



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

<http://enpl.mephi.ru/>

А.И.Болоздыня

Введение в ядерную физику

Лекция №12

Адроны

2017



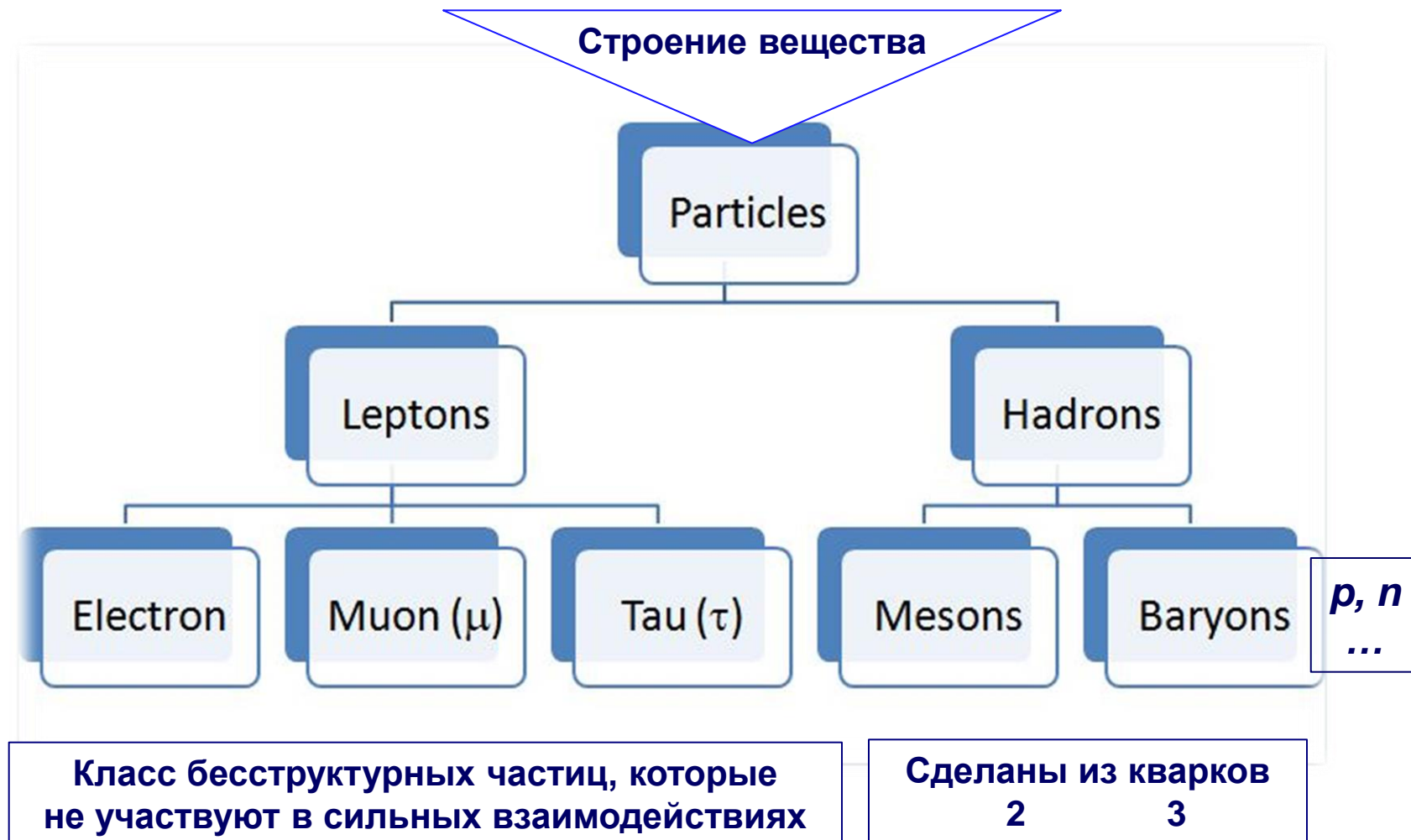
Лекция №12

Адроны

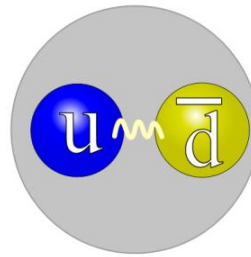
- 1. Введение**
- 2. Мезоны**
- 3. Резонансы**
- 4. Странные частицы**
- 5. Унитарная симметрия**
- 6. Кварковая структура адронов**

1. Введение

Строение вещества



2. Мезоны



Hideki Yukawa
(1907-1981)
Н.п. 1949

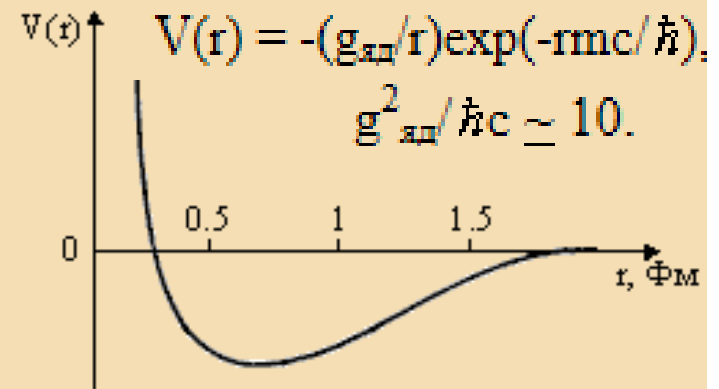
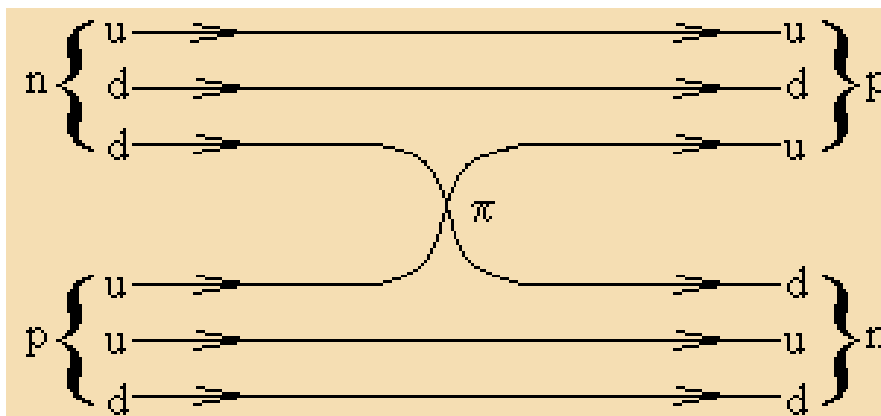


1935: Хидеки Юкава (Hideki Yukawa) разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал существование квантов ядерного поля - **пионов**

Согласно модели Юкавы, механизм ядерного взаимодействия заключается в обмене виртуальной частицей между нуклонами. За время ядерного взаимодействия $\Delta t \sim 10^{-23}$ сек образуется виртуальный **МЕЗОН**, массой m

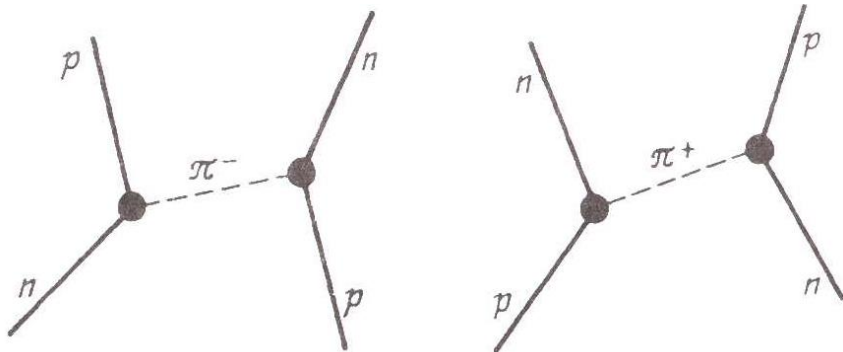
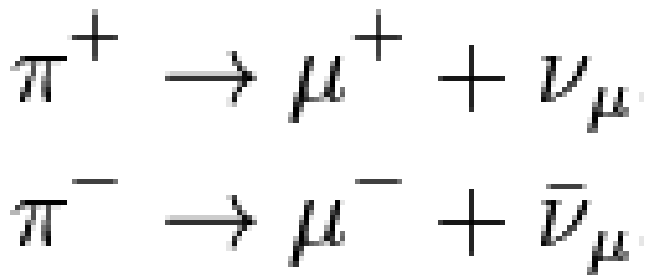
$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar \longrightarrow m = \Delta E/c^2 = \hbar / \Delta t \cdot c^2 \sim 150 \text{ МэВ}$$

Модель хорошо работает до энергий частиц < 1 ГэВ

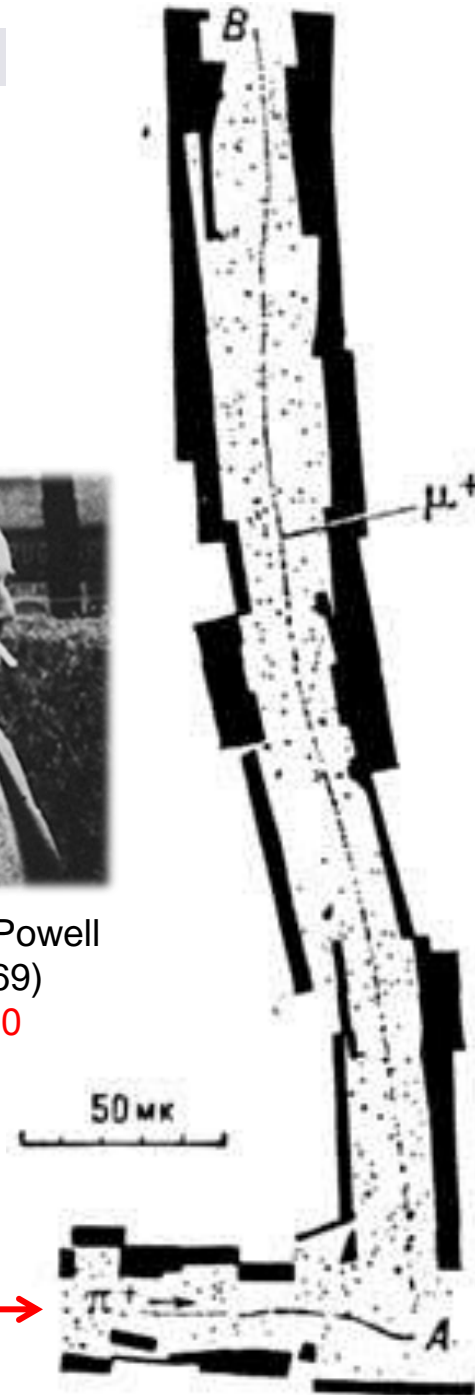


| Частица | Кварковый состав | Масса, Mc^2 (МэВ) | Время жизни (сек) | Спин-четность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада |
|----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| π^+, π^- | $u\bar{d}, d\bar{u}$ | 139.57 | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | $0(1)$ | $\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-$ |
| π^0 | $u\bar{u} - d\bar{d}$ | 134.98 | $8.4 \cdot 10^{-17}$ | $0(1)$ | 2γ |

1947 ученик Резерфорда Сесил Пауэлл и др. (Cecil Rowell et al) открыли заряженные пионы, исследуя треки космических лучей в *ядерных фотоэмульсиях*.



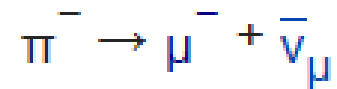
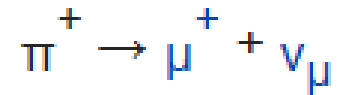
Cecil Frank Powell
(1903-1969)
Н.п.1950



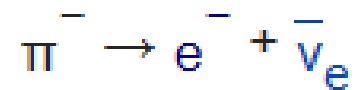
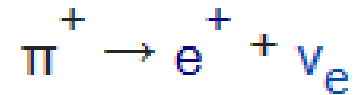
Космические лучи

Распады заряженных пионов в лептоны

Мюонный распад - с вероятностью 0.999877



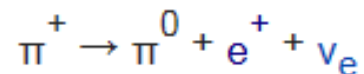
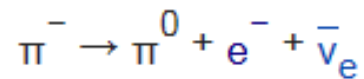
Электронный распад - с вероятностью 0.000123



Фактор подавления электронной моды распада

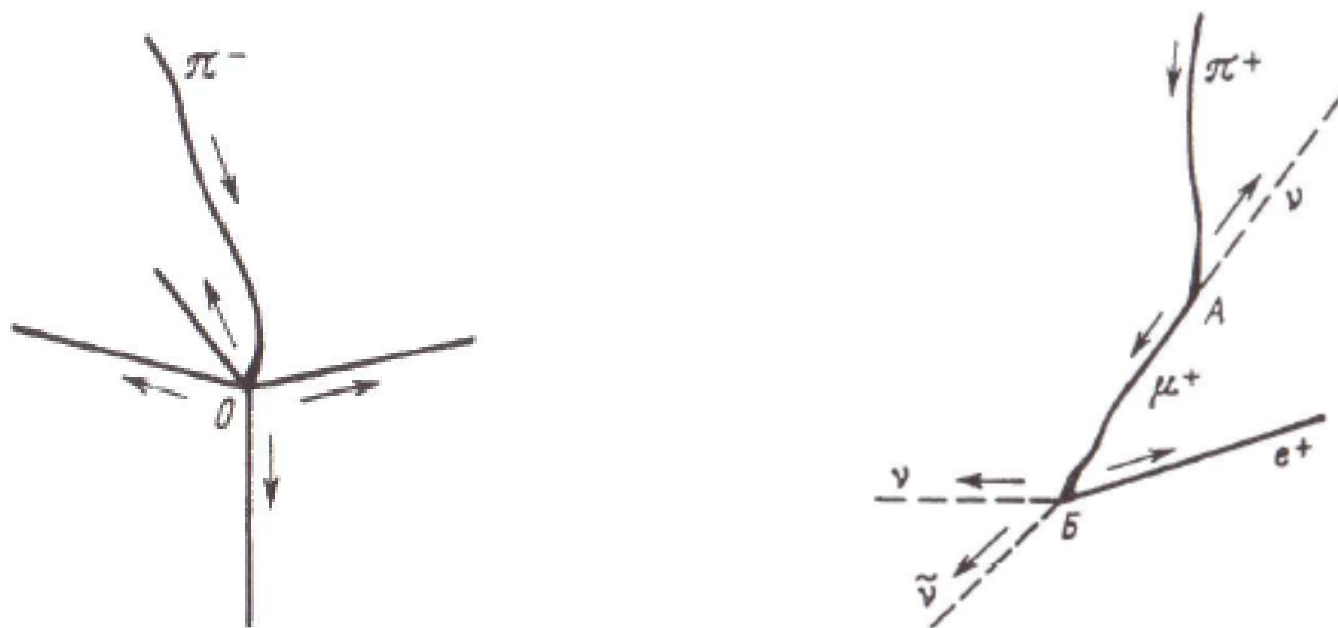
$$R_\pi = (m_e/m_\mu)^2 \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 = 1.283 \times 10^{-4}$$

С вероятностью 10^{-8} наблюдается также «*бета-распад*» заряженных пионов



Взаимодействие заряженных пионов с веществом

«Звёзды» - следы взаимодействия медленных пионов с ядрами фотоэмульсии – свидетельство сильных ядерных взаимодействий

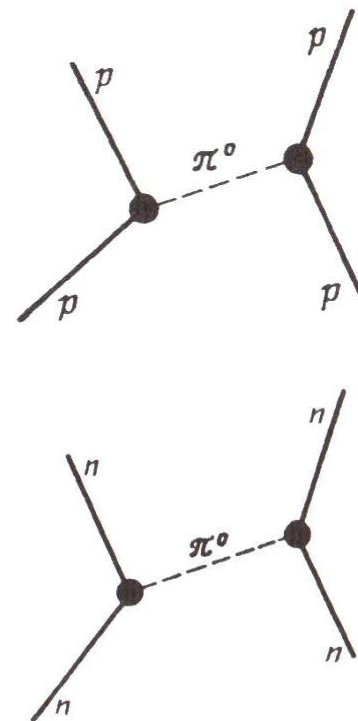
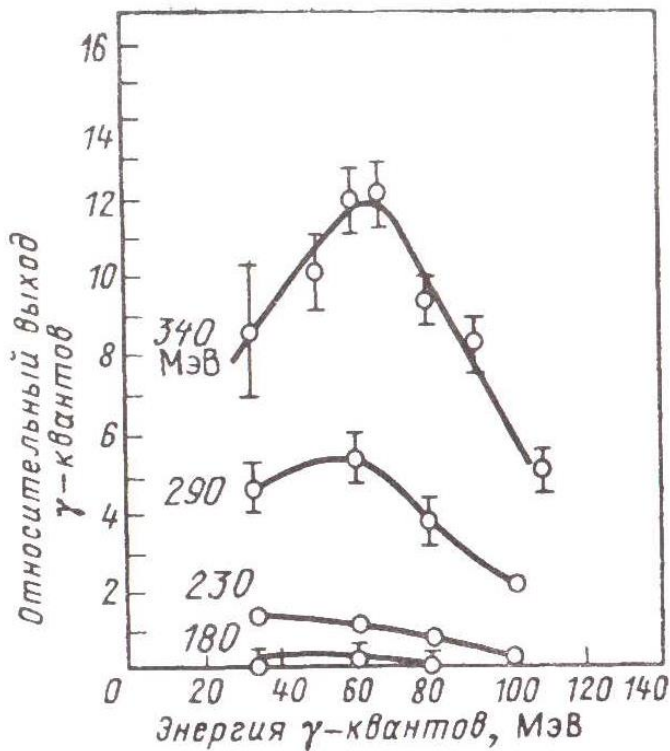


Заряж. пионы с энергией ~ 10 МэВ и ниже при движении в веществе тратят свою энергию в основном на ионизацию атомов (за счёт эл.-магн. взаимодействия с ними) и обычно не успевают до своей остановки провзаимодействовать с атомными ядрами. При этом остановившийся π^+ -мезон распадается на положительно заряженный мюон и мюонное нейтрино. π^- -мезон после остановки притягивается положит. зарядом ближайшего ядра, образуя π^- -мезоатом с размерами в $m_\pi/m_e \approx 270$ раз меньше обычного атома

Обнаружить *нейтральный мезон* π^0 было сложнее, чем заряженные, так как в силу своей электрической нейтральности он не оставляет следов в фотоэмульсии.

π^0 был идентифицирован по распадам на *два гамма-кванта* в экспериментах на ускорителе в Беркли в **1950** году. Гамма-кванты – по конверсии в (e^+e^-) -пары

→ 2



Распады нейтральных пионов

π^0 135.0 MeV/c² 8.4 × 10⁻¹⁷ s. | истинно нейтральная частица.
распадается по электромагнитным каналам

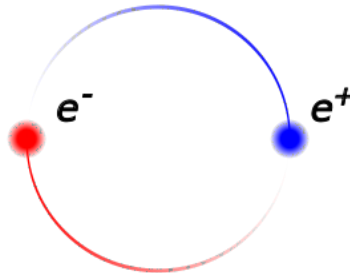
Основная мода распада $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$ BR=0.98823

Распад с парой Далица $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+$ BR=0.01174

Двойной распад Далица $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$ BR=3.34 × 10⁻⁵

Распад на пару Далица $\pi^0 \rightarrow e^- + e^+$ BR=6.46 × 10⁻⁸

Возможен также распад
в **позитронииум**



BR= 10⁻⁹

Нейтральные пионы в силу малого времени жизни, как правило, распадаются до взаимодействия в веществе.

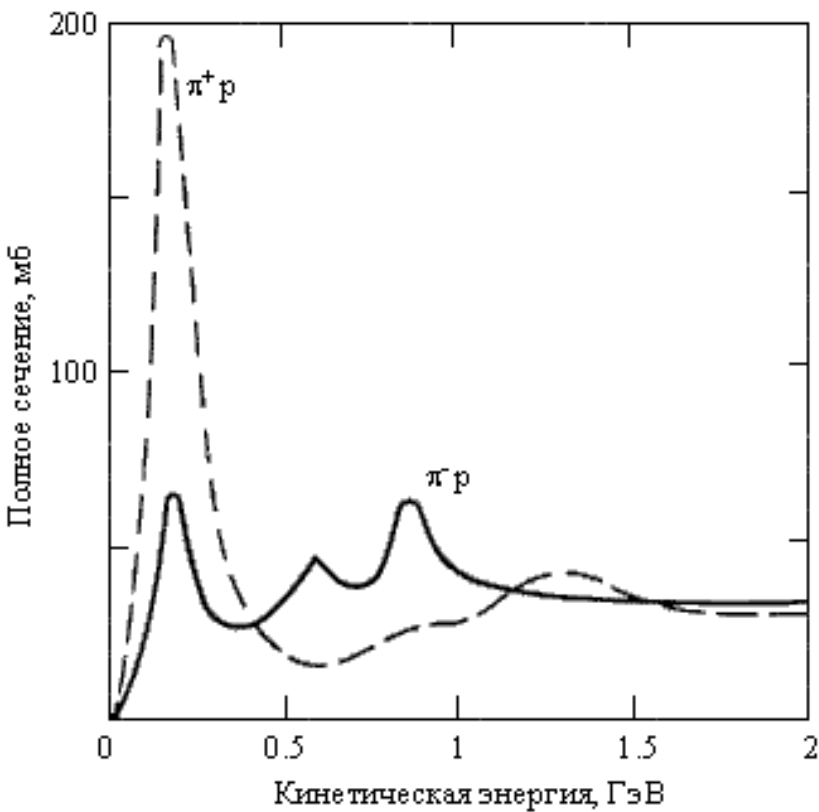
Пионный изотриплет

| Частица. | Масса (МэВ) | Кварковый состав. | Спин I, чётность P, I ^P | Изоспин | Проекция изоспина I ₃ | Среднее время жизни с |
|----------|-------------|-----------------------|------------------------------------|---------|----------------------------------|------------------------|
| π^+ | 139.57 | $u\bar{d}$ | 0^- | 1 | +1 | $2.6 \cdot 10^{-8}$ с |
| π^- | 139.57 | $\bar{u}d$ | 0^- | 1 | -1 | $2.6 \cdot 10^{-8}$ с |
| π^0 | 134.977 | $u\bar{u} - d\bar{d}$ | 0^- | 1 | 0 | $8.4 \cdot 10^{-17}$ с |

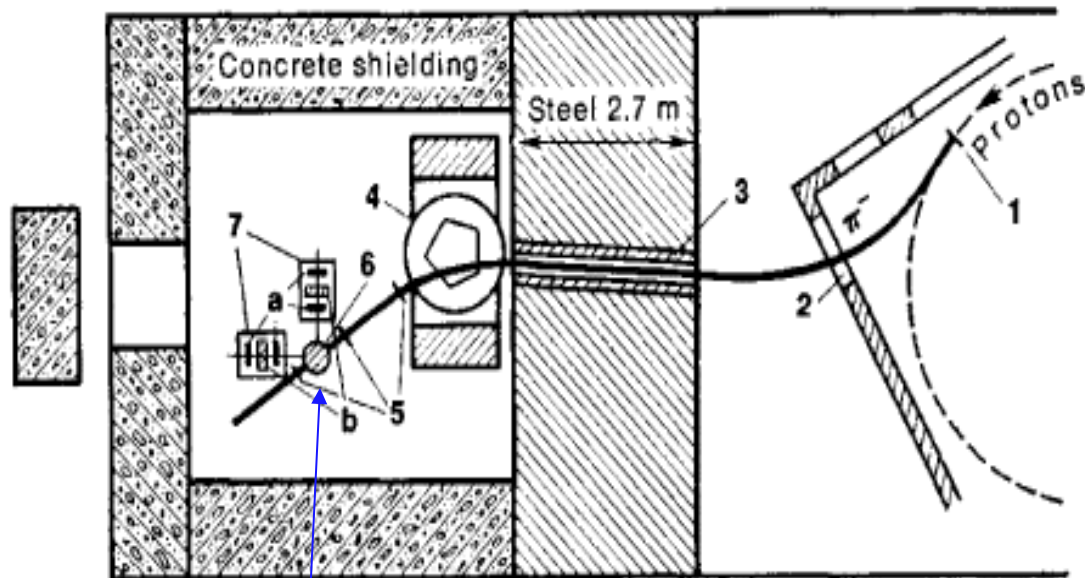
| Particle name | Particle symbol | Antiparticle symbol | Quark content [10] | Rest mass (MeV/c ²) | I ^G | J ^{PC} | S | C | B' | Mean lifetime (s) | Commonly decays to (>5% of decays) |
|----------------------|-----------------|---------------------|---|---------------------------------|----------------|-----------------|---|---|----|------------------------------------|------------------------------------|
| Pion ^[8] | π^+ | π^- | $u\bar{d}$ | $139.570\ 18 \pm 0.000\ 35$ | 1^- | 0^- | 0 | 0 | 0 | $2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8}$ | $\mu^+ + \nu_\mu$ |
| Pion ^[11] | π^0 | Self | $\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ ^[9] | $134.976\ 6 \pm 0.000\ 6$ | 1^- | 0^{++} | 0 | 0 | 0 | $8.4 \pm 0.6 \times 10^{-17}$ | $\gamma + \gamma$ |

3. Резонансы

В области энергий выше порога мезообразования до $\sim 10^9$ эВ при взаимодействии пионов с протонами или нуклонами ядер наблюдается интенсивное образование квазисвязанных мезонных и барионных систем, т. н. резонансов, с временем жизни $10^{-22} - 10^{-24}$ с.



Зависимость полных сечений реакций πp от кинетической энергии пиона



Жидководородная мишень

Определение массы резонанса методом инвариантных масс

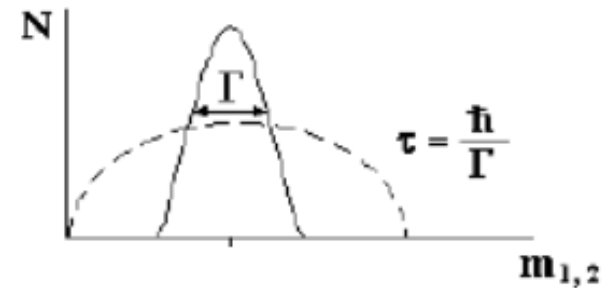
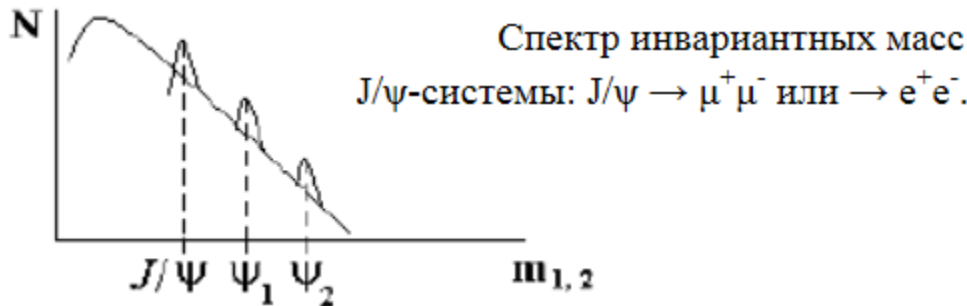
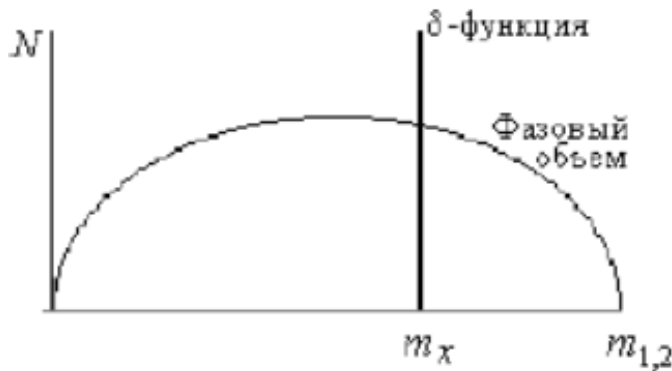
Метод применяется для частиц со временем жизни $\tau < 10^{-16}$ с. К этому классу частиц относятся резонансы, а также промежуточные состояния неизвестных частиц с массой m_x , быстро распадающихся на регистрируемые частицы.

Для резонансов $\tau_x \sim 6 \cdot 10^{-24}$ с, а $\beta \sim 1$, при этом путь $l \sim vt \sim 1.5$ фм ($1.5 \cdot 10^{-13}$ см) измерить невозможно.

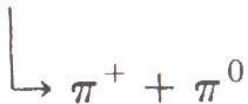
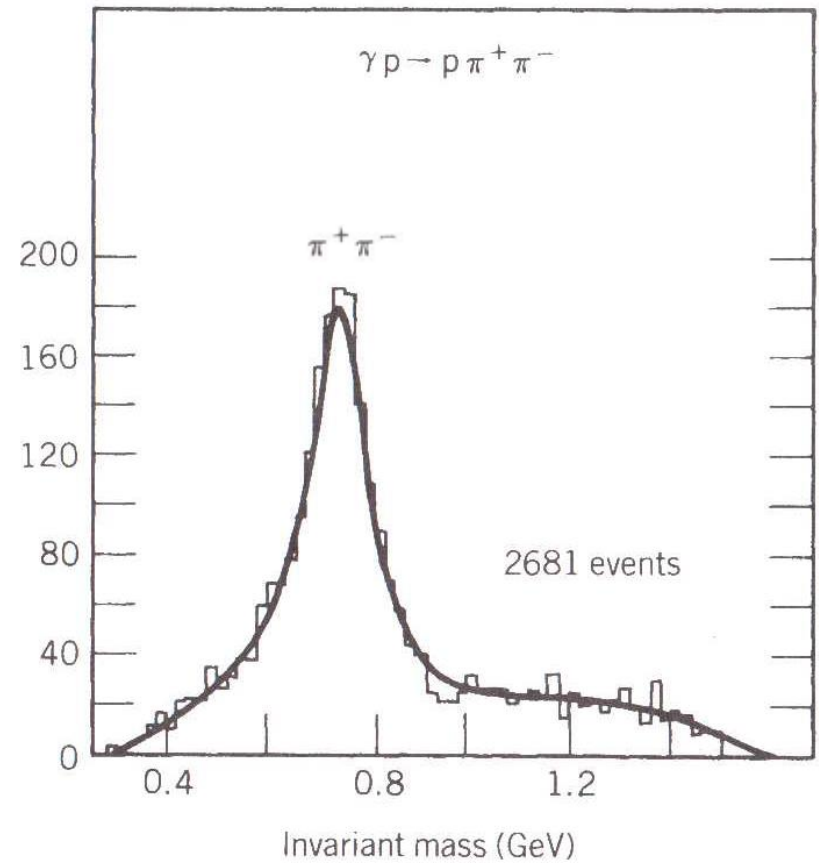
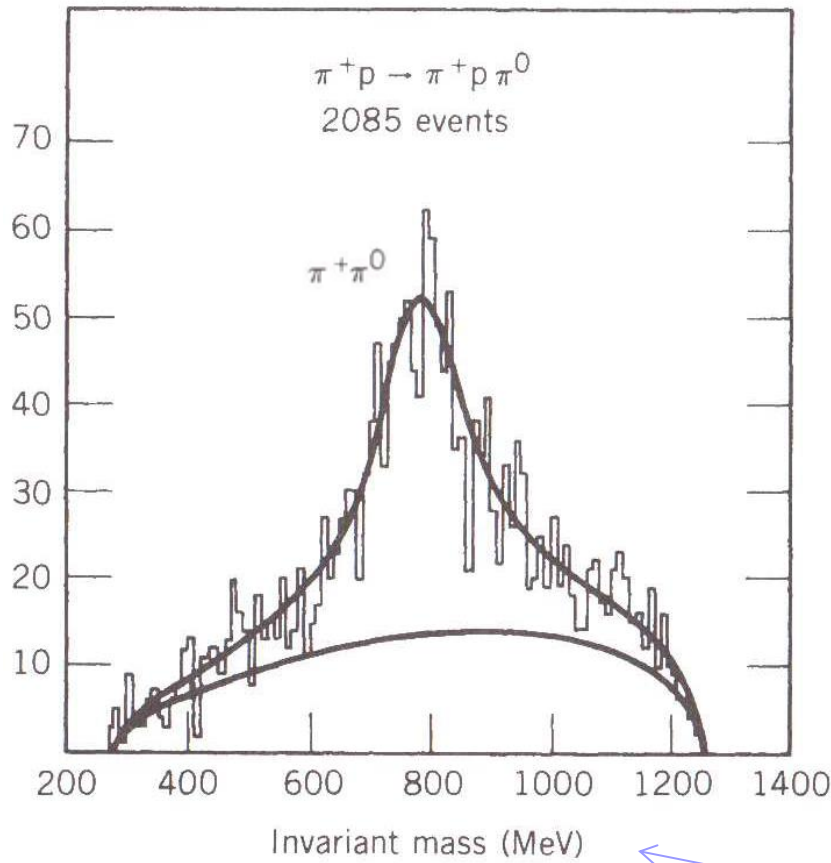
Инвариантная масса двух частиц

$$m_{1,2} = \frac{1}{c^2} [(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2]^{1/2}$$

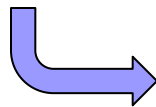
Резонансный всплеск на фоне плавного распределения по фазовому объему свидетельствует о рождении *резонанса* через промежуточное состояние $m_{1,2}$



Используя соотношение неопределенностей $\tau \Gamma \geq \hbar$, можно определить время жизни τ резонанса



$$\left[(E_{\pi^+} + E_{\pi^0})^2 - c^2 |\mathbf{p}_{\pi^+} + \mathbf{p}_{\pi^0}|^2 \right]^{1/2} = m_{\rho} c^2$$

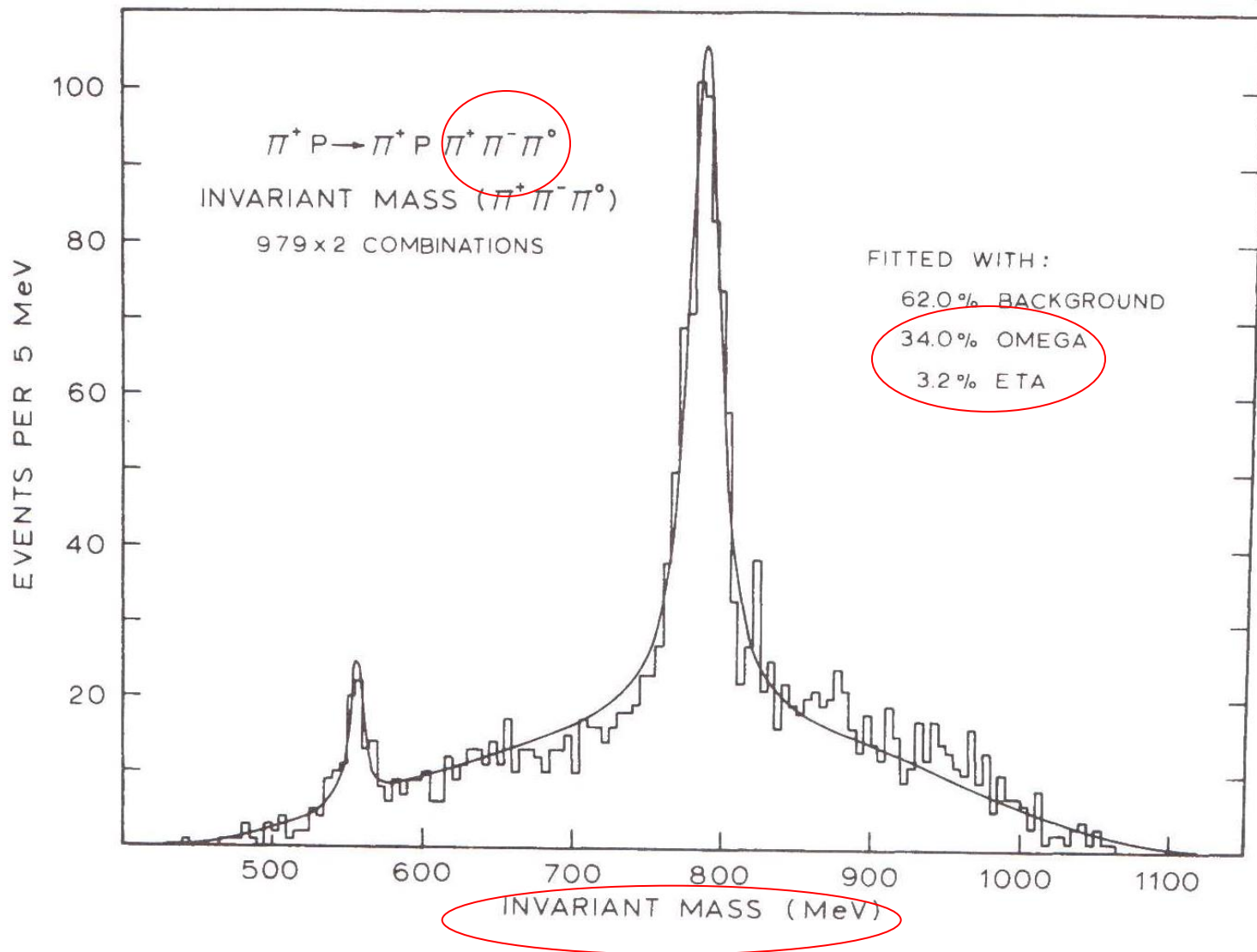


$$E_{\rho} = E_{\pi^+} + E_{\pi^0}$$

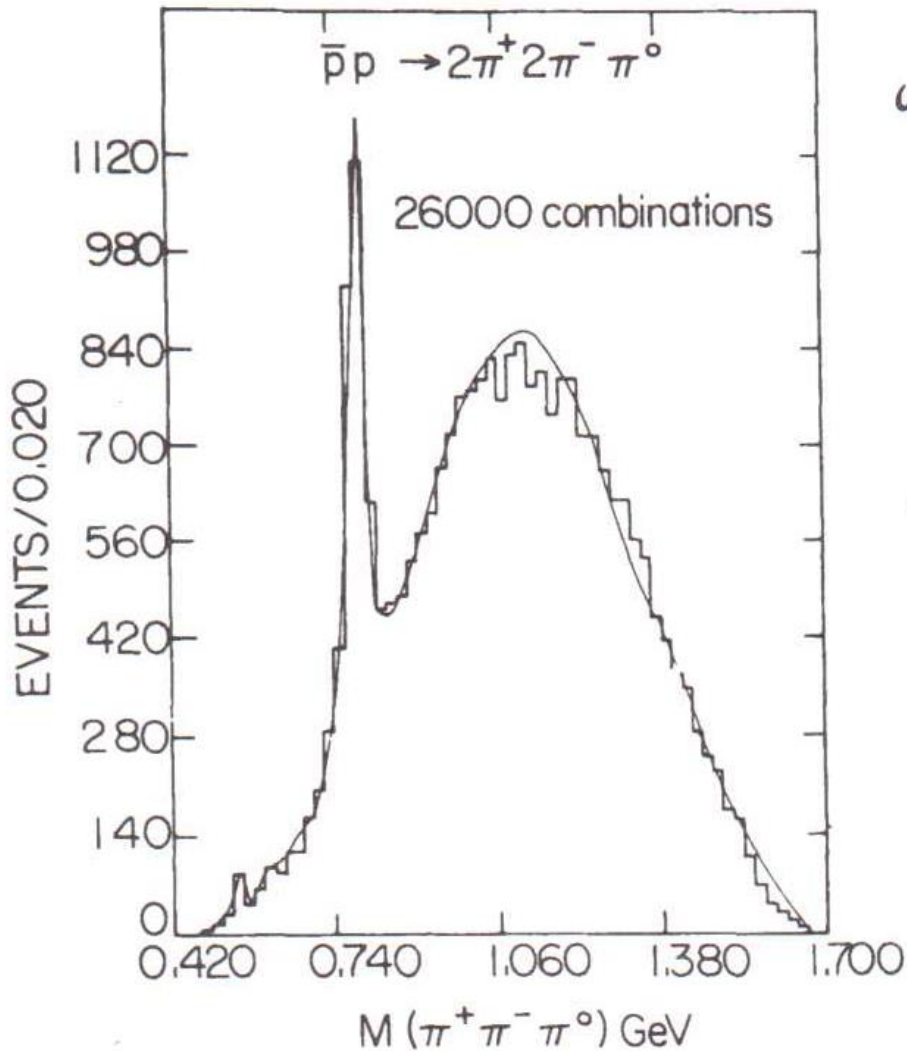
$$\mathbf{p}_{\rho} = \mathbf{p}_{\pi^+} + \mathbf{p}_{\pi^0}$$



Production of ω mesons in $\pi^+ p$ reactions



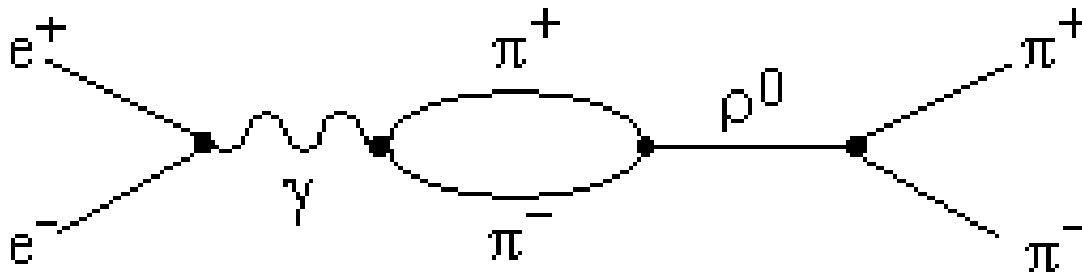
Production of ω mesons from $p\bar{p} \rightarrow 5\pi$



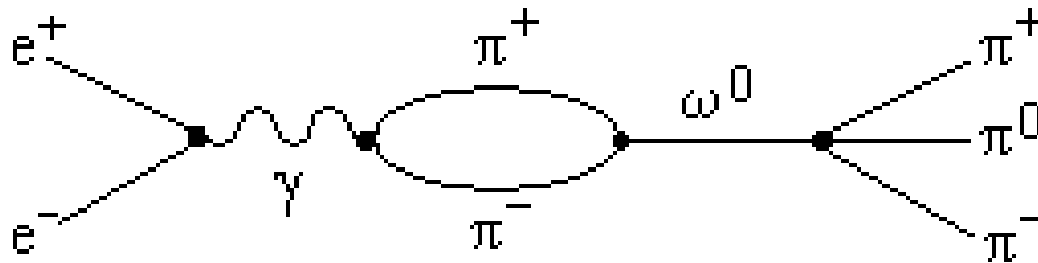
| | |
|--|--------------------------|
| $\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ | (90%) |
| $\rightarrow \pi^0 + \gamma$ | (9%) |
| $\rightarrow \pi^+ + \pi^-$ | (1%) |
| $\rightarrow e^+ + e^-$ | $(6.7 \times 10^{-3}\%)$ |

The decay into $3\pi^0$ is forbidden
by isospin conservation

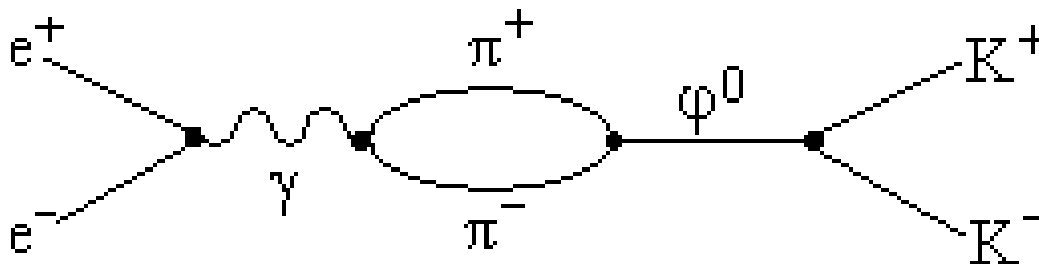
ρ^0 , ω^0 , ϕ^0 мезонные резонансы обладают квантовыми числами фотона ($J^P = 1^-$), поэтому их можно интерпретировать как электромагнитные образования



Масса ρ^0 -мезона 770 МэВ.
Ширина распада $\Gamma = 151$ МэВ.



Масса ω^0 -мезона 782 МэВ.
Ширина распада $\Gamma = 8.4$ МэВ.



Масса ϕ^0 -мезона 1020 МэВ.
Ширина распада $\Gamma = 4.4$ МэВ.

Эти мезонные резонансы можно наблюдать на e^+e^- -коллайдерах

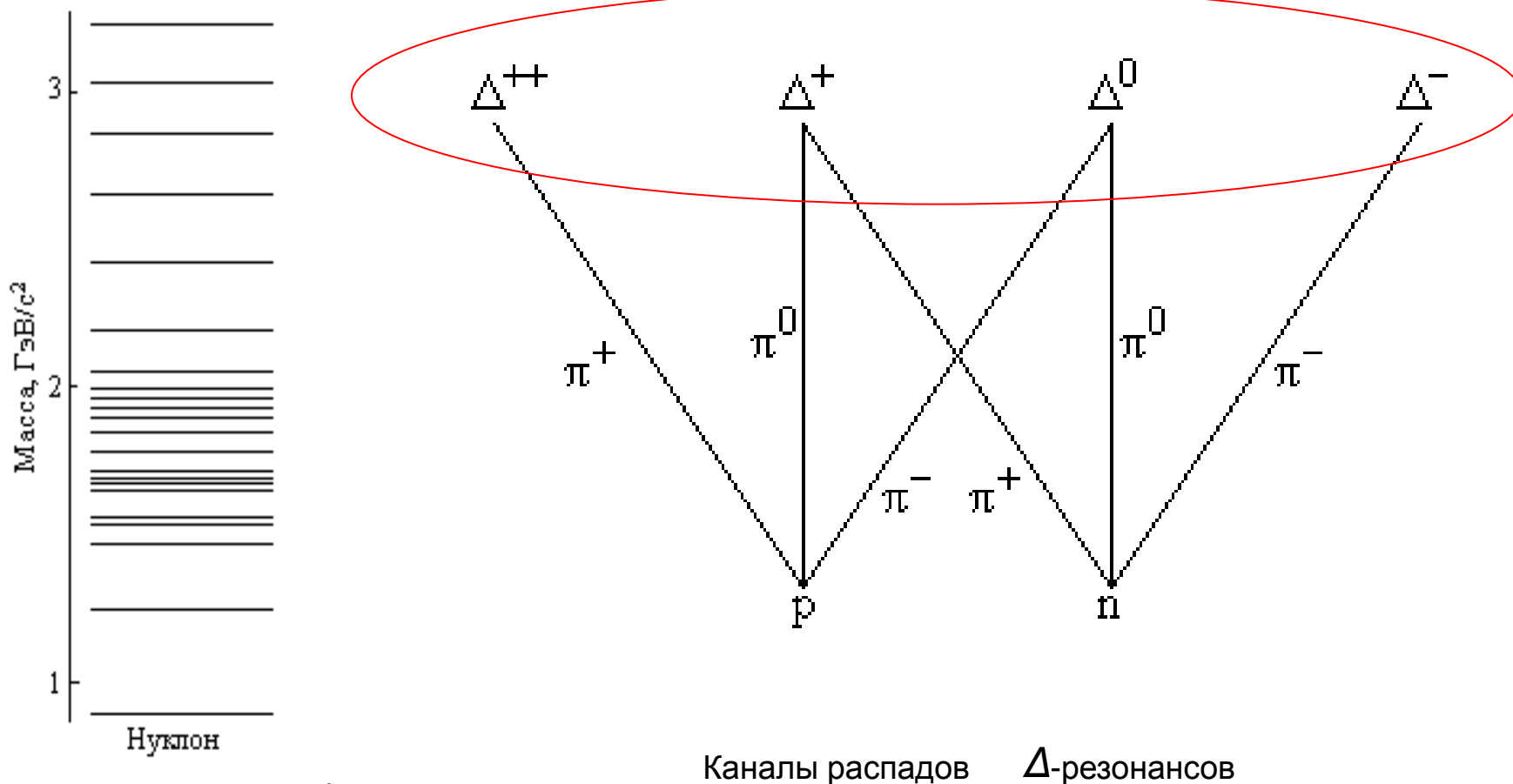
Таблица
наиболее
популярных
мезонов

| Частица | Обозначение | Анти-частица | Состав | Масса МэВ/c ² | S | C | B | время жизни с |
|----------|-------------|--------------|--|-----------------------------|----|----|----|-----------------------|
| Пион | π^+ | π^- | $u\bar{d}$ | 139,6 | 0 | 0 | 0 | $2,60 \cdot 10^{-8}$ |
| | π^0 | \leftarrow | $\frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ | 135,0 | 0 | 0 | 0 | $0,84 \cdot 10^{-16}$ |
| Каон | K^+ | K^- | $u\bar{s}$ | 493,7 | +1 | 0 | 0 | $1,24 \cdot 10^{-8}$ |
| | K_S^0 | K_S^0 | $\frac{d\bar{s} - s\bar{d}}{\sqrt{2}}$ | 497,7 | +1 | 0 | 0 | $0,89 \cdot 10^{-10}$ |
| | K_L^0 | K_L^0 | $\frac{d\bar{s} + s\bar{d}}{\sqrt{2}}$ | 497,7 | +1 | 0 | 0 | $5,2 \cdot 10^{-8}$ |
| Эта | η^0 | \leftarrow | $\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$ | 547,8 | 0 | 0 | 0 | $0,5 \cdot 10^{-18}$ |
| Ро | ρ^+ | ρ^- | $u\bar{d}$ | 776 | 0 | 0 | 0 | $0,4 \cdot 10^{-23}$ |
| Фи | φ | \leftarrow | $s\bar{s}$ | 1019 | 0 | 0 | 0 | $16 \cdot 10^{-23}$ |
| D | D^+ | D^- | $c\bar{d}$ | 1869 | 0 | +1 | 0 | $10,6 \cdot 10^{-13}$ |
| | D^0 | D^0 | $c\bar{u}$ | 1865 | 0 | +1 | 0 | $4,1 \cdot 10^{-13}$ |
| | D_S^+ | D_S^- | $c\bar{s}$ | 1968 | +1 | +1 | 0 | $4,9 \cdot 10^{-13}$ |
| J/ψ | J/ψ | \leftarrow | $c\bar{c}$ | 3096,9 | 0 | 0 | 0 | $7,2 \cdot 10^{-21}$ |
| B | B^- | B^+ | $b\bar{u}$ | 5279 | 0 | 0 | -1 | $1,7 \cdot 10^{-12}$ |
| | B^0 | B^0 | $d\bar{b}$ | 5279 | 0 | 0 | -1 | $1,5 \cdot 10^{-12}$ |
| Ипсилон | Y | \leftarrow | $b\bar{b}$ | 9460 | 0 | 0 | 0 | $1,3 \cdot 10^{-20}$ |

Нуклонные резонансы $\Delta(1232)$ (дельта барионы)

Спин и четность $J^P = 3/2^+$, изоспин $I = 3/2$ (изоквартет).

Δ^+ и Δ^0 можно рассматривать как возбужденные состояния протона и нейтрона



Δ -резонансы как возбужденные состояния нуклона

Каналы распадов Δ -резонансов

Дельта барионы

| Particle name | Symbol ⇄ | Quark content | Rest mass (MeV/c ²) ⇄ | I_3 ⇄ | J^P ⇄ | Q (e) ⇄ | S ⇄ | C ⇄ | B' ⇄ | T ⇄ | Mean lifetime (s) ⇄ | Commonly decays to |
|----------------------|----------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|-------|-------|--------|-------|--|-----------------------------------|
| Delta ^[1] | Δ^{++} (1232) | uuu | 1,232 ± 2 | + $\frac{3}{2}$ | $\frac{3}{2}^+$ | +2 | 0 | 0 | 0 | 0 | $(5.63 \pm 0.14) \times 10^{-24}$ ^[a] | $p^+ + \pi^+$ |
| Delta ^[1] | Δ^+ (1232) | uud | 1,232 ± 2 | + $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{2}^+$ | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | $(5.63 \pm 0.14) \times 10^{-24}$ ^[a] | $\pi^+ + n^0$ or $\pi^0 + p^+$ |
| Delta ^[1] | Δ^0 (1232) | udd | 1,232 ± 2 | - $\frac{1}{2}$ | $\frac{3}{2}^+$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $(5.63 \pm 0.14) \times 10^{-24}$ ^[a] | $\pi^0 + n^0$ or $\pi^- + p^+$ |
| Delta ^[1] | Δ^- (1232) | ddd | 1,232 ± 2 | - $\frac{3}{2}$ | $\frac{3}{2}^+$ | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | $(5.63 \pm 0.14) \times 10^{-24}$ ^[a] | $\pi^- + n^0$ |

Table 2. The status of the Δ resonances. Only those with an overall status of *** or **** are included in the main Baryon Summary Table.

| Particle | J^P | Status | | | Status as seen in — | | | | | | |
|----------------|----------|---------|---------|------------|---------------------|-----------|-----------|-------------|------------|---------|-------------------------|
| | | overall | πN | γN | $N\eta$ | $N\sigma$ | $N\omega$ | ΛK | ΣK | $N\rho$ | $\Delta\pi$ |
| $\Delta(1232)$ | $3/2^+$ | **** | **** | **** | F | | | | | | |
| $\Delta(1600)$ | $3/2^+$ | *** | *** | *** | o | | | | | * | *** |
| $\Delta(1620)$ | $1/2^-$ | **** | **** | *** | | r | | | | *** | *** |
| $\Delta(1700)$ | $3/2^-$ | **** | **** | **** | | b | | | | ** | *** |
| $\Delta(1750)$ | $1/2^+$ | * | * | | | i | | | | | |
| $\Delta(1900)$ | $1/2^-$ | ** | ** | ** | | | d | | ** | ** | ** |
| $\Delta(1905)$ | $5/2^+$ | **** | **** | **** | | | d | | *** | ** | ** |
| $\Delta(1910)$ | $1/2^+$ | **** | **** | ** | | | e | | * | * | ** |
| $\Delta(1920)$ | $3/2^+$ | *** | *** | ** | | | n | | *** | | ** |
| $\Delta(1930)$ | $5/2^-$ | *** | *** | | | | | | | | |
| $\Delta(1940)$ | $3/2^-$ | ** | * | ** | F | | | | | | (seen in $\Delta\eta$) |
| $\Delta(1950)$ | $7/2^+$ | **** | **** | **** | o | | | | *** | * | *** |
| $\Delta(2000)$ | $5/2^+$ | ** | | | | r | | | | | ** |
| $\Delta(2150)$ | $1/2^-$ | * | * | | | | b | | | | |
| $\Delta(2200)$ | $7/2^-$ | * | * | | | | i | | | | |
| $\Delta(2300)$ | $9/2^+$ | ** | ** | | | | | d | | | |
| $\Delta(2350)$ | $5/2^-$ | * | * | | | | | d | | | |
| $\Delta(2390)$ | $7/2^+$ | * | * | | | | | e | | | |
| $\Delta(2400)$ | $9/2^-$ | ** | ** | | | | | n | | | |
| $\Delta(2420)$ | $11/2^+$ | **** | **** | * | | | | | | | |
| $\Delta(2750)$ | $13/2^-$ | ** | ** | | | | | | | | |
| $\Delta(2950)$ | $15/2^+$ | ** | ** | | | | | | | | |

**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

*** Existence is very likely but further confirmation of quantum numbers and branching fractions is required.

** Evidence of existence is only fair.

* Evidence of existence is poor.

Data Particle Group
August 21, 2014

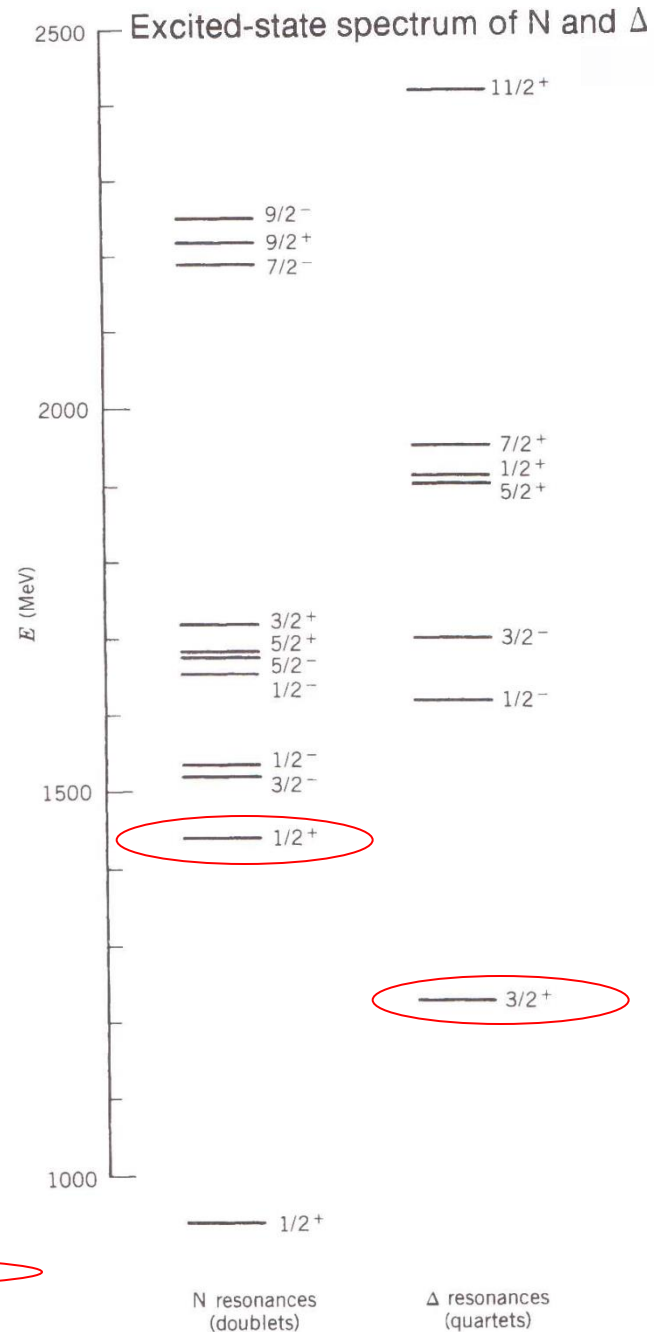
Нуклонные резонансы $N(1440)$

Спин и чётность $J^P = 1/2^+$, изоспин $I = 1/2$ (изодублет) в основном распадаются по каналу $(n \text{ или } p) + \pi$.

| Частица | Масса, Mc^2 (МэВ) | Ширина Γ , МэВ | Спин- чётность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада |
|---|---------------------------|--------------------------|---|-----------------------------|
| $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ | 1230-1234 (~ 1232) | 115-125 | $3/2^+(3/2)$ | $(n \text{ или } p) + \pi$ |
| N^+, N^0, N^- | 1430-1470 (~ 1440) | 250-450 | $1/2^+(1/2)$ | $n(p)+\pi(2\pi), \Delta\pi$ |

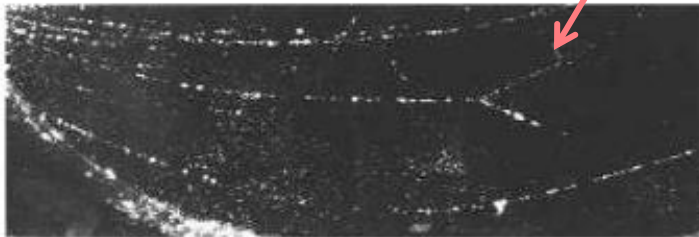
| Particle | J^P | Status | | | Status as seen in — | | | | | | |
|-----------|----------|---------|---------|------------|---------------------|-----------|-----------|------------|------------|---------|-------------|
| | | overall | πN | γN | $N\eta$ | $N\sigma$ | $N\omega$ | ΔK | ΣK | $N\rho$ | $\Delta\pi$ |
| N | $1/2^+$ | **** | | | | | | | | | |
| $N(1440)$ | $1/2^+$ | **** | **** | **** | | *** | | | * | | *** |
| $N(1520)$ | $3/2^-$ | **** | **** | **** | *** | | | | *** | | *** |
| $N(1535)$ | $1/2^-$ | **** | **** | **** | **** | | | | ** | | * |
| $N(1650)$ | $1/2^-$ | **** | **** | *** | *** | | *** | ** | ** | | *** |
| $N(1675)$ | $5/2^-$ | **** | **** | *** | * | | * | | * | | *** |
| $N(1680)$ | $5/2^+$ | **** | **** | **** | * | ** | | | *** | | *** |
| $N(1685)$ | $?^?$ | * | | | | | | | | | |
| $N(1700)$ | $3/2^-$ | *** | *** | ** | * | | * | * | * | | *** |
| $N(1710)$ | $1/2^+$ | *** | *** | *** | *** | | ** | *** | ** | * | ** |
| $N(1720)$ | $3/2^+$ | **** | **** | *** | *** | | | ** | ** | ** | * |
| $N(1860)$ | $5/2^+$ | ** | ** | | | | | | | * | * |
| $N(1875)$ | $3/2^-$ | *** | * | *** | | | ** | *** | ** | | *** |
| $N(1880)$ | $1/2^+$ | ** | * | * | | ** | | * | | | |
| $N(1895)$ | $1/2^-$ | ** | * | ** | ** | | | ** | * | | |
| $N(1900)$ | $3/2^+$ | *** | ** | *** | ** | | ** | *** | ** | * | ** |
| $N(1990)$ | $7/2^+$ | ** | ** | ** | | | | | * | | |
| $N(2000)$ | $5/2^+$ | ** | * | ** | ** | | | ** | * | ** | |
| $N(2040)$ | $3/2^+$ | * | | | | | | | | | |
| $N(2060)$ | $5/2^-$ | ** | ** | ** | * | | | | ** | | |
| $N(2100)$ | $1/2^+$ | * | | | | | | | | | |
| $N(2150)$ | $3/2^-$ | ** | ** | ** | | | | ** | | | ** |
| $N(2190)$ | $7/2^-$ | **** | **** | *** | | | * | ** | | * | |
| $N(2220)$ | $9/2^+$ | **** | **** | | | | | | | | |
| $N(2250)$ | $9/2^-$ | **** | **** | | | | | | | | |
| $N(2600)$ | $11/2^-$ | *** | *** | | | | | | | | |
| $N(2700)$ | $13/2^+$ | ** | ** | | | | | | | | |

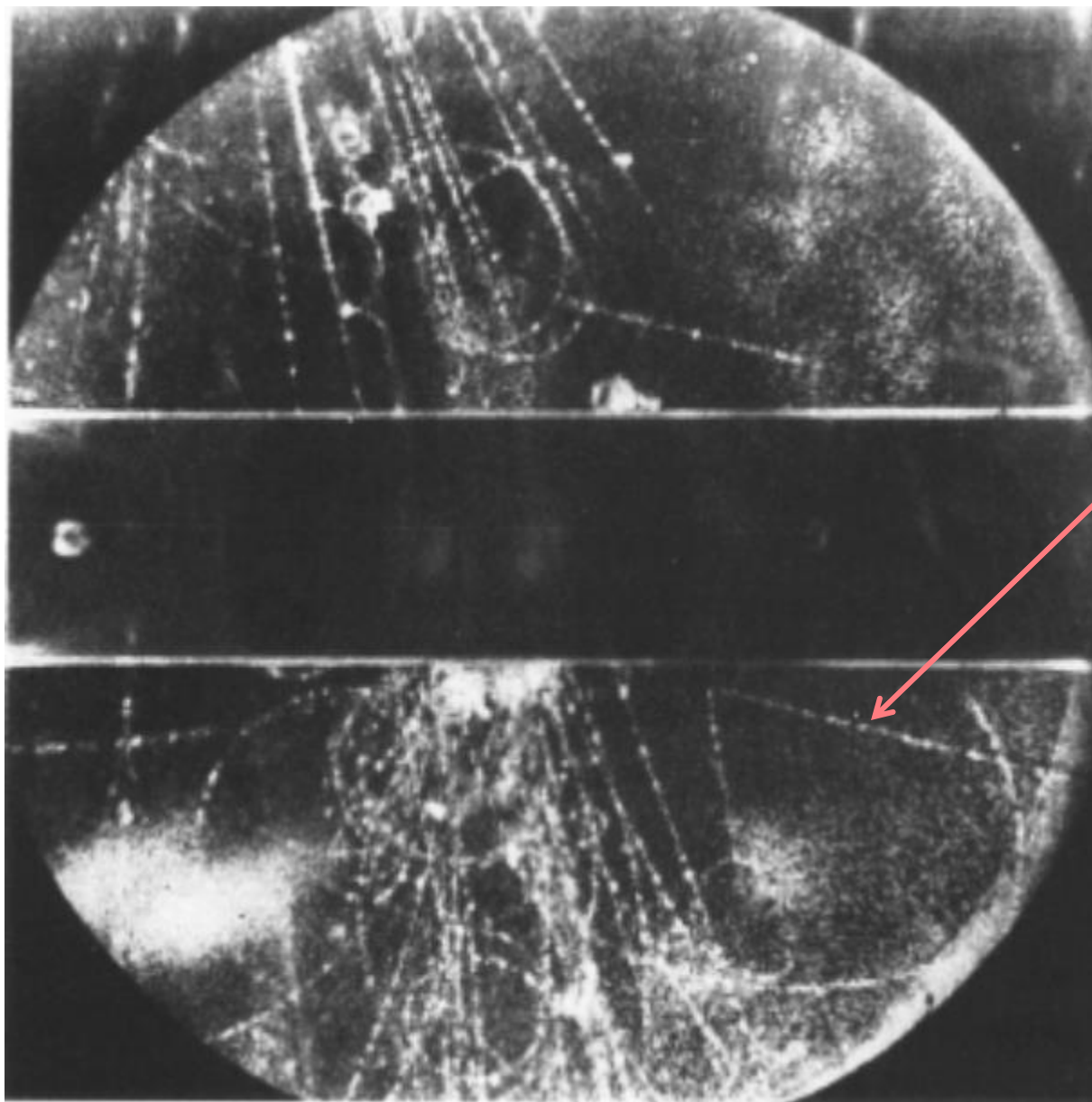
**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.
 *** Existence is very likely but further confirmation of quantum numbers and branching fractions is required.
 ** Evidence of existence is only fair.
 * Evidence of existence is poor.



4. Странные частицы

В течение 10 лет, последовавших за открытием пиона в 1947 году, в результате изучения космических лучей и экспериментов на ускорителях таблица частиц начала быстро пополняться новыми частицами. За это время их было открыто свыше 30. Первыми из открытых частиц были К-мезоны или каоны, частицы с массой ~ 500 МэВ. Затем были обнаружены тяжелые частицы Λ и Σ . Была обнаружена странная особенность вновь открытых частиц - они рождались парами, хотя не были частицей и античастицей.





Открытие V частиц

в камере Вильсона,
помещённой в
магнитное поле.

Об этом открытии было
сообщено в статье,
напечатанной в 1947
году в журнале
Nature, английскими
физиками
G D Rochester,
C C Butler.

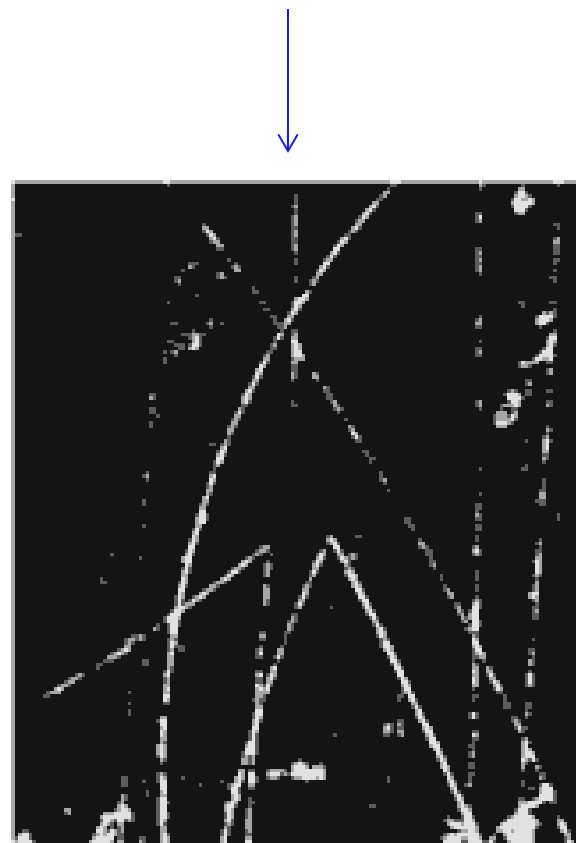
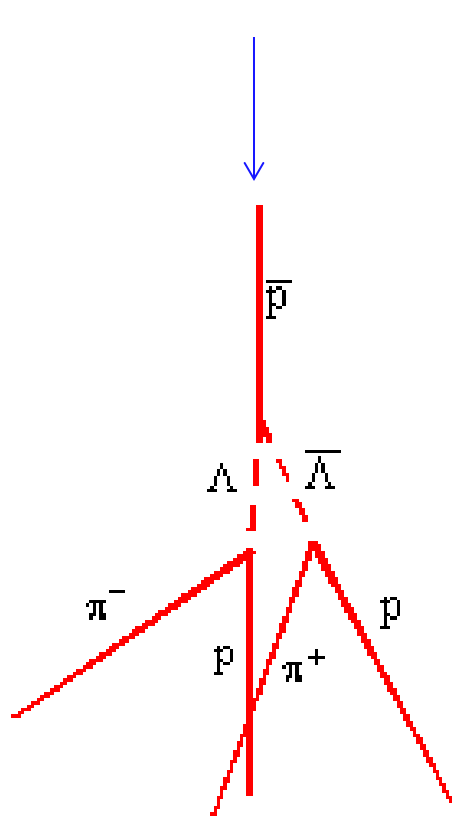
Гипероны

Среди вновь открытых странных частиц оказались частицы, имеющие массу покоя больше массы покоя нуклона. Эти частицы были названы гиперонами. К ним относятся Λ , Σ^0 , Σ^+ , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^- , Ω^- .

Первым открытым странным барионом был **Λ -гиперон**. Это электрически нейтральная частица со странностью $s = -1$. Затем были открыты заряженные барионы Σ^+ и Σ^- гипероны.

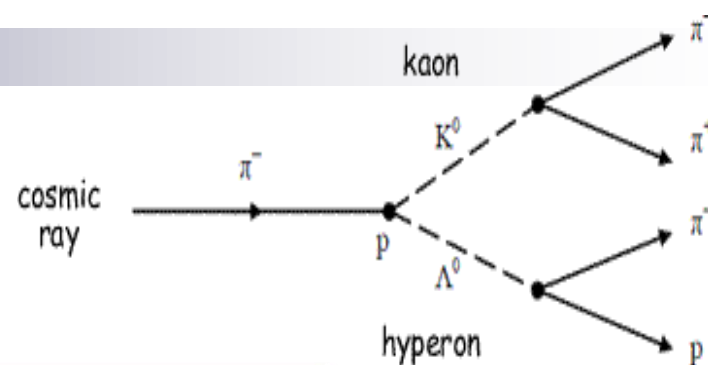
Характеристики Λ и Σ -гиперонов

| Частица | Кварковый состав | Масса, $m c^2$ (МэВ) | Время жизни (сек) или ширина (МэВ) | Спин-четность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада |
|------------|------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Σ^+ | uus | 1189 | $0.80 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1)$ | $p\pi^0$, $n\pi^+$ |
| Σ^0 | uds | 1193 | $7.4 \cdot 10^{-20}$ | $1/2^+(1)$ | $\Lambda\gamma$ |
| Σ^- | dds | 1197 | $1.5 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1)$ | $n\pi^-$ |
| Λ | uds | 1116 | $2.6 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(0)$ | $p\pi^-$, $n\pi^0$ |



Наблюдение пары странных частиц в жидководородной пузырьковой камере при аннигиляции антипротона в ускорительном эксперименте

K-мезоны



Известно 4 различных K-мезона с примерно одинаковыми массами.

$K^+(u\bar{s})$, $m(K^+) = 493.677$ МэВ;

$K^-(\bar{u}s)$, $m(K^-) = 493.677$ МэВ;

$K^0(d\bar{s})$, $m(K^0) = 493.672$ МэВ;

$\bar{K}^0(\bar{d}s)$, $m(\bar{K}^0) = 493.672$ МэВ.

Так же как и π -мезоны, K-мезоны имеют спин $J = 0$ и отрицательную четность

$$J^P(K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0) = 0^-.$$

Основные варианты распада для K^+ :

1. $\mu^+ \nu_\mu$ (лептонный, коэффициент ветвления BR = 63,55(11)%);
2. $\pi^+ \pi^0$ (адронный, BR = 20,66(8)%);
3. $\pi^+ \pi^+ \pi^-$ (адронный, BR = 5,59(4)%);
4. $\pi^0 e^+ \nu_e$ (полулептонный, BR = 5,07(4)%);
5. $\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ (полулептонный, BR = 3,353(34)%);
6. $\pi^+ \pi^0 \pi^0$ (адронный, BR = 1,761(22)%).

Вторая особенность поведения странных частиц – **большое время жизни**. В результате распада странных частиц образовывались сильновзаимодействующие частицы - пионы и нуклоны, поэтому, казалось бы, время жизни странных частиц должно быть «ядерным», однако, их времена жизни **$\sim 10^{-10}$ сек** оказались характерными для слабого взаимодействия.

М.Гелл-Манн (Н.п.1969) и К. Нишиджима высказали предположение, что странная частица является носителем **нового квантового числа**, которое было названо **странностью s** .

Квантовое число s может принимать значения -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 и определяется кварковым составом адронов

$$\begin{aligned} s(K^+, K^0) &= +1, \\ s(\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, K^-, \bar{K}^0) &= -1, \\ s(\Xi^-, \Xi^0) &= -2, \quad s(\Omega^-) = -3. \end{aligned}$$

Согласно соотношению Гелл-Мана – Нишиджимы заряд странной частицы

$$Q = I_z + Y/2,$$

где гиперзаряд **$Y = B + s + c + b + t$** **есть сумма квантовых чисел**

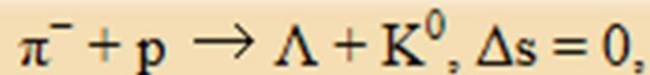
B - барионное число, **s** - странность, **c** - очарование, **b** - bottom, **t** - top.

Несохранение четности в K-распадах

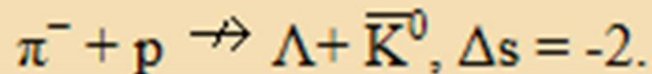
Нейтральные мезоны K^0 и \bar{K}^0 являются частицей и античастицей.

Единственное квантовое число, которым различаются K^0 и \bar{K}^0 , - это **странность** $S(K^0) = 1$, $S(\bar{K}^0) = -1$, поэтому они **по-разному ведут себя в сильном взаимодействии**:

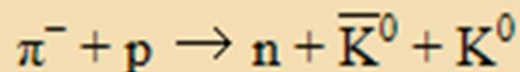
Например, K^0 -мезоны могут образовываться в реакции



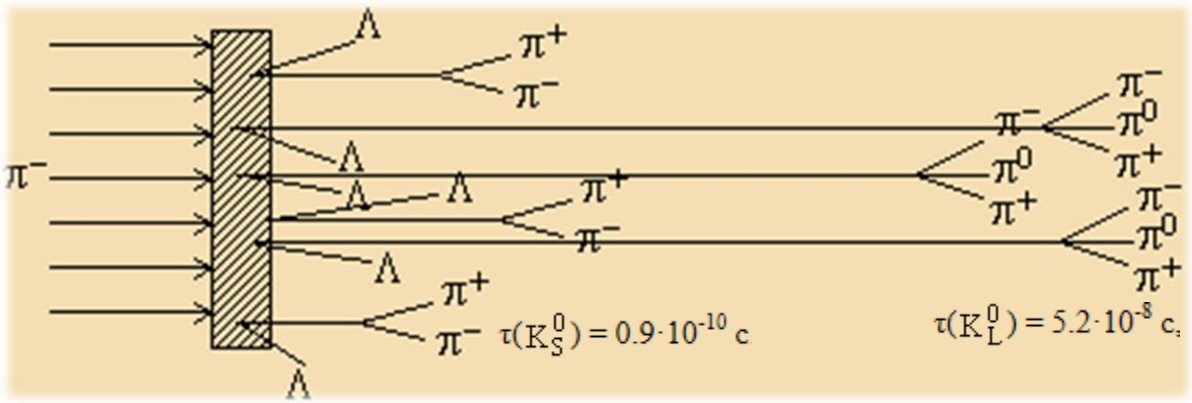
в то время как для \bar{K}^0 -мезонов такая реакция запрещена



\bar{K}^0 в сильных взаимодействиях могут образовываться в реакции



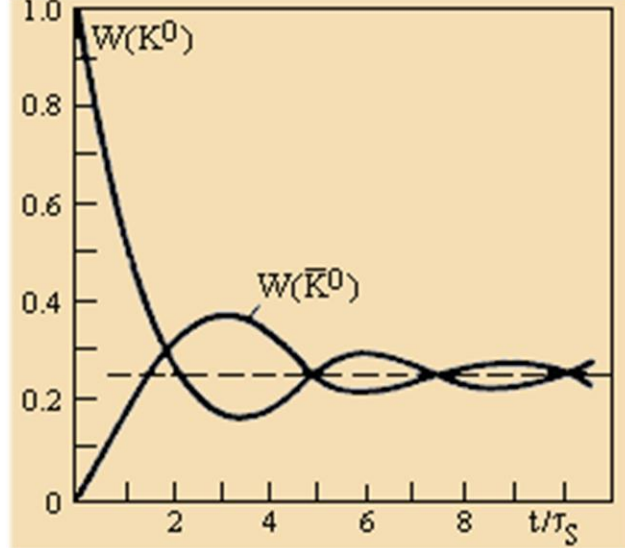
Распад K^0 и \bar{K}^0 -мезонов происходит в результате слабого взаимодействия. При этом после рождения K^0 в реакции $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ наблюдалась такая картина:



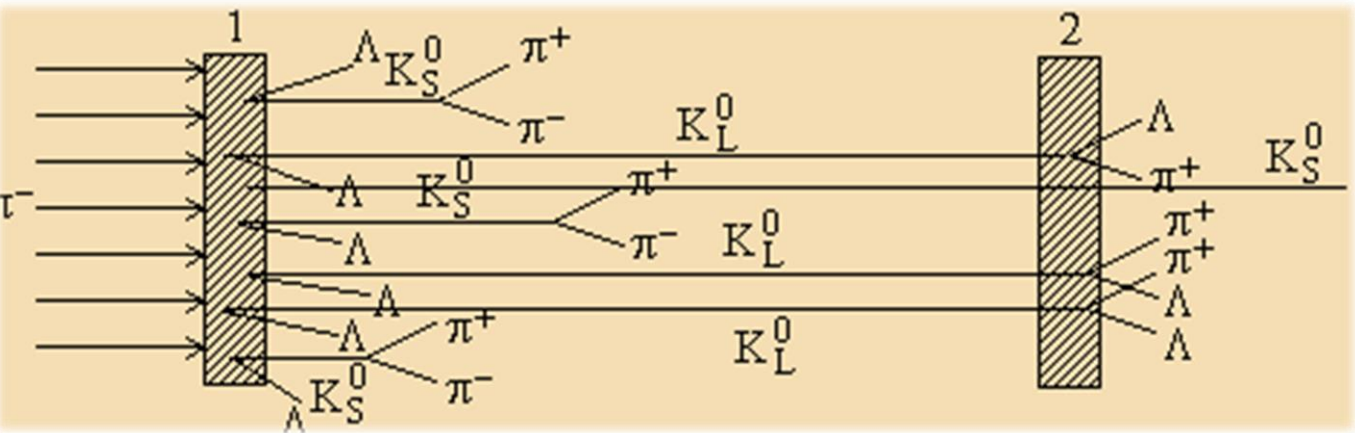
$$|K^0\rangle = |K_1^0\rangle = (|K_L^0\rangle + |K_S^0\rangle)/\sqrt{2}$$

$$|K_L^0\rangle/\sqrt{2} = (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)/2$$

Вероятности $W(K^0)$ и $W(\bar{K}^0)$ наблюдения



Причина эффекта - **осцилляции смеси состояний** $|K^0\rangle$ и $|\bar{K}^0\rangle$
 По периоду осцилляции можно определить разность масс K_L^0 и K_S^0 -мезонов.



$$K(t) = [K_L^0(t) + K_S^0(t)],$$

$$K_L^0(t) = K_L^0 \exp[-iEt/\hbar - \lambda_L t/2],$$

$$K_S^0(t) = K_S^0 \exp[-iEt/\hbar - \lambda_S t/2],$$

$$K(0) = K^0,$$

В природе существует две линейно независимые комбинации состояний K_L^0 и K_S^0 , которые отвечают частицам с различными массами и средним временем жизни:

$$m(K^0) = 497.67 \text{ МэВ}$$

$$\tau(K_L^0) = 5.2 \cdot 10^{-8} \text{ с,}$$

$$\tau(K_S^0) = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Основные каналы распада K_S^0

$$K_S^0 \rightarrow \begin{array}{ll} \pi^+ \pi^- & 68.6\% \\ \pi^0 \pi^0 & 31.4\% \end{array} \quad CP = +1$$

Основные каналы распада K_L^0

$$K_L^0 \rightarrow \begin{array}{ll} \pi^0 \pi^0 \pi^0 & 21.1\% \\ \pi^+ \pi^- \pi^0 & 12.6\% \\ \pi^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu, \pi^- \mu^+ \nu_\mu & 27.1\% \\ \pi^+ e^- \bar{\nu}_e, \pi^- e^+ \nu_e & 38.8\% \end{array} \quad CP = -1$$

Разность масс K_L^0 и K_S^0

$$m(K_L^0) - m(K_S^0) = (3.491 + 0.009) \cdot 10^{-12} \text{ МэВ.}$$

Если CP-инвариантность имеет место, можно считать:

$$|K_S^0\rangle \equiv |K_1^0\rangle, \quad |K_L^0\rangle \equiv |K_2^0\rangle.$$

Однако, в 1964 г. было обнаружено, что существует малая, но конечная вероятность распада:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \quad CP = +1, \quad \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_L \rightarrow \text{all})} = (2.03 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}.$$

Нейтральные каоны нарушают CP- симметрию

$$|K_S^0\rangle = \left(\frac{1}{1 + |\varepsilon_1|^2} \right)^{1/2} (|K_1^0\rangle + \varepsilon_1 |K_2^0\rangle),$$

$$|K_L^0\rangle = \left(\frac{1}{1 + |\varepsilon_2|^2} \right)^{1/2} (|K_2^0\rangle + \varepsilon_2 |K_1^0\rangle),$$

где ε_1 и ε_2 - малые комплексные числа.

Образование и распад странных частиц управляются законом сохранения странности

Закон сохранения странности

В сильных и электромагнитных взаимодействиях странность сохраняется $\Delta s = 0$.

В слабых взаимодействиях странность не изменяется или изменяется на единицу $\Delta s = 0, \pm 1$.

Это позволило объяснить и парное рождение странных частиц в реакции сильного взаимодействия и большое время жизни в результате распада, происходящего за счёт слабого взаимодействия

Изоспин сохраняется только в сильных взаимодействиях. В электромагнитных взаимодействиях сохраняется проекция изоспина.

Каскадные гипероны

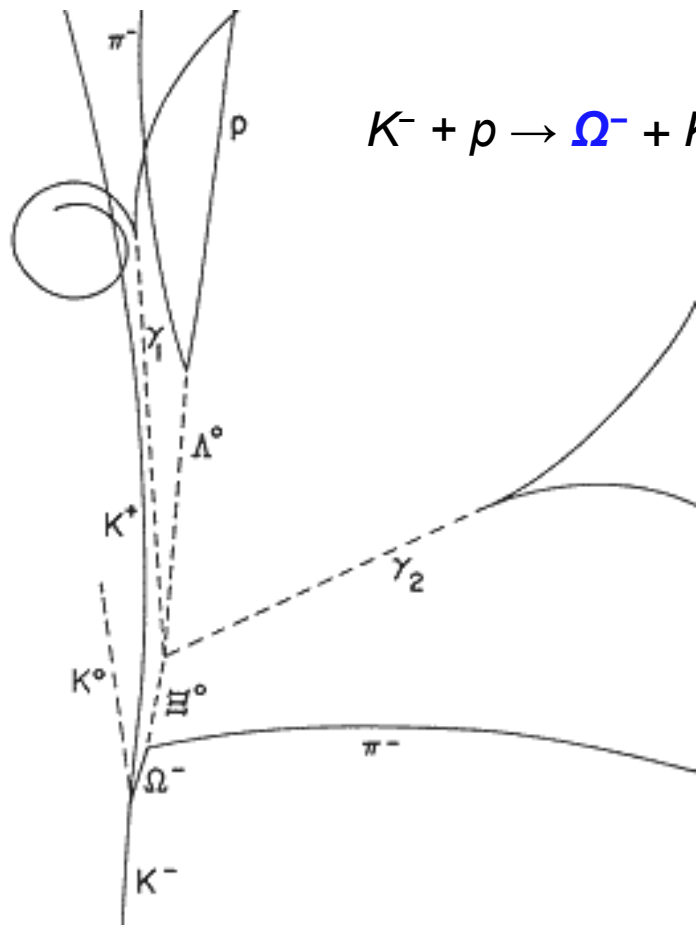
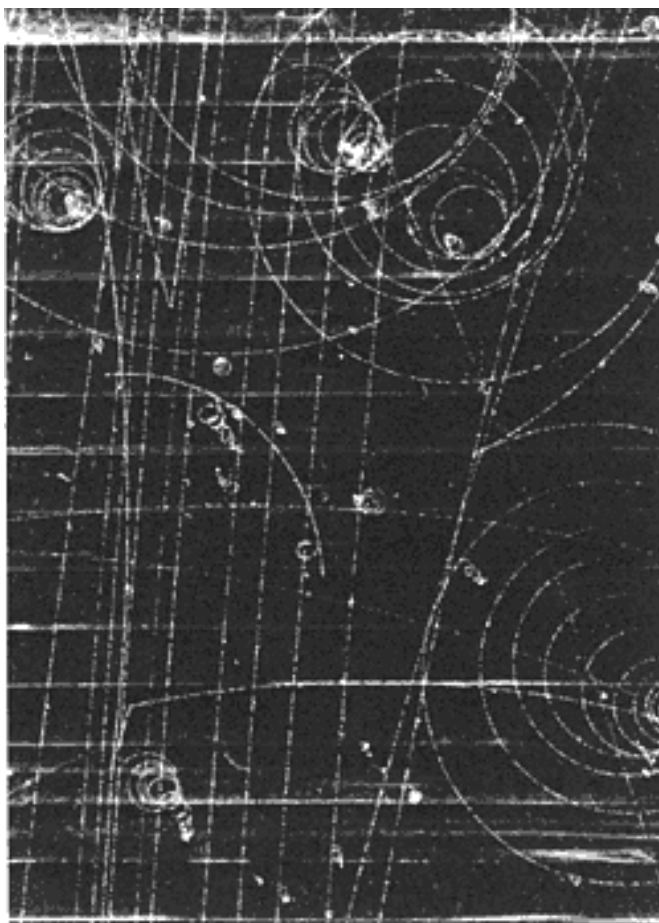
Наряду с частицами имеющими единичную странность были обнаружены, частицы со странностью $s = \pm 2$. У одной из них (Ξ^0 «кси-ноль») был нулевой электрический заряд, у другой (Ξ^- «кси-минус») $Q = -1$.

Среднее время жизни их было приблизительно таким же, как и у Λ и Σ -гиперонов. Это означало, что их распад тоже происходит в результате слабого взаимодействия

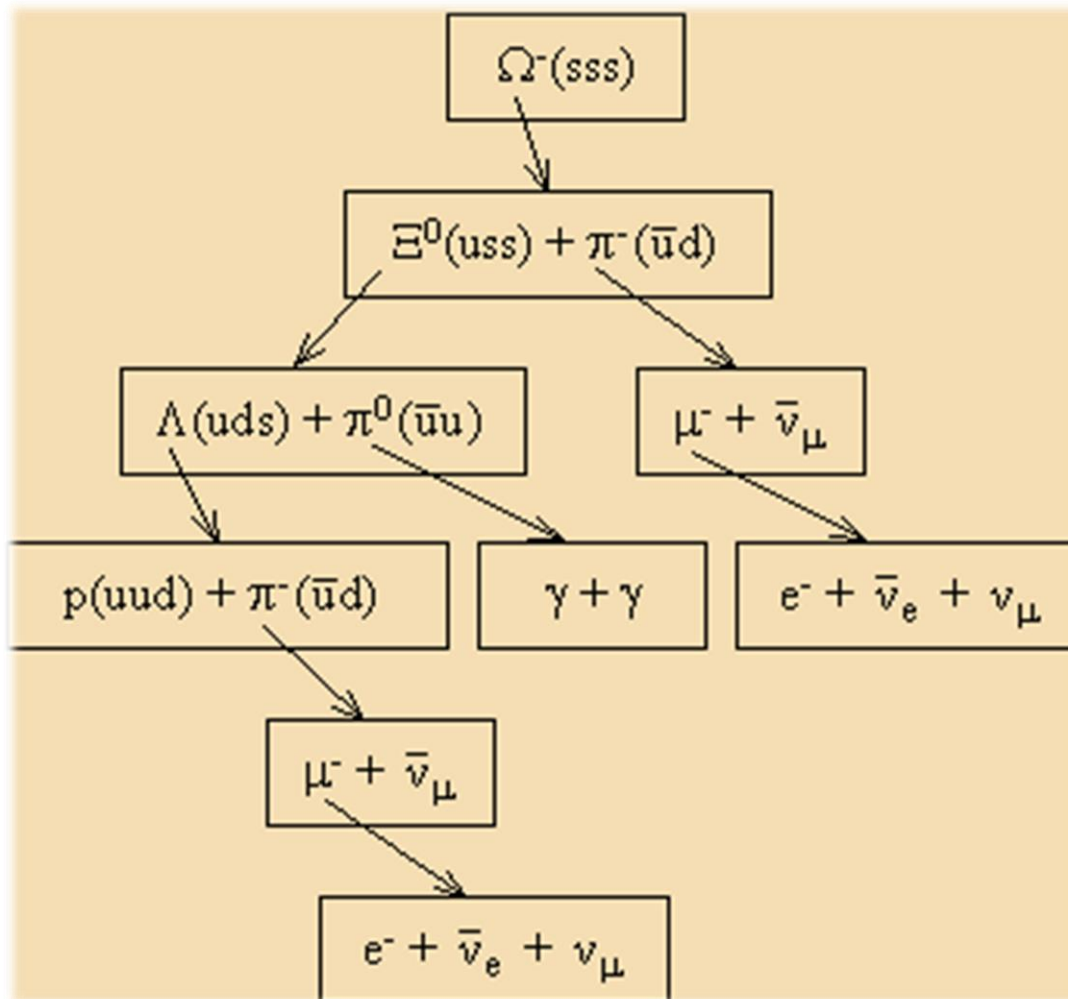
Эти гипероны не распадались непосредственно на частицы без странности, а только в результате каскада - сперва Ξ^0 -гиперон распадался на $\Lambda\pi^0$, а Ξ^- -гиперон на $\Lambda\pi^-$. Т.е. странность менялась на 1. Поэтому их называли **каскадными гиперонами**.

| Частица | Кварковый состав | Масса, mc^2 (МэВ) | Время жизни (сек) или ширина (МэВ) | Спин-четность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада |
|---------|------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Ξ^0 | uss | 1315 | $2.9 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1/2)$ | $\Lambda\pi^0$ |
| Ξ^- | dss | 1321 | $1.6 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1/2)$ | $\Lambda\pi^-$ |

Омега-минус-гиперон - барион, имеющий странность $s = -3$.



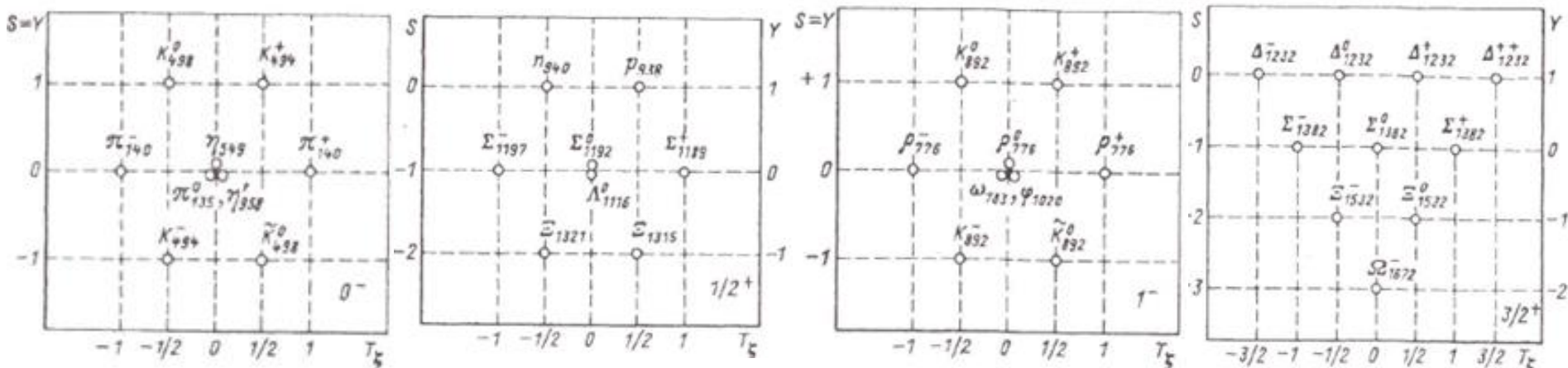
| Частица | Кварковый состав | Масса, mc^2 (МэВ) | Время жизни (с) | Спин-четность J^P , изоспин I $J^P(I)$ |
|------------|------------------|---------------------|-----------------------|--|
| Ω^- | sss | 1672 | $0.82 \cdot 10^{-10}$ | $3/2^+(0)$ |



Т.к. в слабых распадах странность может изменяться не более чем на 1, *распад Ω^- -гиперона происходит через каскад последовательных распадов с образованием в конечном состоянии стабильных частиц.*

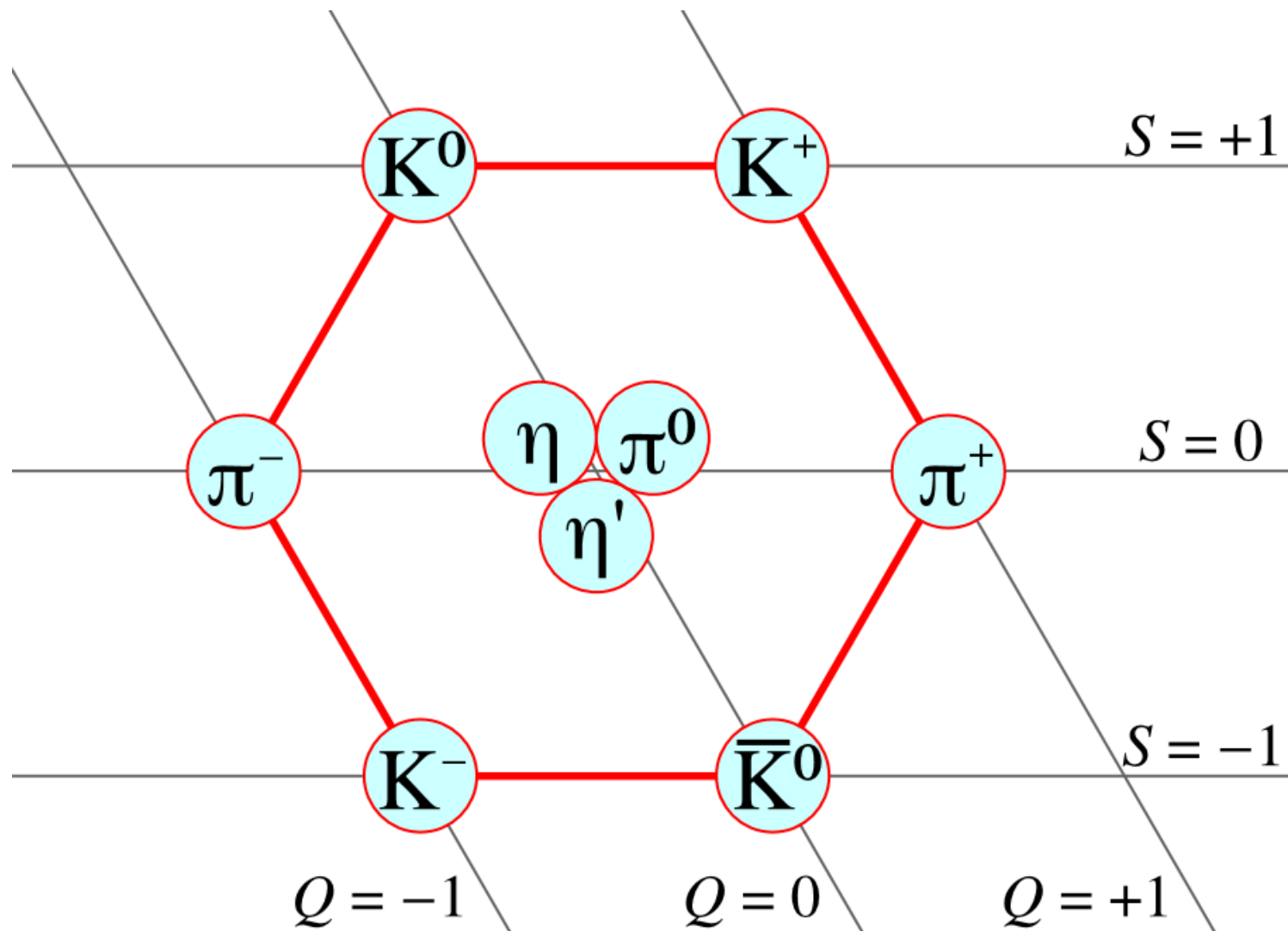
5. Унитарная симметрия

Все стабильные адроны и низко лежащие резонансы могут быть размещены по унитарным мультиплетам, члены которых обладают одним и тем же спином, четностью и барионным числом: октуплет мезонов 0^- , октуплет барионов $1/2^+$, декуплет $3/2^+$, нонуплеты мезонных резонансов 1^- и 2^+ и некоторые другие. Не обнаружено ни одной частицы, которую в принципе нельзя было бы поместить в один из унитарных мультиплетов не очень высокой размерности.

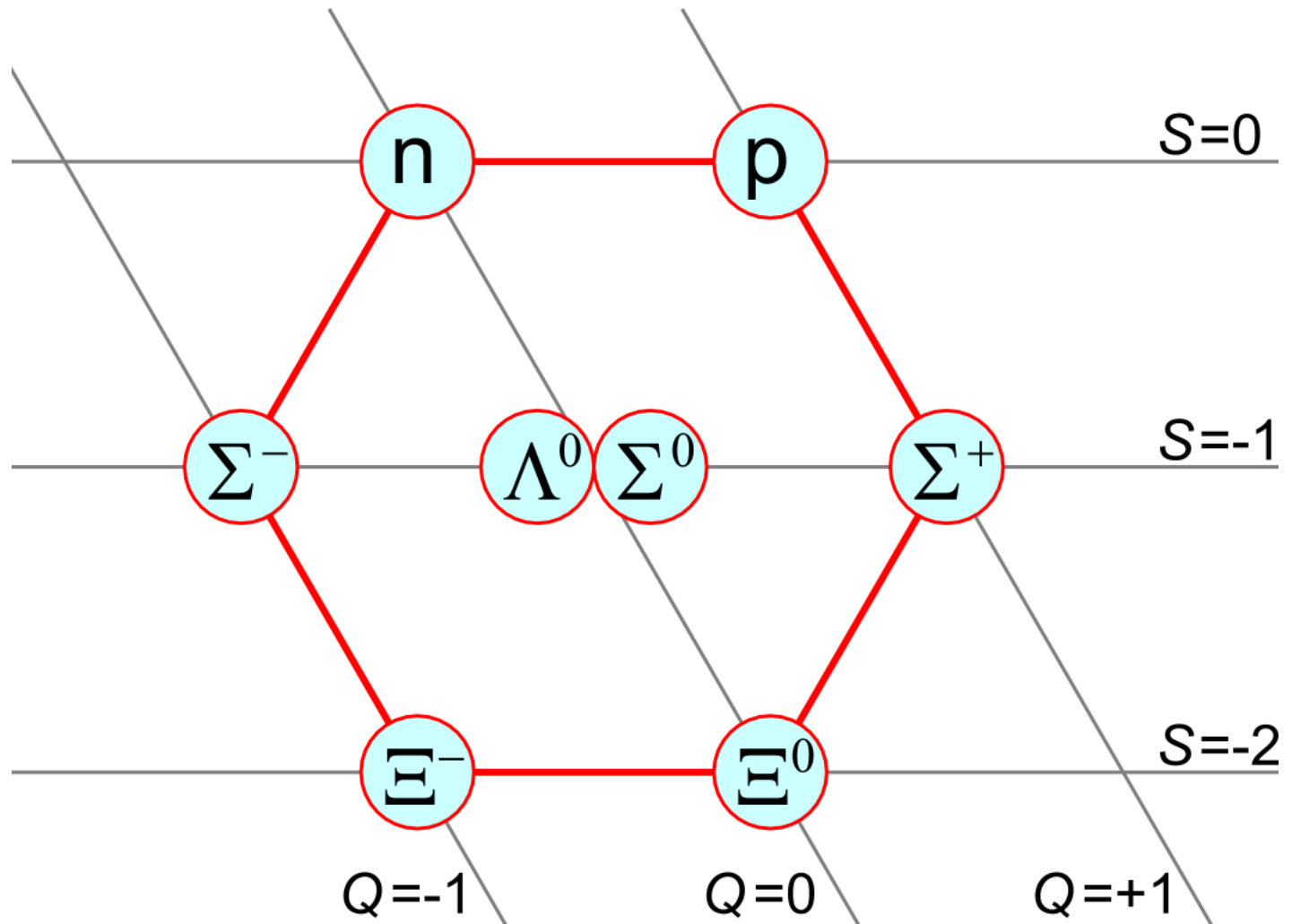


Предполагалось, что каждая из этих групп представляет собой супермультиплет частиц, возникший в результате «расщепления» **одной частицы**, состояние которой характеризуется **барионным зарядом, спином и чётностью**, присущими данной группе. Расщепление по массам в мультиплете $<15\%$

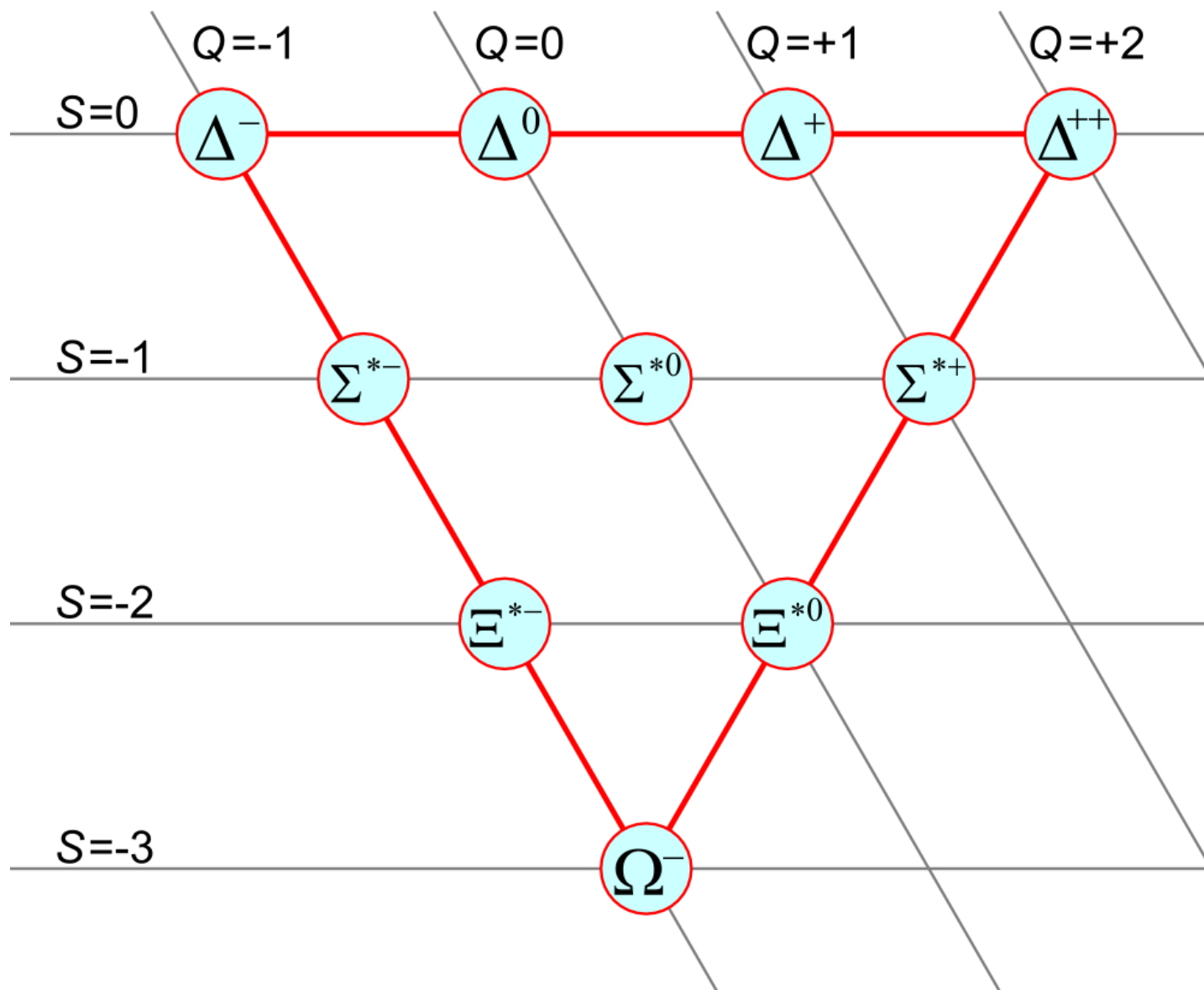
Мезонный октет



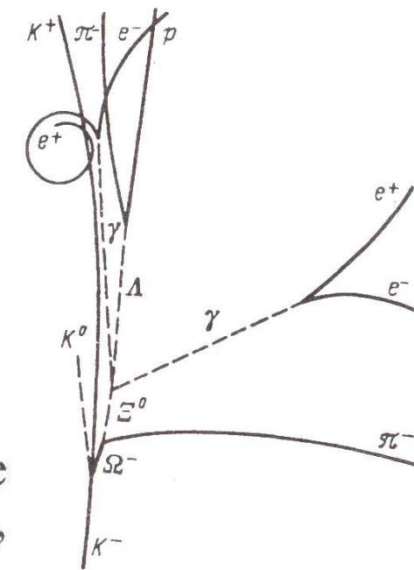
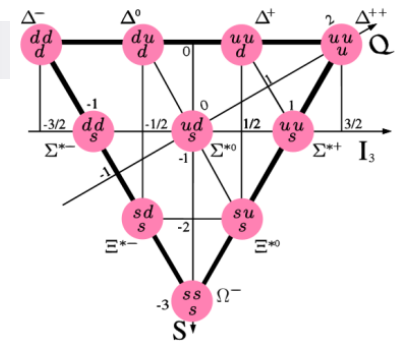
Барионный октет со спином $\frac{1}{2}$



Барионный декуплет со спином $\frac{3}{2}$



SU(3) симметрия

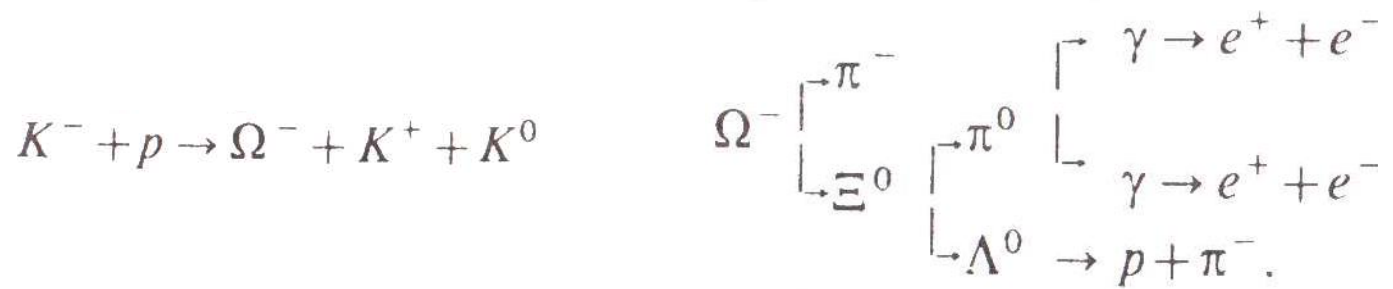


$M_{\Omega} \approx (1672,4 \pm 0,3) \text{ МэВ.}$
 $(0,82 \pm 0,03) \cdot 10^{-10} \text{ с}$

Впервые шестиугольная диаграмма для барионов была получена в начале 1961 г. Гелл-Маном и Нейманом. В это время было известно семь псевдоскалярных мезонов. Через полгода были открыты восемь векторных мезонов. А еще через полгода был открыт недостающий восьмой псевдоскалярный η -мезон.

Триумфом $SU(3)$ -симметрии была расшифровка треугольной диаграммы для барионных адронов в состоянии $3/2^+$. Осенью 1962 г. было известно девять адронов этого типа, которые на плоскости T_z, S образовывали правильный треугольник без нижней вершины. В случае справедливости $SU(3)$ -симметрии должен был существовать десятый адрон — Ω^- -гиперон.

В начале 1964 г. Ω^- -гиперон был открыт в Брукхейвене с помощью двухметровой водородной пузырьковой камеры, облученной K^- -мезонами с импульсом 5 ГэВ/с.



В 1969 г Гелл-Ману была присуждена Нобелевская премия по физике за классификацию элементарных частиц.

$SU(3)$ -симметрия позволила классифицировать как мезонные, так и барионные адроны и предсказать существование нескольких новых частиц. Ее триумфом было предсказание всех квантовых чисел Ω^- -гиперона, который вскоре был открыт.

С другой стороны, гипотеза унитарной симметрии обладает рядом существенных недостатков.

В частности,

$SU(3)$ -симметрия предсказывала следующие соотношения между магнитными моментами барионов:

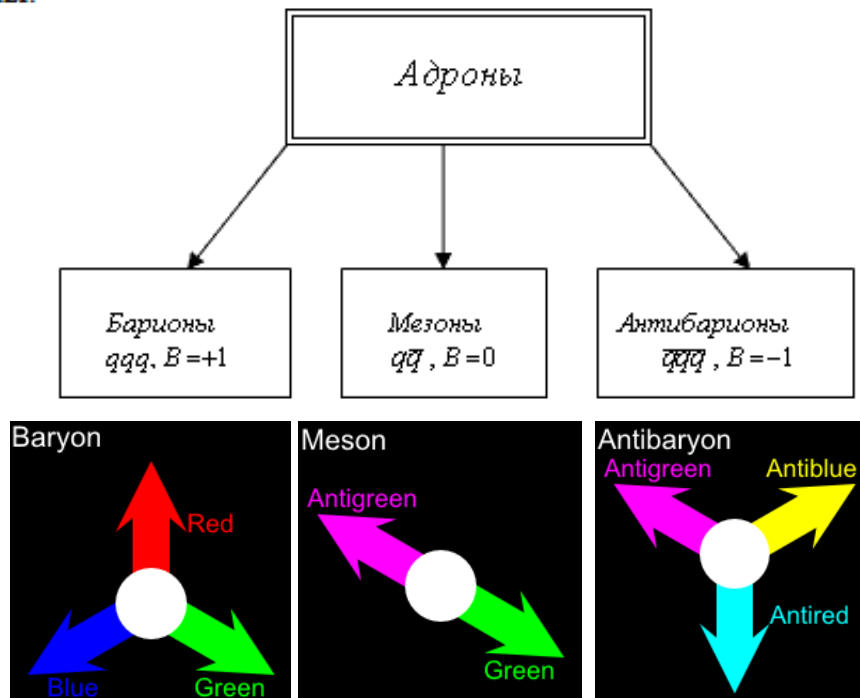
$$\mu_p = \mu_{\Sigma^+}; \quad \mu_{\Sigma} = \mu_{\Xi} = -(\mu_p + \mu_n); \quad \mu_n = \mu_{\Xi^0} = 2\mu_{\Lambda} = -2\mu_{\Sigma^0}.$$

В настоящее время магнитные моменты барионов известны, и они не согласуются с этими предсказаниями.

6. Кварковая структура адронов

К середине шестидесятых годов XX столетия, когда наряду с протоном и нейтроном было открыто несколько десятков «элементарных» частиц, стало ясно, что эти «элементарные» частицы состоят из более фундаментальных частиц. В 1964 г. Независимо друг от друга [М. Гелл-Манн](#) и [Д. Цвейг](#) предложили составную кварковую модель адронов.

Кварки объединяются в частицы, называемые *адронами*. Термин «адрон» происходит от греческого «хадрос» – сильный и отражает свойство адронов участвовать в сильных взаимодействиях. Адроны – связанные системы кварков и антикварков. Адроны существуют двух типов – барионы и мезоны.



- **Барионы** (барионный заряд $B = +1$) - частицы, состоящие из трёх кварков (qqq), и являющиеся фермионами ($J = 1/2, 3/2, \dots$). К числу барионов относятся, например, протон и нейтрон.
- **Антибарионы** ($B = -1$) состоят из трех антикварков ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$). Антипротон и антинейтрон входят в группу антибарионов.
- **Мезоны** ($B = 0$), состоящие из кварка и антикварка ($q\bar{q}$), занимают промежуточное положение. Мезоны имеют целочисленное значение спина и являются бозонами ($J = 0, 1, 2, \dots$).

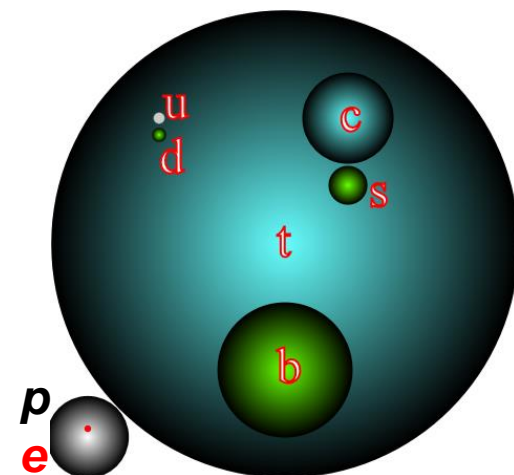
| Name | Symbol | Mass (MeV/c ²) [*] | J | B | Q (e) | I ₃ | C | S | T | B' | Antiparticle | Antiparticle symbol |
|--------------------------|--------|---|-----|------|-------|----------------|----|----|----|----|--------------|---------------------|
| First generation | | | | | | | | | | | | |
| Up | u | 2.3 ± 0.7 ± 0.5 | 1/2 | +1/3 | +2/3 | +1/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | Antiup | ū |
| Down | d | 4.8 ± 0.5 ± 0.3 | 1/2 | +1/3 | -1/3 | -1/2 | 0 | 0 | 0 | 0 | Antidown | d̄ |
| Second generation | | | | | | | | | | | | |
| Charm | c | 1275 ± 25 | 1/2 | +1/3 | +2/3 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | Anticharm | c̄ |
| Strange | s | 95 ± 5 | 1/2 | +1/3 | -1/3 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | Antistrange | s̄ |
| Third generation | | | | | | | | | | | | |
| Top | t | 173 210 ± 510 ± 710 | 1/2 | +1/3 | +2/3 | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | Antitop | t̄ |
| Bottom | b | 4180 ± 30 | 1/2 | +1/3 | -1/3 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | Antibottom | b̄ |

В отличие от точечных кварков, адроны – протяжённые объекты, т. е. имеют размер ($\approx 1 \text{ ФМ}$). Среднеквадратичные зарядовые радиусы протона (p), пиона (π) и каона (K) дают представление о размере области пространства, в которой распределён электрический заряд адрона:

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle}_p = 0.86 \text{ ФМ}, \quad \sqrt{\langle r^2 \rangle}_\pi = 0.67 \text{ ФМ}, \quad \sqrt{\langle r^2 \rangle}_K = 0.58 \text{ ФМ}.$$

Закон сохранения числа барионов

Во всех процессах, происходящих в природе, разность числа барионов и антибарионов сохраняется



Мезоны (B=0, L=0)

| Частица | Кварковый состав | Масса, Мс ² (МэВ) | Время жизни (сек) или ширина | Спин-четность, изоспин J ^P (I) | Основные моды распада |
|-------------------------|--|------------------------------|---|---|--|
| π^+, π^- | $u\bar{d}, d\bar{u}$ | 139.57 | $2.6 \cdot 10^{-8}$ | 0 ⁻ (1) | $\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-$ |
| π^0 | $u\bar{u} - d\bar{d}$ | 134.98 | $8.4 \cdot 10^{-17}$ | 0 ⁻ (1) | 2γ |
| K^+, K^- | $u\bar{s}, s\bar{u}$ | 494 | $1.2 \cdot 10^{-8}$ | 0 ⁻ (1/2) | $\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-, \pi^\pm \pi^0$ |
| K^0, \bar{K}^0 | $d\bar{s}, s\bar{d}$ | 498 | $\left\{ \begin{array}{l} 0.89 \cdot 10^{-10} K_S^0 \\ 5.2 \cdot 10^{-8} K_L^0 \end{array} \right.$ | 0 ⁻ (1/2) | $\pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$ |
| | | | | 0 ⁻ (1/2) | $\text{пe}\nu, \mu\nu, 3\pi^0, \pi^0\pi^+\pi^-$ |
| η | $u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$ | 547 | 1.2 кэВ | 0 ⁻ (0) | $2\gamma, 3\pi^0, \pi^0\pi^+\pi^-$ |
| η' | $u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$ | 958 | 0.20 МэВ | 0 ⁻ (0) | $\eta\pi^+\pi^-, \rho^0\gamma, \pi^0\pi^0\eta$ |
| ρ^\pm, ρ^0 | $\left. \begin{array}{l} u\bar{d}, d\bar{u} \\ u\bar{u} - d\bar{d} \end{array} \right\}$ | 770 | 151 МэВ | 1 ⁻ (1) | $\text{п}\text{п}$ |
| ω | $u\bar{u} + d\bar{d}$ | 782 | 8.4 МэВ | 1 ⁻ (0) | $\pi^+\pi^-\pi^0$ |
| φ | $s\bar{s}$ | 1020 | 4.4 МэВ | 1 ⁻ (0) | $K^+K^-, \pi^+\pi^-\pi^0$ |
| D^\pm | $c\bar{d}, d\bar{c}$ | 1869 | $1.1 \cdot 10^{-12}$ | 0 ⁻ (1/2) | } K + другие частицы, e + другие, μ + другие |
| D^0, \bar{D}^0 | $c\bar{u}, u\bar{c}$ | 1865 | $4.2 \cdot 10^{-13}$ | 0 ⁻ (1/2) | |
| D_S^\pm | $c\bar{s}, s\bar{c}$ | 1969 | $4.7 \cdot 10^{-13}$ | 0 ⁻ (0) | K + другие |
| B^\pm, B^0, \bar{B}^0 | $\left. \begin{array}{l} u\bar{b}, b\bar{u} \\ d\bar{b}, b\bar{d} \end{array} \right\}$ | 5279 | $1.6 \cdot 10^{-12}$ | 0 ⁻ (1/2) | $D^0 + \text{др}, D^{*+} + \text{др}$ |
| | | | | 0 ⁻ (1/2) | $\nu + \text{др}, D^+ + \text{др}, D^{*+} + \text{др}$ |
| J/ψ | $c\bar{c}$ | 3097 | 87 кэВ | 1 ⁻ (0) | адроны, $e^+e^-, \mu^+\mu^-$ |
| Y | $b\bar{b}$ | 9460 | 53 кэВ | 1 ⁻ (0) | $\tau^+\tau^-, e^+e^-, \mu^+\mu^-$ |

Барионы ($B = 1, L = 0$)

| Частица | Кварковый состав | Масса, $m c^2$ (МэВ) | Время жизни (сек) или ширина (МэВ) | Спин-четность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада |
|---|---|----------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| p | uud | 938.27 | >1031 лет | $1/2^+(1/2)$ | |
| n | ddu | 939.57 | 887 ± 2 | $1/2^+(1/2)$ | $p e \bar{\nu}$ |
| Λ | uds | 1116 | $2.6 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(0)$ | $p \pi^-, n \pi^0$ |
| Σ^+ | uus | 1189 | $0.80 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1)$ | $p \pi^0, n \pi^+$ |
| Σ^0 | uds | 1193 | $7.4 \cdot 10^{-20}$ | $1/2^+(1)$ | $\Lambda \gamma$ |
| Σ^- | dds | 1197 | $1.5 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1)$ | $n \pi^-$ |
| Ξ^0 | uss | 1315 | $2.9 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1/2)$ | $\Lambda \pi^0$ |
| Ξ^- | dss | 1321 | $1.6 \cdot 10^{-10}$ | $1/2^+(1/2)$ | $\Lambda \pi^-$ |
| Ω^- | sss | 1672 | $0.82 \cdot 10^{-10}$ | $3/2^+(0)$ | $\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$ |
| Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^- | $\left. \begin{array}{l} uuu \\ uud \\ udd \\ ddd \end{array} \right\}$ | 1230-1234 | 115-125 | $3/2^+(3/2)$ | (n или p) + π |
| $\Sigma^+(1385)$ | uus | 1383 | 36 | } $3/2^+(1)$ | $\Lambda \pi, \Sigma \pi$ |
| $\Sigma^0(1385)$ | uds | 1384 | 36 | | |
| $\Sigma^-(1385)$ | dds | 1387 | 39 | | |
| $\Xi^0(1530)$ | uss | 1532 | 9.1 | } $3/2^+(1/2)$ | $\Xi \pi$ |
| $\Xi^-(1530)$ | dss | 1535 | 9.1 | | |

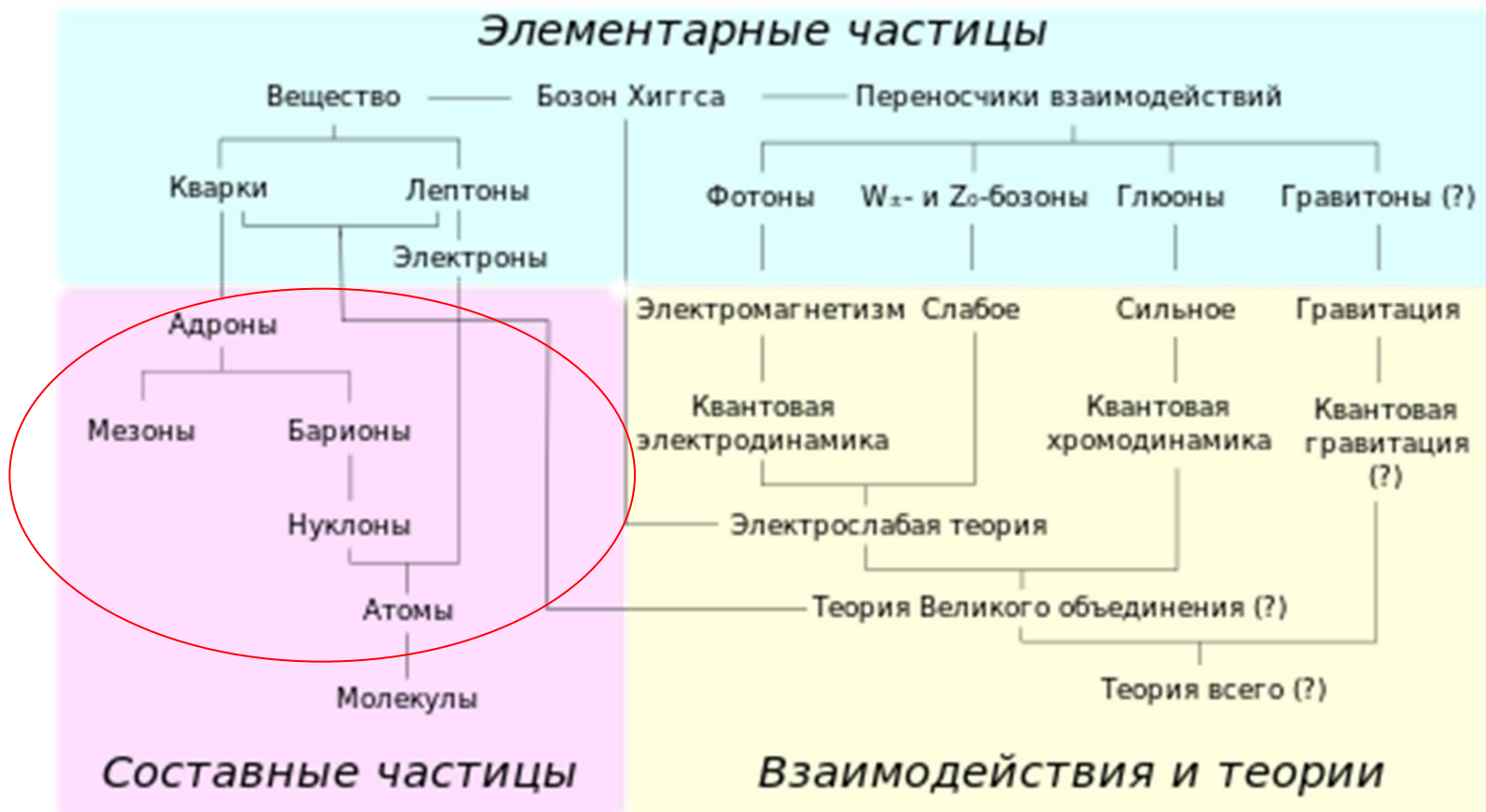
Итак, что мы имеем?

Большинство известных элементарных частиц – адроны.

(термин предложен Л. Б. Окунем в 1962 г.)

В настоящее время известно несколько сотен адронов.

Как их можно классифицировать?



Т а б л и ц а стабильных элементарных частиц

| Класс | Частица | Масса, Мэв | Спин и чет- ность | Время жизни, сек | Основные распады | S | T | T ₃ |
|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|--|--|----|-----|----------------|
| Лептоны B=0, L=1 | Фотон B=0 L=0 | γ | 0 | 1 ⁻ | ∞ | — | — | — |
| | ν_e | 0 | 1/2 | ∞ | — | — | — | — |
| | ν_μ | 0 | 1/2 | ∞ | — | — | — | — |
| | e^- | 0,511 | 1/2 | ∞ | — | — | — | — |
| Мезоны B=0, L=0 | μ^- | 105,66 | 1/2 | $2,2 \cdot 10^{-6}$ | $e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ | — | — | — |
| | π^+ | 139,58 | 0 ⁻ | $2,6 \cdot 10^{-8}$ | $\mu^+ \nu_\mu$ | 0 | 1 | +1 |
| | π^0 | 134,98 | | $0,89 \cdot 10^{-16}$ | $\gamma\gamma$ | | | 0 |
| | π^- | 139,58 | | $2,6 \cdot 10^{-8}$ | $\mu^- \bar{\nu}_\mu$ | | | -1 |
| | K^+ | 493,8 | 0 ⁻ | $1,24 \cdot 10^{-8}$ | $\mu^+ \nu_\mu; \pi^+ \pi^0;$ $\pi^+ \pi^- \pi^+$ | +1 | 1/2 | +1/2 |
| | K^0 | 497,9 | | $0,87 \cdot 10^{-10}$ | $\pi^+ \pi^-; \pi^0 \pi^0$ | | | -1/2 |
| K_L^0 | $5,73 \cdot 10^{-8}$ | | | $\pi e \nu_e; \pi \mu \nu_\mu;$ $\pi^0 \pi^0 \pi^0;$ $\pi^+ \pi^- \pi^0$ | | | | |
| η | 548 | 0 ⁻ | $\sim 10^{-17}$ | $\gamma\gamma; \pi^+ \pi^- \pi^0;$ $\pi^0 \pi^0 \pi^0; \pi^0 \gamma\gamma$ | 0 | 0 | 0 | |
| Барионы B=1, L=0 | p | 938,25 | 1/2 ⁺ | ∞ | — | 0 | 1/2 | +1/2 |
| | n | 939,55 | | $\sim 10^3$ | $p e^- \bar{\nu}_e$ | | | -1/2 |
| | Λ | 1115,6 | 1/2 ⁺ | $2,54 \cdot 10^{-10}$ | $p \pi^-; n \pi^0$ | -1 | 0 | 0 |
| | Σ^+ | 1189,5 | 1/2 ⁺ | $0,8 \cdot 10^{-10}$ | $p \pi^0; n \pi^+$ | -1 | 1 | +1 |
| | Σ^- | 1192,6 | | $< 1 \cdot 10^{-14}$ | $\Lambda \gamma$ | | | 0 |
| | Σ^0 | 1197,4 | | $1,65 \cdot 10^{-10}$ | $n \pi^-$ | | | -1 |
| | Ξ^0 | 1314,7 | 1/2 ⁺ ? | $3 \cdot 10^{-10}$ | $\Lambda \pi^0$ | -2 | 1/2 | +1/2 |
| Ξ^- | 1321,2 | $1,74 \cdot 10^{-10}$ | | $\Lambda \pi^-$ | -1/2 | | | |
| Ω | 1674 | 3/2 ⁺ ? | $\sim 1 \cdot 10^{-10}$ | $\Xi \pi; \Lambda \tilde{K}^+$ | -3 | 0 | 0 | |

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:

Не существует совершенной красоты, которая не содержала бы в себе некоторую долю странности.

Ф. Бэкон

Открытие адронов с внутренним квантовым числом — «странностью» — положило начало самой поразительной эпохе в физике элементарных частиц, которая даже сейчас, пятьдесят лет спустя, не дошла до своего завершения... Именно большие эксперименты определили это развитие, и основные открытия появлялись неожиданно или даже вопреки ожиданиям теоретиков.

I.I. Bigi and A.I. Sanda

Нарушение CP-инвариантности

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава XVIII - XXI.
2. Ядерная физика в Интернете: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 17; <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf>