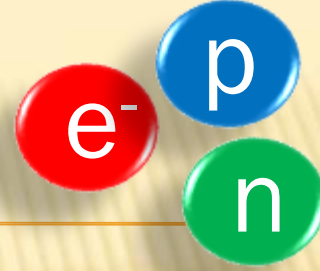




ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ И ИНТЕРАКЦИЈЕ

КЛАСИЧНО ДОБА



- ✘ Thompson 1896.- откриће електрона
- ✘ Rutherford 1899. – атомско језгро
- ✘ Bohr 1913. – модел атома водоника
- ✘ Chadwick 1932.-откриће неутрона

ФОТОН

× Planck 1900. појам кванта $E=h\nu$

$$h=6.626 \cdot 10^{-27} \text{ erg s}^{-1}$$

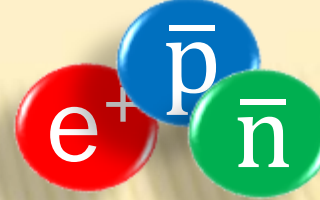
× Einstein 1905

– објашњење фотоелектричног ефекта

$$\frac{mv_e^2}{2} = h\nu - A_i$$

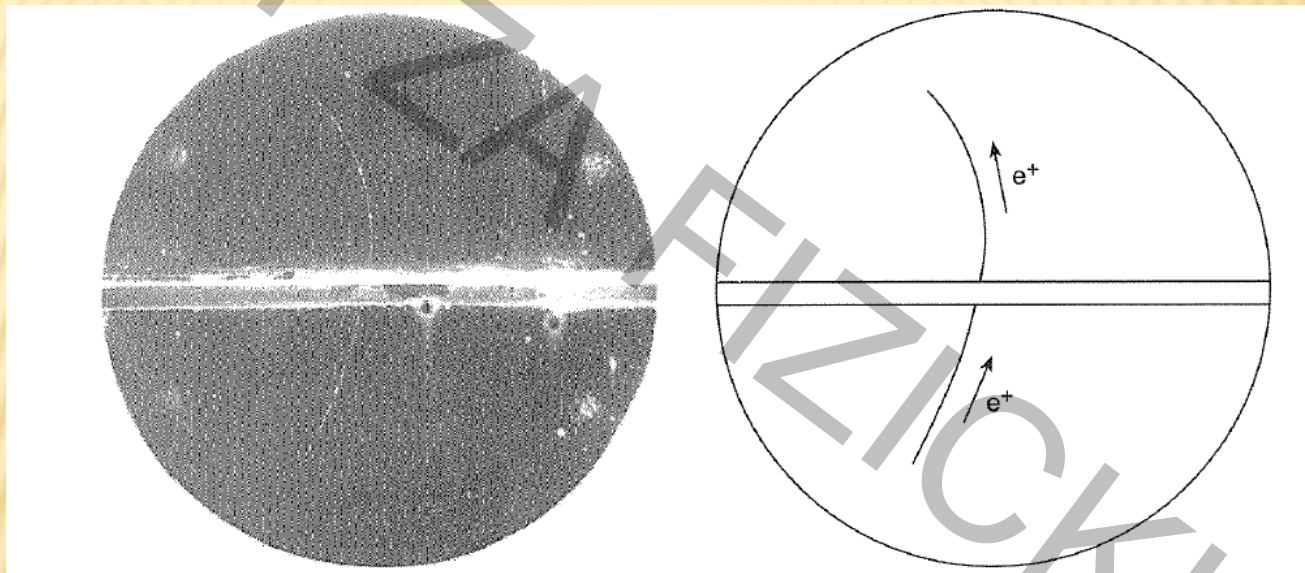
-електромагнетно зрачење у својој природи
квантовано

АНТИЧЕСТИЦЕ



- ✘ Dirac-ова (1927) једначина предвиђа и стања електрона са негативном енергијом
- ✘ $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$
- ✘ $E = \pm \sqrt{m^2 c^2 + p^2 c^2}$
- ✘ Dirac-ова претпоставка сва стања са негативном енергијом заузета?
- ✘ Незаузето стање негативне енергије се понаша као електрон са позитивним наелектрисањем (?протон?).

- ✘ Anderson (1931) откриће pozitrona
- ✘ Feynman Stuckelberg 1940 – негативно решење Dirac-ove једначине се може изразити као стање нове честице -позитрона



- ✘ Уопштено из Dirac-ove једначине следи
- ✘ **СВАКА ЧЕСТИЦА ИМА ОДГОВАРАЈУЋУ АНТИЧЕСТИЦУ ИСТЕ МАСЕ АЛИ РАЗЛИЧИТОГ НАЕЛЕКТРИСАЊА**

✗ 1955 антипротон \bar{p} (Berkeley Bevatron)

✗ 1956 антинеутрон \bar{n} (Berkeley Bevatron)

+ Како неутрон има античестицу?

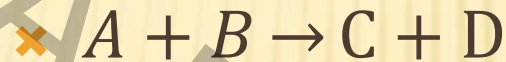
✗ Нови квантни број- барионски број

✗ Унутрашња структура

▪ $\bar{\gamma} \equiv \gamma$

СИМЕТРИЈА ПРЕЛАЗА

- ✗ За дејства и реакције у којима учествују честице и античестице важи симетрија прелаза и представљају манифестације у суштини истог физичког процеса

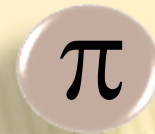


- ✗ Али само ако су испуњени енергетски захтеви и без претеривања:



Комптонов ефекат

Анихилација



МЕЗОНИ

- ✘ Yukawa 1934. мезон као медијатор јаке силе која држи нуклеоне на окупу
- ✘ Маса мезона $\approx 300 \times m_e$ ($1/6 m_p$)
- ✘ Лептони – мала маса (електрон...)
- ✘ Мезони-средња маса (...)
- ✘ Бариони- велика маса (протон, неутрон...)
- ✘ 1937- ?потврда Yukawa мезона Anderson и Neddermeyer, Street и Stevenson

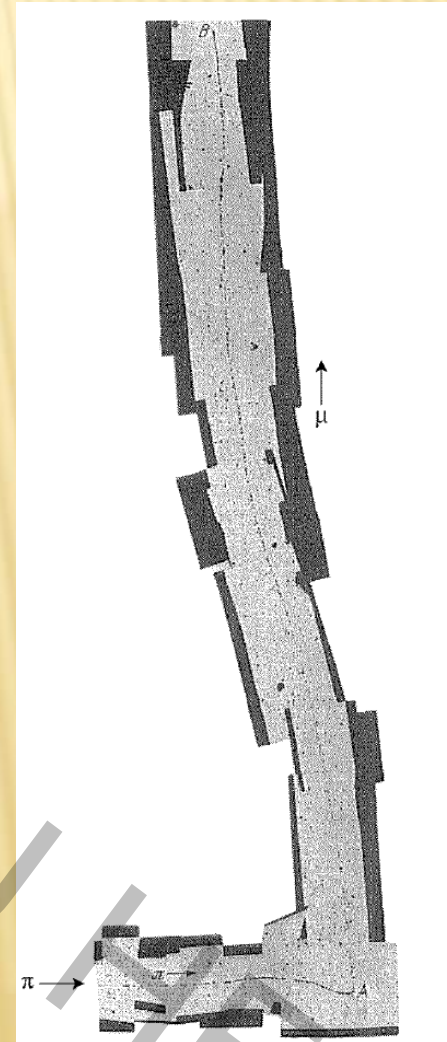
✘ 1947 Powell – два мезона π (пион)
и μ (мион)

✘ π

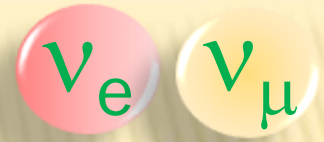
✘ π = Јукава мезон

✘ Мезони слабо интерагују са
језгром \rightarrow нису носиоци јаке силе у
језгру

✘ Пошто се понашају као тежи
рођаци електрона сврставају се у
лептоне



НЕУТРИНИ



✘ Енергија електрона

✘ требала би да буде

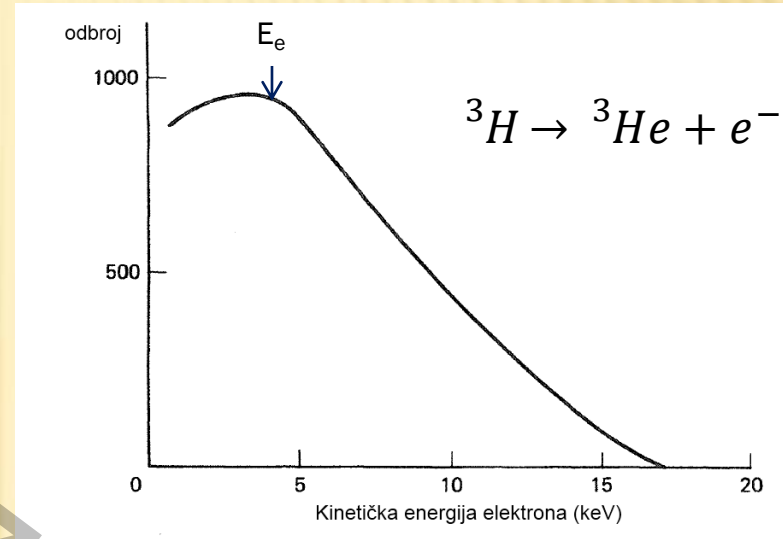
✘
$$E_e = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A} \right) c^2$$

✘ Wolfgang Pauli – претпоставка да неутрална честица јако мале масе односи остатак енергије

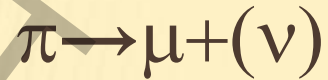
✘ 1933 Enrico Fermi – теорија β распада



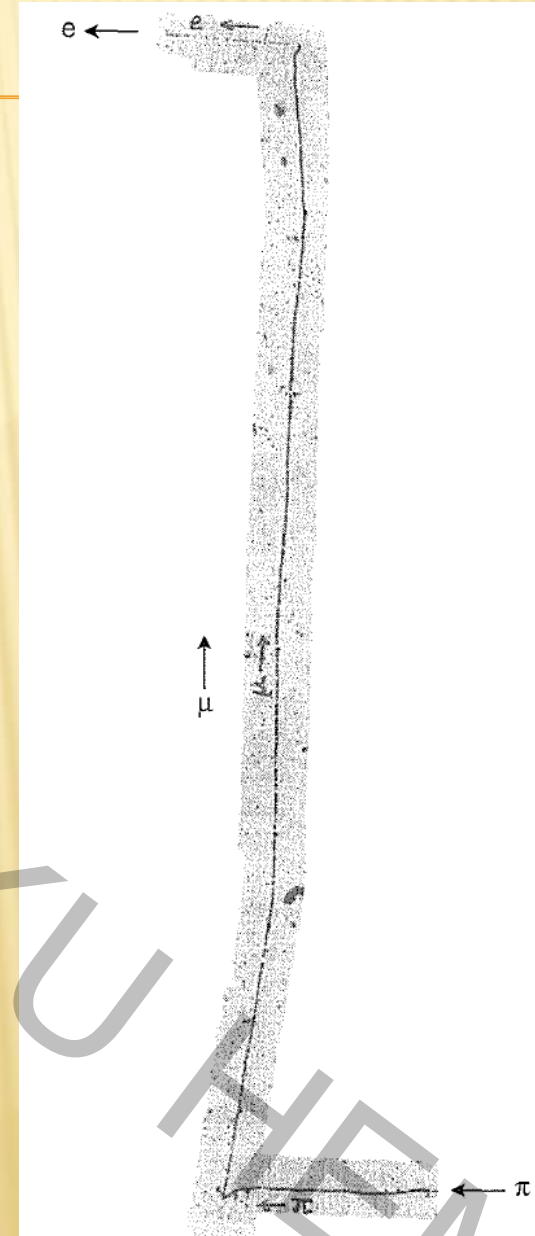
✘ ν – неутрино (италијански - деминутив од неутрон)



- ✗ Распад пиона (π) је такође праћен емисијом неутрина

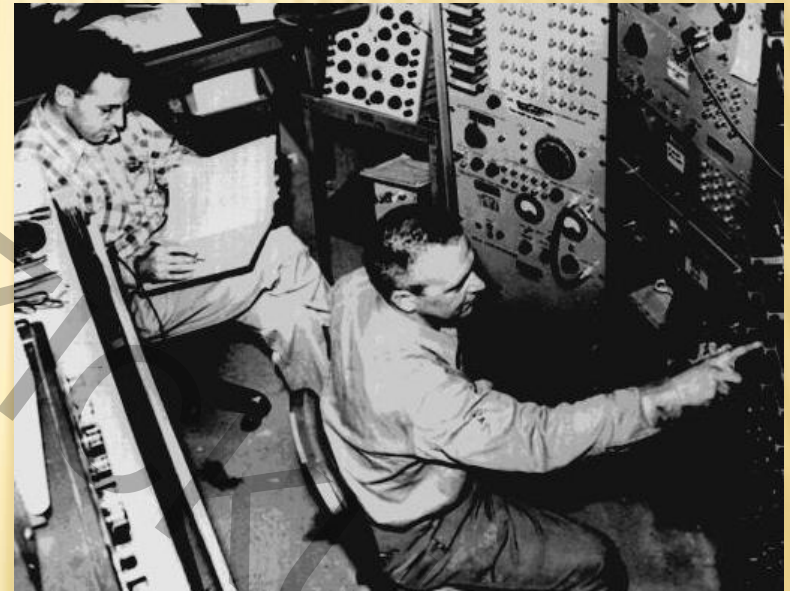


- ✗ Како знамо да се распад миона прати емисија два неутрина?
- ✗ Мерење енергије електрона:
 - + Ако енергија електрона варира онда у процесу настају три честице
 - + У распаду пиона потпуно је константна



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОТВРДА ПОСТОЈАЊА НЕУТРИНА

- ✘ Неутрино средње енергије може проћи кроз хиљаду светлосних година! олова! без икакве интеракције.
- ✘ Reines и Cowan 1955.
- ✘ Savannah River нуклеарни реактор (флукс неутрина $5 \cdot 10^{13}$)-потрага за инверзним β распадом:

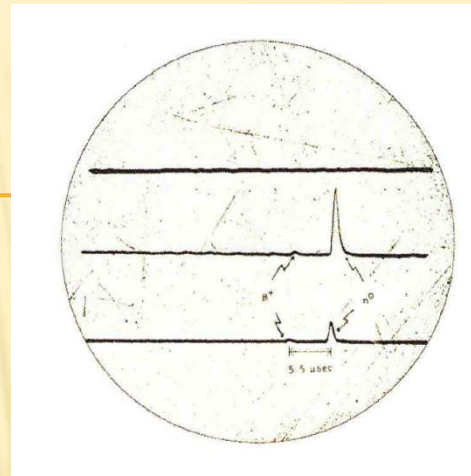




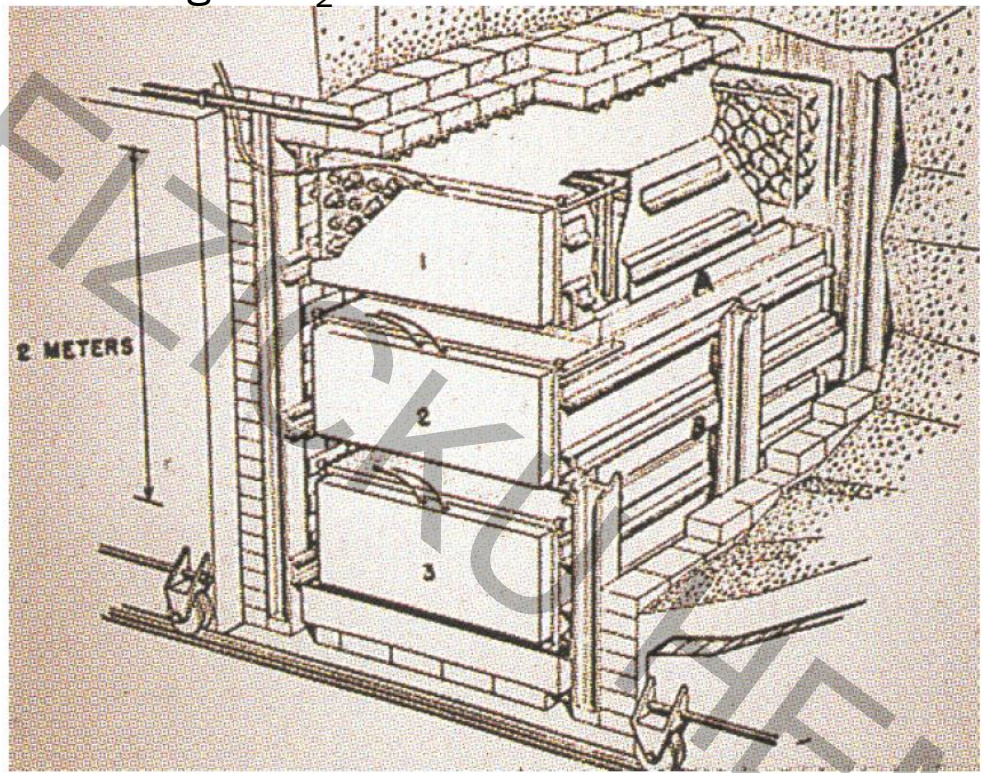
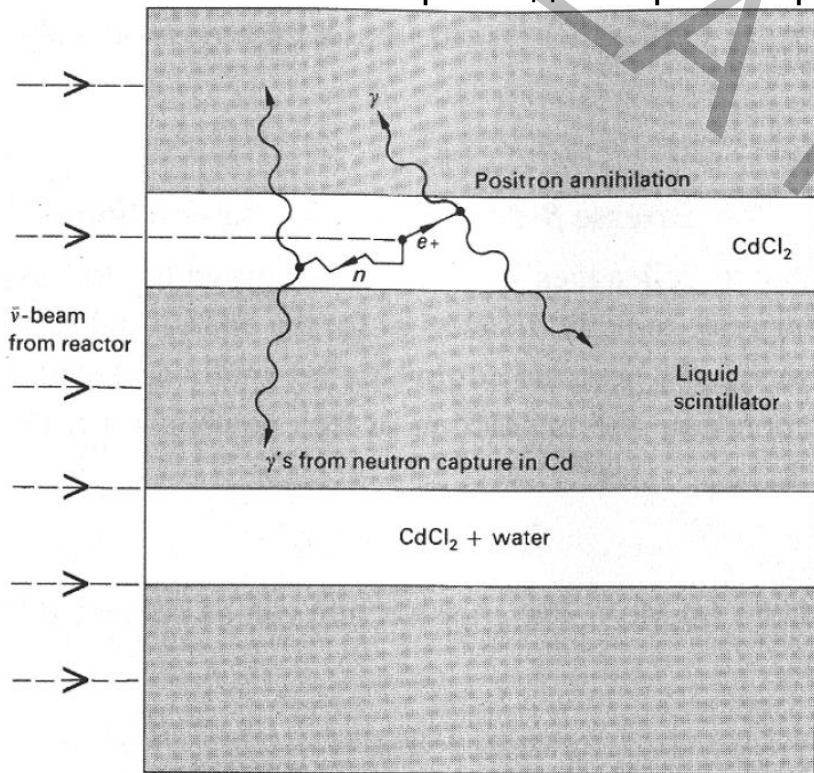
Нуклеарни
реактор

12 m

11 m

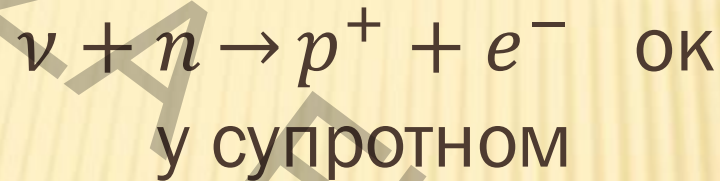


2x100 литара воде са растворених 40 kg CdCl_2



ν ИЛИ $\bar{\nu}$ У β^- РАСПАДУ

- ✗ Davis и Harmer 1959.
- ✗ Ако се у β^- -распаду емитује антинеутрино онда ће се одигравати и реакција



Закон одржања лептонског броја (Konopinski-Mahmud 1953) подржава овај налаз

Лептонски број=1 за електрон, мион и неутрино
-1 је за њихове античестице

- ✗ Антинеутрино и неутрино се разликују по хелицитету

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

- ✘ Зашто не постоји реакција?

$$\cancel{\mu^- \rightarrow e^- + \gamma}$$

- ✘ Закон одржања електронског и мионског броја.
- ✘ Решење – два типа неутрина, један придружен електрону, а други миону
- ✘ ν_e , ν_μ и одговарајући антинеутрини

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

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

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

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

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

- ✘ Постојање две врсте неутрина је потврђено 1962. тестирањем реакција (antineutrini из распада пиона

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

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

- ✘ Да ли неутрини имају масу?
 - + Имају али малу $< 2 \text{ eV}$
- ✘ Неутринске осцилације-конверзија неутрина једних у друге при већим пређеним растојањима

Фамилија лептона (1962-1976)

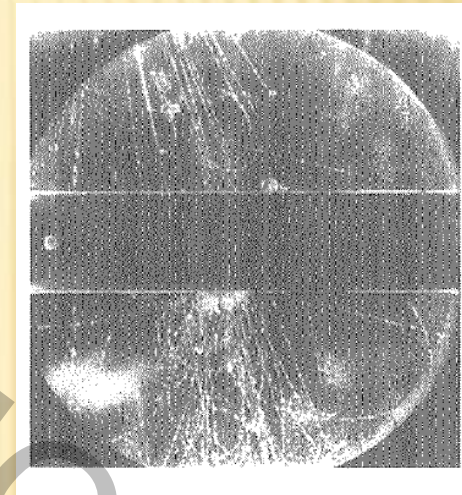
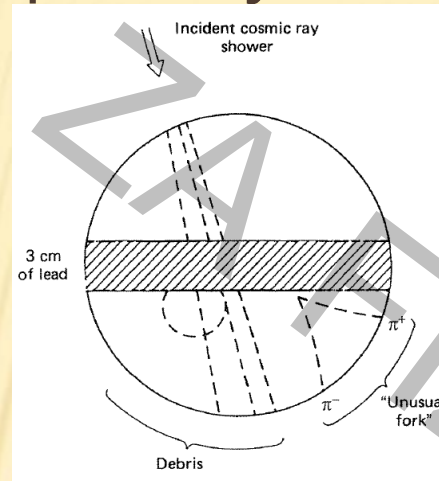
Table 1.1 The lepton family, 1962–1976

	Lepton number	Electron number	Muon number
Leptons			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
Antileptons			
e^+	-1	-1	0
$\bar{\nu}_e$	-1	-1	0
μ^+	-1	0	-1
$\bar{\nu}_\mu$	-1	0	-1

“СТРАНЕ” ЧЕСТИЦЕ

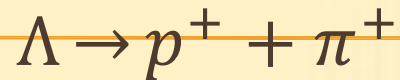


- ✘ 1947. Rochester&Butler откриће каона (K) у космичког зрачењу



- ✘ $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ каони се понашају слично као пиони и припадају фамилији мезона
- ✘ $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ 1949.

- ✘ 1950. „тешки“ протон (сврстан у барионе)



- ✘ Сврстан у барионе на основу закона очувања барионског броја (Stuckelberg 1953.)
- ✘ Бариони и лептони се покуравају очувању барионских и лептонских бројева, али мезони не.
- ✘ У наредним годинама пронађен је велики број бариона: Σ , Δ , Ξ ...
- ✘ Неке особине „страних“ честица
 - + Обилно се производе у паровима (10^{-28}s)
 - + Њихов распад знатно спорији (10^{-10}s)
 - + Производ су деловања јаке (нуклеарне) силе, а распадају се под дејством слабе силе
 - + За њих је уведен закон одржања броја „страности“ који важи само када ове честице настају.

$$\begin{aligned}\pi^- + p^+ &\rightarrow K^+ + \Sigma^- \\ &\rightarrow K^0 + \Sigma^0 \\ &\rightarrow K^0 + \Lambda\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\pi^- + p^+ &\not\rightarrow \pi^+ + \Sigma^- \\ &\not\rightarrow \pi^0 + \Lambda \\ &\not\rightarrow K^0 + n\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Lambda &\rightarrow p^+ + \pi^- \\ \Sigma^+ &\rightarrow p^+ + \pi^0 \\ &\rightarrow n + \pi^+\end{aligned}$$

1952 први модерни акцелератор честица у Brookhaven-у омогућио је добијање великог броја нових „страних“ честица.

✘ Willis Lamb 1955 говор поводом доделе Нобелове награде

When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called “elementary particles”: the electron and the proton. A deluge of other “elementary” particles appeared after 1930; neutron, neutrino, μ meson (sic), π meson, heavier mesons, and various hyperons. I have heard it said that “the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine”.

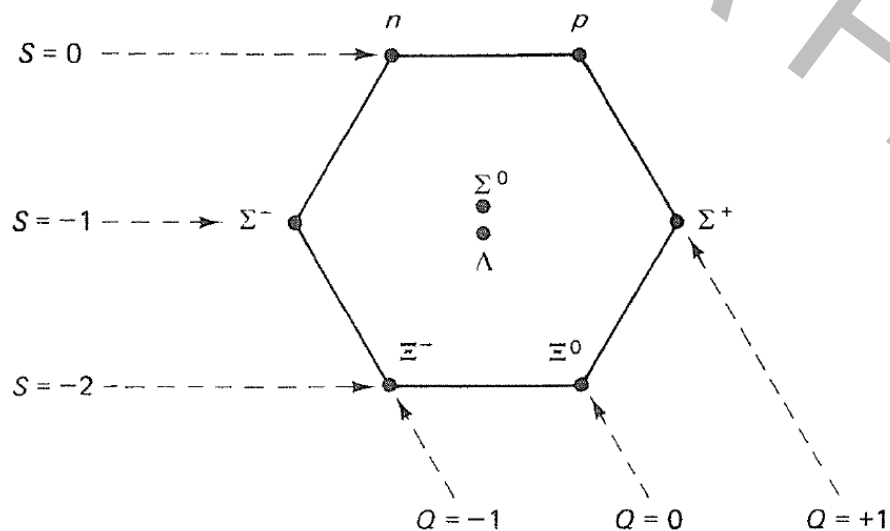
E.Fermi обраћајући се свом студенту

L. Lederman-у каже:

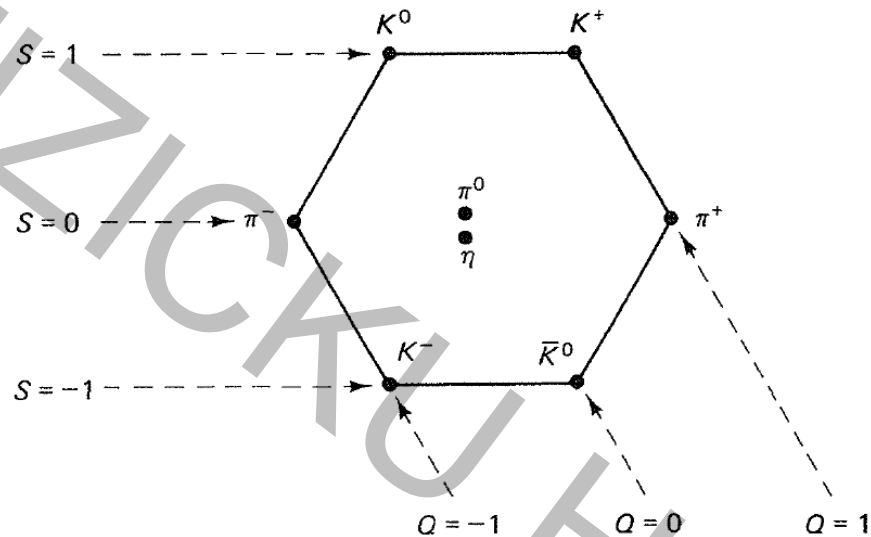
**"Young man, if I could remember
the names of these particles,
I would have been a botanist!"**

EIGHTFOLD WAY ИЛИ ПЕРИОДНИ СИСТЕМ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧЕСТИЦА

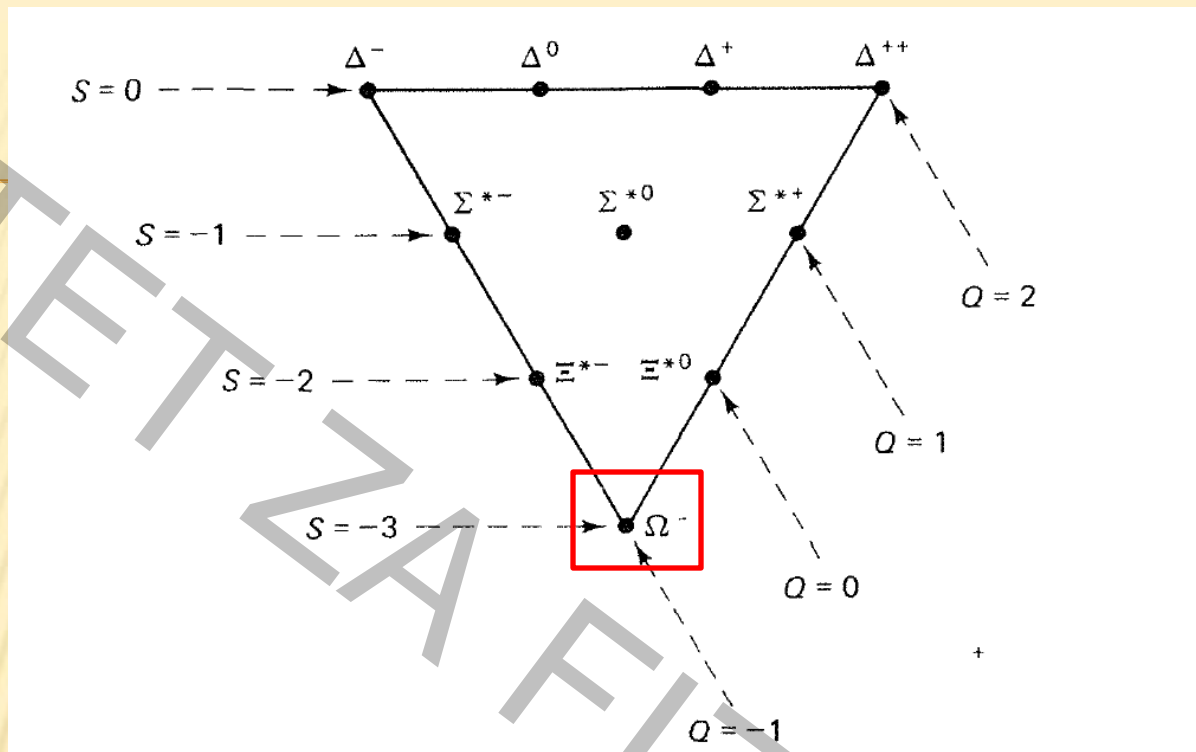
- ✘ Gell-Mann 1961. – eightfold way- систем распоређивања бариона и мезона (заједничко име хадрони) у геометријске матрице.



Барионски октет
("лаки бариони")



Мезонски октет



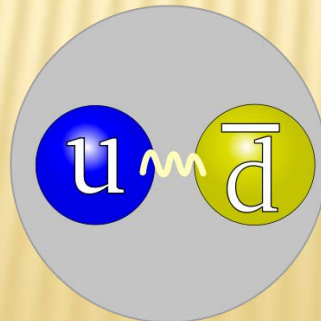
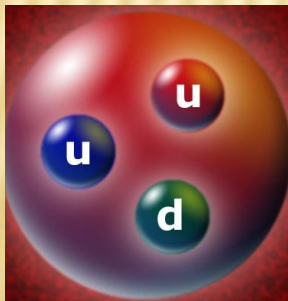
Барионски декуплет

- Gell-Mann је предвидео својства Ω^- честице као и начин на који се може поризвести
- Постоје посебни декуплети за барионе и антибарионе, док су мезони смештени у један декуплет.

КВАРКОВИ (КВАРК МОДЕЛ)

- ✗ Gell-Mann и Zweig 1964:
- ✗ Сви хадрони су састављени од кваркова:

- + Бариони од три
- + Мезони од два (кварк и антикварк)



James Joyce "Finnegans Wake"

Three quarks for Muster Mark!

Sure he hasn't got much of a bark

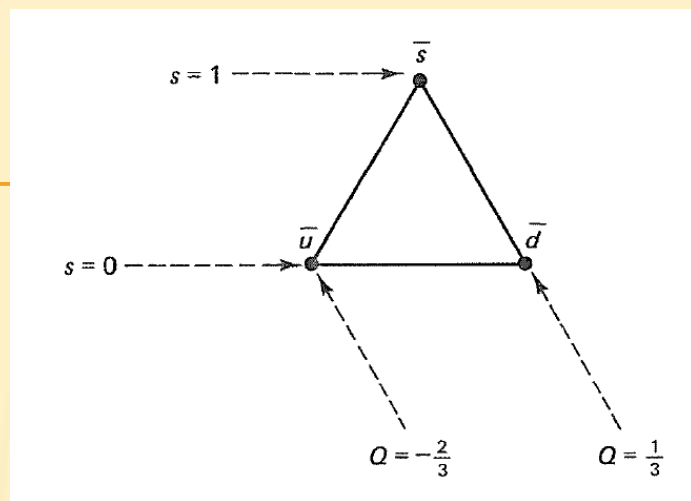
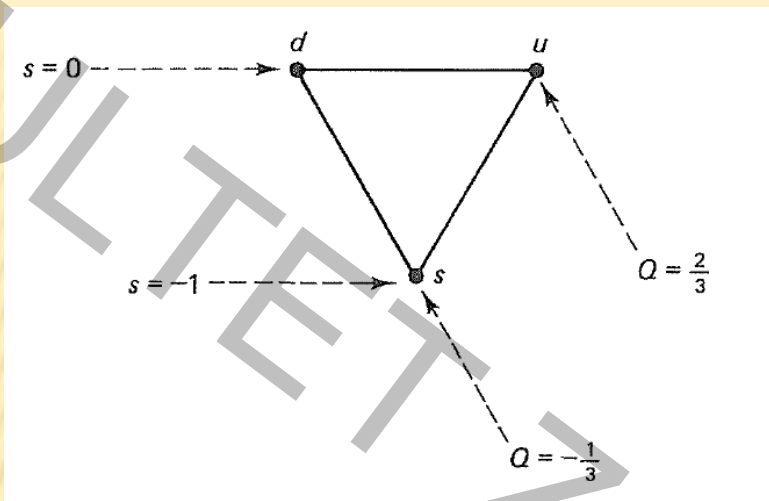
And sure any he has it's all beside the mark.

But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark

To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark

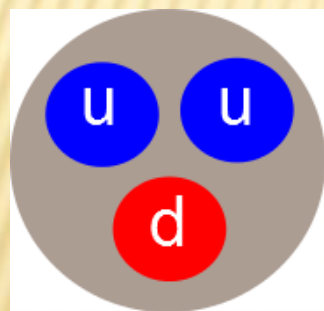
And he hunting round for uns speckled trousers around by

Palmerstown Park?

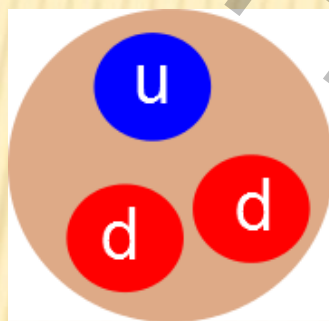


✘

Кваркови



протон



неутрон

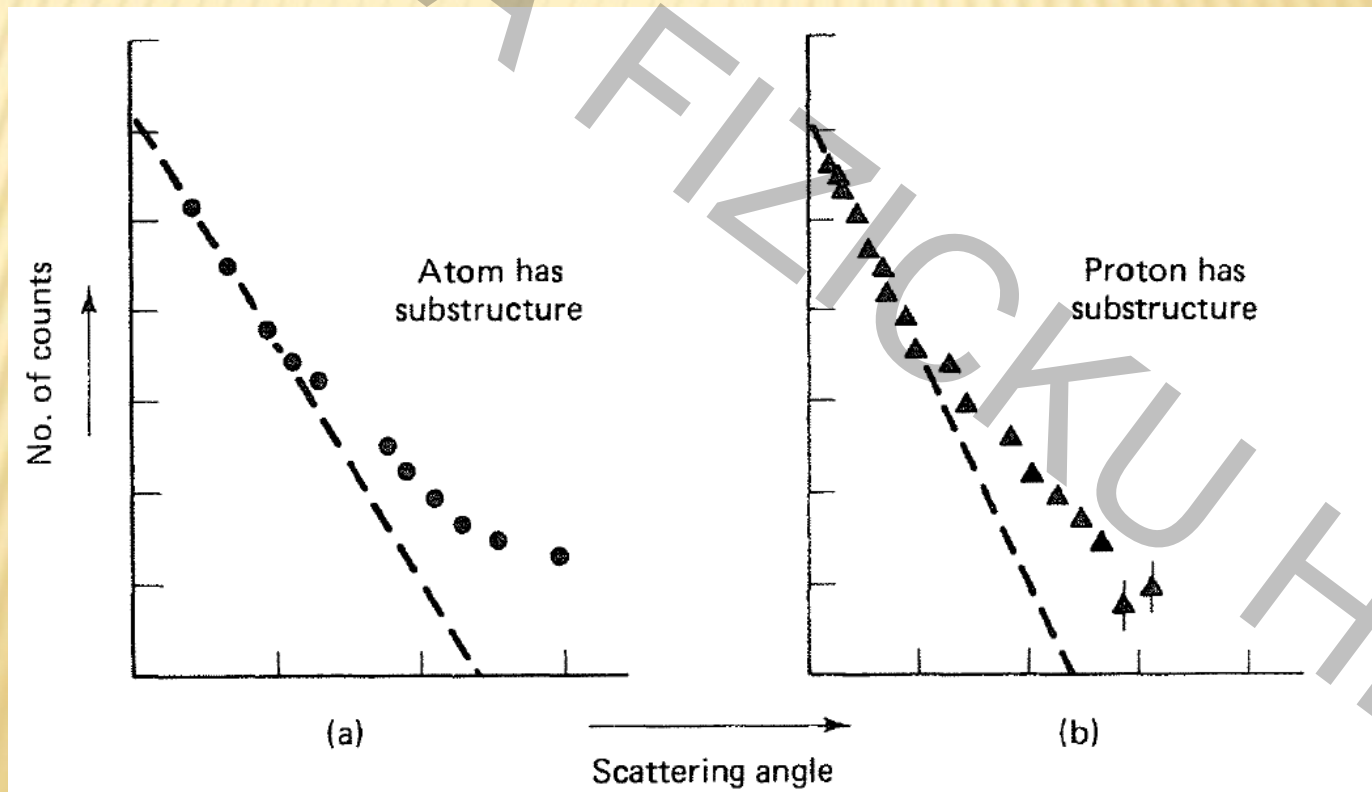
Антикваркови

qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^+
udd	0	0	Δ^0
ddd	-1	0	Δ^-
uus	1	-1	Σ^{*+}
uds	0	-1	Σ^{*0}
dds	-1	-1	Σ^{*-}
uss	0	-2	Ξ^{*0}
dss	-1	-2	Ξ^{*-}
sss	-1	-3	Ω^-

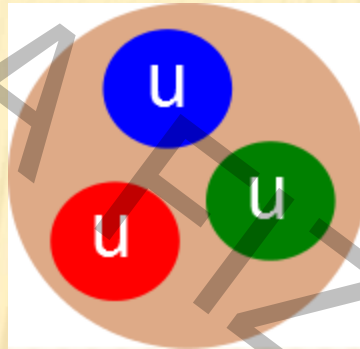
$q\bar{q}$	Q	S	Meson
$u\bar{u}$	0	0	π^0
$u\bar{d}$	1	0	π^+
$d\bar{u}$	-1	0	π^-
$d\bar{d}$	0	0	η
$u\bar{s}$	1	1	K^+
$d\bar{s}$	0	1	K^0
$s\bar{u}$	-1	-1	K^-
$s\bar{d}$	0	-1	\bar{K}^0
$s\bar{s}$	0	0	?? η'

- ✘ Али како $\Delta^+ = uud$ и $p^+ = uud$?
- ✘ Исте комбинације са различитим везивањем јако се разликују по енергетским стањима те их можемо сматрати различитим честицама.

- ✘ До сада није детектован слободни кварк
- ✘ Кваркови ограничени на постојање унутар хадрона
- ✘ 1960 SLAC- протон има структуру – партони (експерименти слични Ратерфордовим)



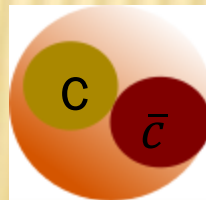
- ✘ Али кварк модел се противи Паулијевом принципу!
- ✘ Решење-кваркови имају „боју“ – плаву, зелену и црвену и



- ✘ Све природне честице су безбојне
- ✘ Увођење боје решава и проблем зашто не постоје комбинације од два или четири кварка – јер су „обојене“.

НОВЕМБАРСКА РЕВОЛУЦИЈА

- ✘ Откриће Ψ мезона (Ting 1974. Brookhaven) који је три пута тежи од протона и има неоубичајено дуго време живота (10^{-20} s у поређењу са 10^{-23} s за остале барионе-изузимајући протон и неутрон.
- ✘ Дуго време живота указивало је на посебну структуру:
- ✘ Ψ се састоји од потпуно нове врсте кварка и његове честице – “шармантног” (*charm*) и “антишармантног”



Ψ

- ✘ Откриће Ψ је отклонило асиметрију (Glashow) између броја лептона и кваркова ($4:3 \rightarrow 4:4$).
- ✘ Пошто Ψ не поседује укупни шарм, постојање шарм кварка је доказано проналаском честица које га садрже (*naked charm*)- Λ_c^+ (udc) и Σ_c^{++} (uuc) .
- ✘ Симетрија је опет нарушена ($5:4$)- пронађен τ лептон (припадајући му неутрино ν_τ тек 2000-те)
- ✘ Честице које садрже нови кварк пронађена је 1980 (*bottom (beauty)*, $\Lambda_b^0 = udb$)
- ✘ Још увек није пронађена честица која садржи *up* кварк ($m_{up} = 174 \text{ GeV}/c^2$) , али постоје јаке индикације да она постоји (1995)

ИНТЕРМЕДИЈЕРНИ ВЕКТОРСКИ БОЗОНИ (1983) МЕДИЈАТОРИ СЛАБЕ НУКЛЕАРНЕ СИЛЕ

- ✘ Пошто није познат домет слабе силе дуго су постојале само претпоставке о њиховој маси.
- ✘ Теорија унификације електромагнетне и слабе нуклеарне силе- електрослаба сила (Glashow, Weinberg, Salam 1969.) предвидела је постојање три интермедијерна векторска бозона (W^\pm и Z)
- ✘ Предвиђене масе: $m_W=82\pm 2 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z=92\pm 2 \text{ GeV}/c^2$
- ✘ Rubia (CERN 1983) потврда W^\pm и Z . Измерене масе:
- ✘ $m_W=80,4\pm 0,029 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z=91.19\pm 0,002 \text{ GeV}/c^2$

КВАНТНА ТЕОРИЈА (ЕЛМ, Г, Н) ПОЉА МЕДИЈАТОРИ

Глуон је медијатор (8 њих) јаке нуклеарне силе?
као и кваркови глуони поседују „боју“
Посредан доказ о глуонима- дубоко нееластично
расејање честица указује да око половине момента
протона отпада на неутралне честице

Честица/медијатор	Сила/поље	Маса (GeV/c ²)
фотон	електромагнетна	0
гравитон	гравитациона	0
глуон	нуклеарна јака	?
W [±] и Z ⁰ бозони	нуклеарна слаба	80,39; 91,19

МЕДИЈАТОРИ (2)

✱ мисија виртуелног медијатора од стране честице нарушава закон о одржању енергије за фотоне енергија ΔE за време Δt

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}$$

Домет дејства фотона

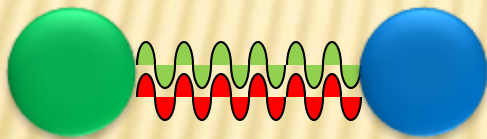
$$R = c\Delta t \approx \frac{\hbar c}{\Delta E}$$

Домет дејства медијатора масе m

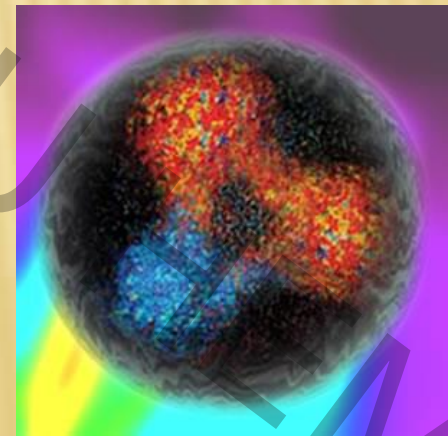
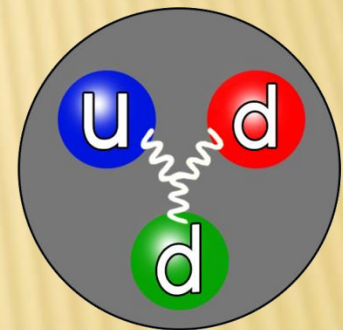
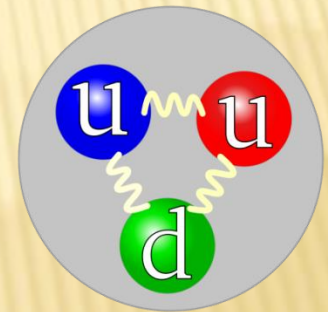
$$R = c\Delta t \approx \frac{\hbar}{mc}$$

ГЛУОНИ И КВАРКОВИ

- Глуони су медијатори јаке силе (боје) између кваркова.
- Садрже једну боју и једну антибоју и делују тако што мењају боју кварка
- Интеракције између нуклеона су само остаци интеракција међу кварковима
- Глуони могу да интерагују међусобно



Зелено-антиплави глуон преводи плаву честицу у зелену и обрнуто



СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

- ✘ 6 лептона подељених у три генерације и класификованих према наелектрисању, електронском, мионском и тау броју.

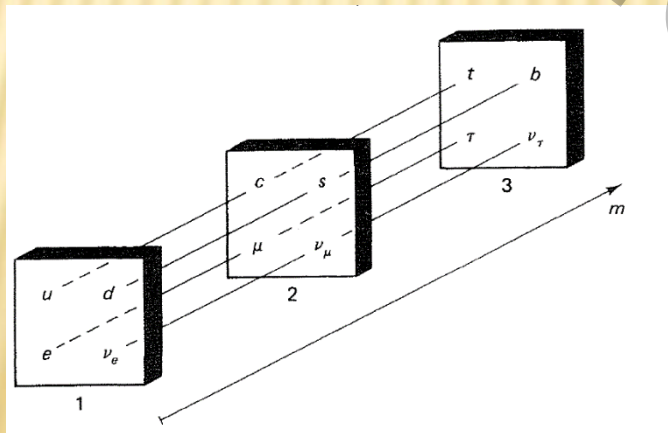
l	Q	L_e	L_μ	L_τ	
I генерација	e	-1	1	0	0
	ν_e	0	1	0	0
II генерација	μ	-1	0	1	0
	ν_μ	0	0	1	0
III генерација	τ	-1	0	0	1
	ν_τ	0	0	0	1

- ✘ Слична табела за антилептоне

- ✘ 6 кваркова сврстаних калсификованих према шарму, страности, горе, доле, дно, врх

	q	Q	D	U	S	C	B	T
I генерација	d	-1/3	-1	0	0	0	0	0
	u	2/3	0	1	0	0	0	0
II генерација	s	-1/3	0	0	-1	0	0	0
	c	2/3	0	0	0	1	0	0
III генерација	b	-1/3	0	0	0	0	-1	0
	t	2/3	0	0	0	0	0	1

- ✘ Слична табела за антикваркове



Масе кваркова и лептона

МАСЕ КВАРКОВА И ЛЕПТОНА

ЛЕПТОН		кварк	Маса (MeV/C ²)
e	$<2 \cdot 10^{-6}$	u	2
ν_e	$<0,2$	d	5
m	<18	s	100
ν_m	0,511	c	1200
t	106	b	4200
ν_t	1777	t	174000

Σ 12 лептона + 36 кваркова + 12 медијатора (без гравитона) + Higgs-ов бозон=61

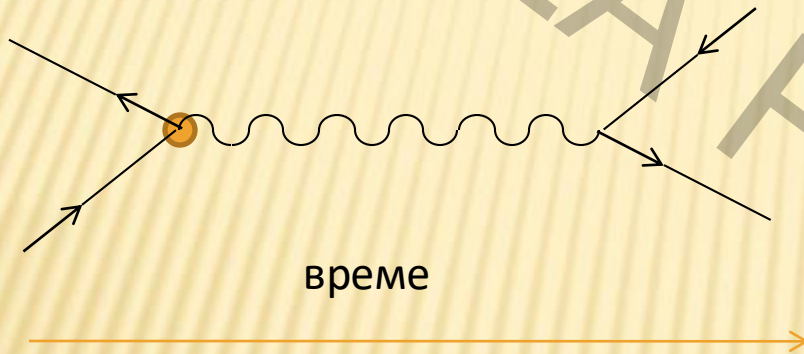
HIGGS-ОВ БОЗОН

- ✘ Зашто честице имају масу када симетрије које контролишу њихове интеракције захтевају да је немају?
- ✘ Зашто слаба сила има много мањи домет од електромагнетне?
- ✘ Higgs честица треба да је бозон без спина, наелектрисања или „боје“.
- ✘ Постулиран од стране групе научника (између осталог и Peter Higgs-a) 1964.
- ✘ Његово постојање откривено је 04. 07. 2012. (LHC), а потврђено 14. 03. 2013.

ФЕЈНМАНОВИ ДИЈАГРАМИ-ИНТЕРАКЦИЈЕ ИЗМЕЂУ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧЕСТИЦА

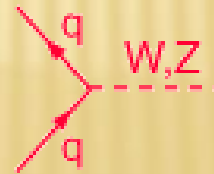
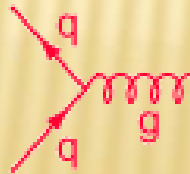
✗ —————> честица/античестица • вертекс (интеракција)

✗ ~~~~~ медијатор



Правила:

- Дијаграми се читају са лева на десно (временска оса)
- Стрелица на десно представља честицу, стрелица на десно античестицу.
- Колико честица улази у вертекс толико и излази



ПРИМЕРИ ИНТЕРАКЦИЈА ПРЕМА ФЕЈМАНОВИМ ДИЈАГРАМИМА

