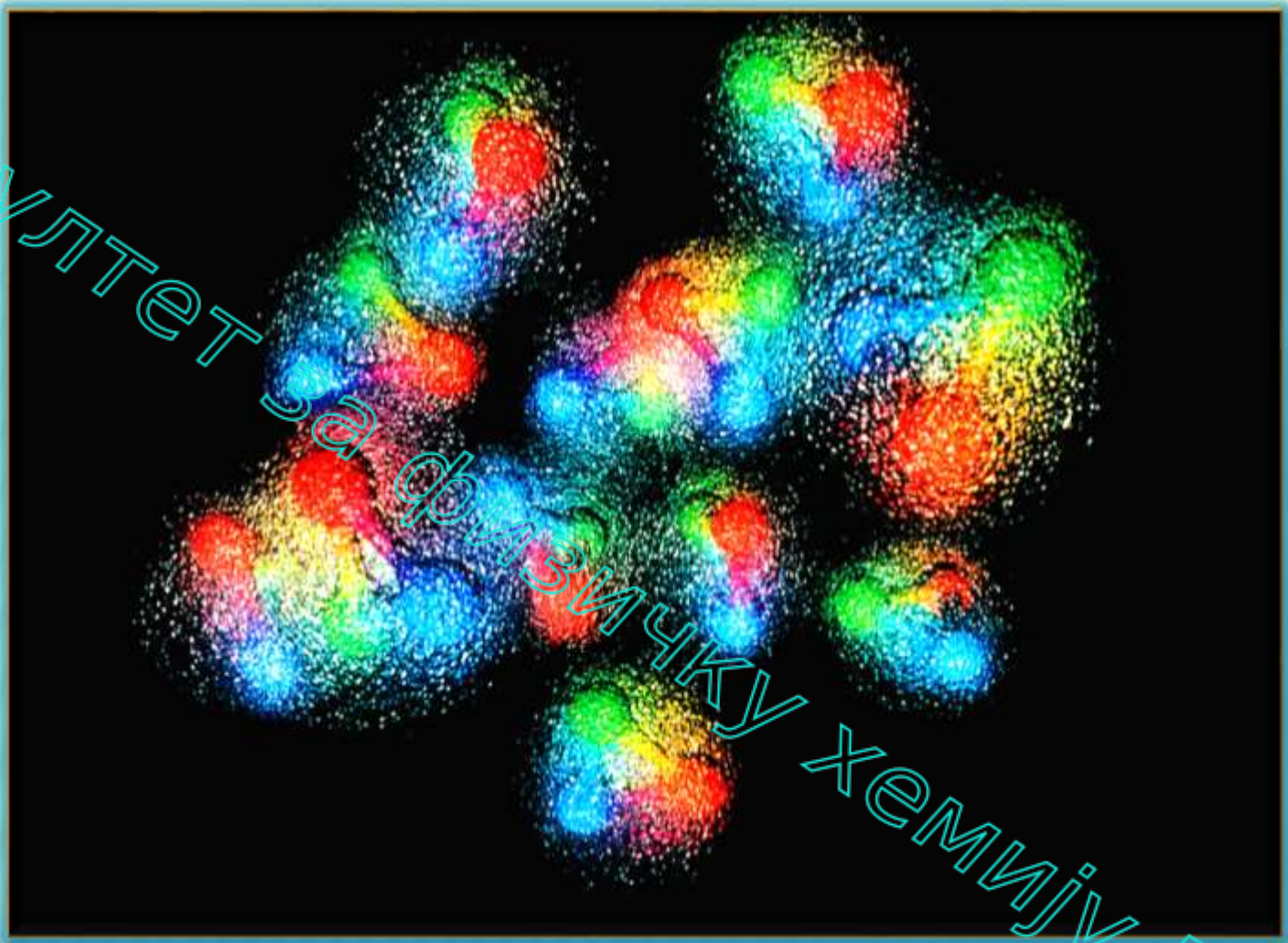
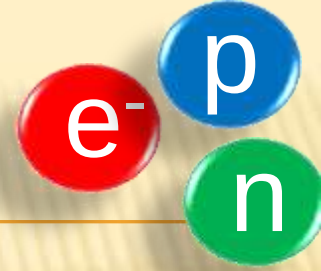




ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ

КЛАСИЧНО ДОБА



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

ФОТОН

✗ Planck 1900. појам кванта $E=h\nu$

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

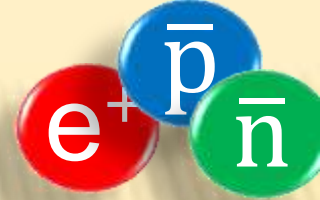
✗ Einstein 1905

– објашњење фотоелектричног ефекта

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

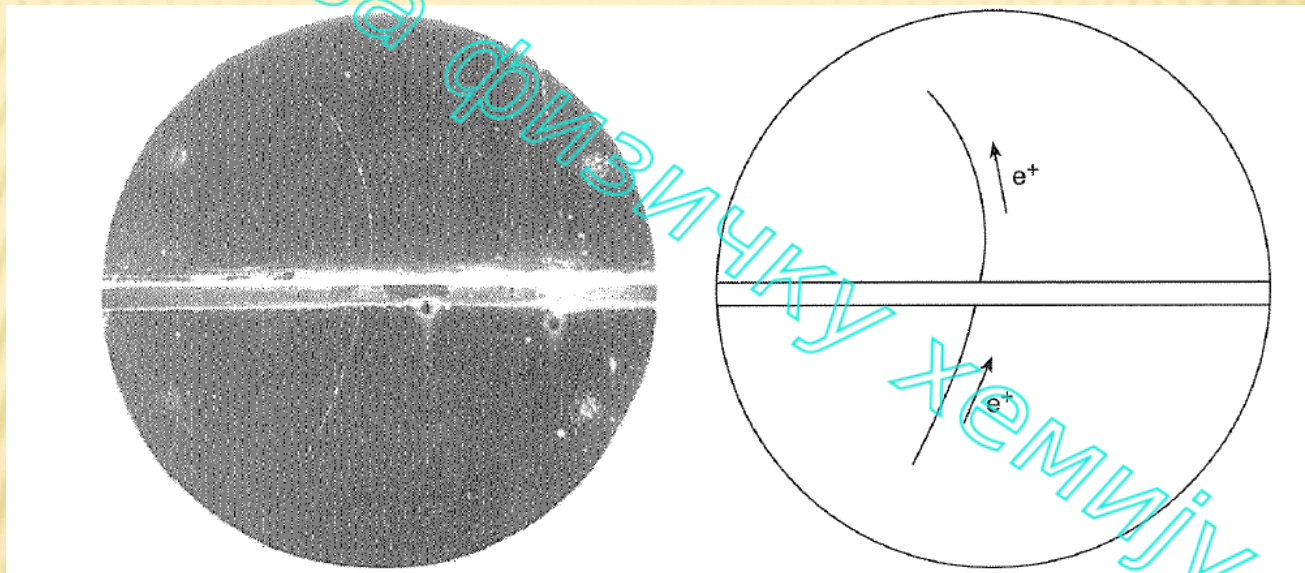
-електромагнетно зрачење у својој природи
квантовано

АНТИЧЕСТИЦЕ



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

- ✗ Anderson (1931) откриће позитрона
- ✗ 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 ЕЛЕКТРИСНОГ НАБОЈА**

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

✗ 1956 антинейтрон $\bar{n}$ (Berkeley Bevatron)

+ Како неутрон има античестицу?

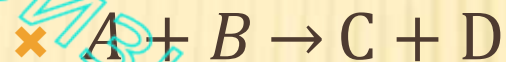
✗ Нови квантни број- барионски број

✗ 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 эффект

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

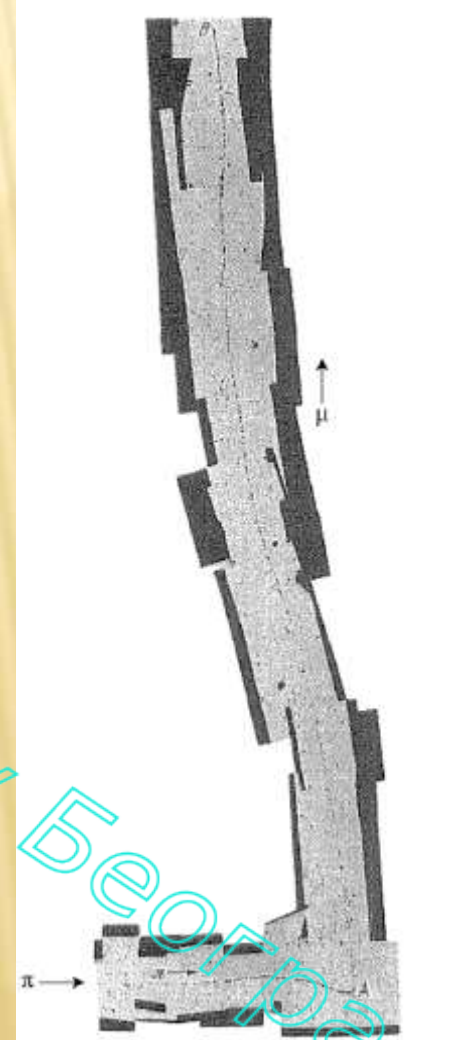
✖ 1947 Powell – два мезона $\square$
(пион) и μ (мион)

✖ π

✖ $\square = \text{Yukawa мезон}$

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

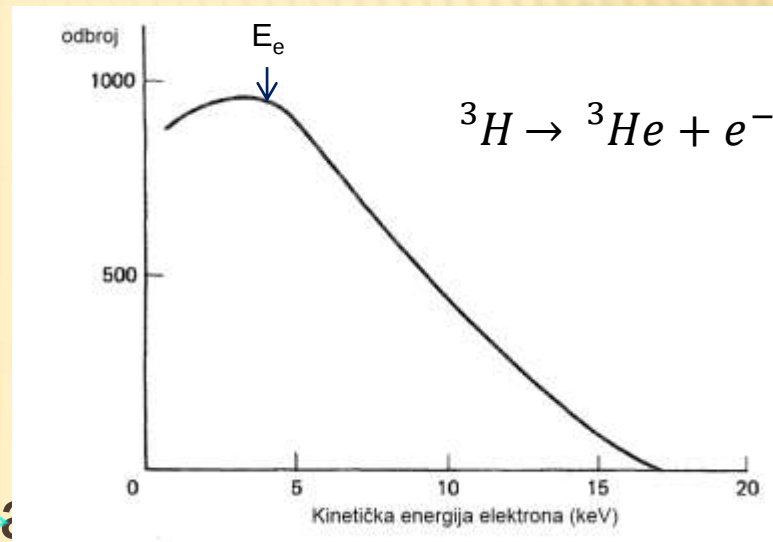
✖ Пошто се понашају као тежи
рођаци електрона сврставају се
у лептоне



НЕУТРИНИ



- ✗ $A \rightarrow B^+ + e^- + ?$
- ✗ 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
честица јако мале масе односи остатак енергије
- ✗ 1933 Enrico Fermi – теорија β распада
- ✗ $A \rightarrow B^+ + e^- + (\bar{\nu})$
- ✗ ν – неутрино (италијански - деминутив од неутрон)

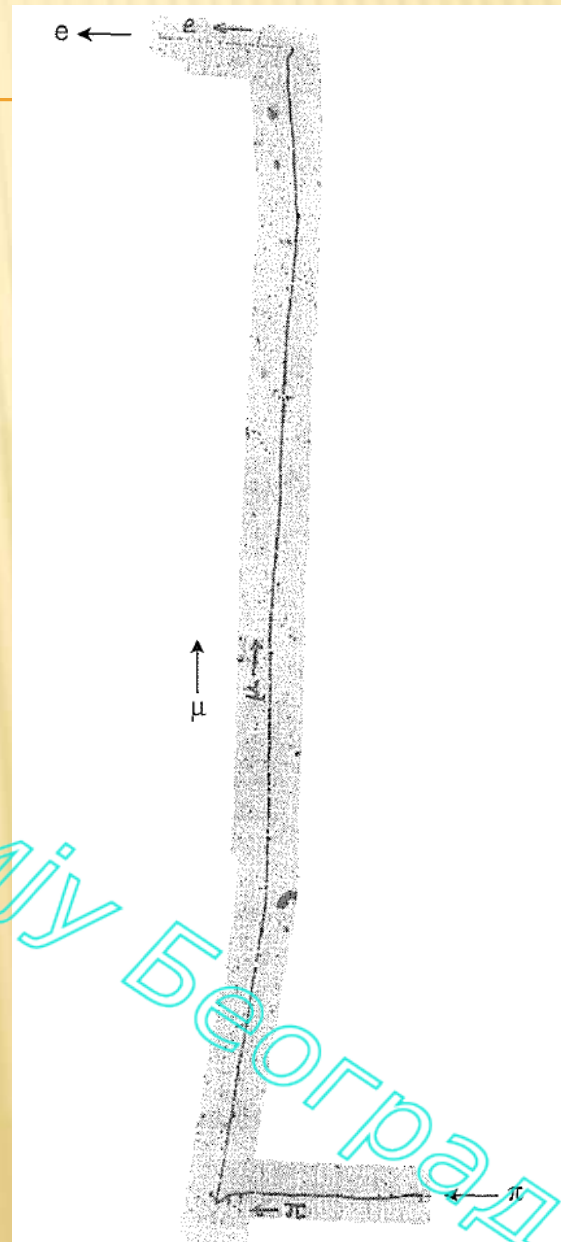


- ✗ Распад пиона (π) је такође праћен емисијом неутрина

$$\pi \rightarrow \mu + (\nu)$$

$$\mu \rightarrow e^{-} + 2(\nu)$$

- ✗ 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:



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

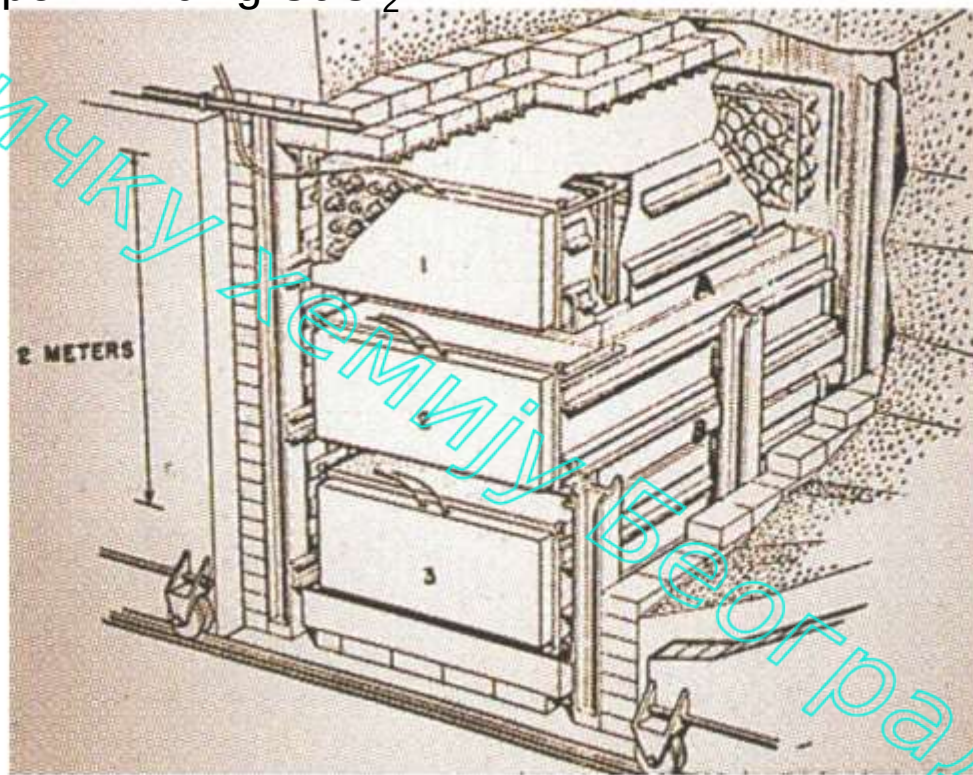
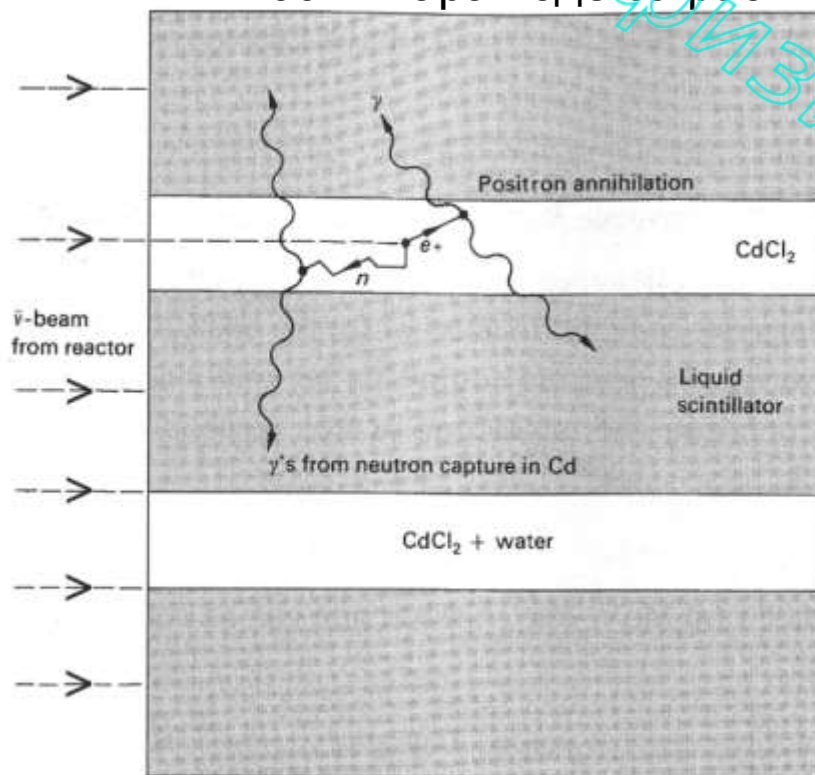
Нуклеарни
реактор



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 антинейтрино онда ће се одигравати и реакција

$$\nu + n \rightarrow p^+ + e^- \quad \text{ОК}$$

у супротном

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

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

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

- ✗ Антинейтрино и нейтрино 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?

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

- ✗ Закон одржања електронског и мионског броја.
- ✗ Решење – два типа неутрина, један придружен електрону, а други миону
- ✗ ν_e , ν_{μ} и одговарајући антинетруини

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

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

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

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

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

- ✗ 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)

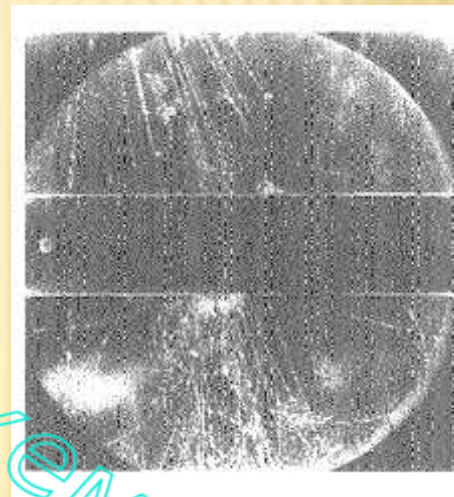
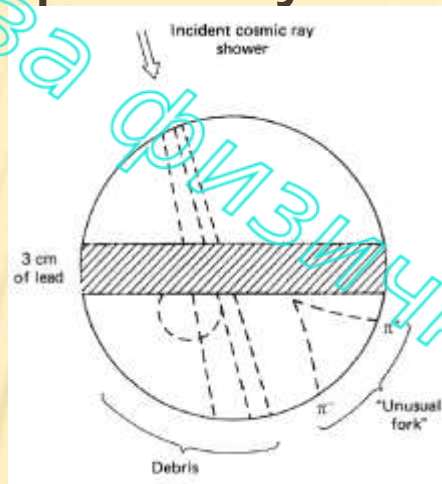
Table 1.1 The lepton family, 1962–1976

	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 kaona (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)

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^+$$

- ✗ Сврстан у барионе на основу закона очувања барионског броја (Stuckelberg 1953.)
- ✗ Бариони и лептони се померавају 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 uveden 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”.

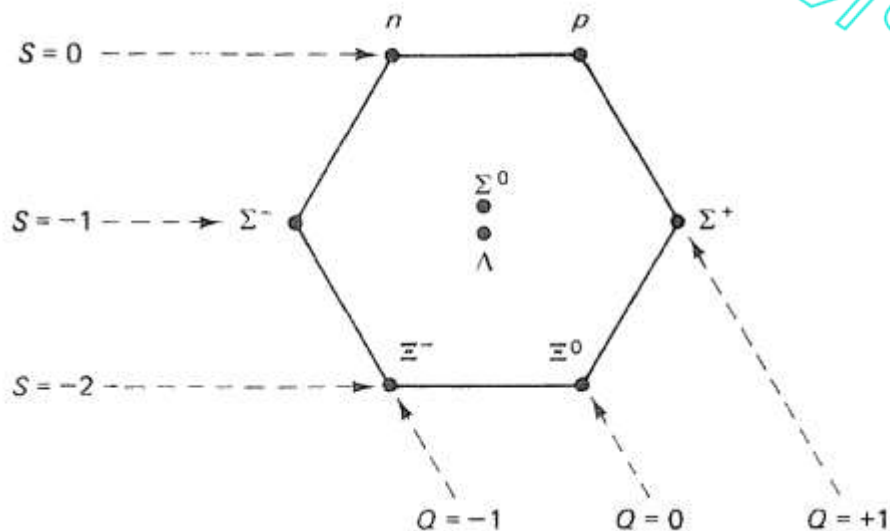
E.Fermi обраћајући се свом студенту

L. Lederman-у каже:

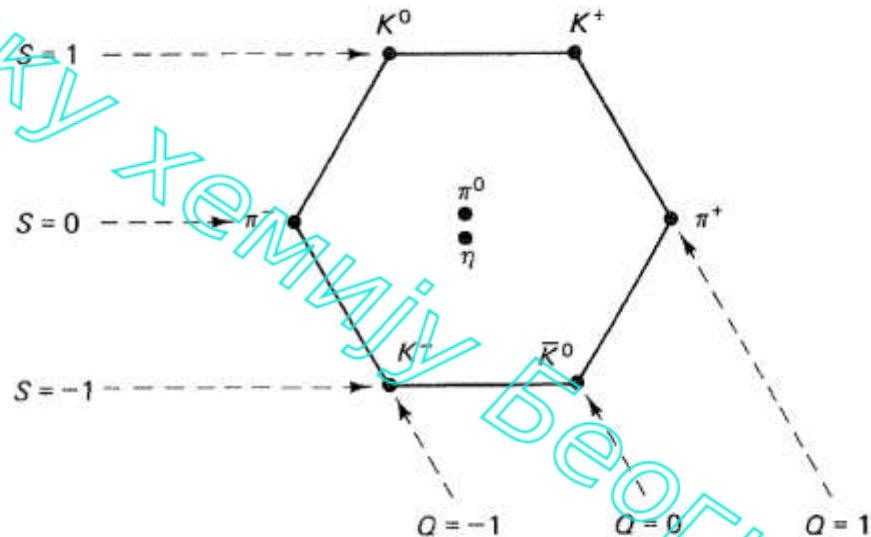
***"Young man, if I could remember
the names of these particles,
I would have been a botanist!"***

EIGHTFOLD WAY ИЛИ ПЕРИОДНИ СИСТЕМ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧЕСТИЦА

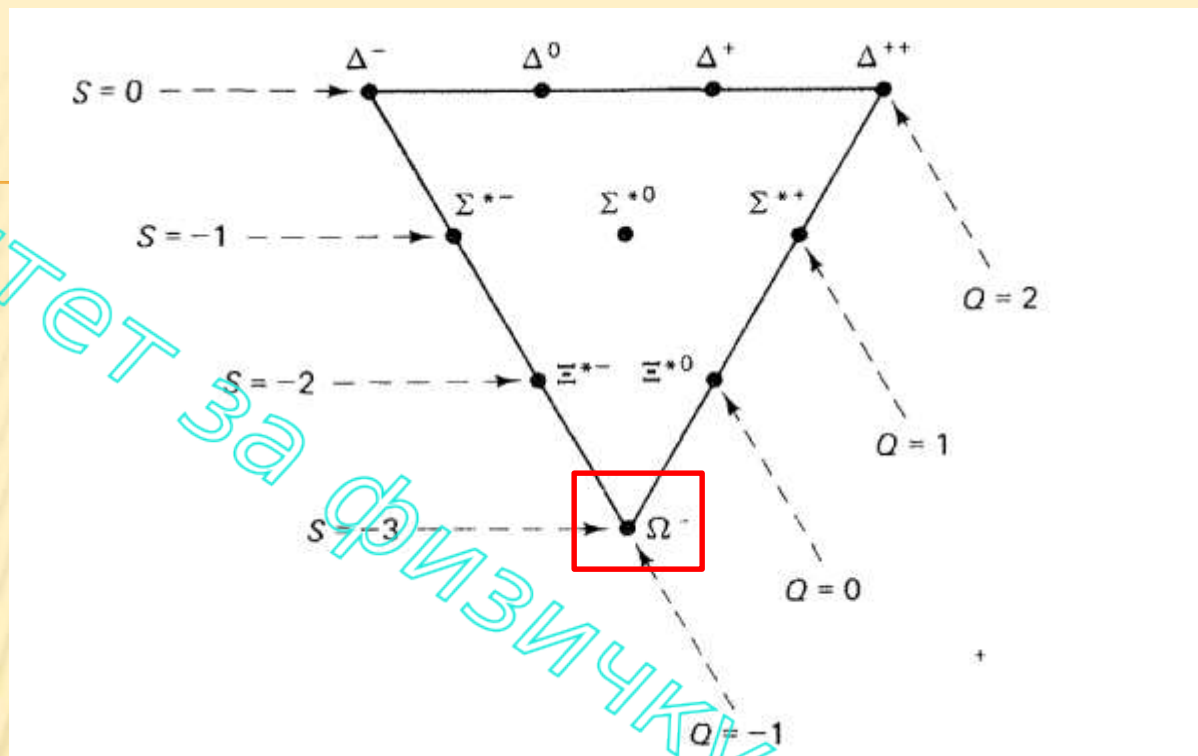
- ✗ Gell-Mann 1961. – eightfold way- систем распоређивања бариона и мезона (заједничко име хадрони) у геометријске матрице.



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
состављени од
кваркова:

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



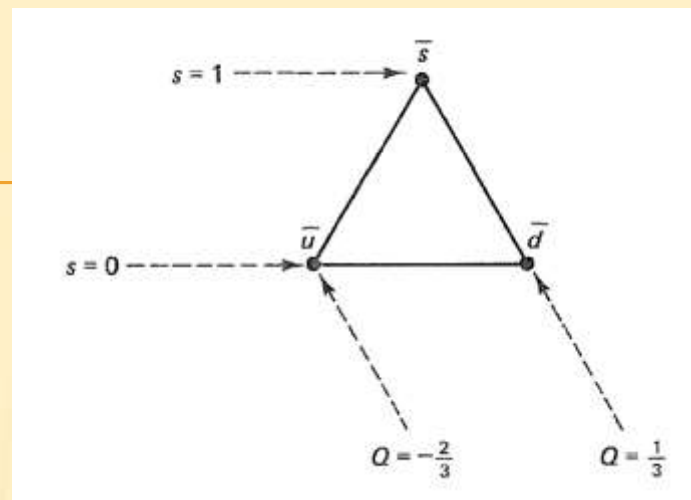
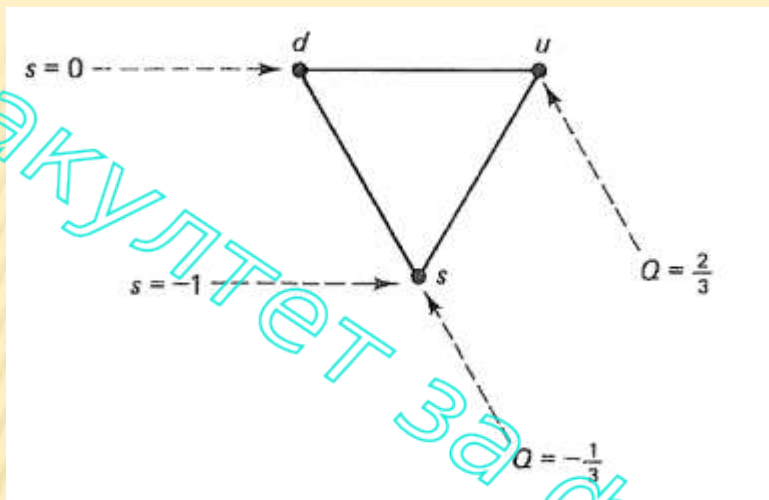
James Joyce "Finnegans Wake"

*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.*

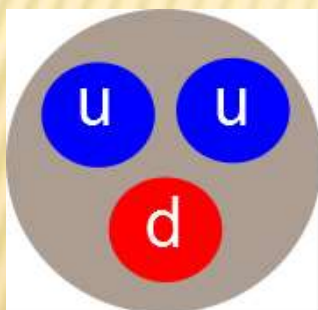
*But O, Wreneagle Almighty,
wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard
whooping about for uns shirt in
the dark*

*And he hunting round for uns
speckled trousers around by
Palmerstown Park?*

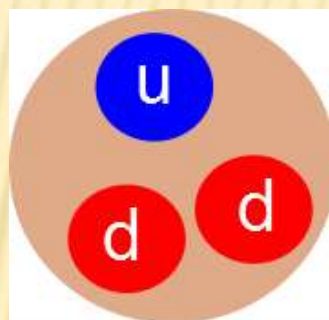


✗ Кваркови

Антикваркови



протон



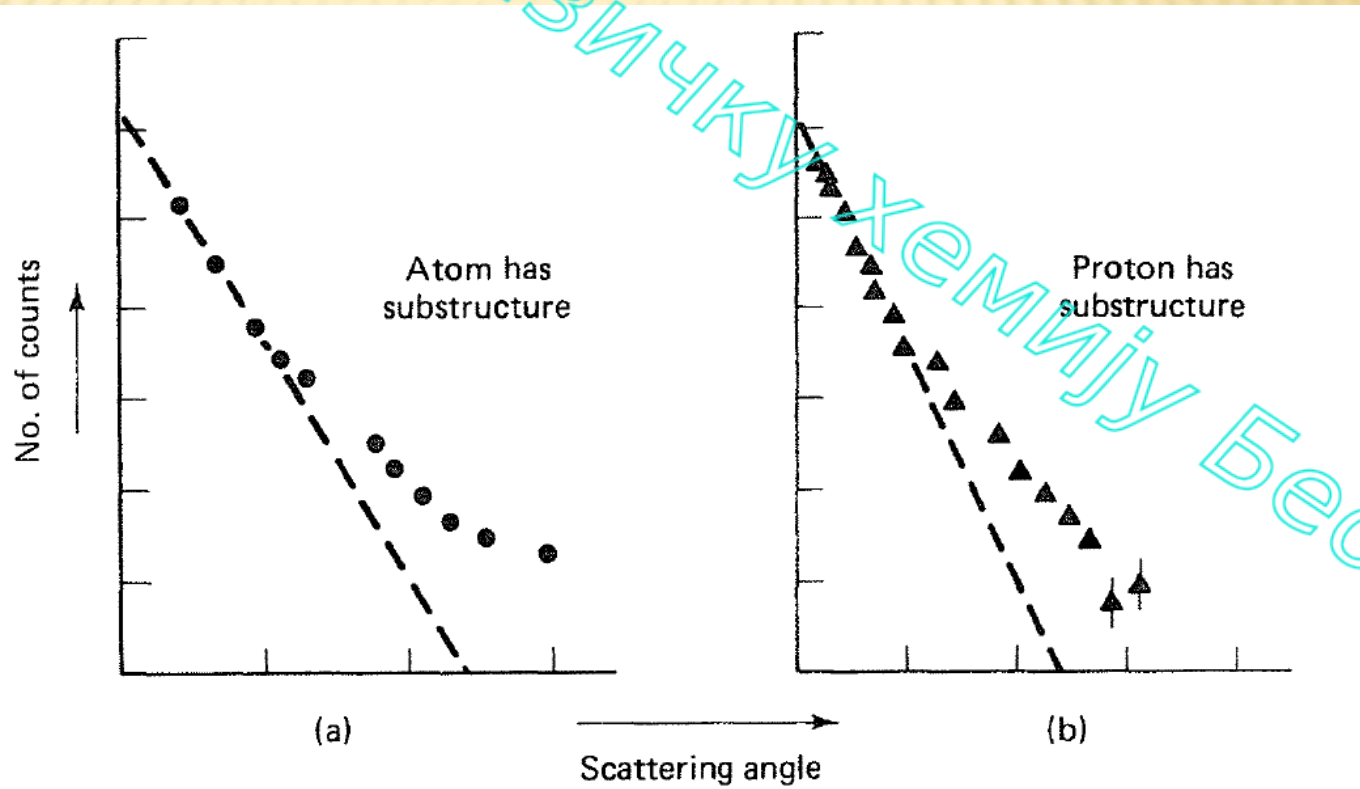
неутрон

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'

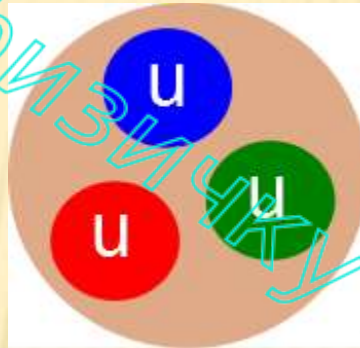
- ✗ Али како $\Delta^+ = uud$ и $p^+ = uud$?
- ✗ Исте комбинације са различитим везивањем јако се разликују по енергетским стањима те их можемо сматрати различитим честицама.

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



✗ Али кварк модел се противи Паулијевом принципу!

✗ Решење-кваркови имају „боју“ –плаву, зелену и црвену и

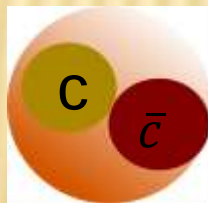


✗ **Све природне честице су безбојне**

✗ 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

- ✖ Оtkриће 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: $m_W=82\pm2 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z=92\pm2 \text{ GeV}/c^2$
- ✗ Rubia (CERN 1983) потврда $W^\pm$ и Z . Измерене масе:
- ✗ $m_W=80,4\pm0,029 \text{ GeV}/c^2$, $m_Z=91.19\pm0,002 \text{ GeV}/c^2$

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)

Емисија 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

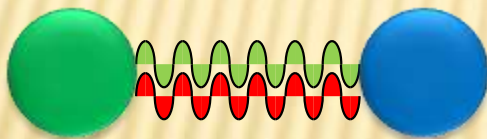
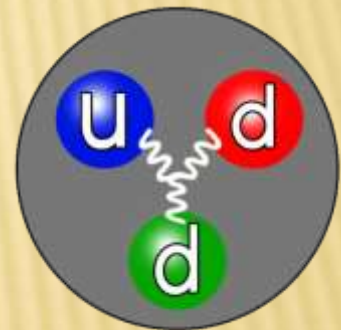
$$R = c\Delta t \approx \frac{\hbar c}{\Delta E}$$

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 глюон преводи плаву честицу у зелену и обрнуто



СТАНДАРДНИ МОДЕЛ

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

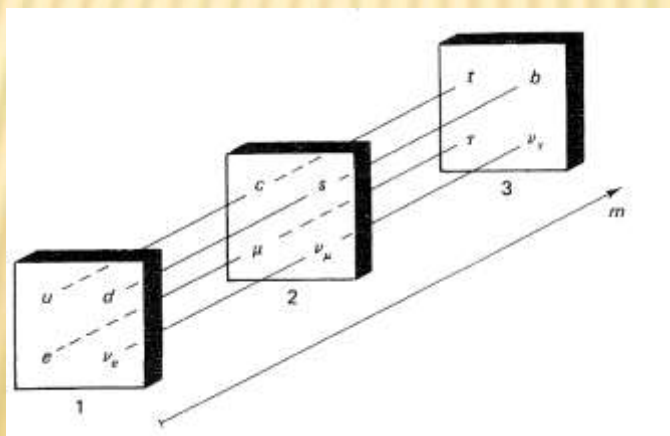
	I	Q	L_e	L_μ	L_τ
I генерација	e	-1	1	0	0
	ν_e	0	1	0	0
II генерација	μ	-1	0	1	0
	ν_μ	0	0	1	0
III генерација	τ	-1	0	0	1
	ν_τ	0	0	0	1

- ✗ 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

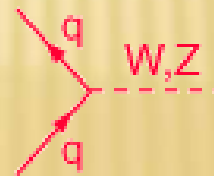
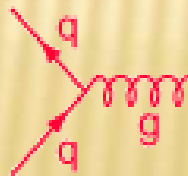
× —————→ честица/античестица

× ~~~~~ 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

