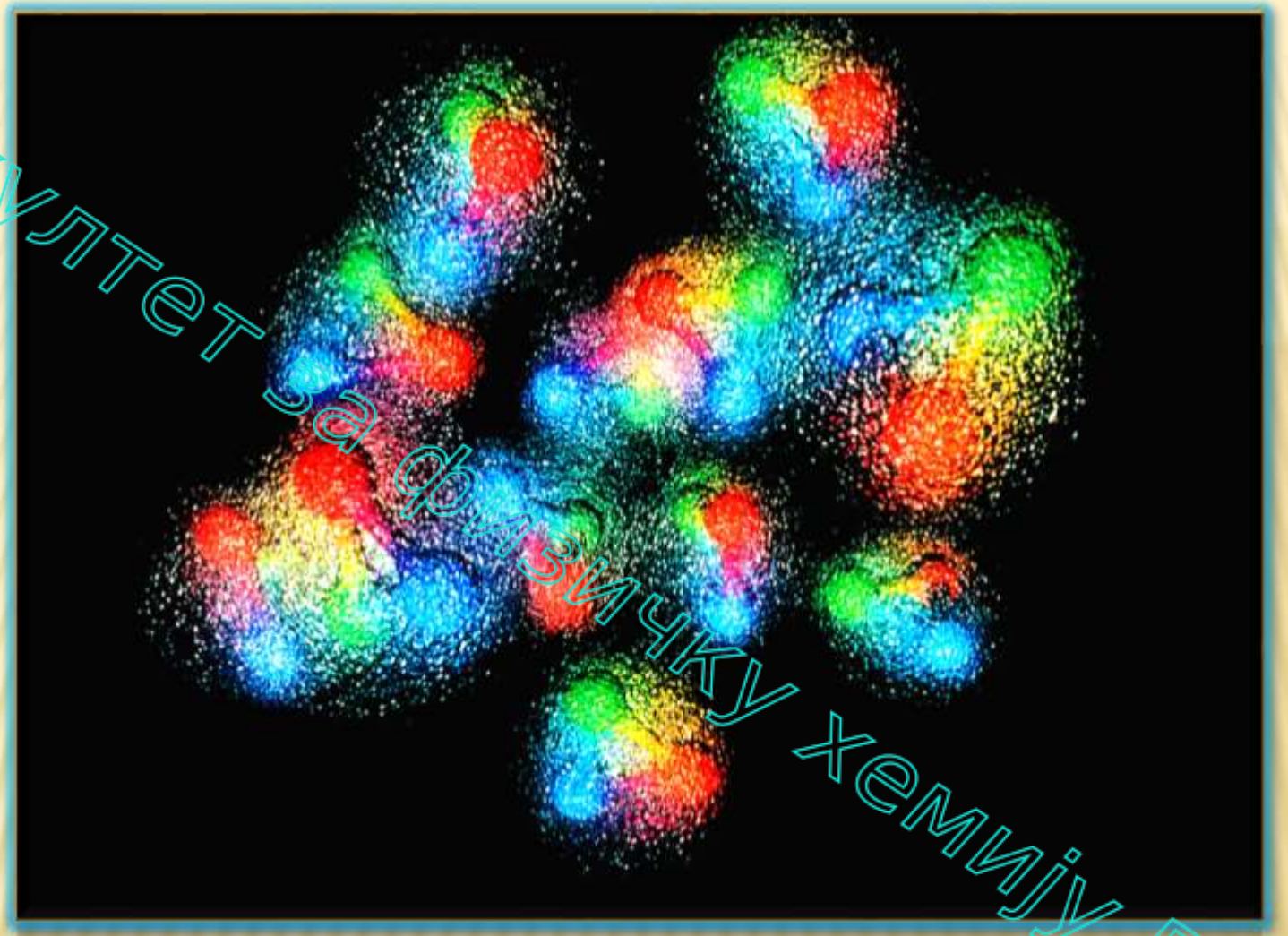
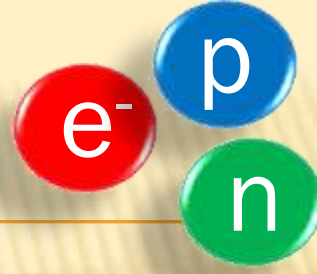


Факултет за физичку хемију Београд

ЕЛЕМЕНТАРНЕ ЧЕСТИЦЕ

КЛАСИЧНО ДОБА



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

Факултет за физичку хемију Београд

ФОТОН

- Planck 1900. појам кванта E=hν

h=6.626·10^{-27} erg s^{-1}

- Einstein 1905

– објашњење фотоелектричног ефекта

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

-електромагнетно зрачење у својој природи квантовано

Факултет за физичку хемију Београд

КВАНТНА ТЕОРИЈА (ЕЛМ, Г, Н) ПОЉА МЕДИЈАТОРИ

Честица/медијатор	Сила/поље	Маса (GeV/c^2)
фотон	електромагнетна	0
гравитон	гравитациона	0
глуон	нуклеарна јака	?
$W^{\pm}$ и Z^0 бозони	нуклеарна слаба	80,39; 91,19

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*

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

Факултет за физичку хемију Београд

МЕЗОНИ





- Yukawa 1934. мезон као медијатор јаке силе која држи нуклеоне на окупу

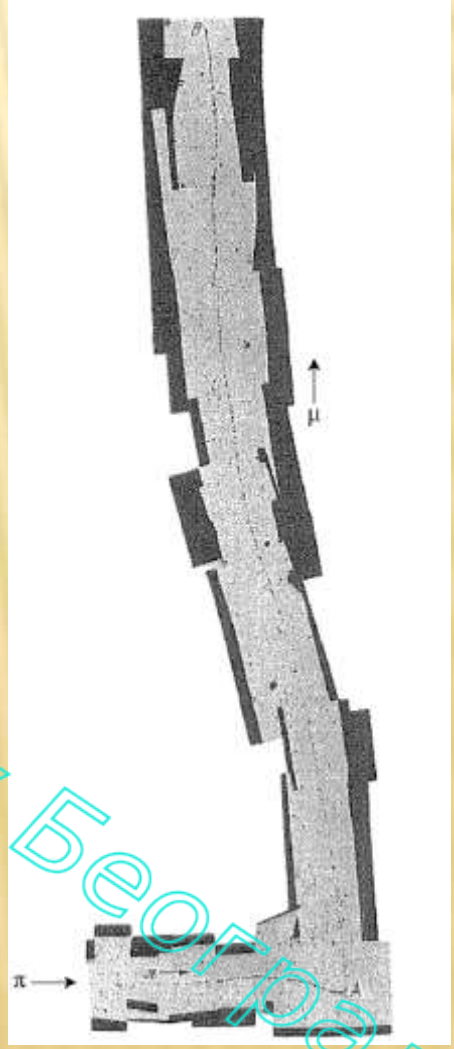
- Маса мезона ≈300 × m_e (1/6 m_p)
- Лептони –мала маса (електрон...)
- Мезони-средња маса (...)
- Баріони- велика маса (протон, неутрон...)

- 1937- потврда Yukawa мезона Anderson и Neddermeyer, Street и Stevenson

Факултет за физичку хемију Београд

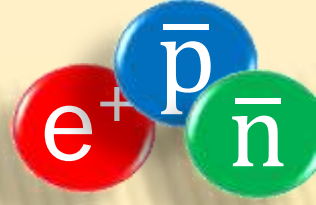
- 1947 Powell – два мезона π (пион) и μ (мион)
- π
- π= Yukawa мезон

- Мезони слабо интерагују са језгром ⟶нису носиоци јаке силе у језгру
- Пошто се понашају као тежи рођаци електрона сврставају се у лептоне



Факултет за физичку хемију Београд

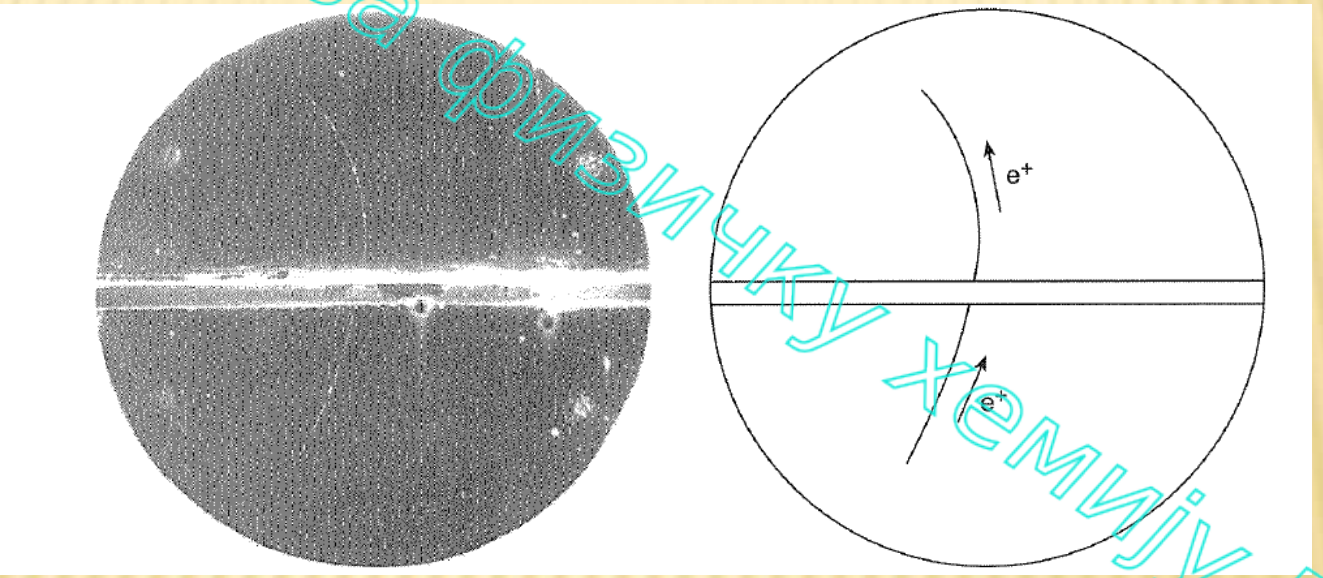
АНТИЧЕСТИЦЕ



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

Факултет за физичку хемију Београд

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



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

Факултет за физичку хемију Београд

- 1955 антипротон $\bar{p}$ (Berkeley Bevatron)
- 1956 антинеутрон $\bar{n}$ (Berkeley Bevatron)
  - Како неутрон има античестицу?
    - Нови квантни број- барионски број
    - Унутрашња структура

- $\bar{\gamma} \equiv \gamma$

Факултет за физичку хемију Београд

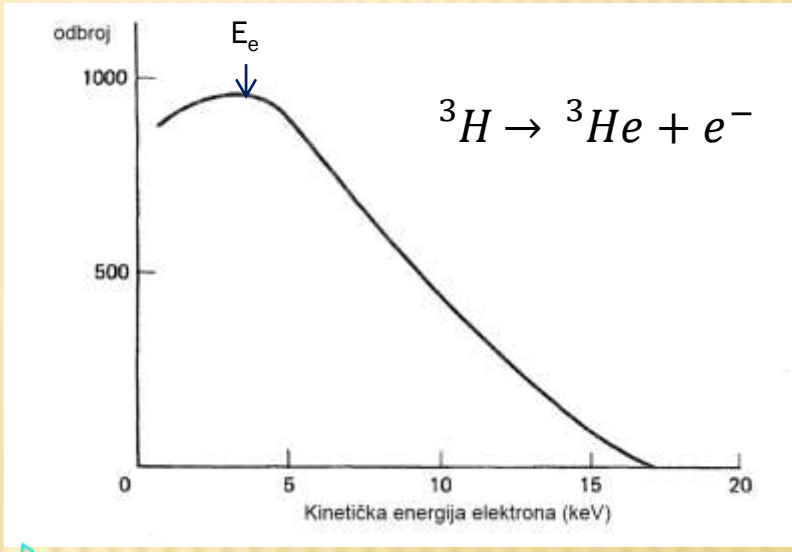
СИМЕТРИЈА ПРЕЛАЗА

- За дејства и реакције у којима учествују честице и античестице важи симетрија прелаза и представљају манифестације у суштини истог физичког процеса
  - $A + B \rightarrow \mathrm{C} + \mathrm{D}$
  - $A \rightarrow \bar{B} + C + \mathrm{D}$
  - $\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$
- Али само ако су испуњени енергетски захтеви и без претеривања:
- $\gamma + \mathrm{e}^- \rightarrow \gamma + \mathrm{e}^-$ или $\mathrm{e}^+ + \mathrm{e}^- \rightarrow \gamma + \gamma$

Комптонов ефекат Анихилација

Факултет за физичку хемију Београд

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 да неутрална 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)

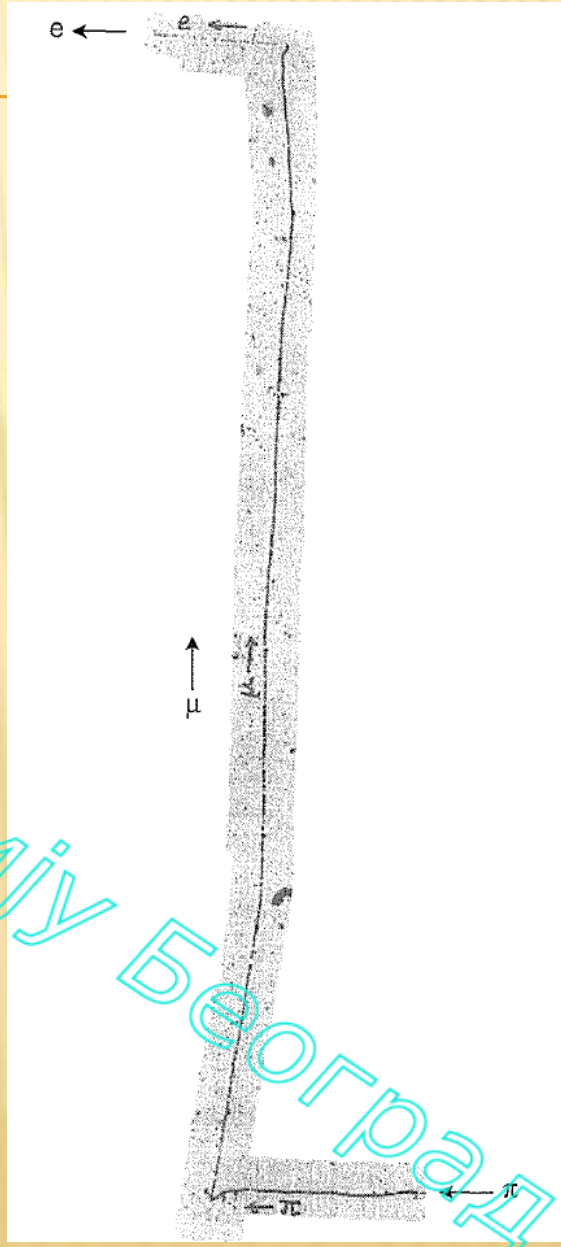
Факултет за физичку хемију Београд

- Распад пиона (π) је такође праћен емисијом неутрина

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

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

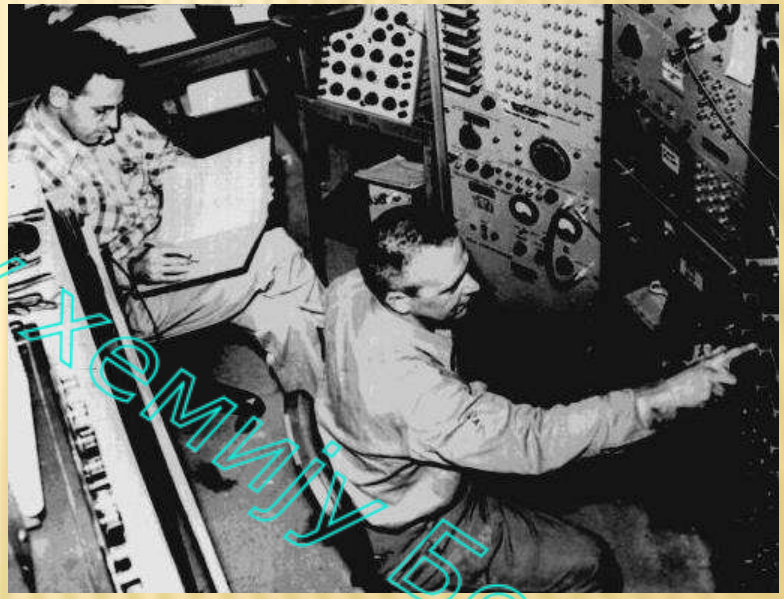
- Како знамо да се распад миона прати емисија два неутрина?
- Мерење енергије електрона!
  - Ако енергија електрона варира онда у процесу настају три честице
  - У распаду пиона потпуно је константна



Факултет за физичку хемију Београд

ЕКСПЕРИМЕНТАЛАНА ПОТВРДА ПОСТОЈАЊА НЕУТРИНА

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



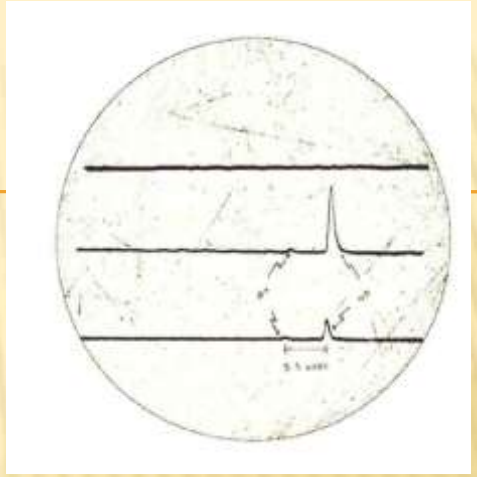
$$\bar{\nu} + p^{+} \rightarrow n + e^{+}$$

Факултет за физичку хемију Београд

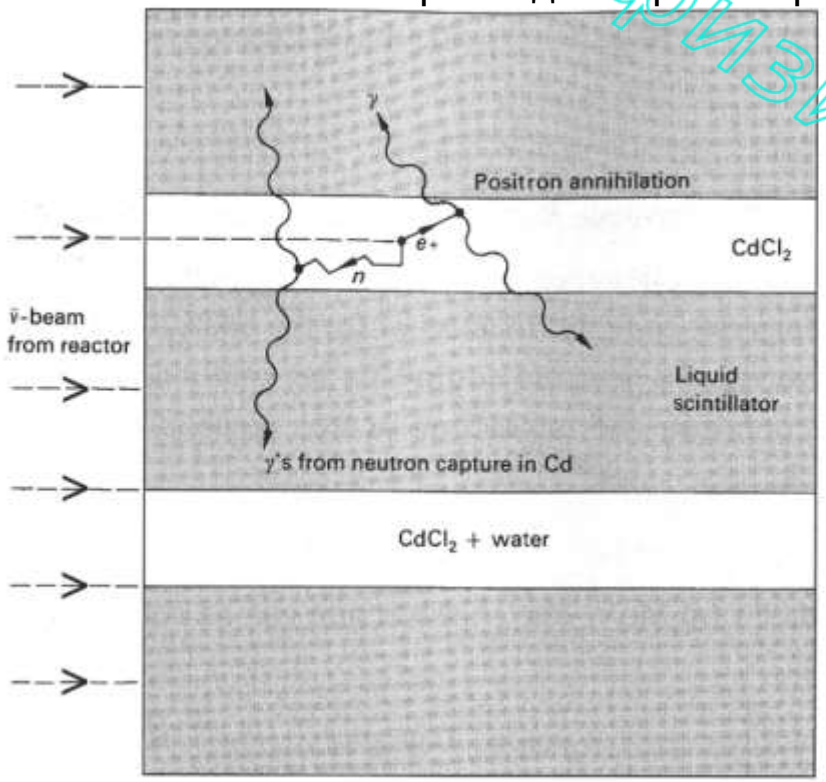
Нуклеарни реактор

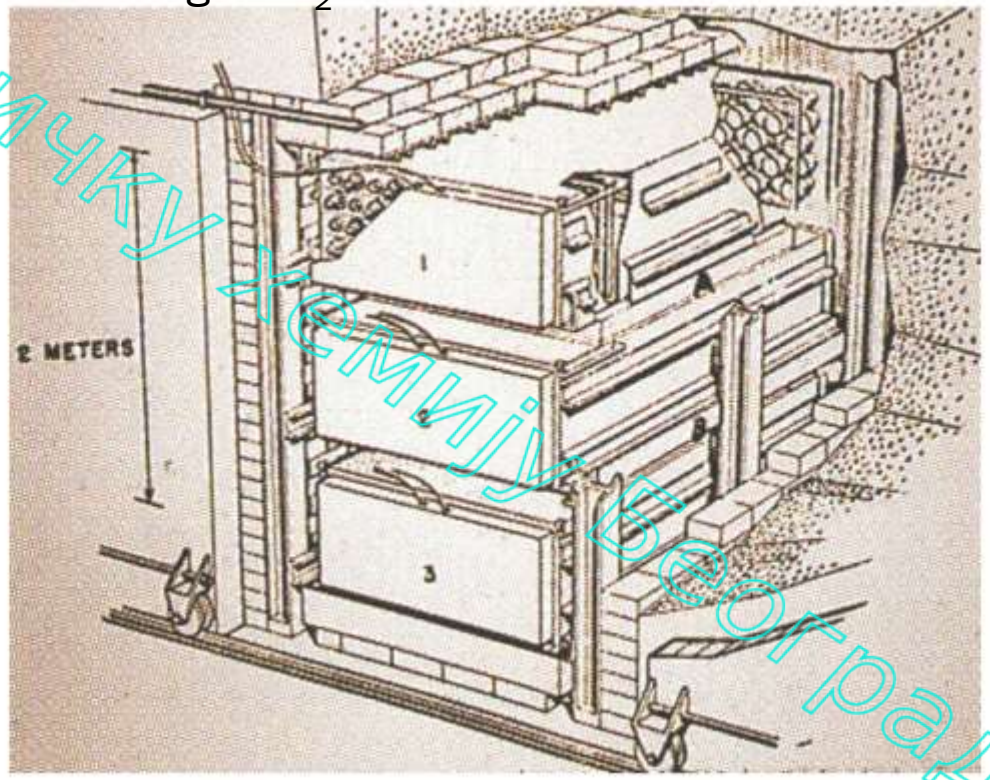
12 m

11 m



2x100 литара воде са растворених 40 kg $CdCl_2$





Факултет за физичку хемију Београд

ν ИЛИ $\bar{\nu}$ У β^- РАСПАДУ

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

$$\nu + n \rightarrow p^+ + e^-$$ 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 неутрино

-1 је за њихове античестице

- Антинеутрино и неутрино се разликују по хелицитету

Факултет за физичку хемију Београд

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

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

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

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

- 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

Факултет за физичку хемију Београд

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

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

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

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

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

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

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

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

Факултет за физичку хемију Београд

Да ли неутрини имају масу?

- Имају али малу <2 eV

- Неутринске осцилације-конверија неутрина једних у друге при већим пређеним растојањима

Фамилија лептона (1962-1976)

Table 1.1 The lepton family, 1962–1976

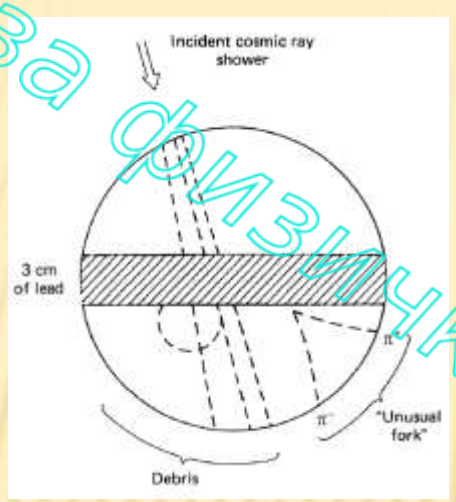
	Lepton number	Electron number	Muon number
Leptons			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
Antileptons			
e^+	−1	−1	0
$\overline{\nu}_e$	−1	−1	0
μ^+	−1	0	−1
$\overline{\nu}_\mu$	−1	0	−1

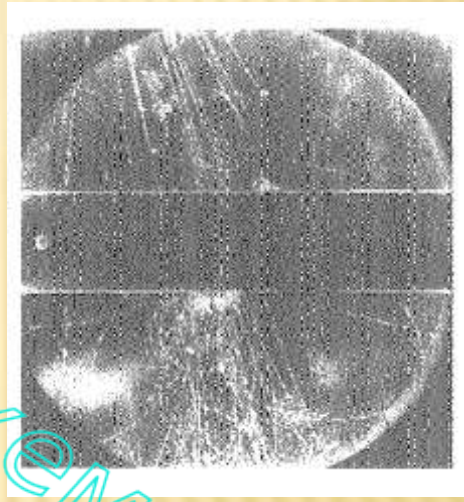
Факултет за физичку хемију Београд

“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.

Факултет за физичку хемију Београд

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

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

- Сврстан у барионе на основу закона очувања баријонског броја (Stuckelberg 1953.)
- Баријони и лептони се покоравају очувању бариоских и лептонских бројева, али мезони не.
- У наредним годинама пронађен је велики број баријона: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.

Факултет за физичку хемију Београд

$$\pi^- + p^+ \rightarrow K^+ + \Sigma^-$$
$$\rightarrow K^0 + \Sigma^0$$
$$\rightarrow K^0 + \Lambda$$

$$\pi^- + p^+ \not\rightarrow \pi^+ + \Sigma^-$$
$$\not\rightarrow \pi^0 + \Lambda$$
$$\not\rightarrow K^0 + n$$

$$\Lambda \rightarrow p^+ + \pi^-$$
$$\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$$
$$\rightarrow n + \pi^+$$

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

Факултет за физичку хемију Београд

Willis Lamb 1955 говор поводом доделе Нобелове награде

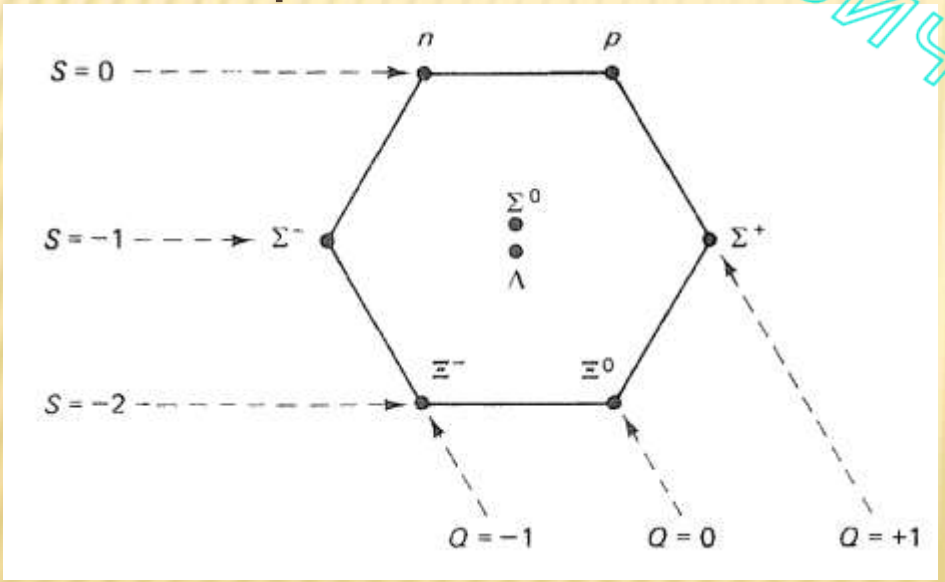
When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called "elementary particles": the electron and the proton. A deluge of other "elementary" particles appeared after 1930; neutron, neutrino, μ meson (sic), π meson, heavier mesons, and various 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!"

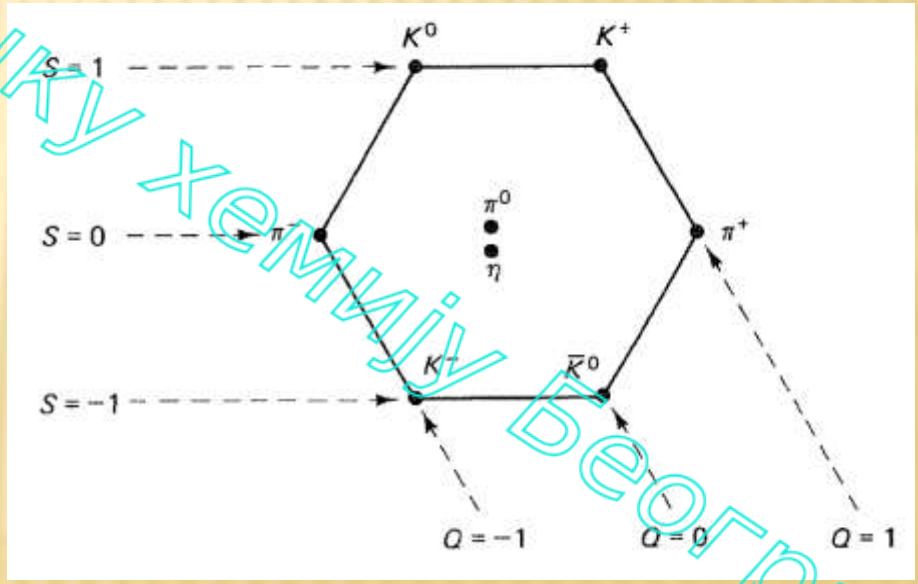
Факултет за физичку хемију Београд

EIGHTFOLD WAY ИЛИ ПЕРИОДНИ СИСТЕМ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧЕСТИЦА

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

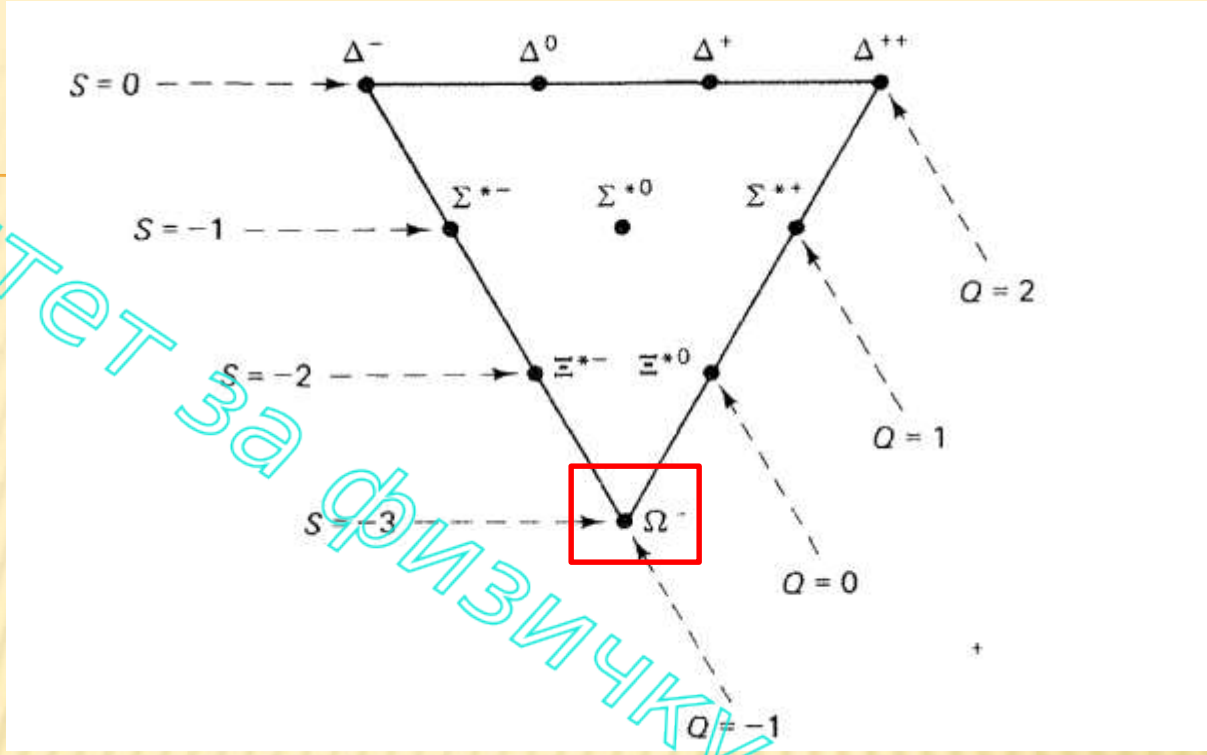


Барионски октет



Мезонски октет

Факултет за физичку хемију Београд



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.

Факултет за физичку хемију Београд

КВАРКОВИ (КВАРК МОДЕЛ)

- Gell-Mann и Zweig 1964:
- Сви хадрони су састављени од кваркова:
  - Бариони од три
  - Мезони од два (кварк и антикварк)



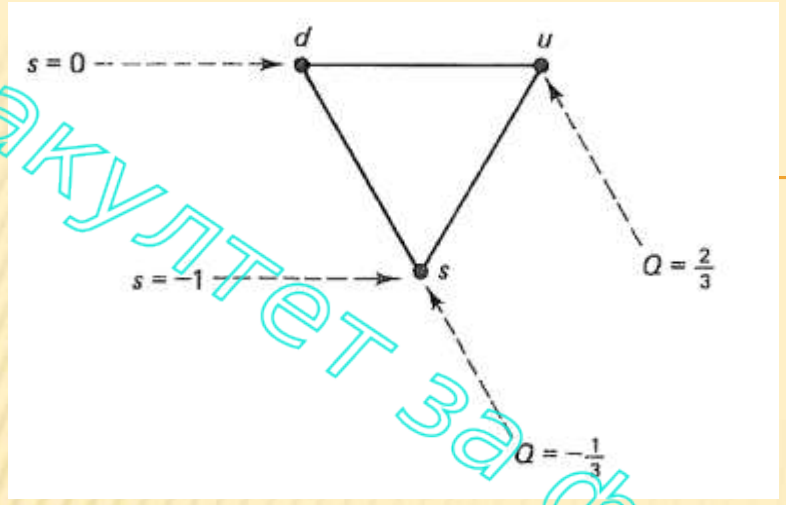


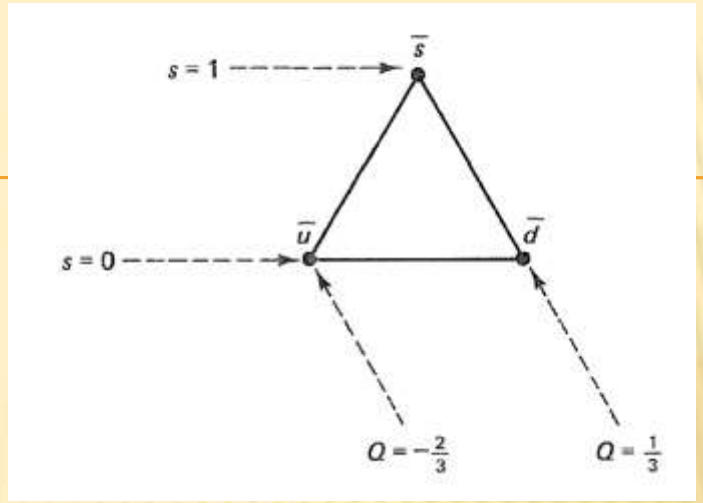
James Joyce "Finnegans Wake"

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

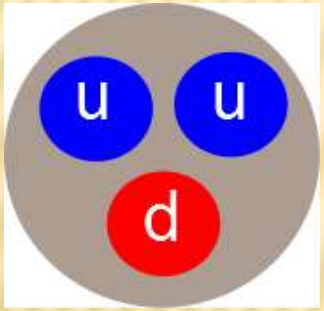
Факултет за физичку хемију Београд

Факултет за физичку хемију Београд

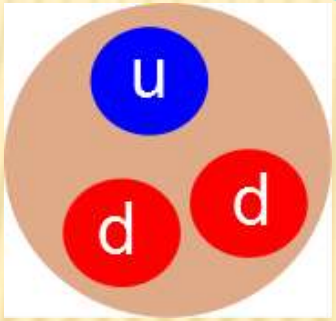




- *Кваркови* *Антикваркови*



протон



неутрон

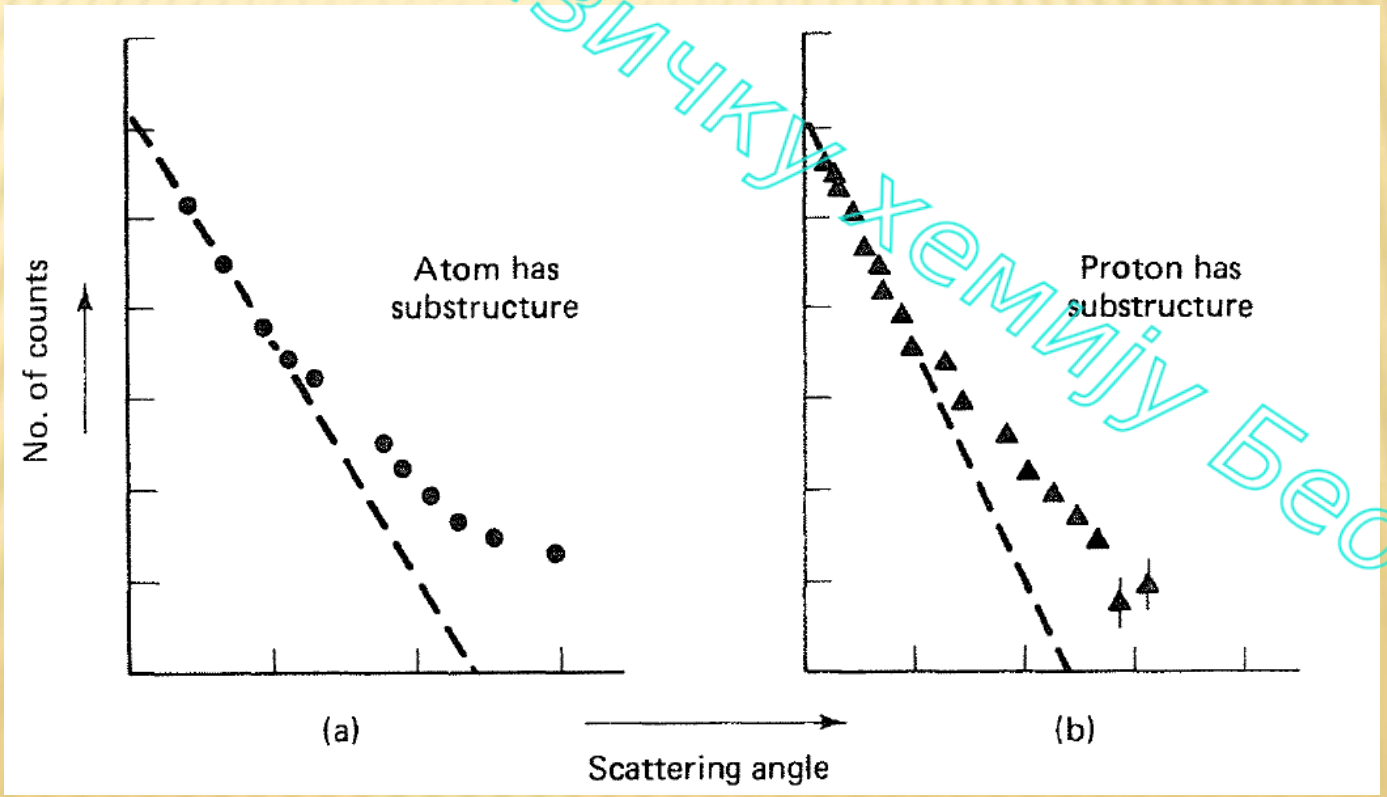
qqq	Q	S	Baryon
uuu	2	0	Δ^{++}
uud	1	0	Δ^{+}
udd	0	0	Δ^{0}
ddd	−1	0	Δ^{-}
uus	1	−1	Σ^{*+}
uds	0	−1	Σ^{*0}
dds	−1	−1	Σ^{*-}
uss	0	−2	Ξ^{*0}
dss	−1	−2	Ξ^{*-}
sss	−1	−3	Ω^{-}

$q\bar{q}$	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 Δ^+ =uud и p^+=uud?
- Исте комбинације са различитим везивањем јако се разликују по енергетским стањима те их можемо сматрати различитим честицама.

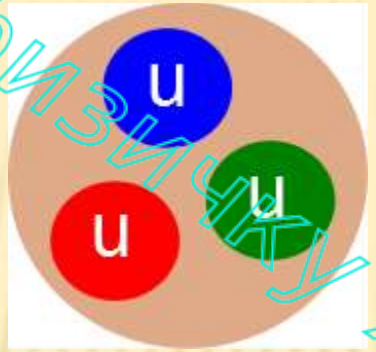
Факултет за физичку хемију Београд

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



Факултет за физичку хемију Београд

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

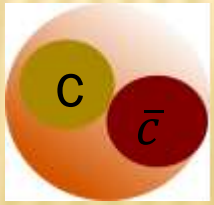


- **Све природне честице су безбојне**
- Увођење боје решава и проблем зашто не постоје комбинације од два или четири кварка – јер су „обојене“.

Факултет за физичку хемију Београд

НОВЕМБАРСКА РЕВОЛУЦИЈА

- Откриће Ψ мезона (Ting 1974. Brookheaven) 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

Факултет за физичку хемију Београд

- Откриће Ψ је отклонило асиметрију (Glashow) између броја лептона и кваркова (4:3 →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 (6:4)– пронађен τ лептон (припадајући му неутрино ν_τ тек 2000-те)
- Честице које садрже нови кварк пронађена је 1980 (*bottom (beauty),* Λ_b^0 =udb)
- Још увек није пронађена честица која садржи *up* кварк (m_{up}=174 GeV/c^2) , али постоје јаке индикације да она постоји (1995)

Факултет за физичку хемију Београд

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

Факултет за физичку хемију Београд

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
I I генерација	μ	-1	0	1	0
	ν_μ	0	0	1	0
I I I генерација	τ	-1	0	0	1
	ν_τ	0	0	0	1

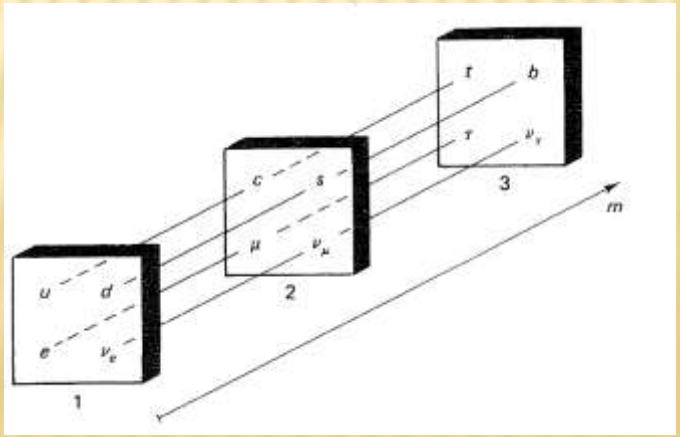
- Слична табела за антилептоне

Факултет за физичку хемију Београд

- 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
I I генерација	s	-1/3	0	0	-1	0	0	0
	c	2/3	0	0	0	1	0	0
I I I 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

Факултет за физичку хемију Београд

МАСЕ КВАРКОВА И ЛЕПТОНА

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

Факултет за физичку хемију Београд

- 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	?
$W^{\pm}$ и Z^0 бозони	нуклеарна слаба	80,39; 91,19

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

Факултет за физичку хемију Београд

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 Petter Higgs-a) 1964.
- Његово постојање откривено је 04. 07. 2012. (LHC), а потврђено 14. 03. 2013.

Факултет за физичку хемију Београд

ИЗВОРИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧЕСТИЦА

- Космичко зрачење
- Низак интензитет, немогуће контролисати. Иницијално протони који у горњим слојевима атмосфере производе мезоне и неутрине
- Нуклеарни реактори –електрони, фотони неутрони и неутрини (антинеутрини)
- Акцелератори честица – контролисана производња, убрзавање и усмеравање честица. Произведене честице се чак могу и „чувати“.

Факултет за физичку хемију Београд