



*Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»*

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики

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

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №26

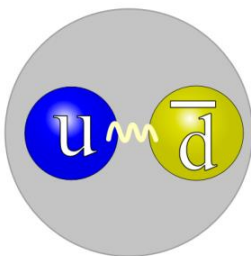
Мезоны

Лекция №26

Мезоны

1. Предсказание
2. Открытие заряженных пионов
3. Нейтральный пион
4. Пиониум
5. Изотриплет
6. Резонансы
7. Мезонные фабрики

1. Предсказание



Hideki Yukawa
(1907-1981)
Н.п. 1949

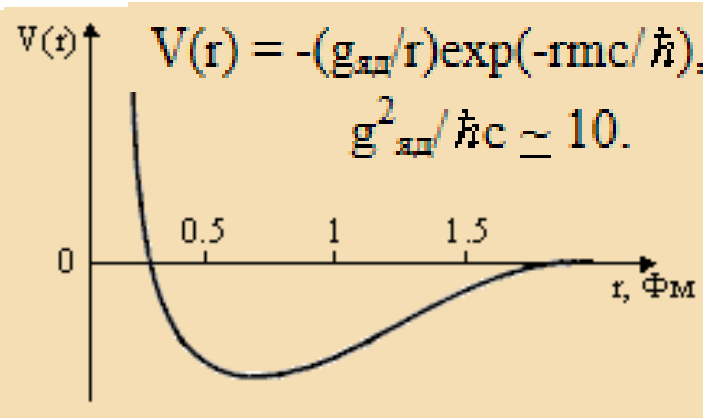
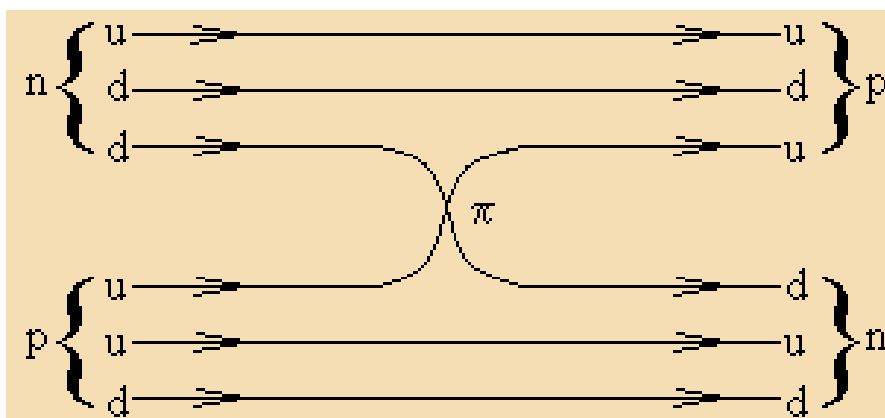


В 1935 г. Хидеки Юкава (Hideki Yukawa) разработал теорию ядерного взаимодействия с помощью квантов ядерного поля - **«МЕЗОНОВ»** - адронов с $B=0$ **μέσος** = средний

Согласно модели Юкавы, механизм ядерного взаимодействия заключается в обмене виртуальным мезоном между нуклонами. За время ядерного взаимодействия $\Delta t \sim 10^{-23}$ сек возможно образование виртуальной частицы с 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

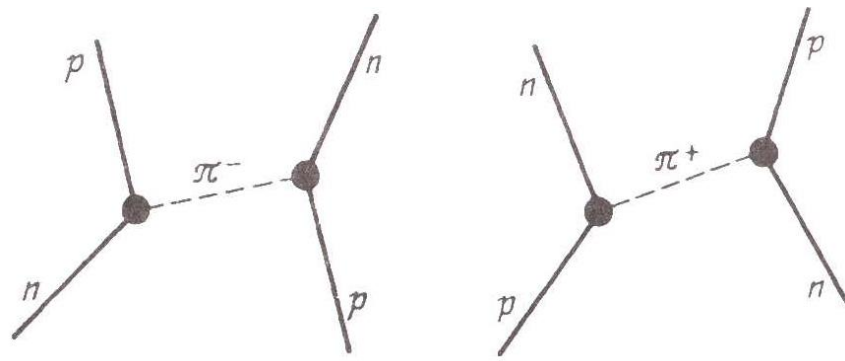
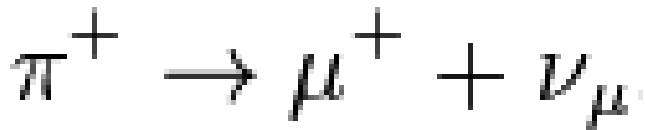


Частица	Кварковый состав	Масса, Mc^2 (МэВ)	Время жизни (сек)	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
π^+, π^-	$u\bar{d}, d\bar{u}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0(1)$	$\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134.98	$8.4 \cdot 10^{-17}$	$0(1)$	2γ

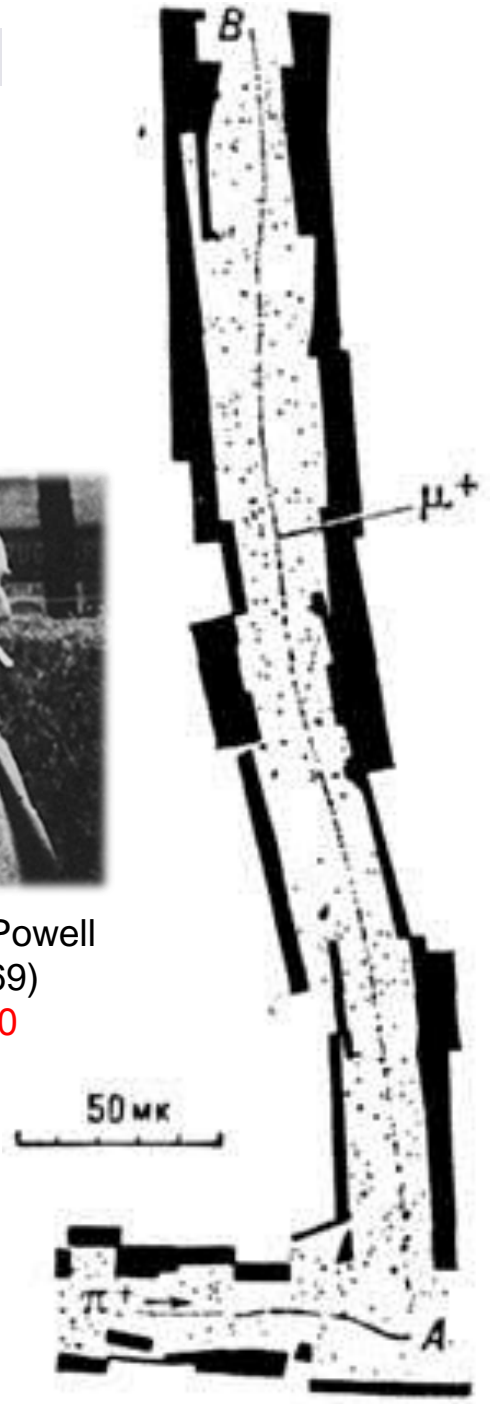
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

2. Открытие заряженных пионов

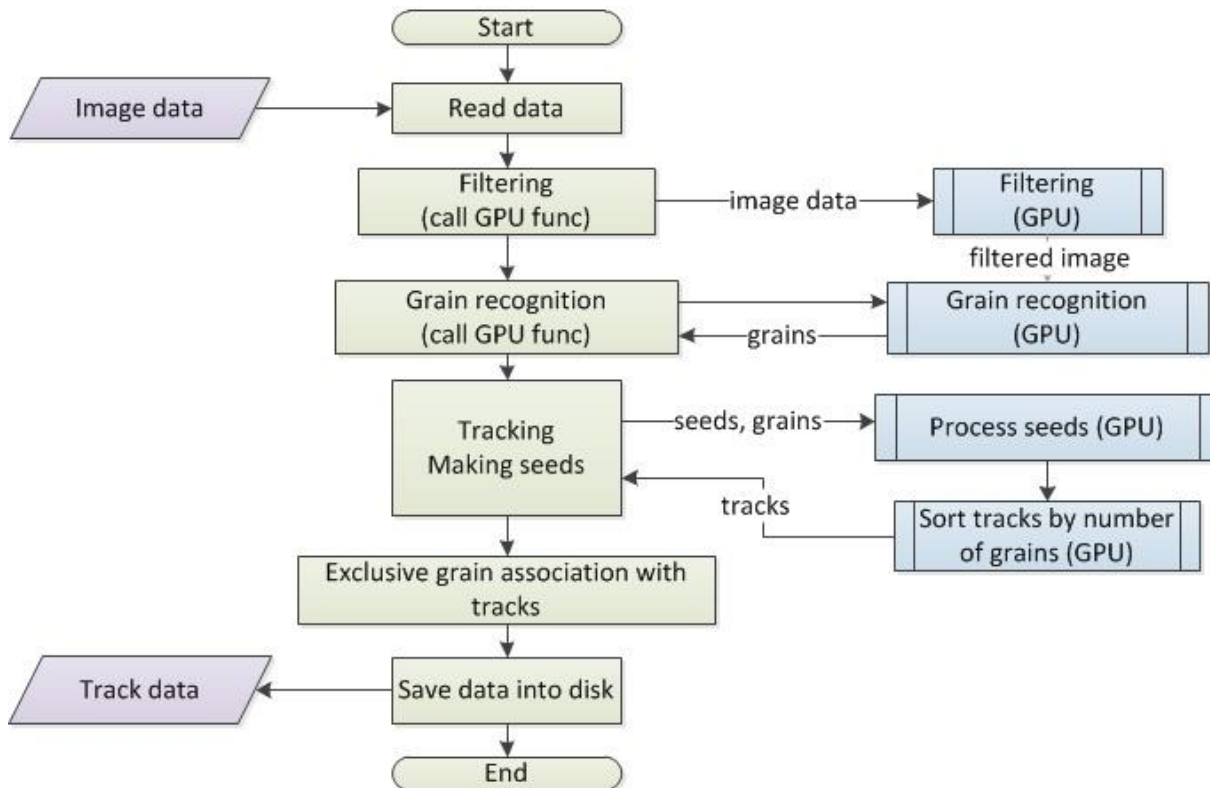
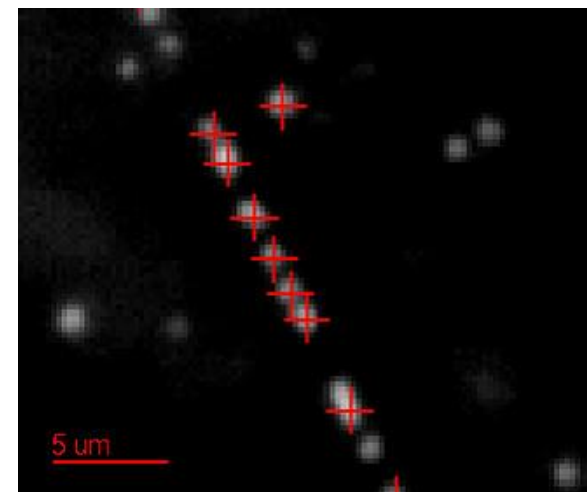
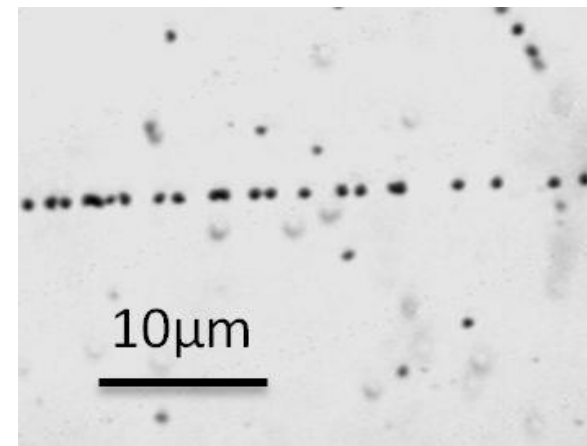
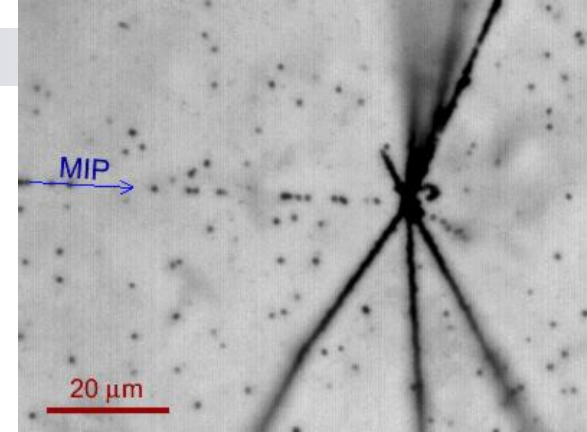
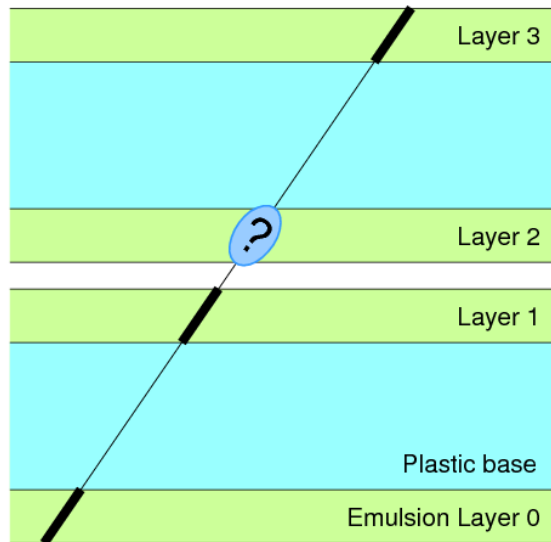
1947 Сесил Пауэлл и др. (Cecil Powell et al) открыли заряженные пионы, исследуя треки космических лучей в фотоэмульсиях на предмет появления мюонов. Они обнаружили реакции, которые идентифицировали как распады пионов

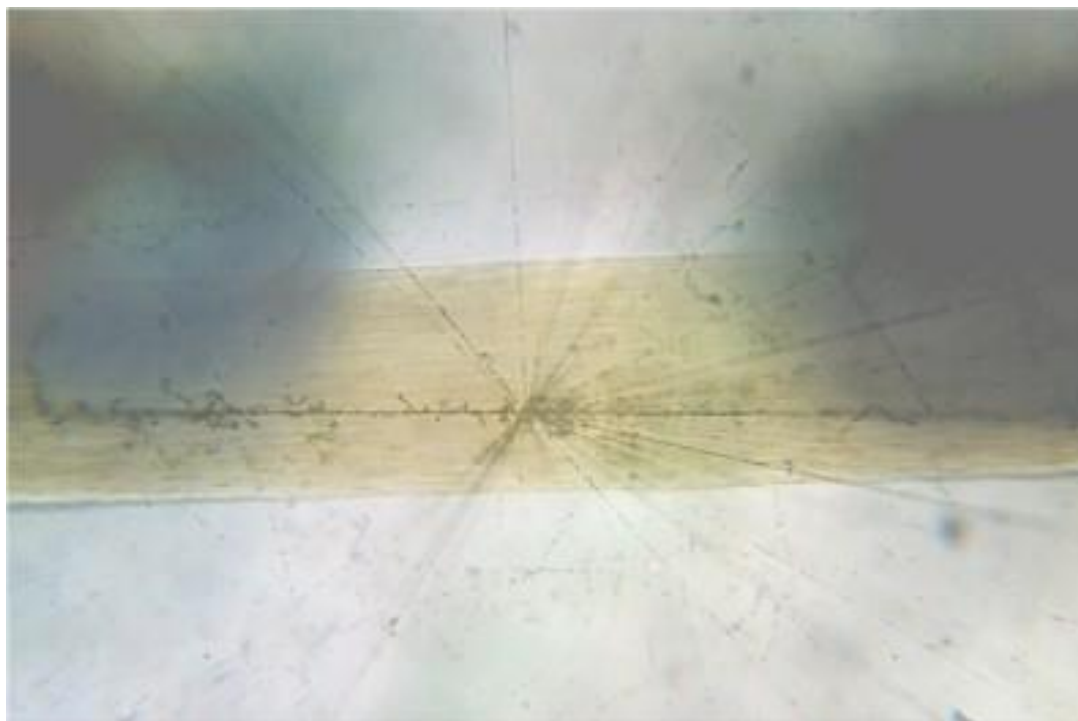


Cecil Frank Powell
(1903-1969)
Н.п.1950



Методика
обработки
данных с фото-
эмульсионной
камеры

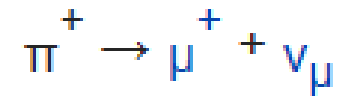




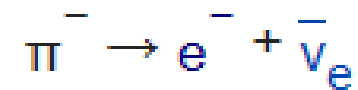
Совмещенные в одном масштабе фотографии взаимодействия релятивистского ядра серы в ядерной эмульсии и человеческого волоса толщиной 60 мкм. полученные с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры.

Распады заряженных пионов

С вероятностью 0.999877 осуществляется *мюонный* канал распада



С вероятностью 0.000123 осуществляется *электронный* канал распада

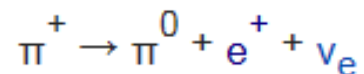
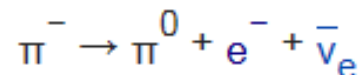


Электронная мода распада подавлена с фактором

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

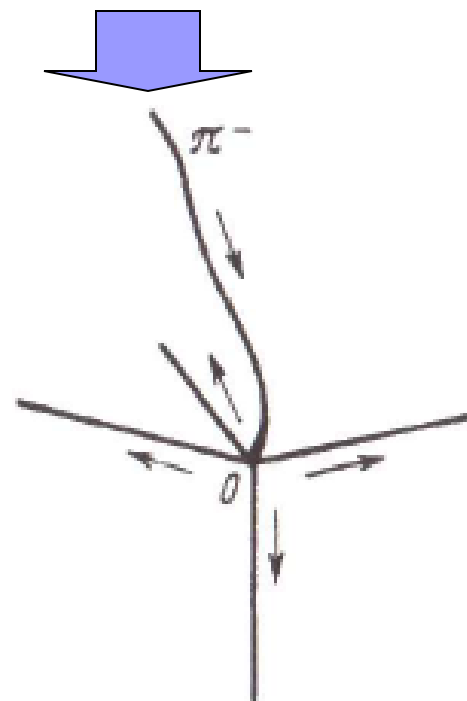
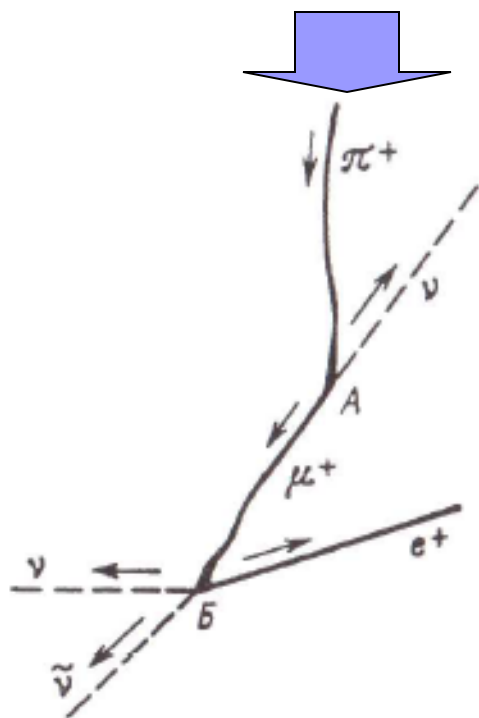
Причина подавления *электронных* распадов по сравнению с *мюонными* — сохранение *спиральности* для ультрарелятивистских частиц

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



Взаимодействие заряженных пионов с веществом

Следы пионов, останавливающиеся в фотоэмульсии

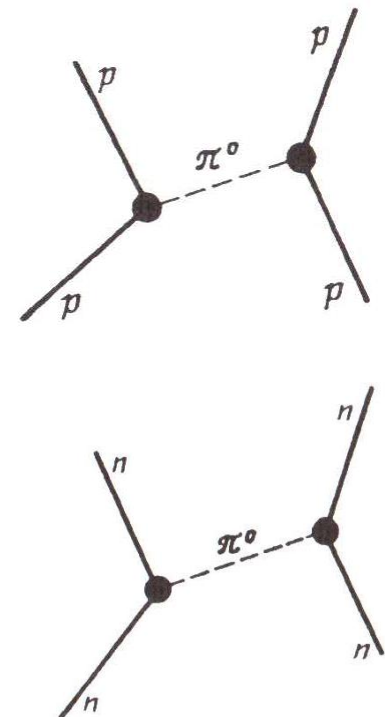
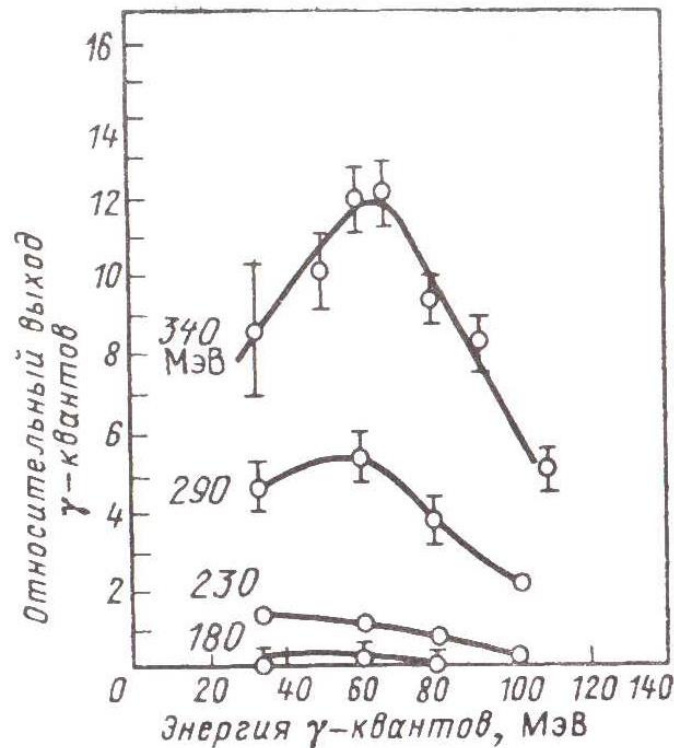
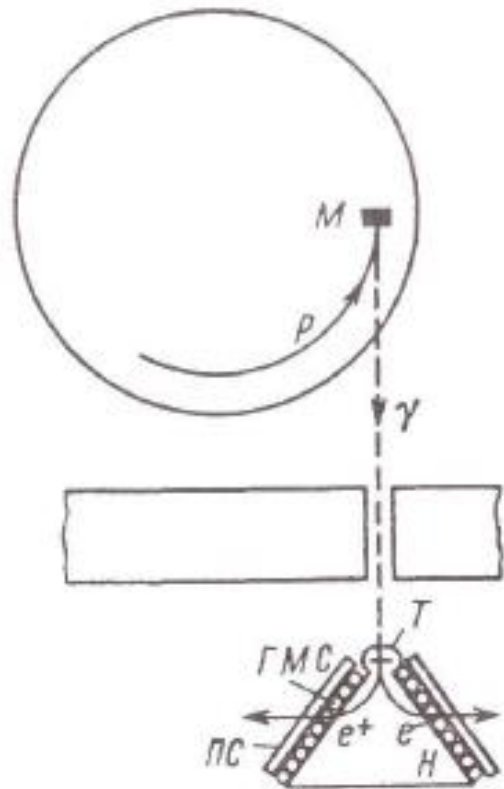


Заряж. пионы с энергией ~ 10 МэВ и ниже при движении в веществе тратят свою энергию в основном на ионизацию атомов (за счёт эл.-магн. взаимодействия с ними) и обычно не успевают до своей остановки провзаимодействовать с атомными ядрами. При этом остановившийся π^+ -мезон распадается на положительно заряженный 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

3. Нейтральный пион

Обнаружить нейтральный мезон π^0 было сложнее, чем заряженные, так как 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.



Распады нейтральных пионов

π^0 135.0 MeV/c² 8.4×10^{-17} s. | Как истинно нейтральная частица π^0 чаще распадается по электромагнитным каналам

Основная мода распада

$$\pi^0 \rightarrow 2 \gamma \quad \text{BR}=0.98823$$

Распад с парой Далица

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+ \quad \text{BR}=0.01174$$

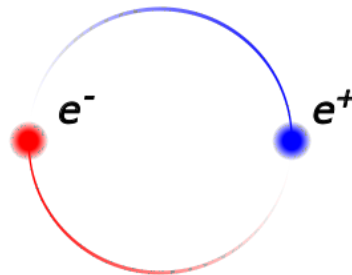
Двойной распад Далица

$$\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+ \quad \text{BR}=3.34 \times 10^{-5}$$

Распад только на пару Далица

$$\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ \quad \text{BR}=6.46 \times 10^{-8}$$

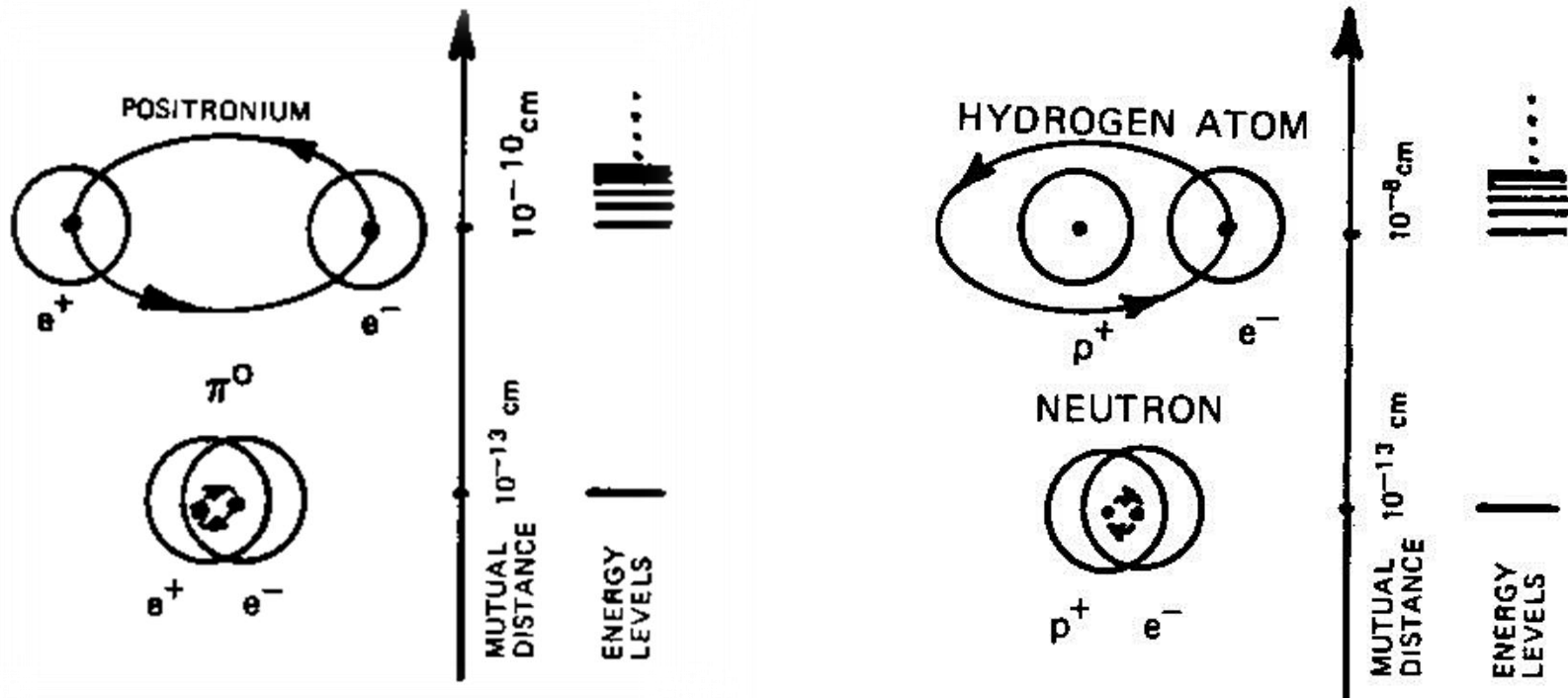
Возможен также распад в **позитронииум**



$$\text{BR} = 10^{-9}$$

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

Природа нейтрального пиона в различных моделях

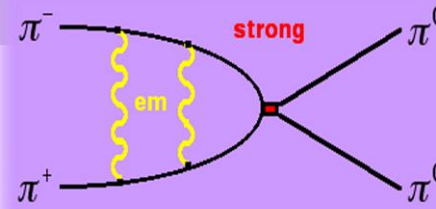


Santilli (1978) model of the π^0 particle as "*compressed positronium*"

I. Gandzha and J Kadeisvili, *New Sciences for a New Era: Mathematical, Physical and Chemical Discoveries of Ruggero Maria Santilli*, Sankata Printing Press, University of Kathmandy, Nepal (2011)

<http://www.santilli-foundation.org/santilli-scientific-discoveries-6.php>

4. Пиониум



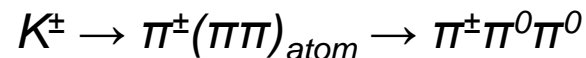
Пиониум - экзотический атом, состоящий из π^+ и π^- мезонов. Он может возникать при взаимодействии ускоренных протонов в ядерной мишени.

Пиониум – короткоживущее образование, которое согласно *киральной пертурбационной теории* имеет время жизни 2.89×10^{-15} секунд.

П. распадается на два π^0 мезона и с меньшей вероятностью – на два фотона.

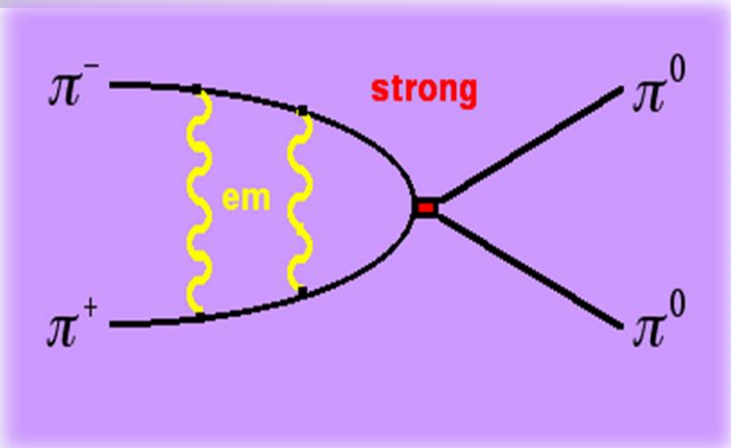
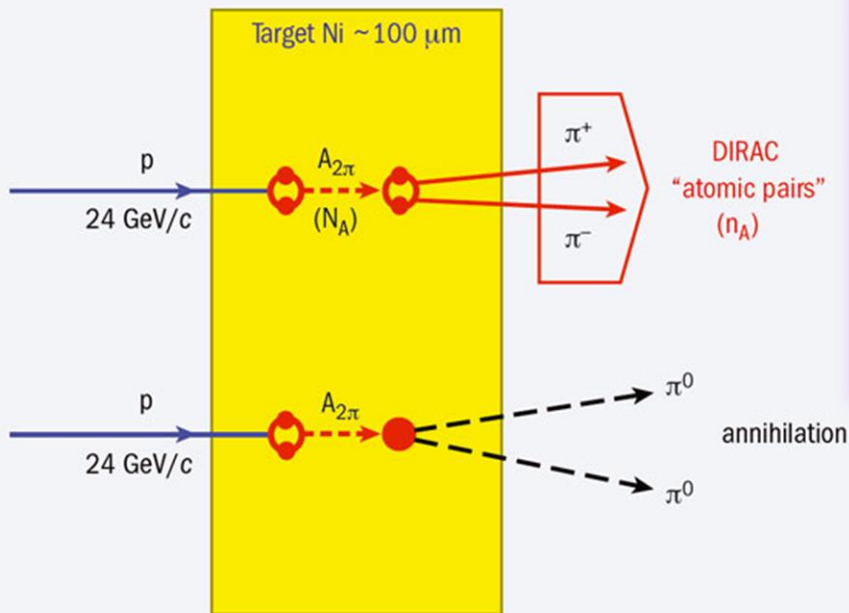
Время жизни пиониума измеряли в ЦЕРНе на установке DIRAC. Было зарегистрировано 21227 атомноподобных пар из общего числа событий 1.5×10^9 , что позволило измерить время жизни со статистической точностью 9%.

В 2006 году коллаборция NA48/2 в ЦЕРНе опубликовала доказательство возникновения пиониума при распадах заряженных *Каонов* в цепочке реакций

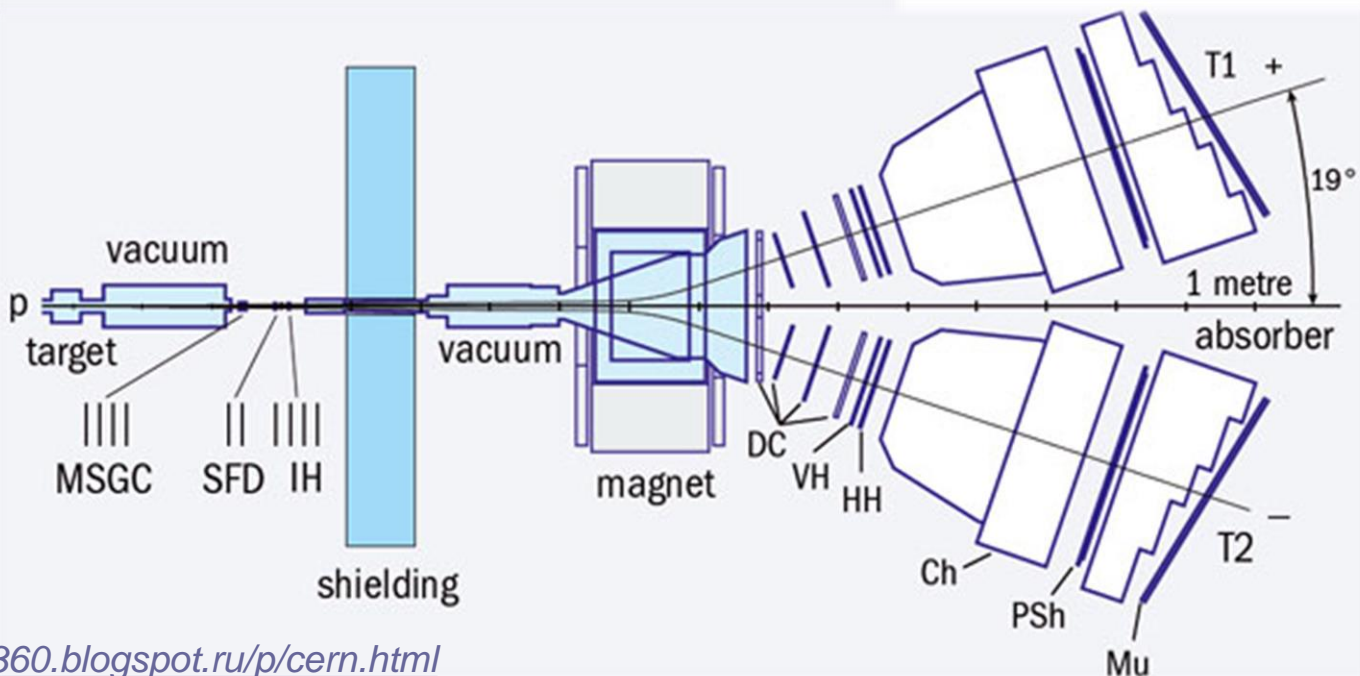


Более точный результат был опубликован в 2009 году из анализа длины рассеяния S-волны. Эти результаты признаны решающими по проверке предсказаний *квантовой хромодинамики* в области низких энергий.

DIRAC at CERN



Ставится задача измерить время жизни $\pi^-\pi^+$ атома величиной 3 fs (основное состояние) с точностью 10%



5. Изотриплет

Пионы обладают изотопическим спином $I = 1$ и образуют изотопический триплет:

три возможные «проекции» изотопического спина $I_3 = +1, 0, -1$ сопоставляются с тремя зарядовыми состояниями пионов

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

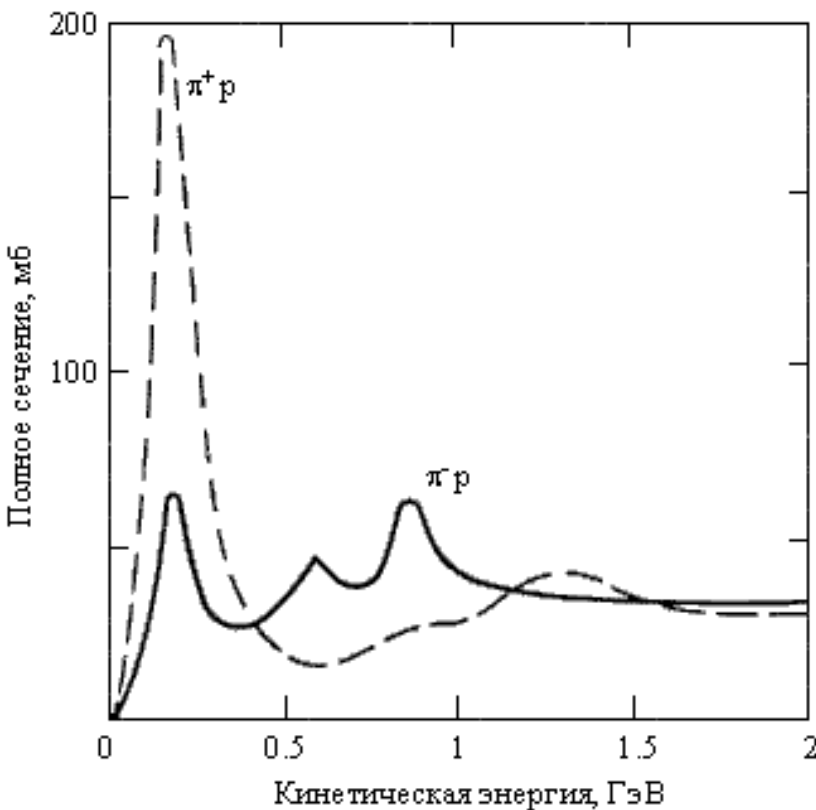
6. Резонансы

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.

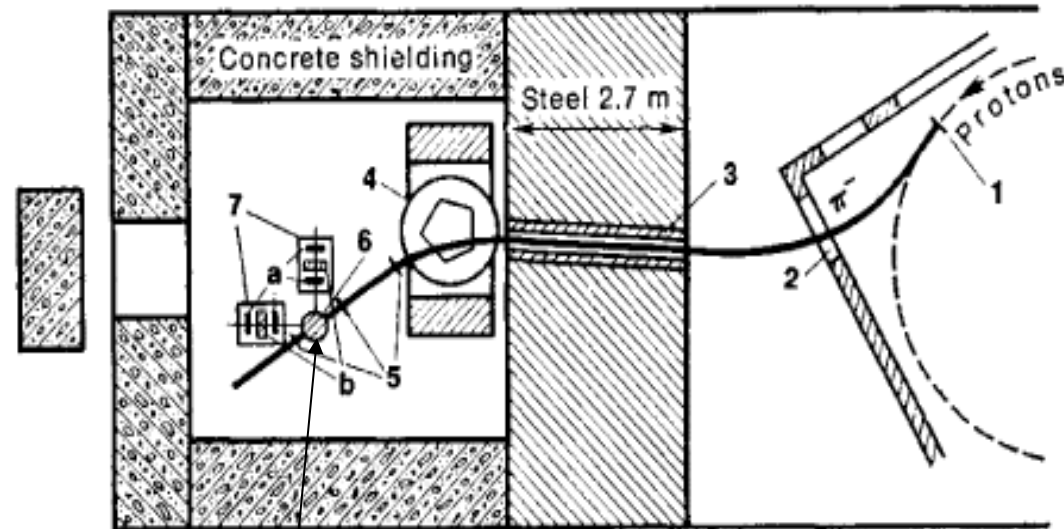
Масса резонансной частицы

$$mc^2 = (E^2 - c^2p^2)^{1/2},$$

где E и p - полная энергия и полный импульс π -мезона и нуклона.



Зависимость полных сечений реакций πp от кинетической энергии пиона



Жидководородная мишень

Резонансы распадаются в основном в результате сильного взаимодействия. Характерные времена жизни резонансов $10^{-22} - 10^{-24}$ с. Из-за их малого времени жизни и соответственно малых расстояний от возникновения до распада треки резонансов не могут непосредственно наблюдаться. Резонансы проявляются как максимумы в зависимостях полных сечений от энергии.

Резонансы имеют вполне определённые квантовые характеристики – массу, электрический заряд, спин, изоспин и др. Эффективным методом наблюдения резонансов является анализ энергий и импульсов продуктов распада резонанса.

Масса резонанса m определяется из релятивистского инварианта $mc^2 = (E^2 - c^2p^2)^{1/2}$, где E и p – суммарные энергия и импульс частиц, на которые распадается резонанс.

Резонансы делятся на две группы:

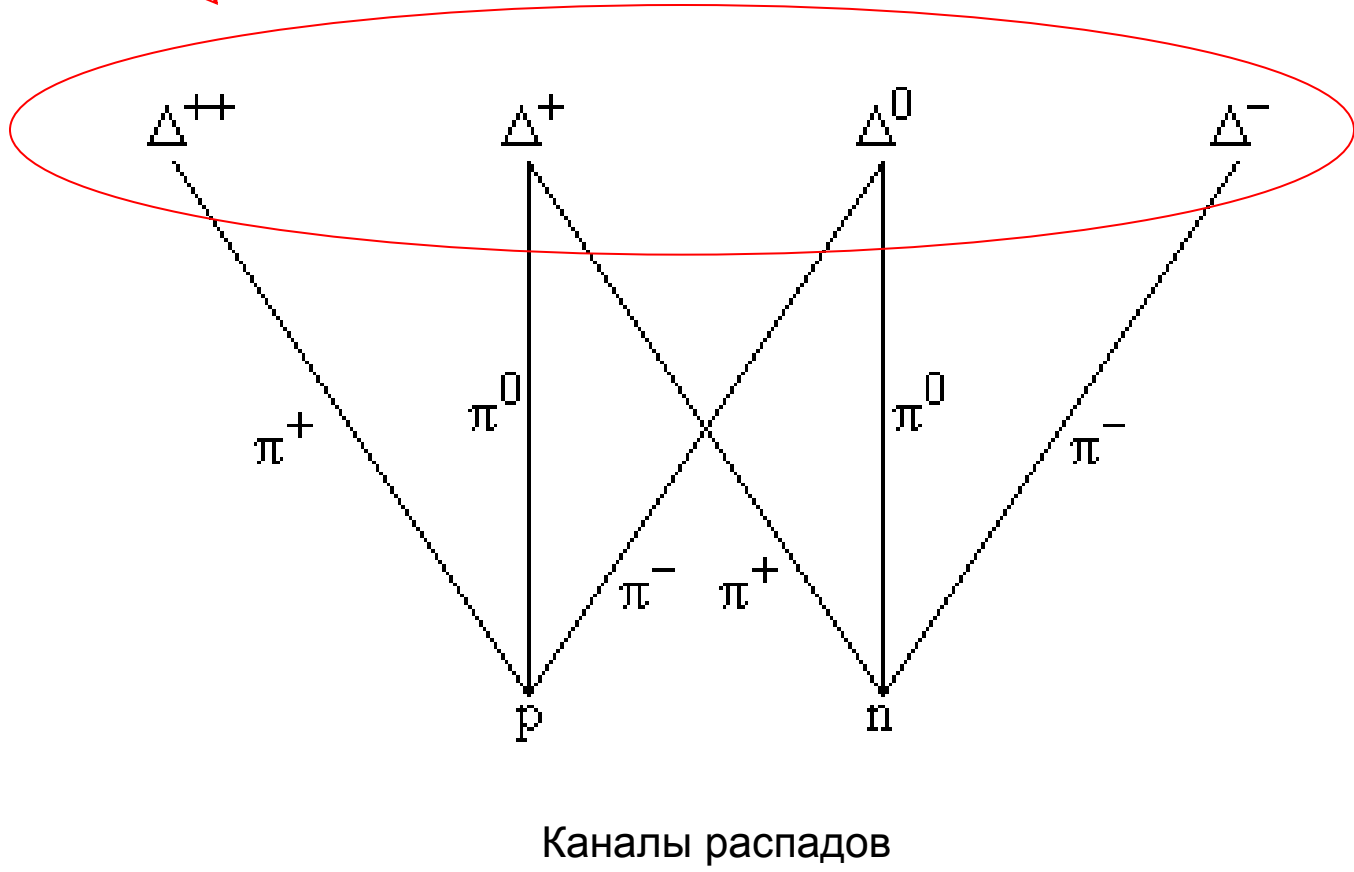
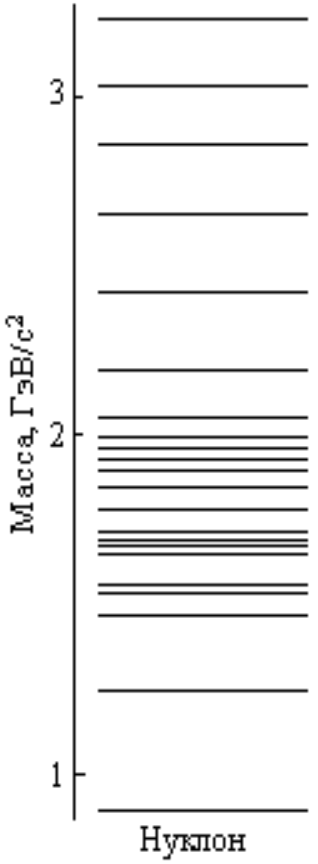
1. **Барионные** резонансы, имеющие барионное число $B = 1$ и распадающиеся на мезоны и один стабильный барион.



2. **Мезонные** резонансы, имеющие барионное число $B = 0$ и распадающиеся на мезоны



Нуклонные резонансы рассматривают как возбуждённые состояния протона и нейтрона
Нуклонные резонансы $\Delta(1232)$ (дельта барионы) имеют спин, четность $J^P = 3/2^+$, изоспин $I = 3/2$ (**изоквартет**). Δ^+ и Δ^0 можно рассматривать как возбужденные состояния протона и нейтрона соответственно.



Резонансы как возбужденные состояния нуклона

Каналы распадов

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

У **нуклонных резонансов $N(1440)$** $J^P = 1/2^+$, изоспин $I = 1/2$ (**изодублет**).

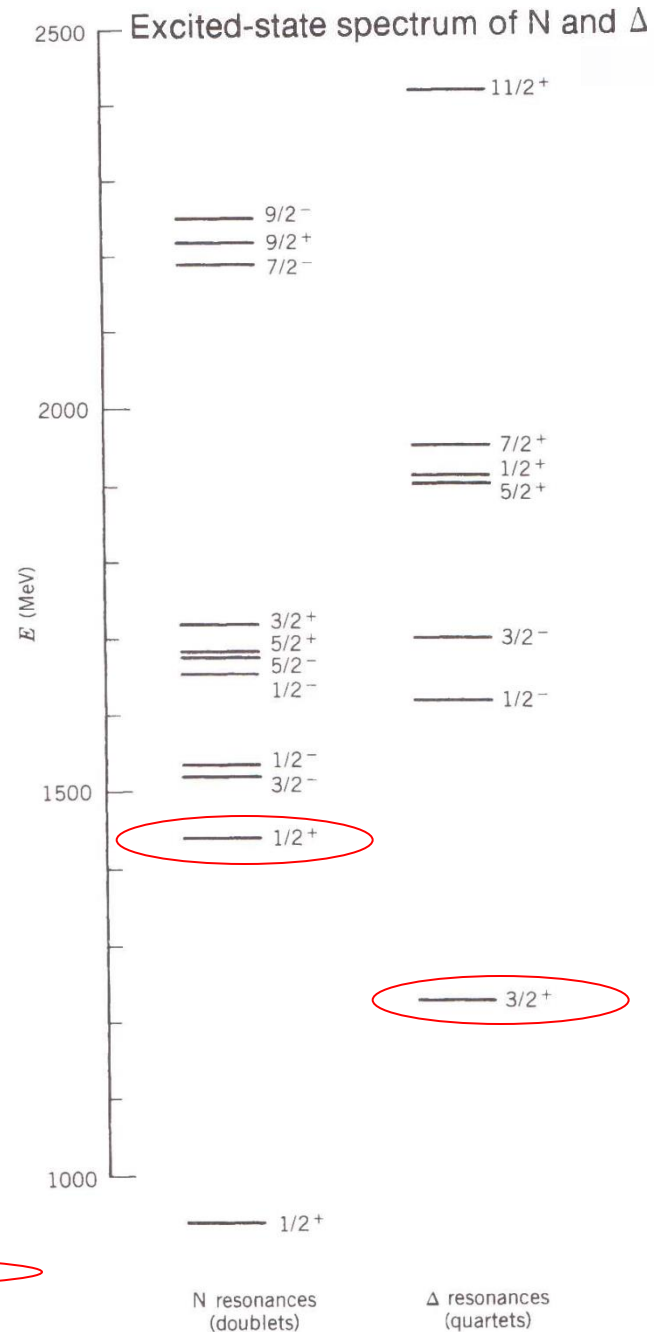
Низкорасположенные нуклонные резонансы в основном распадаются по каналу (n или p) + π .

Время жизни резонанса τ определяется из ширины его распада Γ , используя соотношение неопределенности $\Gamma\tau \sim \hbar$.

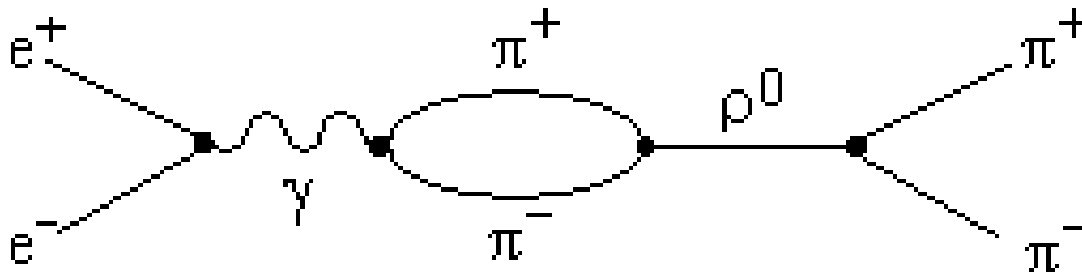
Частица	Масса, Mc^2 (МэВ)	Ширина Γ , МэВ	Спин- четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
$\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$	1230-1234 (~1232)	115-125	$3/2^+(3/2)$	(n или p) + π
N^+, N^0, N^-	1430-1470 (~1440)	250-450	$1/2^+(1/2)$	$n(p)+\pi(2\pi), \Delta\pi$

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

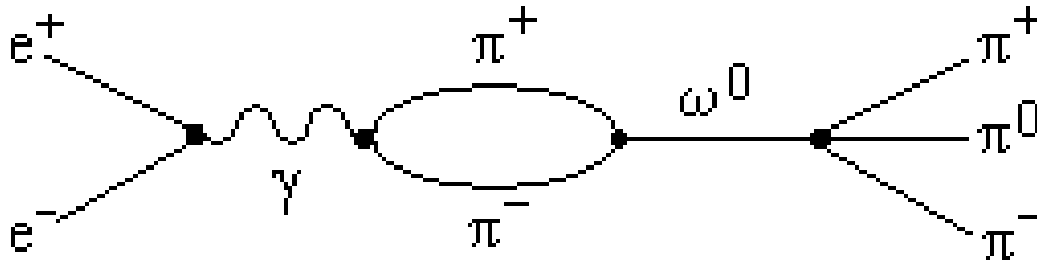
**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.
 *** Existence is very likely but further confirmation of quantum numbers and branching fractions is required.
 ** Evidence of existence is only fair.
 * Evidence of existence is poor.



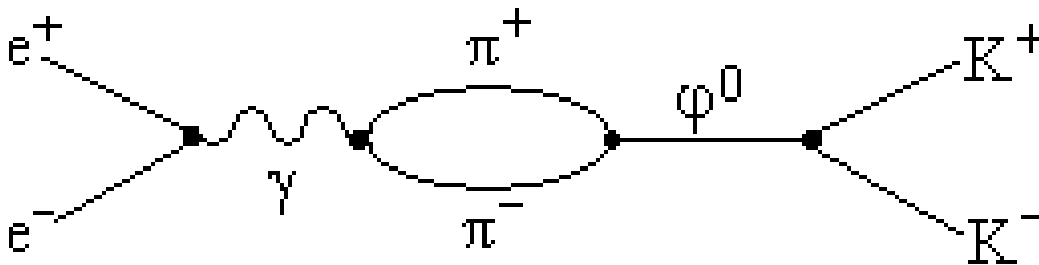
ρ^0 , ω^0 , ϕ^0 мезонные резонансы обладают квантовыми числами фотона ($J^P = 1^-$), поэтому их можно интерпретировать как



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



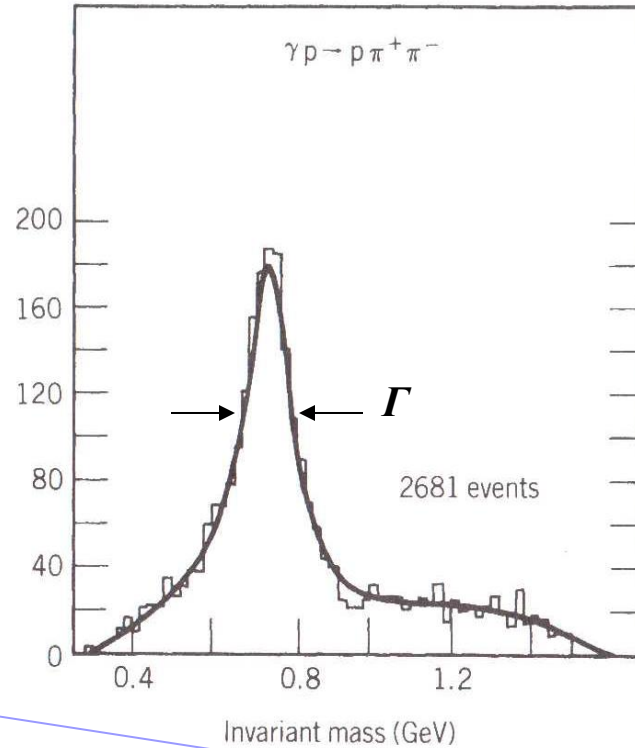
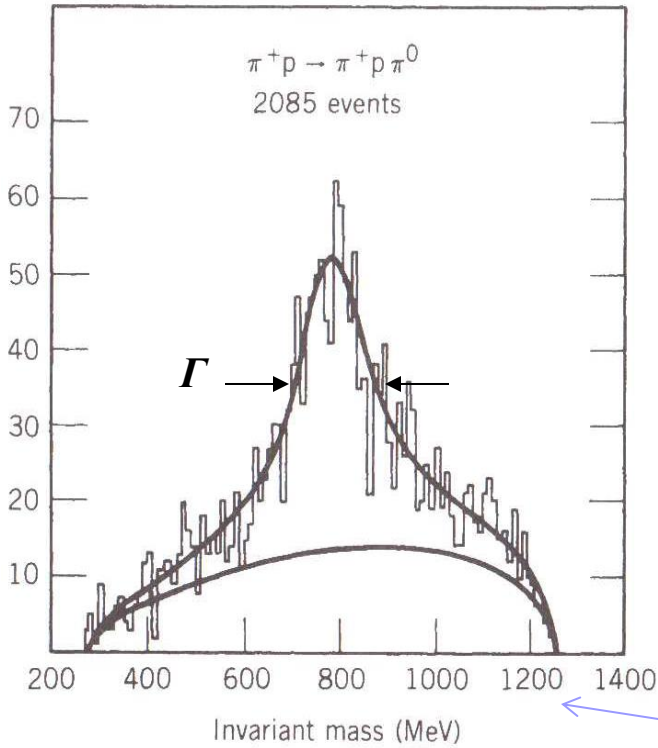
Масса ω^0 -мезона 782 МэВ.
Ширина распада $\Gamma = 8.4$ МэВ.



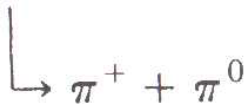
Масса ϕ^0 -мезона 1020 МэВ.
Ширина распада $\Gamma = 4.4$ МэВ.

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

Резонансный всплеск на фоне плавного распределения по фазовому объему свидетельствует о рождении пары π -мезонов через промежуточное состояние



Используя соотношение неопределенностей $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$, можно определить время жизни зарегистрированных частиц. $\Delta E = \Gamma = \hbar/\tau$ есть полуширина резонансной кривой, отсюда $\tau = \hbar/\Gamma$.

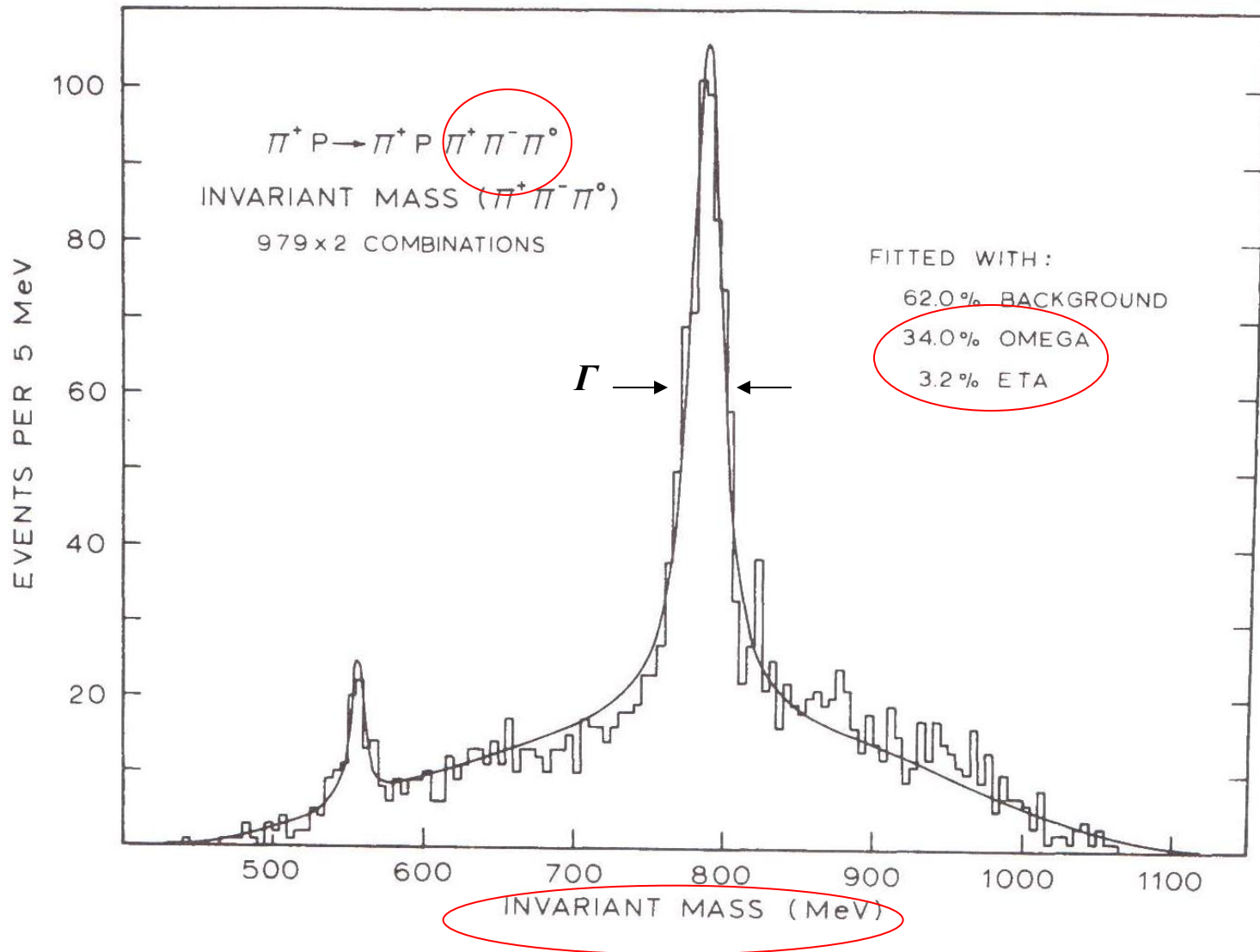


$$\left[(E_{\pi^+} + E_{\pi^0})^2 - c^2 |\mathbf{p}_{\pi^+} + \mathbf{p}_{\pi^0}|^2 \right]^{1/2} = m_{\rho} c^2$$

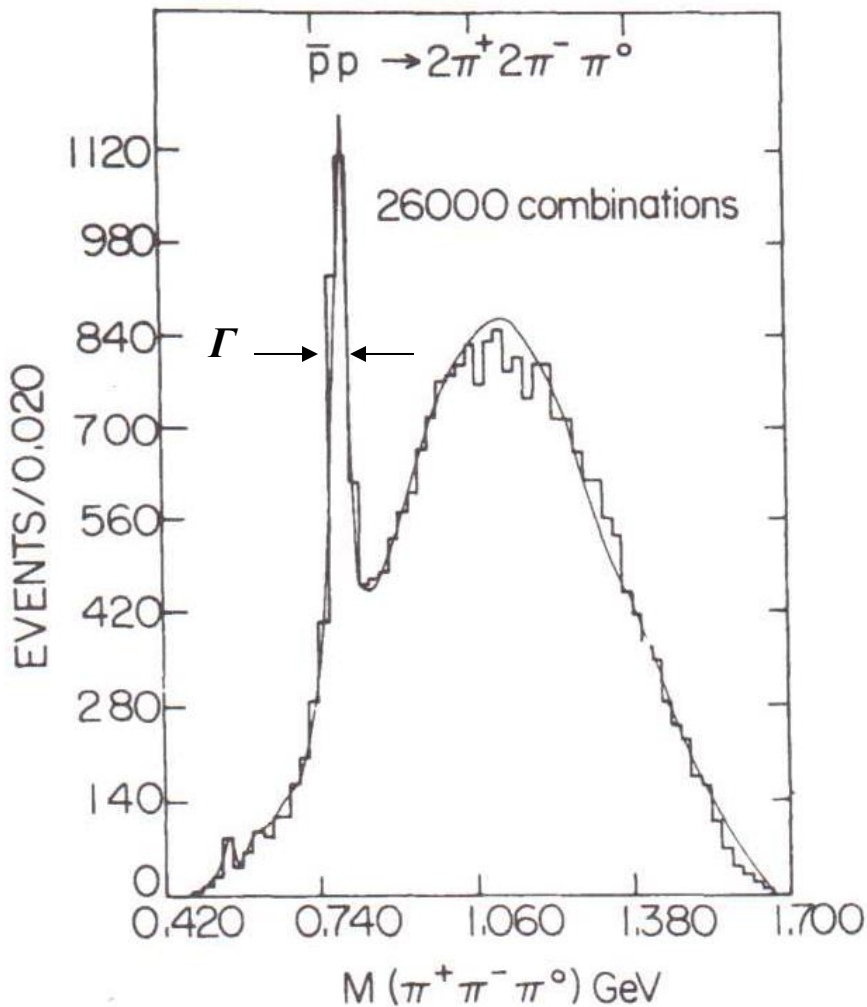
$$E_{\rho} = E_{\pi^+} + E_{\pi^0}$$

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

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



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



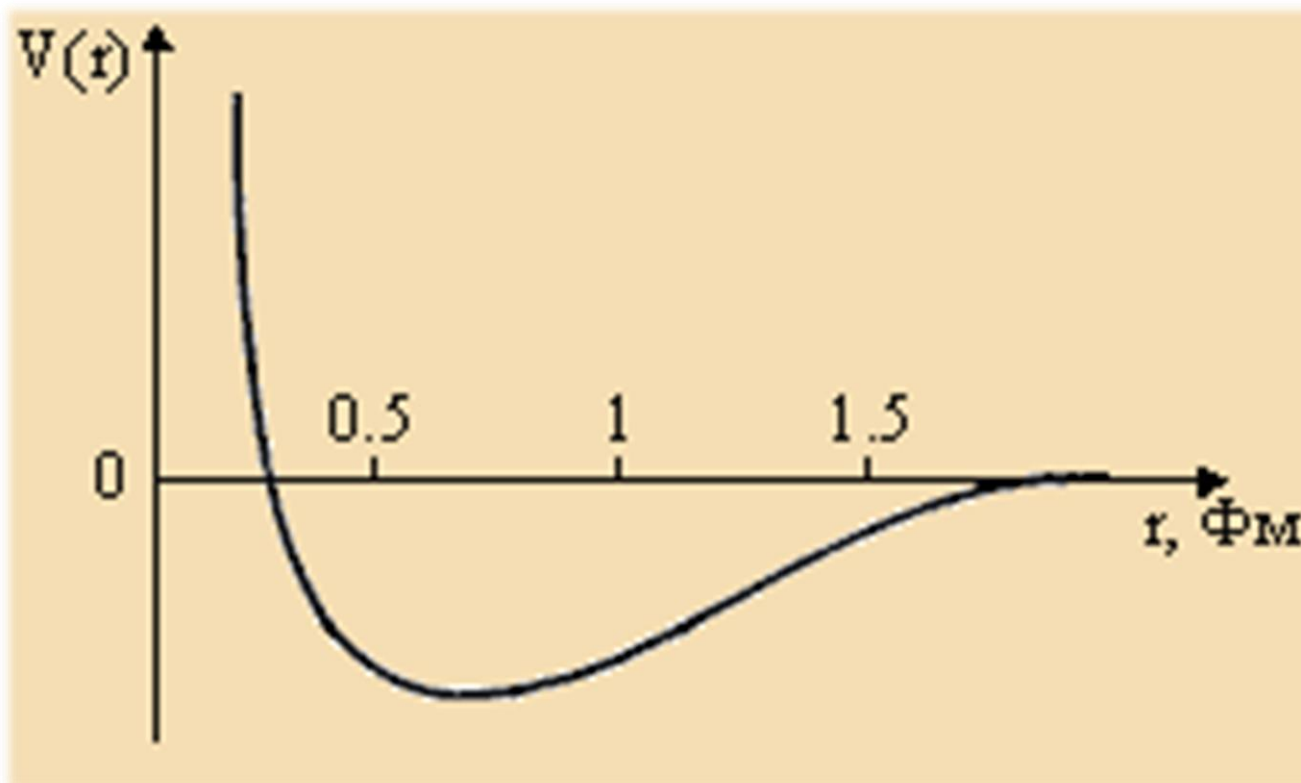
$\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$	(90%)
$\rightarrow \pi^0 + \gamma$	(9%)
$\rightarrow \pi^+ + \pi^-$	(1%)
$\rightarrow e^+ + e^-$	$(6.7 \times 10^{-3}\%)$

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

Тяжелые мезоны могут быть ответственны за взаимодействие между нуклонами на малых расстояниях:

η (549 МэВ) – на расстояниях $a \sim 0.36$ Фм

ρ (770 МэВ) и ω (782 МэВ) на расстояниях $a \sim 0.25$ Фм



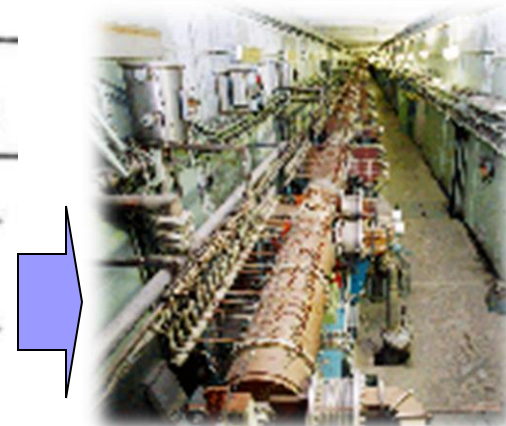
7. Мезонные фабрики

International Symposium
Lepton and Hadron Physics at Meson-Factories
 Messina (Italy) - October 13-15, 2013

МЕЗОННАЯ ФАБРИКА

- ускоритель, предназначенный для получения пучков π -мезонов и μ онов (π^\pm, π^0, μ^\pm) высокой интенсивности в широком диапазоне энергий. Поскольку сечения рождения частиц малы (~ 1 мб), то для получения необходимых плотностей потоков требуются протонные пучки со ср. значениями токов до 1 мА.

Тип ускорителя	Месторасположение	Энергия, МэВ	Средний ток, мА	Вид частиц
Линейный ускоритель LAME	Лос-Аламос, США	800	до 1	p, H^-
Линейный ускоритель ММФ АН СССР	Москва, СССР	600	до 1	p, H^-
Изохронный циклотрон SIN	Цюрих, Швейцария	600	0,14	p
Изохронный циклотрон TRIUMF	Ванкувер, Канада	500	0,07	p, H^-

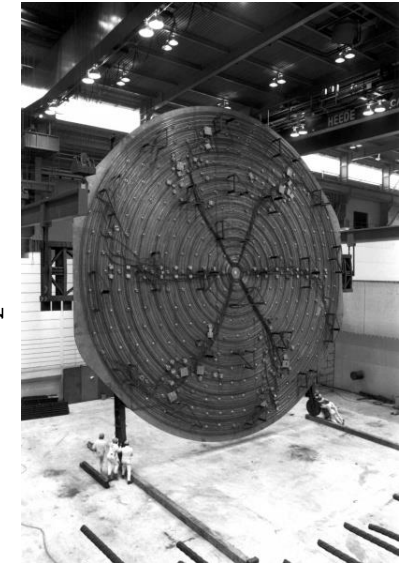
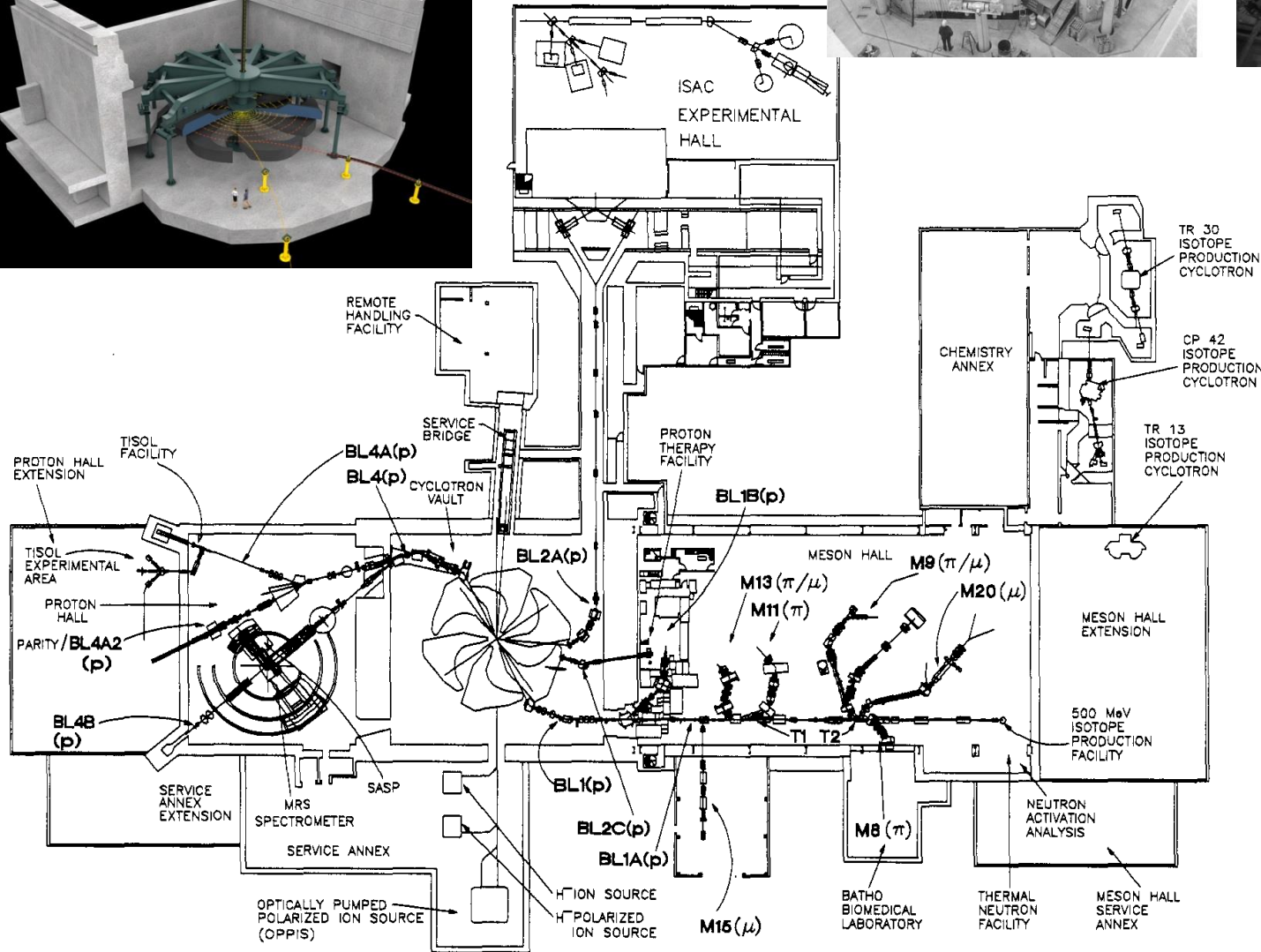
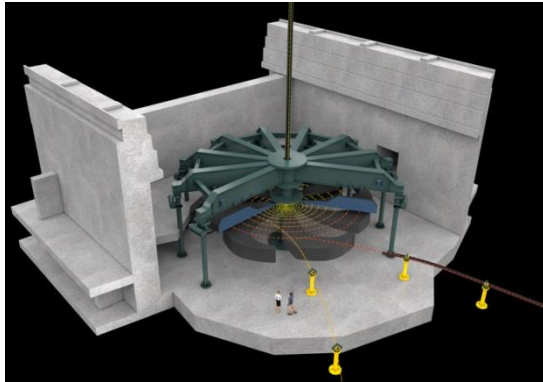
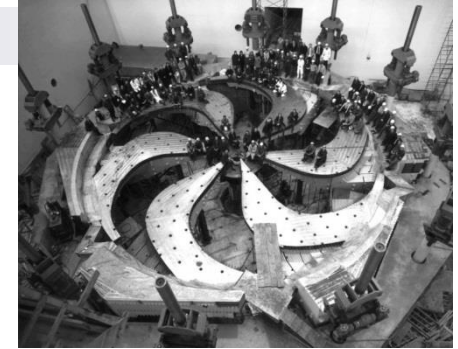
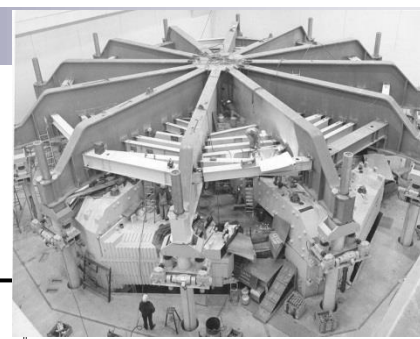


ИЯИ РАН, г. Троицк

В самой сильноточной из действующих Лос-Аламос-ской М. ф. генерируются потоки пионов низких (0 - 300 МэВ) энергий с интенсивностями $3 \cdot 10^9 \pi^+ / c$ или $8 \cdot 10^8 \pi^- / c$ и потоки пионов высоких (100-600 МэВ) энергий — $10^{10} \pi^+ / c$ или $10^9 \pi^- / c$. В изохронном циклотроне TRIUMF ускоряются ионы H^- , к-рые перезаряжаются на выходной мишени в протоны.



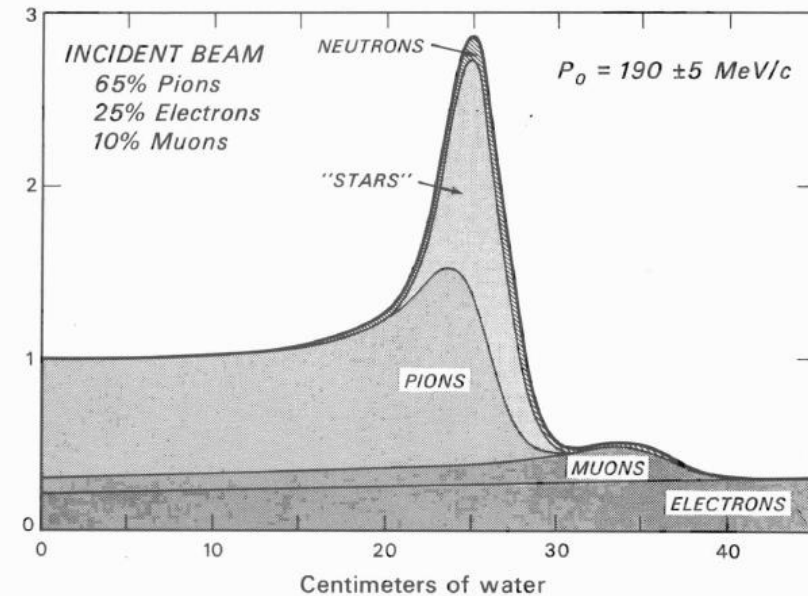
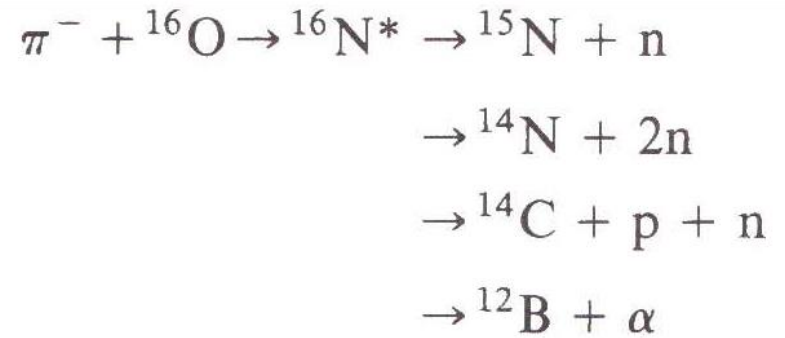
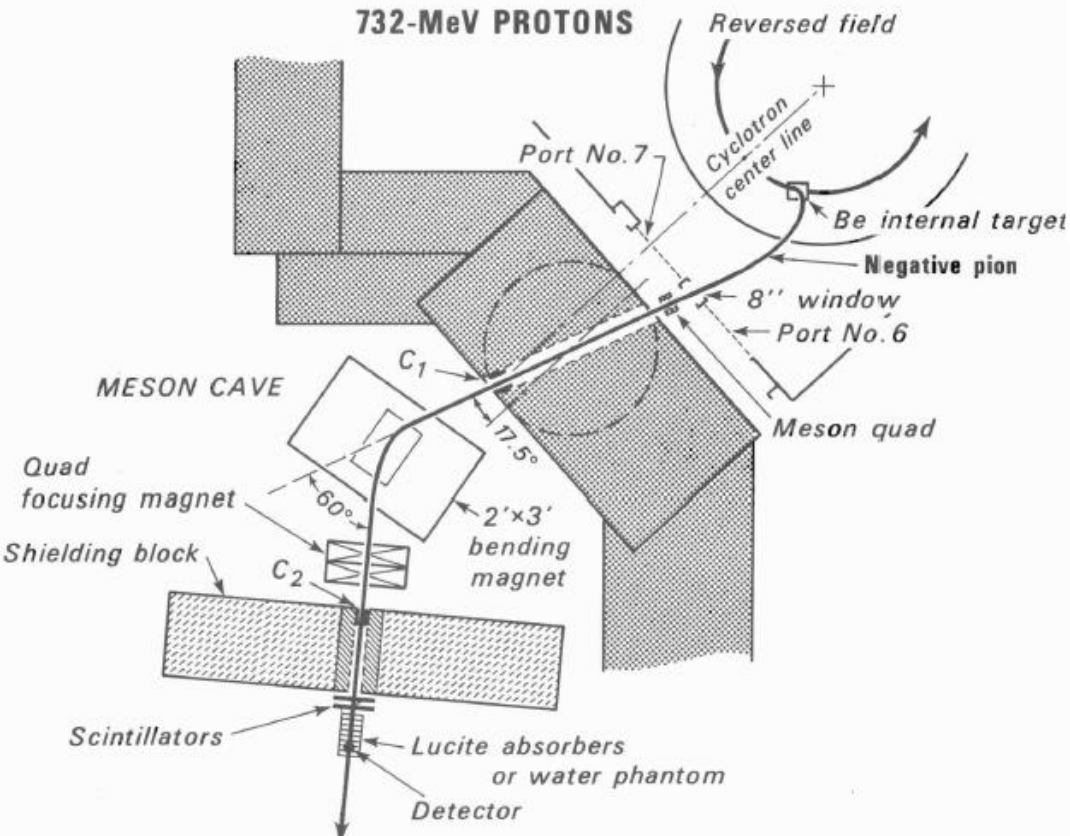
TRIUMF



H⁻ (1 proton, 2 e⁻)
 180 to 500 MeV
 50 to 75 kW
 up to 100 μ A

NEGATIVE PION BEAMS FOR RADIOTHERAPY

Los Alamos Scientific Laboratory
Los Alamos, New Mexico



at the Los Alamos Meson Production Facility (LAMPF) the first patient was treated at LAMPF in 1974, and patient treatments were discontinued in 1981. Over this period, 228 patients were irradiated with pions as part or all of their treatments.

Вместо заключения:

In awarding this year's Nobel Prize in Physics to Professor C.F. Powell of Bristol, the Swedish Academy of Sciences cited his development of the photographic method for the study of nuclear processes and his discoveries concerning the mesons.

....

The introduction of the new electron-sensitive emulsions makes it probable that we may expect further important discoveries

*Award Ceremony Speech
from the Nobel Committee,
The Nobel Prize in Physics 1950
Cecil Powell*

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава XVIII.
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>