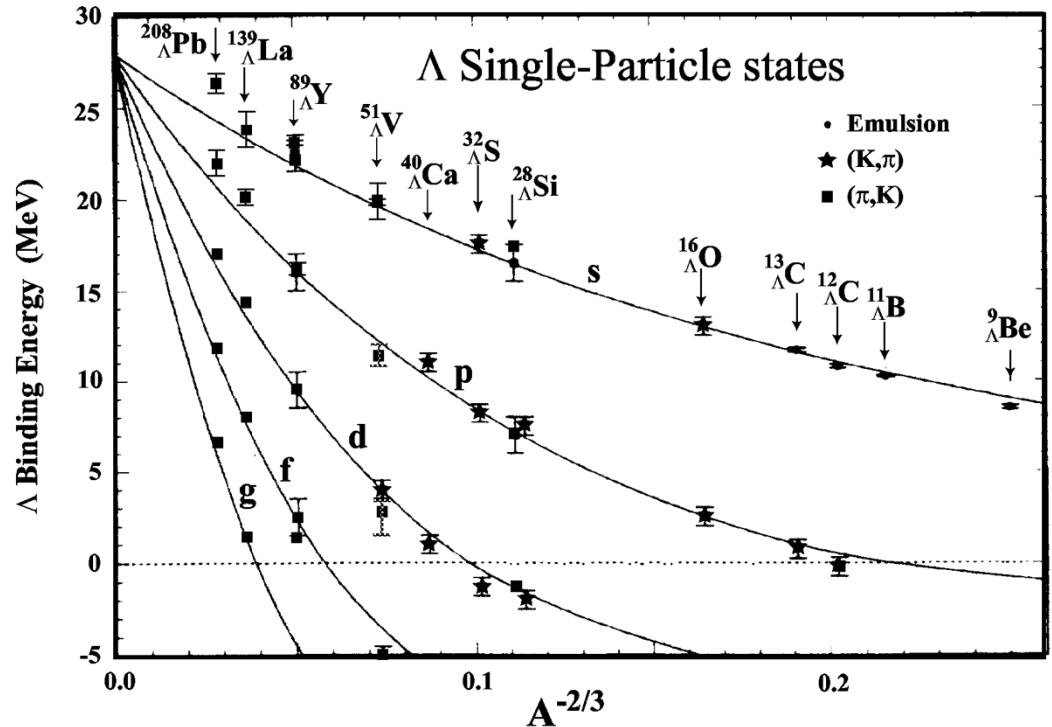
(неразличимы)

CR

Гиперядра

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

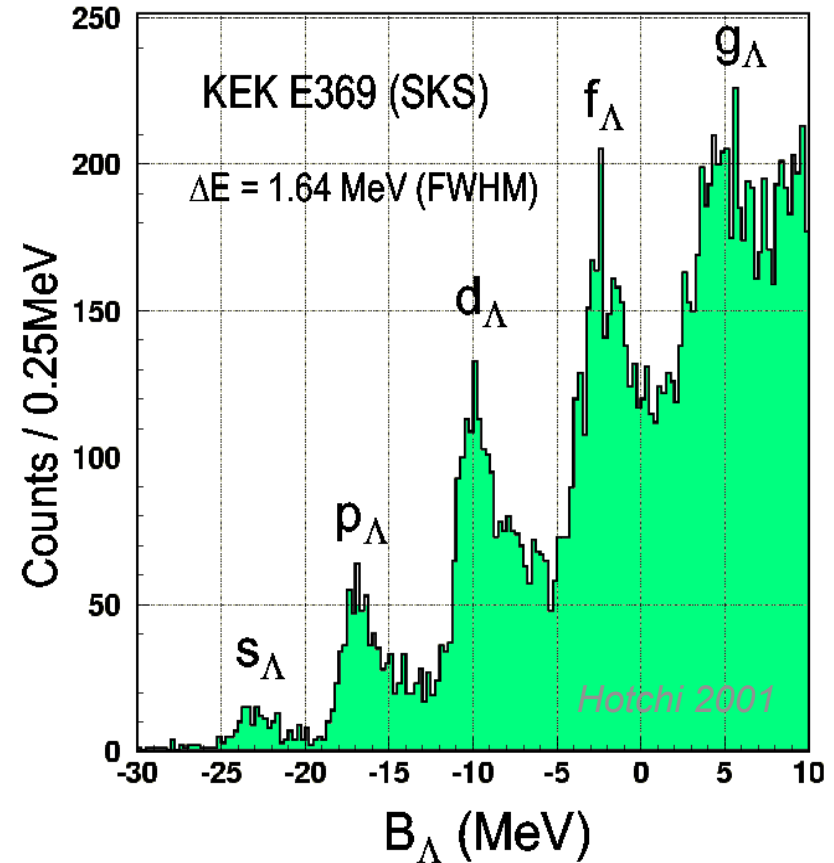
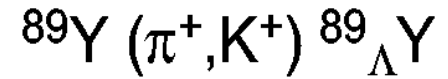
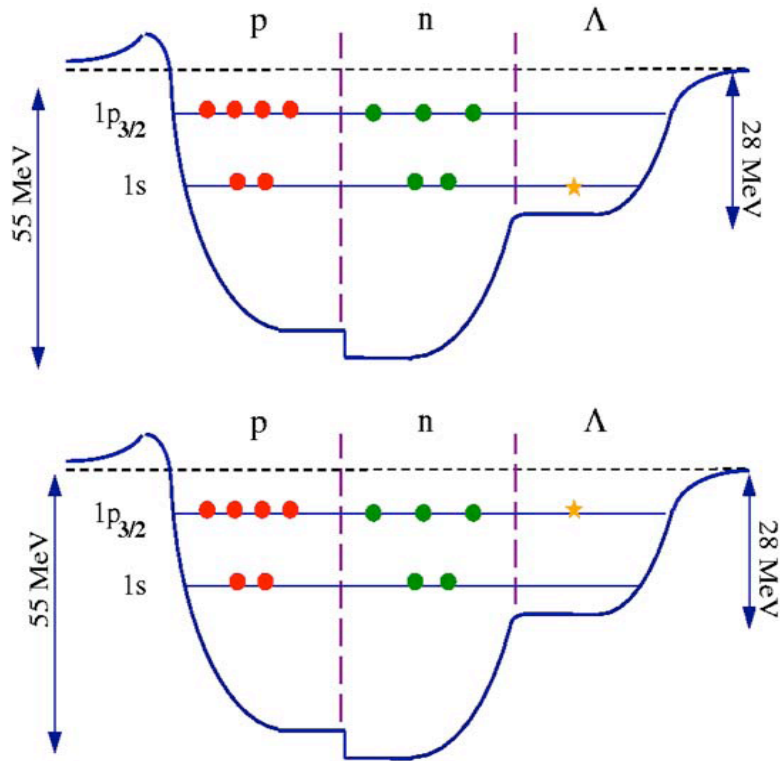
$$B_{\Lambda}(^{A+1}_{\Lambda}Z) = E_{CB}(^{A+1}_{\Lambda}Z) - E_{CB}(^AZ)$$



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

$N_u \sim N_d \sim N_s$



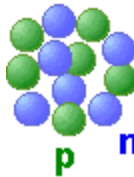
“Stable”

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

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

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

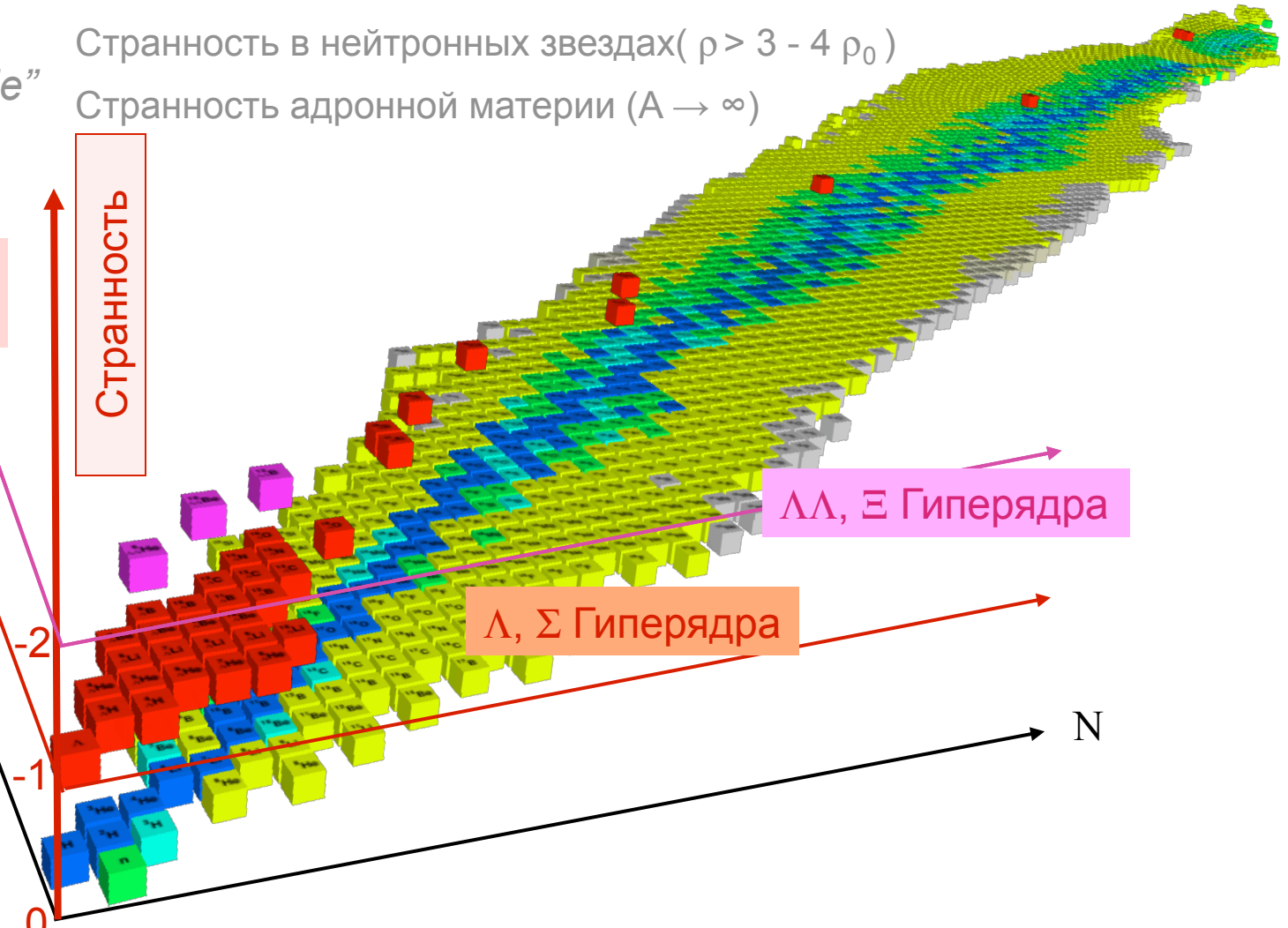
Рост
ПЛОТНОСТИ



Странность

$\Lambda\Lambda, \Xi$ Гиперядра

Λ, Σ Гиперядра



3-D карта изотопов

by M. Kaneta inspired by HYP06 conference poster

Адронная материя в нейтронных звездах

Фракция барионов: зависит от ΥN , $\Upsilon\Upsilon$ взаимодействия

-> Максимальная масса звезды, скорость остывания

Для более реалистичных расчетов нужны

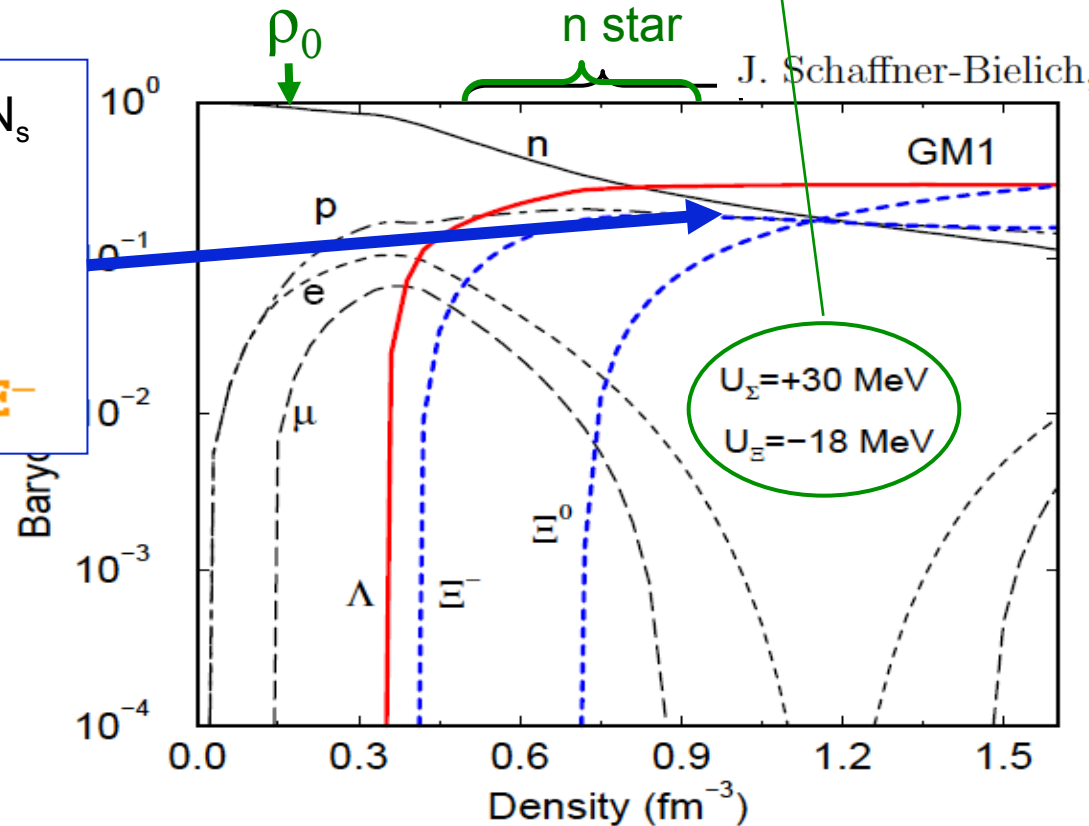
данные по гиперядрам ΞN , $\Lambda\Lambda$, ΣN , KN forces, ΛN p-wave force, NNN and YNN force, ...

Одно из возможных предположений.



$N_u \sim N_d \sim N_s$

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



ВОПРОСЫ

Тяжелые ($M = 1.97 \pm 0.04 M_\odot$)

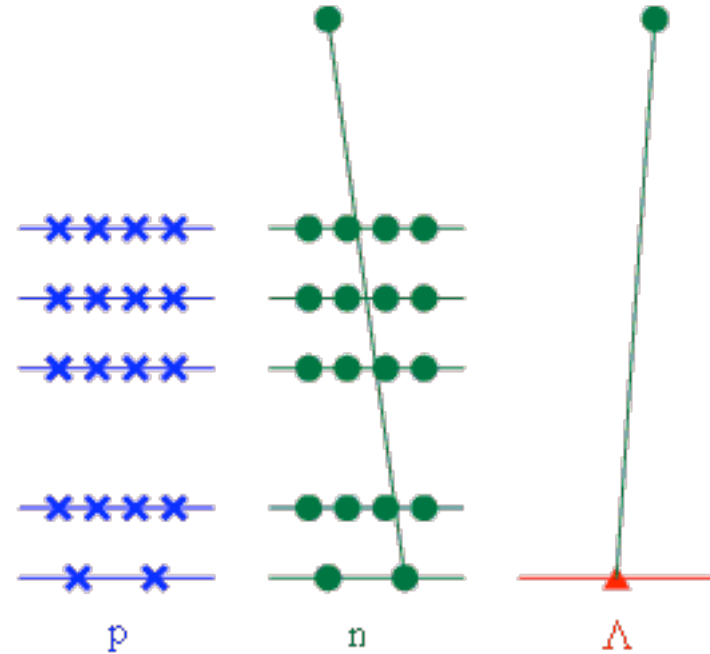
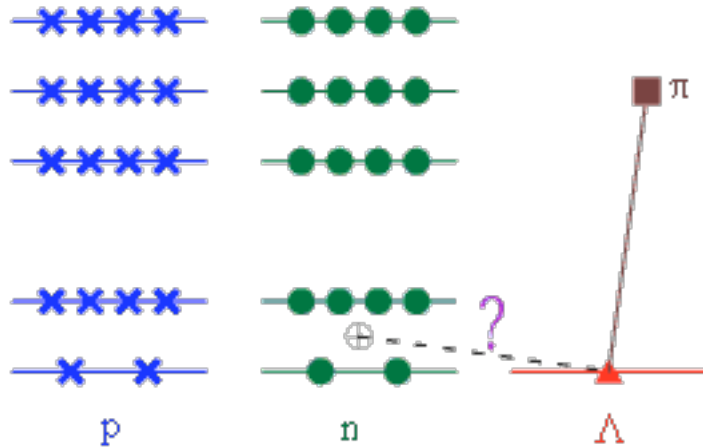
нейтронные звезды

Появление Σ, K^{bar}

Существование странной материи

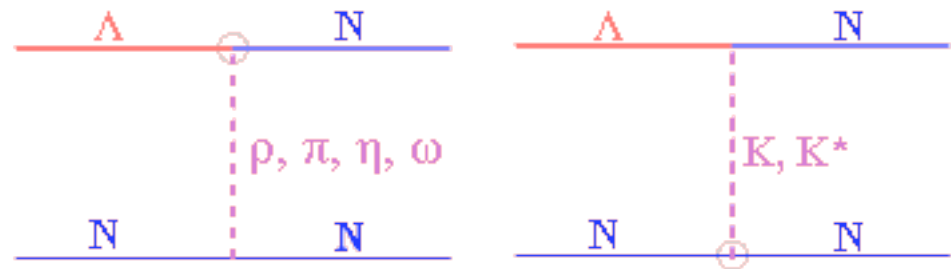
Время жизни гиперядра

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



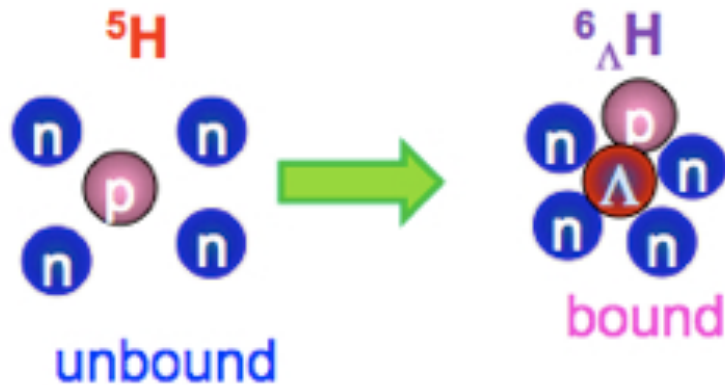
$$\Lambda + N \rightarrow N + N + 175 \text{ МэВ.}$$

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



Безмезонный распад с нарушением странности

Гиперядра с нейтронным избытком



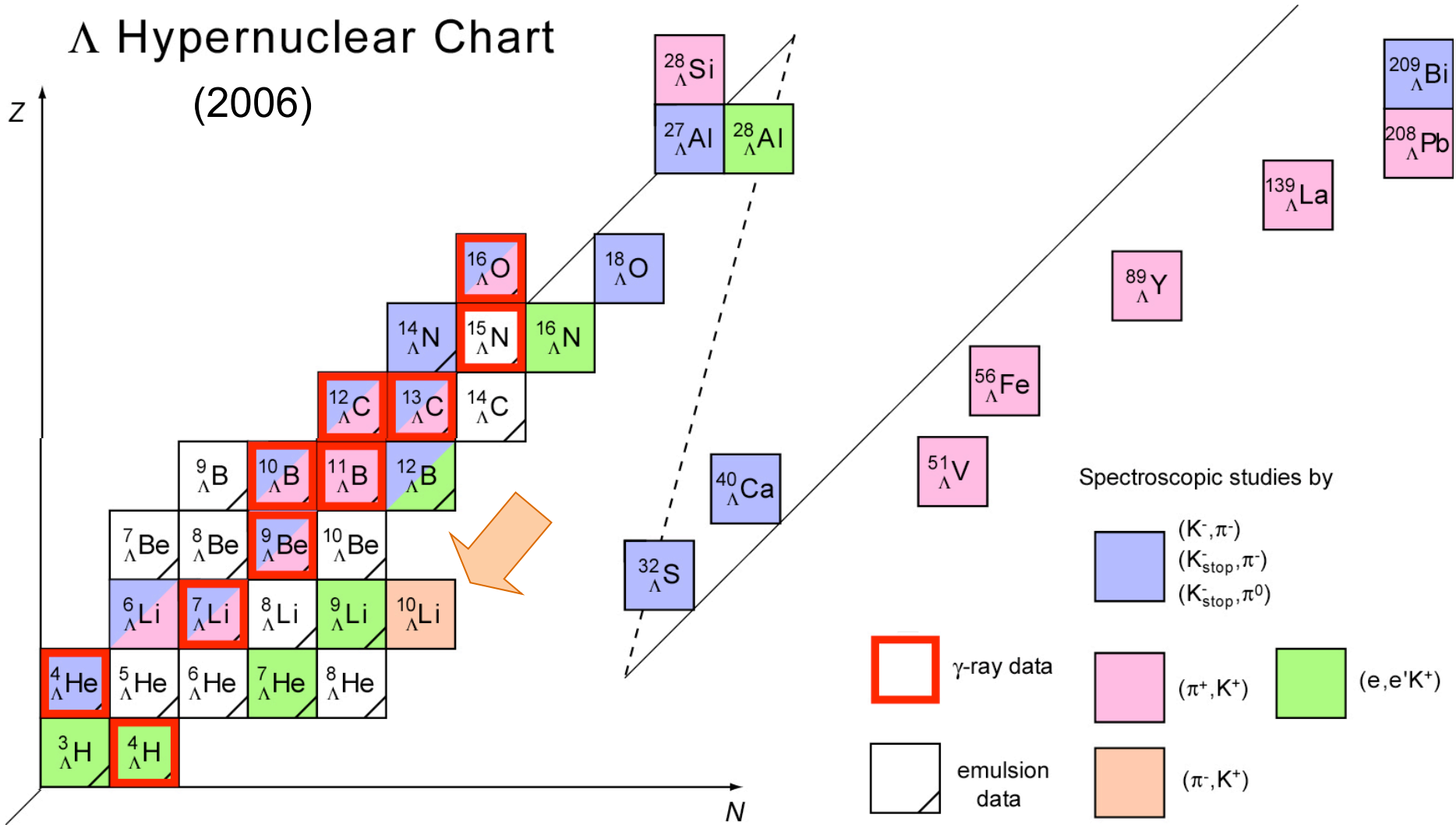
Λ -гипероны играют роль «клея», связывая нуклоны. При добавлении Λ -гиперона несвязанное ядро ${}^5\text{H}$ становится связанным ${}^6_{\Lambda}\text{H}$



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

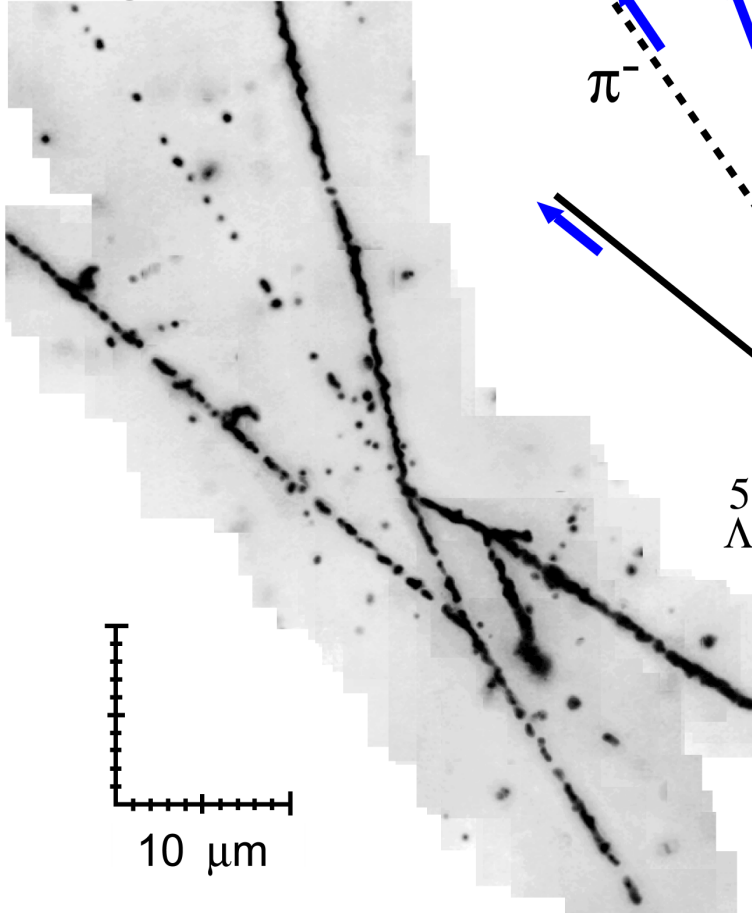
Спектроскопия гиперядер

Λ Hypernuclear Chart
(2006)

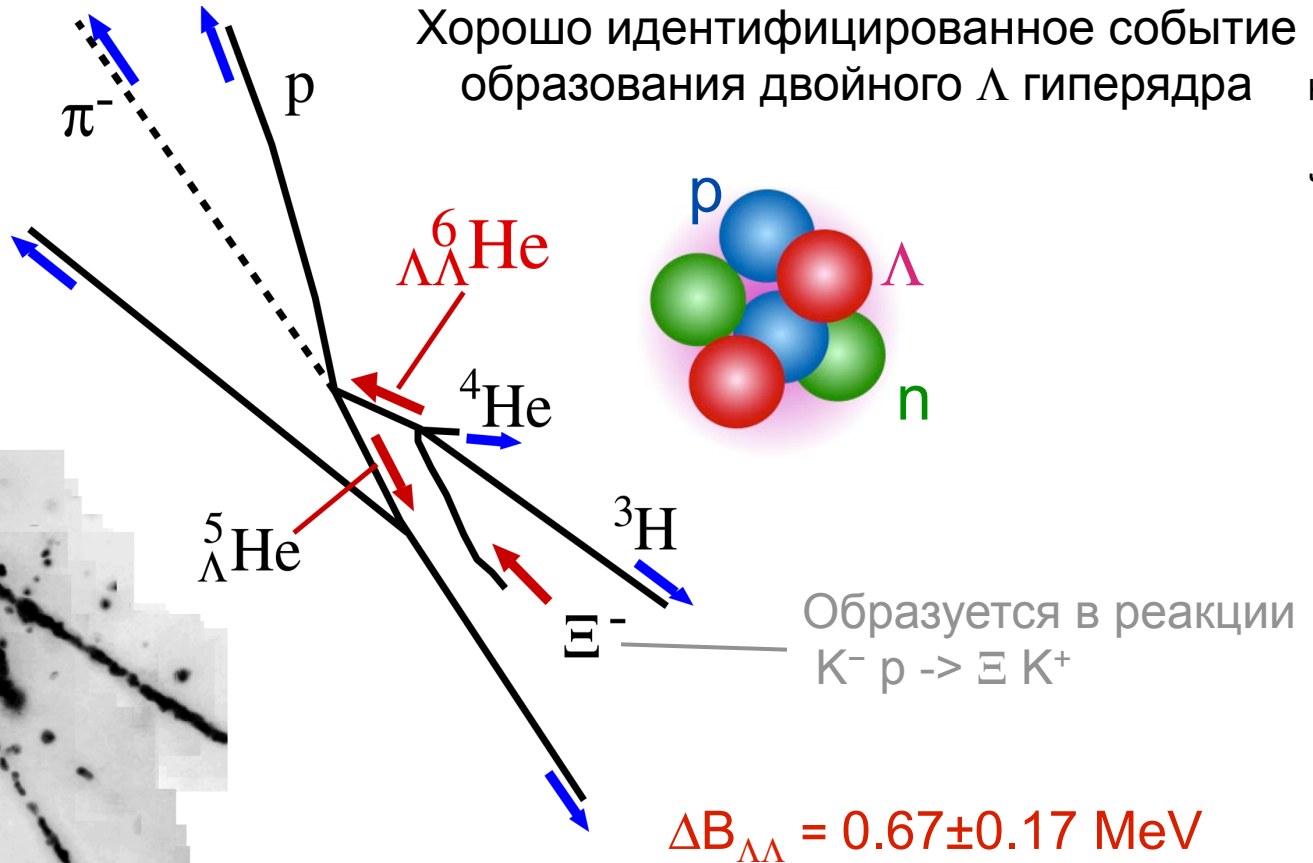


Двойные гиперядра

Nagara event



Takahashi et al., PRL 87 (2001) 212502



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

Физика
атомного
ядра

Гипер-
ядра

Физика
частиц

Астрофизика