

# Физика на елементарните частици

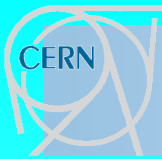
Лекция 1

Л. Литов

Софийски Университет

София, Април 2008

# Що е то?



Опитва се да отговори на на два фундаментални въпроса

-Кои са елементарните съставлящи на материята?

-Кои са фундаменталните сили, контролиращи тяхното поведение ?

## Инструменти



Accelerators  
LHC, LEP

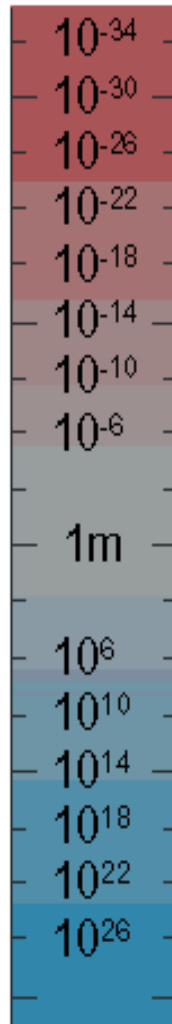


(Particle beams)  
Electron  
Microscope  
Microscope

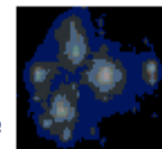
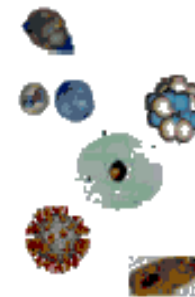


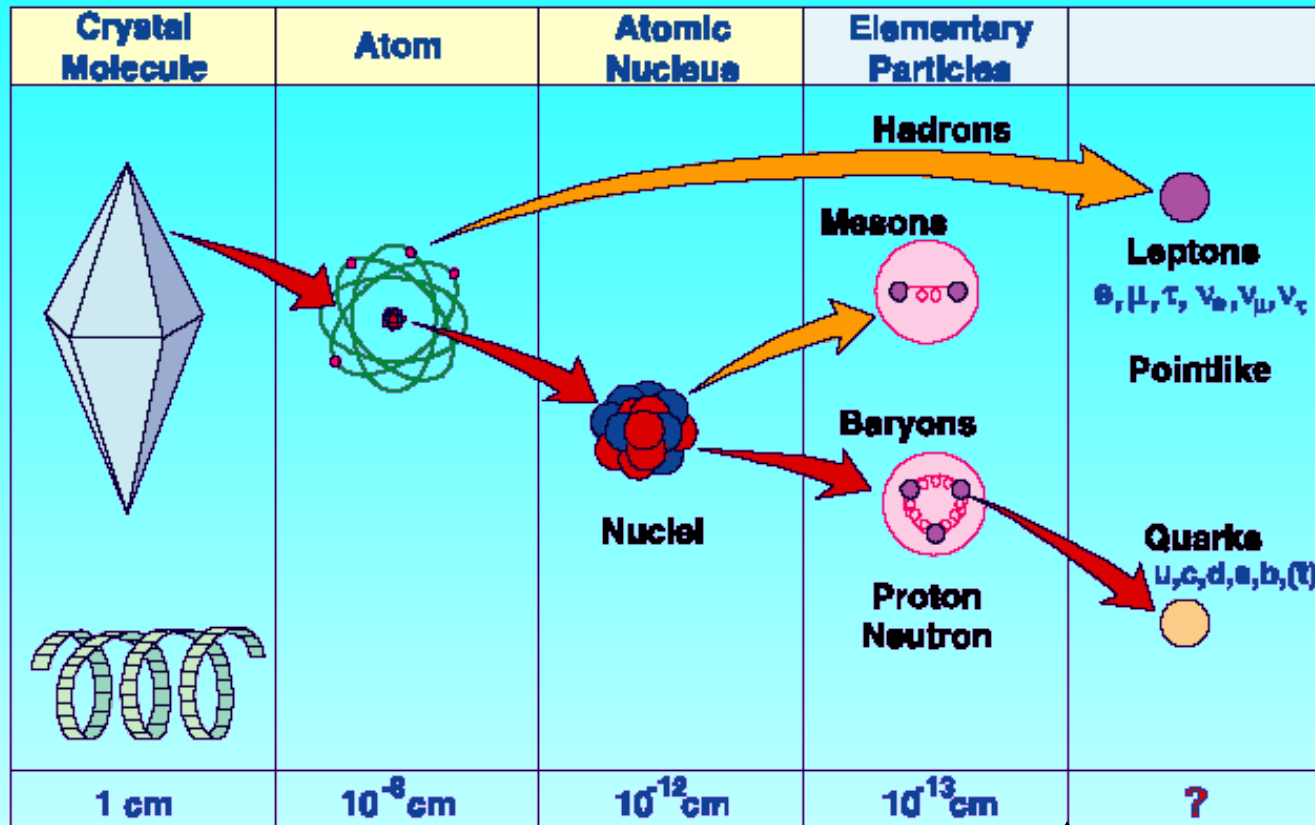
Telescope

Radio  
Telescope



## Наблюдаеми





y1101

## Физика на елементарните частици



## Енергия

### 1 електронволт (eV):

енергията на частица с електричен заряд  $= |e|$ , първоначално в покой, след това ускорена от разлика в електростатичния потенциал  $= 1 \text{ Volt}$  ( $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### Кратни:

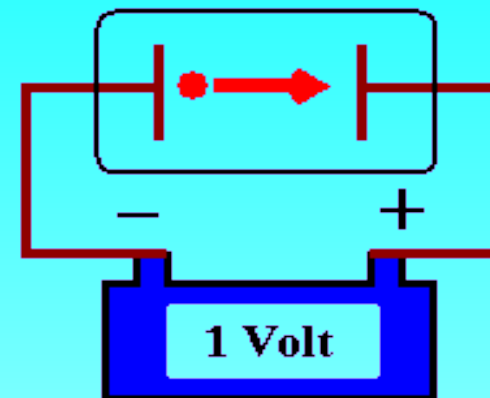
$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} ; \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

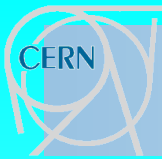
$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} ; \quad 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

### Енергията на протон в ускорителя LHC (2008):

$$7 \text{ TeV} = 1.12 \times 10^{-6} \text{ J}$$

(същата енергия има тяло с маса  $1 \text{ mg}$ , движещо се със скорост  $1.5 \text{ m/s}$ )





# Маса, разстояние, енергия, температура



## Тези величини са свързани

Във физиката на елементарните частици единицата за енергия е електронволт

$E = mc^2$	$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$	скорост на светлината във вакуум
$E = kT$	$k = 10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$	константа на Болцман
$E = hc/\lambda$	$h = 4 \times 10^{-15} \text{ eV s}$	константа на Планк

Маса на електрона      0.5 MeV

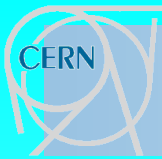
Маса на протона        1 GeV

**1 eV ~ 10,000 K    1 GeV ~ 10<sup>-15</sup> m = 1 fm**

Общата теория на относителността зависи от  $c$  и  $G$  (константата на Нютон), КМ зависи от  $\hbar$ . Естествена единица за дължина (Планкова дължина)  $\sim 10^{-35} \text{ m}$

$$\sqrt{(\hbar G/c^3)}$$





# Фундаментални съставлящи

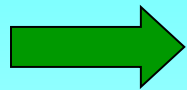


**J.J. Thomson**

**Изучаване на “катодни лъчи”:** електричен ток в тръби при много ниско налягане на газа (“газов разряд”)

**Измерване на масата на електрона:**  $m_e \approx M_H/1836$

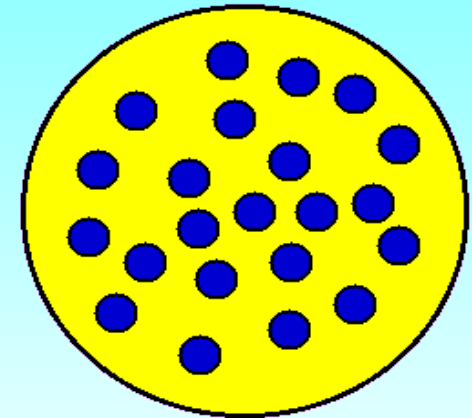
“Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen?” (J.J. Thomson)

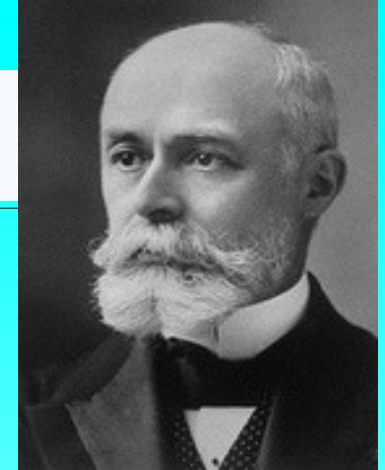


**АТОМИТЕ НЕ СА ЕЛЕМЕНТАРНИ ЧАСТИЦИ**

## Атомен модел на Томсън:

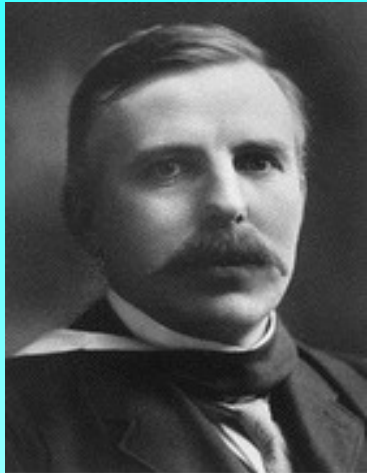
- Електрично заредена сфера
- Радиус  $\sim 10^{-8}$  cm
- Положителен електричен заряд
- Електрони с отрицателен електричен заряд в сферата



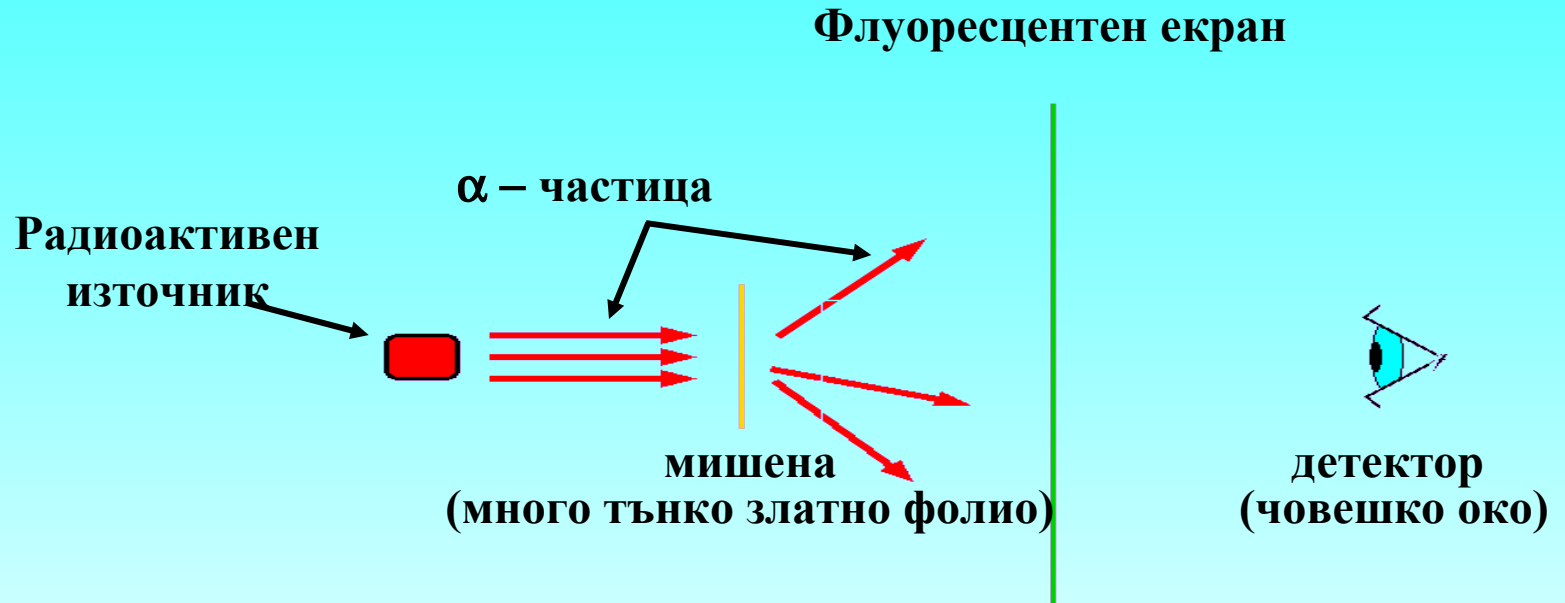


Henri Becquerel

## 1909 – 13: Опити на Ръдърфорд с разсейване Откриване на атомните ядра



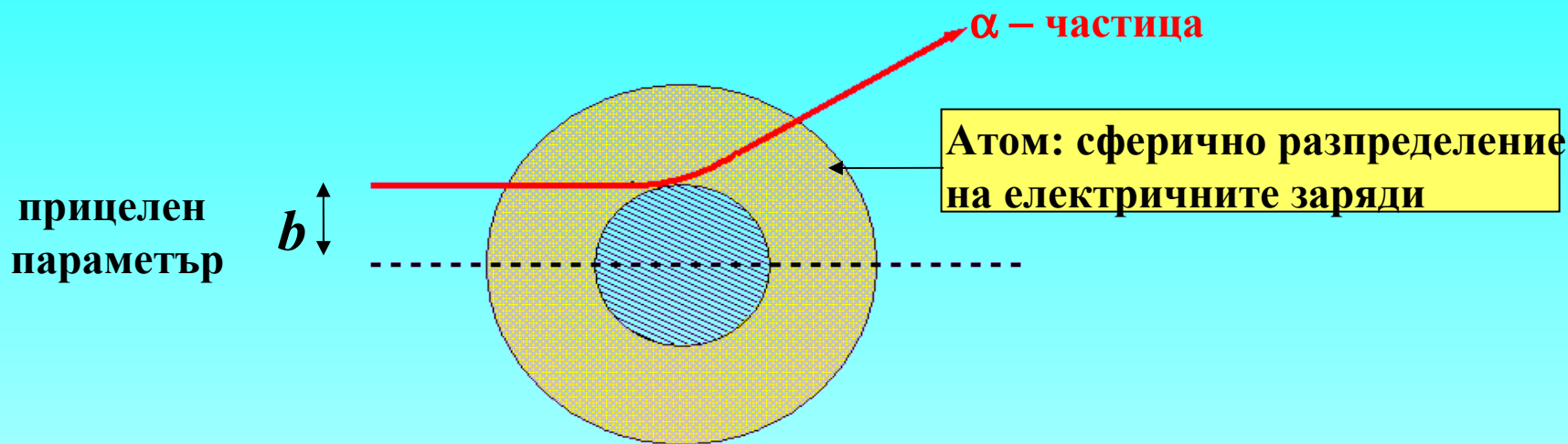
Ernest Rutherford



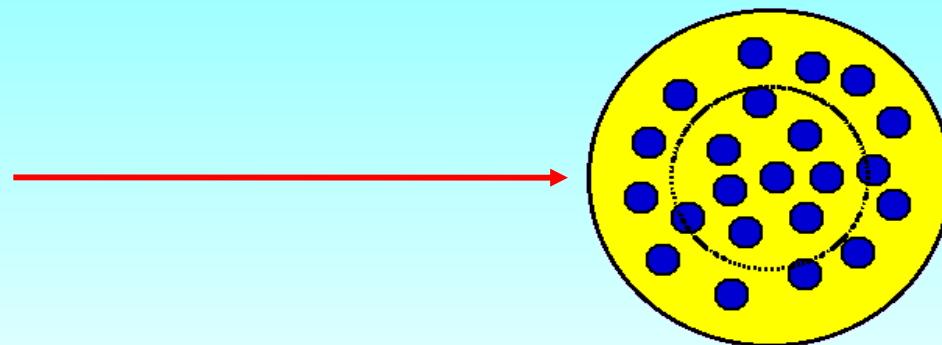
**$\alpha$  – частици: ядра на хелиеви атоми, спонтанно излъчени от тежки радиоактивни изотопи**

**Типична скорост на  $\alpha$  – частица  $\approx 0.05 c$  ( $c$  : скорост на светлината)**

При разсейването на  $\alpha$ -частици от атоми, доминира Кулоновото взаимодействие



Според модела на Томсън електричният заряд, който  $\alpha$ -частицата "вижда" е нула, независимо от прицелния параметър.

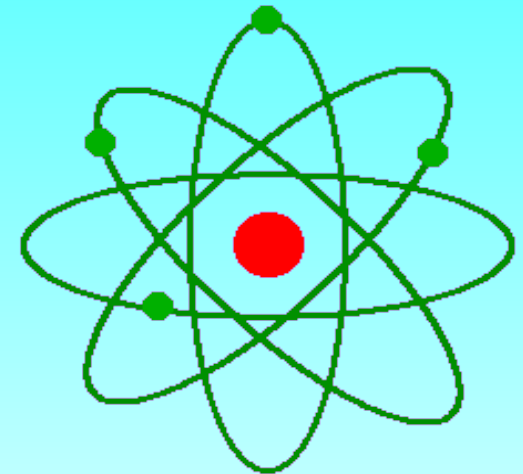


⇒ не се очаква значително разсейване на големи ъгли

Значително разсейване на  $\alpha$  – частици на големи ъгли, в съгласие с разсейването, очаквано за сфера с радиус  $\approx 10^{-13}$  cm и електричен заряд =  $Ze$ , където  $Z = 79$  (атомното число за злато) и  $e = |\text{заряд на електрона}|$



**Атомът се състои от положително заредено ядро заобиколено от облак електрони**



**Радиус на ядрото  $\approx 10^{-13}$  cm  $\approx 10^{-5}$  x радиус на атома**

**маса на ядрото  $\approx$  маса на атома (до 1‰)**

**Неутрон: частица с маса  $\approx$  масата на протона,  
но с нулев електричен заряд (Chadwick, 1932)**

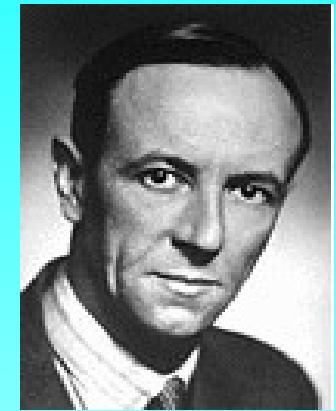
**Решение на проблема с ядрената структура:**

**Ядра с атомно число  $Z$  и масово число  $A$ :  
свързана система от  $Z$  протона и  $(A-Z)$  наутрона**

**Аномалия при азота: няма проблем ако спинът на нейтрона =  $\frac{1}{2}\hbar$**

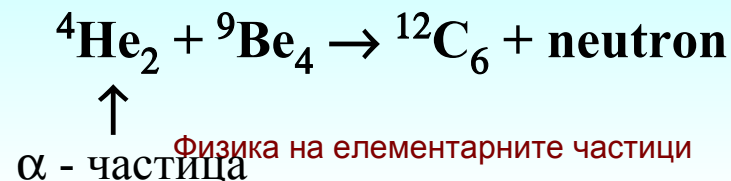
**Ядра на азот ( $A = 14, Z = 7$ ): 7 протона, 7 нейтрона = 14 частици  
със спин  $\frac{1}{2}$**

**$\Rightarrow$  пълният спин е цяло число**



**James Chadwick**

**Източник на нейтрони в експериментите на Chadwick: радиоактивен източник  
 $^{210}\text{Po}$  (5 MeV  $\alpha$  – частици) смесен с берилиев прах  $\Rightarrow$  излъчване на  
електрически неутрално лъчение, което може да премине няколко сантиметра в  
Pb:**



**В квантовата механика орбитите на електрона около ядрата се “квантуват”:**  
**само някои специфични орбити (характеризирани с цели квантови числа)**  
**са разрешени**

$$R_n = \frac{4\pi \epsilon_0 \hbar^2 n^2}{m_e e^2} \approx 0.53 \times 10^{-10} n^2 \text{ [m]}$$

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2(4\pi \epsilon_0)^2 \hbar^2 n^2} \approx -\frac{13.6}{n^2} \text{ [eV]}$$

$$\left( \begin{array}{l} m = m_e m_p / (m_e + m_p) \\ n = 1, 2, \dots \end{array} \right)$$

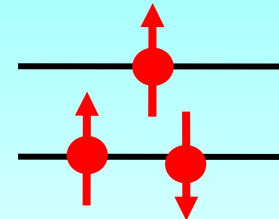
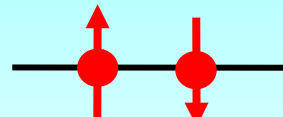
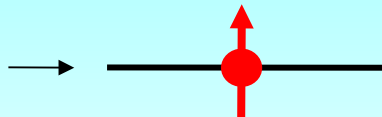
**В атоми със  $Z > 2$  има само два електрона на най-вътрешната орбита - ЗАЩО?**  
**ОТГОВОР (Pauli, 1925):** два електрона (спин =  $\frac{1}{2}$ ) никога не могат да бъдат в едно и също физично състояние

Водород ( $Z = 1$ )

Хелий ( $Z = 2$ )

Литий ( $Z = 3$ ) .....

Най-ниско енергетично състояние



Wolfgang Pauli

**Принципът на Паули се отнася за всички частици с полуцел спин (наричани фермиони)**



P.A.M. Dirac

Открита “теоретично” от by P.A.M. Dirac (1928)

Уравнение на Дирак: релативистко вълново уравнение за електрона

Два изненадващи резултата:

- Движение на електрон в електромагнитно поле: присъствие на член, описващ (за бавни електрони) потенциалната енергия на магнитния диполен момент в магнитно поле  
 $\Rightarrow$  съществуване на вътрешен магнитен диполен момент на електрона, противоположен на спина



$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 5.79 \times 10^{-5} \text{ [eV/T]}$$

За всяко решение на уравнението на Дирак с енергия на електрона  $E > 0$ , има и друго решение с  $E < 0$ .

**Какъв е физичният смисъл на решенията с “отрицателна енергия”?**





# Експериментално наблюдение на антиматерия



Carl D. Anderson

(C.D. Anderson, 1932)

**Измерване на импулса и електричния заряд на частицата от закривяването в магнитно поле**

**Детектор:** Уилсънова газова камера(детектор за пряко наблюдение, базиран на газов обем и пари, близки до насищане) в магнитно поле, изложена на космични лъчи.



**Проекцията на траекторията на частицата в равнина, перпендикулярна на  $B$ , е окръжност**

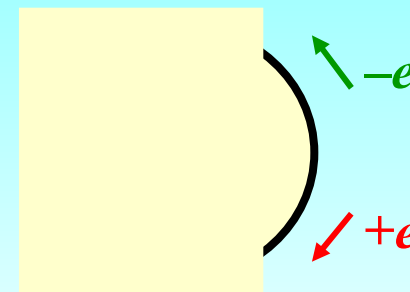
Лоренцова сила  $f = ev \times B$

Радиус на окръжността за електричен заряд  $|e|$ :

$p_{\perp}$  : компонента на импулса, перпендикулярна на посоката на магнитното поле

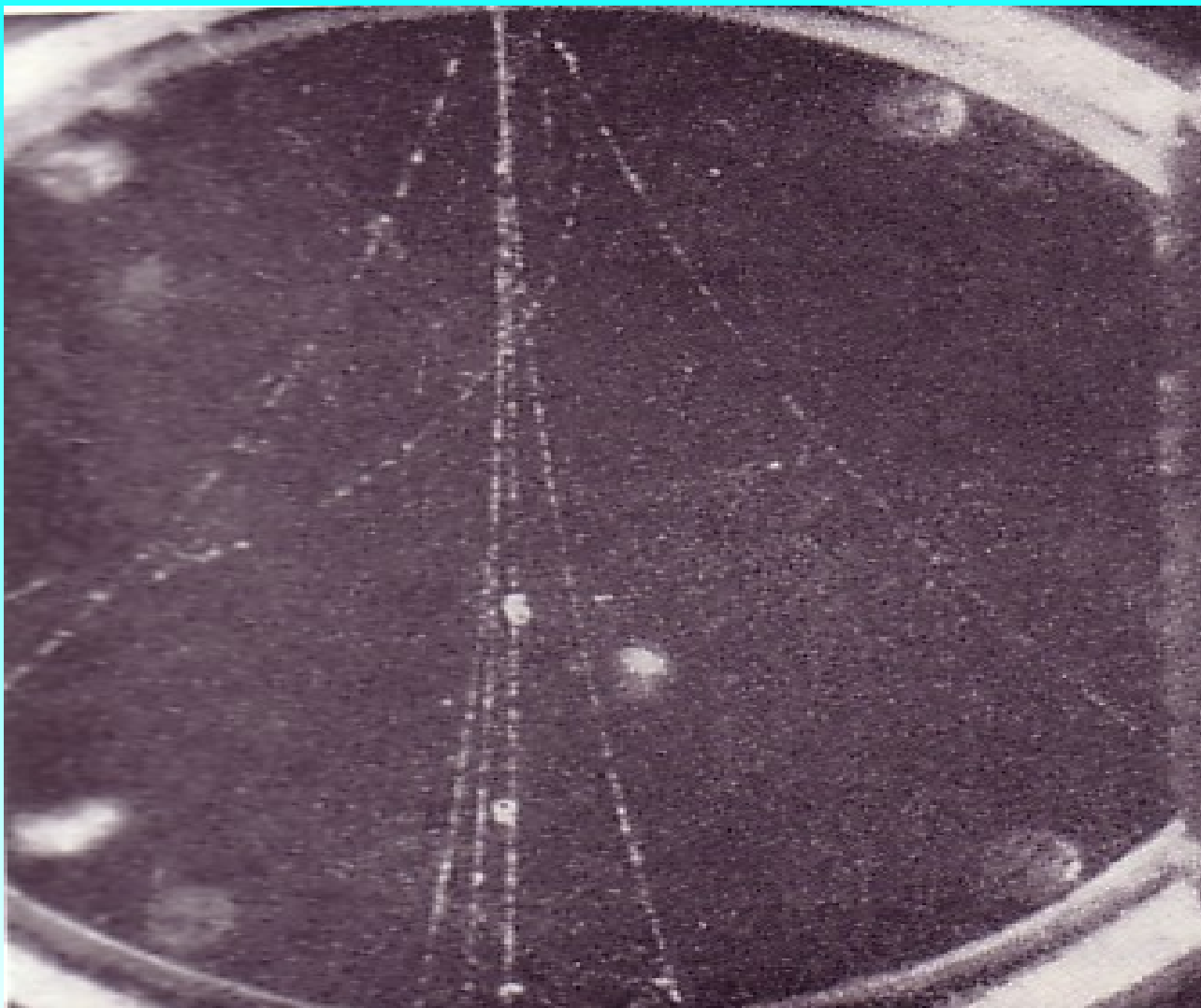
$$R [m] = \frac{10 p_{\perp} [GeV/c]}{3B [T]}$$

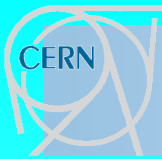
**Не е възможно да се отличат положително от отрицателно заредени частици, движещи се в противоположни посоки!**



**⇒ Необходимо е независимо определяне на посоката на движение на частицата**

# Експериментално потвърждение за антиматерията





## Декември, 1930: писмо от W. Pauli до среща на физиците в Tübingen

Zürich, Dec. 4, 1930

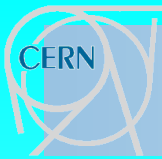
Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

...because of the “wrong” statistics of the N and  ${}^6\text{Li}$  nuclei and the continuous  $\beta$ -spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin  $\frac{1}{2}$  and obey the exclusion principle ..... The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous  $\beta$ -spectrum would then become understandable by the assumption that in  $\beta$ -decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and electron is constant.

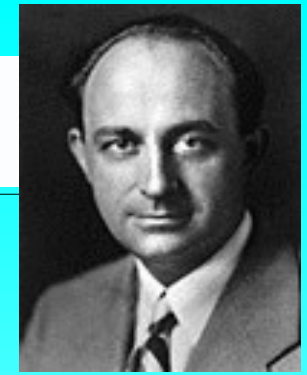
..... For the moment, however, I do not dare to publish anything on this idea .....

So, dear Radioactives, examine and judge it. Unfortunately I cannot appear in Tübingen personally, since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night of 6/7 December. ....

W. Pauli



# Теория на $\beta$ -разпада (V-A модел)



Enrico Fermi

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

$\beta^+$  разпад:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$  (напр.,  $^{14}\text{O}_8 \rightarrow ^{14}\text{N}_7 + e^+ + \nu$ )

$\nu$ : частицата, предложена от Паули

— (наречена “неутрино” от Ферми)

$\bar{\nu}$ : нейната античастица (антинейтрино)

(E. Fermi, 1932-33)

Теория на Ферми: взаимодействие в точка между четири частици със спин  $\frac{1}{2}$ , използва се математическият формализъм на операторите на раждане и унищожение, измислени от Jordan

$\Rightarrow$  частиците, излъчени при  $\beta$  – разпад не е необходимо да са съществували преди излъчването – те се “раждат” в момента на разпада

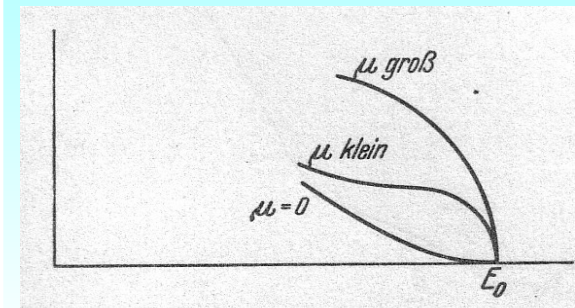
Предсказание за скоростите на  $\beta$  – разпада и енергетичния спектър на електрона като функция на само един параметър:

константата на Ферми  $G_F$  (определена експериментално)

**Зависимост на спектъра на енергията от масата на неутрино  $\mu$**

(от оригиналната статия на Ферми, публикувана на немски в German Zeitschrift für Physik, след отхвърляне на английската версия от Nature)

**Видимо изкривяване за  $\mu > 0$  близо до крайната точка ( $E_0$ : максимална позволена енергия за електрона)**



# Наблюдение на неутриното

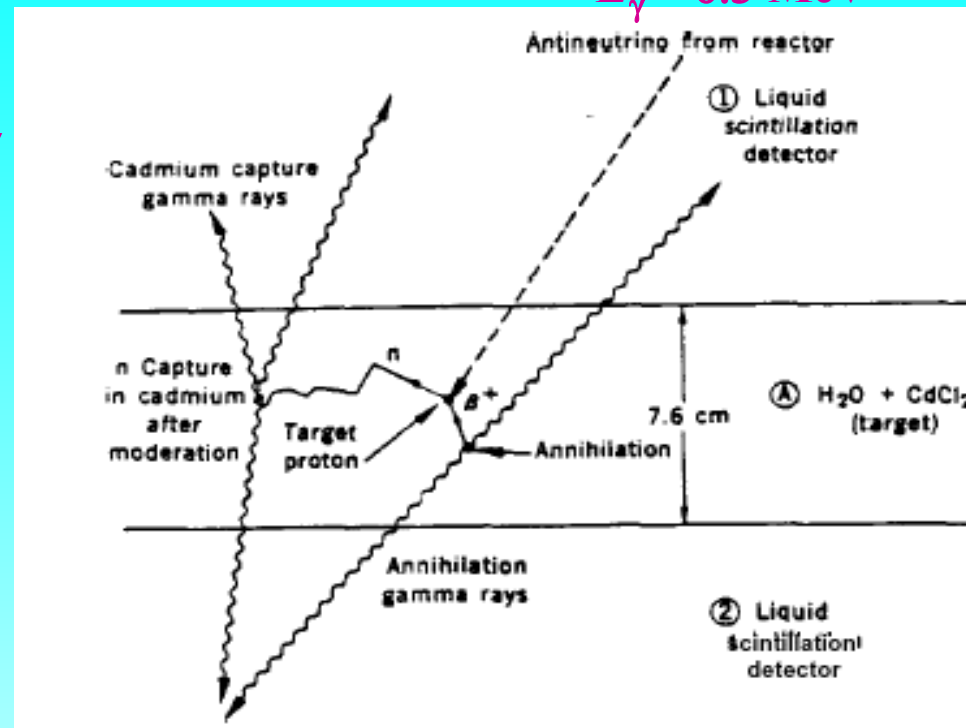


$$E_\gamma = 0.5 \text{ MeV}$$



■ детектират се 0.5 MeV  $\gamma$ -лъчи от  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  ( $t=0$ )

”термализация” на неутрона, следвана от захващане в ядро на Cd  $\Rightarrow$  излъчване на закъснели  $\gamma$ -лъчи (средно закъснение  $\sim 30 \mu\text{s}$ )



(Reines, Cowan 1953)

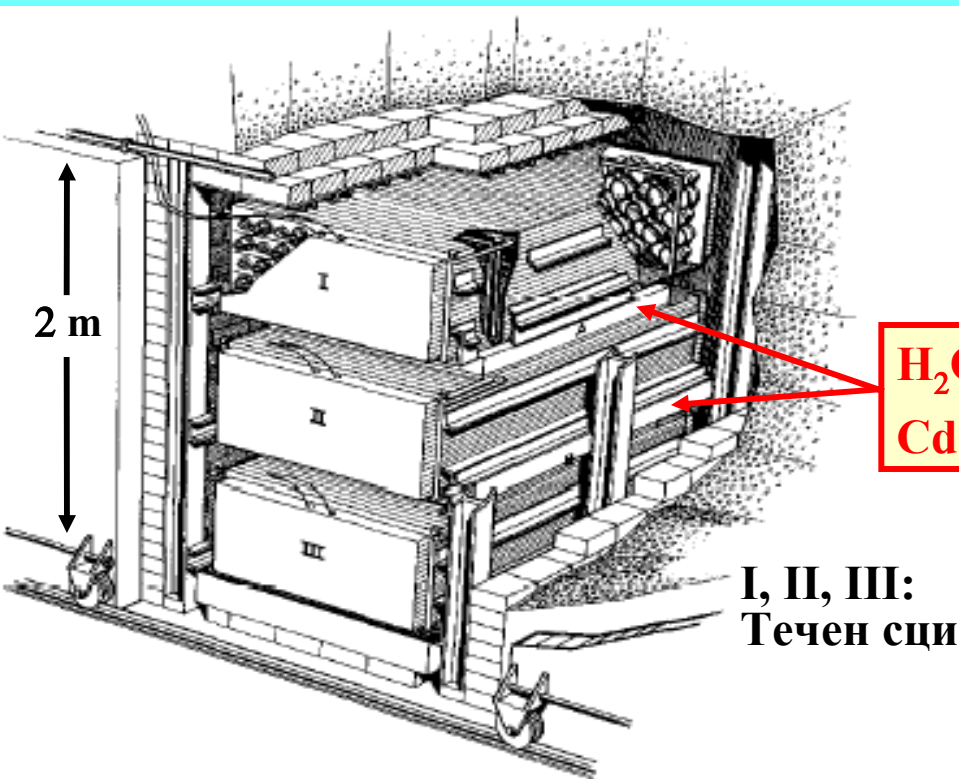
Честота на събитията в атомната електроцентрала в Savannah River :

$3.0 \pm 0.2$  събития / час

(след изваждане на събитията, измерени при изключен реактор)

**В СЪОТВЕТСТВИЕ С ОЧАКВАНИЯТА**

Sofia, April 2008



**H<sub>2</sub>O + CdCl<sub>2</sub>**

**I, II, III:  
Течен сцинтилатор**

оните частици

**Наблюдение на разпада  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  в ядрена емулсия, изложена на космични лъчи при голяма надморска височина**

**Във всички събития, мюонът има фиксирана кинетична енергия (4.1 MeV, съответстваща на пробег  $\sim 600 \mu\text{m}$  в ядрена емулсия)**

**$\Rightarrow$  двучастичен разпад**

$$m_{\pi} = 139.57 \text{ MeV}/c^2 ; \text{ спин} = 0$$

**Доминиращ канал на разпад:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$  (и  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$ )**

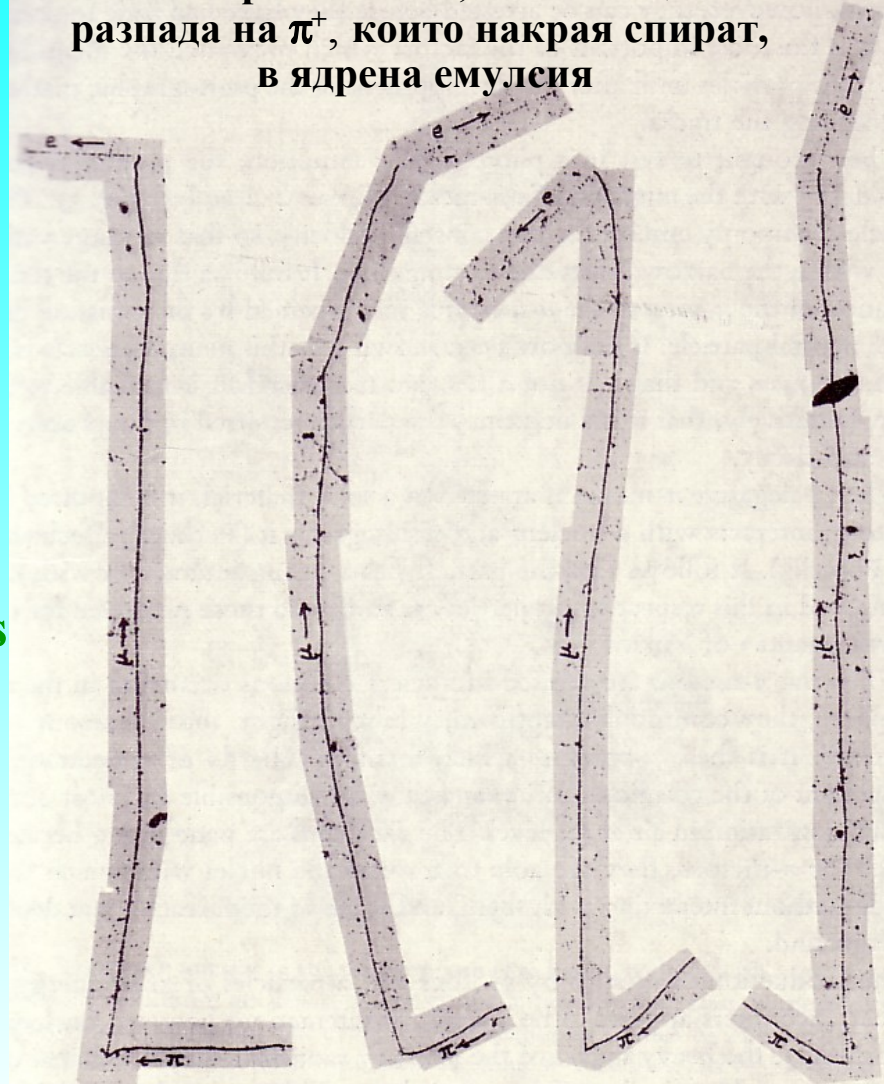
**Средно време на живот в покой:  $\tau_{\pi} = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$**

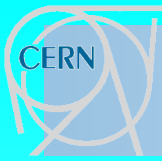
**Съществува и неутрален  $\pi$  – мезон ( $\pi^0$ ):**

**$m(\pi^0) = 134.98 \text{ MeV}/c^2$ , разпад:  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ , средно време на живот =  $8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$**

**$\pi$  – мезоните са най-изобилно ражданите частици в сблъсъците протон-протон и протон-ядро при високи енергии**

**Четири събития, показващи разпада на  $\pi^+$ , които накрая спират, в ядрена емулсия**





## Запазващи се квантови числа



Възможни канали на разпад на протона (позволени от всички познати закони за запазване: енергия и импулс, електричен заряд, ъглов момент):

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+$$

$$p \rightarrow \pi^0 + \mu^+$$

$$p \rightarrow \pi^+ + \nu$$

**Защо свободният протон е стабилен?**

До сега не е наблюдаван разпад на протона – протонът е **СТАБИЛНА** частица

Граница за средното време на живот на протона:  $\tau_p > 1.6 \times 10^{32}$  years

**Измисля се ново квантово число: “Барионно число”  $B$**

$B = 1$  за протон, неутрон

$B = -1$  за антипротон, антинейтрон

$B = 0$  за  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ , неутрино, мезони, фотони

**Изисква се запазване на барионното число във всички процеси:**

$$\sum_i B_i = \sum_f B_f$$

( $i$ : начално състояние на частицата;  $f$ : крайно състояние на частицата)



## Странност



**Края на 40-те години на ХХв.:** откриване на множество по-тежки мезони (K – мезони) и бариони (“хиперони”) – изучени подробно през 50-те години с новите протонни синхротрони с високи енергии (3 GeV “космотрон” в Brookhaven National Lab и 6 GeV Bevatron в Berkeley)

### Стойности за масите:

Мезони (спин = 0):  $m(K^\pm) = 493.68 \text{ MeV}/c^2$  ;  $m(K^0) = 497.67 \text{ MeV}/c^2$

Хиперони (спин =  $1/2$ ):  $m(\Lambda) = 1115.7 \text{ MeV}/c^2$  ;  $m(\Sigma^\pm) = 1189.4 \text{ MeV}/c^2$

$m(\Xi^0) = 1314.8 \text{ MeV}/c^2$ ;  $m(\Xi^-) = 1321.3 \text{ MeV}/c^2$

### Характеристики:

- Изобилно раждане в протон-ядро,  $\pi$  – ядро сблъсъци
- Сечение за раждане, типично за силните взаимодействия ( $\sigma > 10^{-27} \text{ cm}^2$ )
- Раждане в двойки (напр.:  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$  ;  $K^- + p \rightarrow \Xi^- + K^+$ )
- Разпад до по-леки частици със средни времена на живот  $10^{-8} - 10^{-10} \text{ s}$  (както се очаква за разпад под действие на слабото взаимодействие)

### Примери за канали на разпад

$K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$  ;  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$  ;  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$  ;  $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  ;  $K^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$  ; ...

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

$\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$  ;  $\Xi^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$



(Gell-Mann, Nakano, Nishijima, 1953)

▪ **Запазва се в силните взаимодействия**

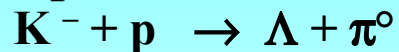
$$\sum_i S_i = \sum_f S_f$$

▪ **Не се запазва в слабите разпади:**

$$\left| S_i - \sum_f S_f \right| = 1$$

$S = +1$ :  $K^+$ ,  $K^0$ ;  $S = -1$ :  $\Lambda$ ,  $\Sigma^\pm$ ,  $\Sigma^0$ ;  $S = -2$ :  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ;  $S = 0$ : всички останали частици  
(и противоположна странност  $-S$  за съответните античастици)

Пример за спиране на  $K^-$  в течен водород:

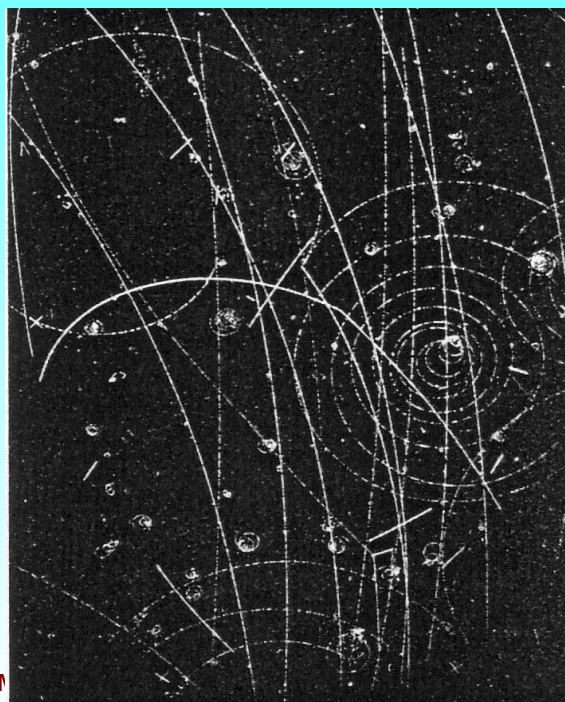


(странността се запазва)

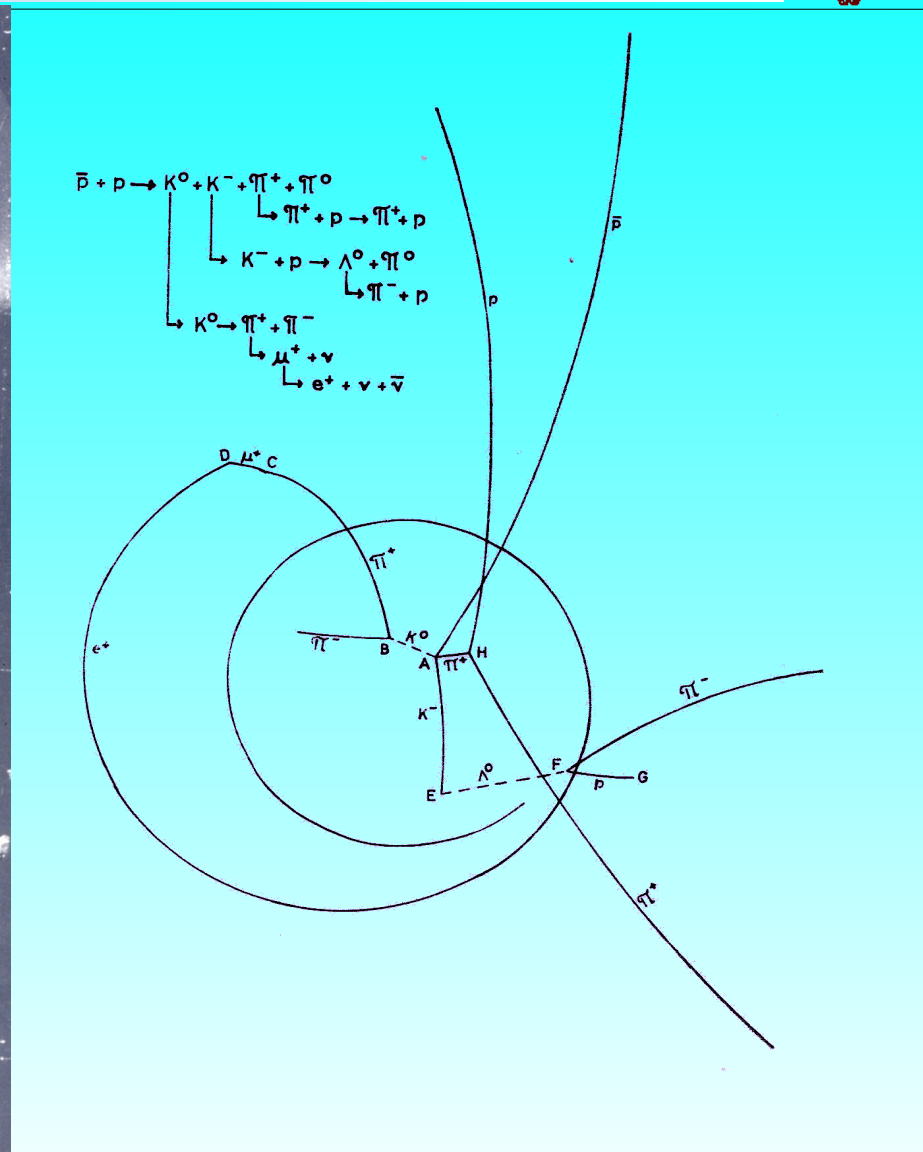
последвано от



(странността не се запазва)



# Открытие на антипротона



Загадка в края на 50-те години: отсъствието на разпади  $\mu \rightarrow e \gamma$

Експериментална граница:  $< 1$  в  $10^6$   $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu} \nu$  разпада

**Възможно решение: съществуването на ново запазващо се “мюонно” квантово число, отличаващо мюоните от електроните**

За да са разрешени разпадите  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu} \nu$ ,  $\bar{\nu}$  трябва да има “мюонно” квантово число, но не и  $\nu \Rightarrow$  в  $\mu^+$  разпада,  $\bar{\nu}$  не е античастицата  $\nu$

$\Rightarrow$  две различни неутрина ( $\nu_e, \nu_\mu$ ) в разпада  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$

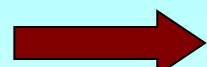
Следствие за разпадите на  $\pi$  – мезини:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  ;  $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

за да се запази “мюонното” квантово число

Протонни скорители с високи енергии: интензивни източници на  $\pi^\pm$  – мезони

$\Rightarrow \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$

Експериментален метод



Протонен сноп



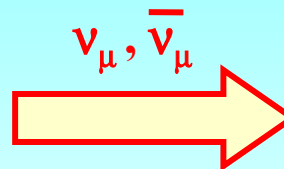
мишена



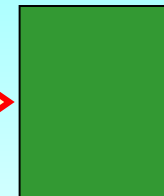
Област на разпад за  $\pi$



Преграда за спиране на всички други частици, вкл.  $\mu$  от разпад на  $\pi$



$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$



Детектор на неутрино

Ако  $\nu_\mu \neq \nu_e$ , при взаимодействия с  $\nu_\mu$  се ражда  $\mu^-$  а не  $e^-$  (напр.:  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$ )



# Кварков модел



Края на 50-те – началото на 60-те години: откриване на много силно взаимодействащи частици на протонните ускорители с високи енергии (Berkeley Bevatron, BNL AGS, CERN PS), всички с много малки средни времена на живот ( $10^{-20} - 10^{-23}$  s, типично за силни разпади)

⇒ каталог на > 100 силно взаимодействащи частици (наречани “адрони”)

## АДРОНИТЕ ЕЛЕМЕНТАРНИ ЧАСТИЦИ ЛИ СА?

1964 (Gell-Mann, Zweig): Класификация на адроните в “поколения”; наблюдава се, че всички адрони могат да бъдат изградени от три “градивни блокчета” със спин  $1/2$  (наречени “кварки” от Gell-Mann):

	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>s</i>
Електричен заряд (в единици $ e $ )	$+2/3$	$-1/3$	$-1/3$
Барионно число	$1/3$	$1/3$	$1/3$
Странност	$0$	$0$	$-1$

и три антикварки ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ ) с противоположни ел.заряд,  
барионно число и странност

## Мезони: кварк-антикваркови двойки

Примери за не-странни мезони:

$$\pi^+ \equiv u\bar{d} \quad ; \quad \pi^- \equiv \bar{u}d \quad ; \quad \pi^0 \equiv (d\bar{d} - u\bar{u})/\sqrt{2}$$

Примери за странни мезони:

$$K^- \equiv s\bar{u} \quad ; \quad \bar{K}^0 \equiv s\bar{d} \quad ; \quad K^+ \equiv \bar{s}u \quad ; \quad K^0 \equiv \bar{s}d$$

## Бариони: три кварка, свързани заедно

## Антибариони: три антикварка, свързани заедно

Примери за не-странни бариони:

$$\text{proton} \equiv uud \quad ; \quad \text{neutron} \equiv udd$$

Примери за бариони със странност -1:

$$\Sigma^+ \equiv suu \quad ; \quad \Sigma^0 \equiv sud \quad ; \quad \Sigma^- \equiv sdd$$

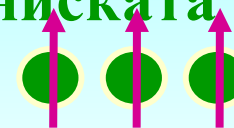
Примери за бариони със странност -2:

$$\Xi^0 \equiv ssu \quad ; \quad \Xi^- \equiv ssd$$

## “Декуплетът” на бариони със спин 3/2

<u>Странност</u>					<u>Маса (MeV/c<sup>2</sup>)</u>
0	$N^{*++}$ <i>uuu</i>	$N^{*+}$ <i>uud</i>	$N^{*0}$ <i>udd</i>	$N^{*-}$ <i>ddd</i>	1232
-1	$\Sigma^{*+}$ <i>suu</i>	$\Sigma^{*0}$ <i>sud</i>	$\Sigma^{*-}$ <i>sdd</i>		1384
-2		$\Xi^{*0}$ <i>ssu</i>	$\Xi^{*-}$ <i>ssd</i>		1533
-3		$\Omega^{-}$ <i>sss</i>			1672 (предсказано)

$\Omega^{-}$ : свързаното състояние на три *s* – кварка с най-ниската маса с пълен ъглов момент = 3/2  $\Rightarrow$



**принципът на Паули изисква трите кварка да не са идентични**

**Първото  $\Omega^-$  събитие (наблюдавано в двуметровата мехурчеста камера с течен водород в BNL, използваща 5 GeV/c сноп от  $K^-$  от 30 GeV AGS)**

Верига от събития на фигурата:

$K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^0$   
(странността се запазва)

$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$   
( $\Delta S = 1$  слаб разпад)

$\Xi^0 \rightarrow \pi^0 + \Lambda$   
( $\Delta S = 1$  слаб разпад)

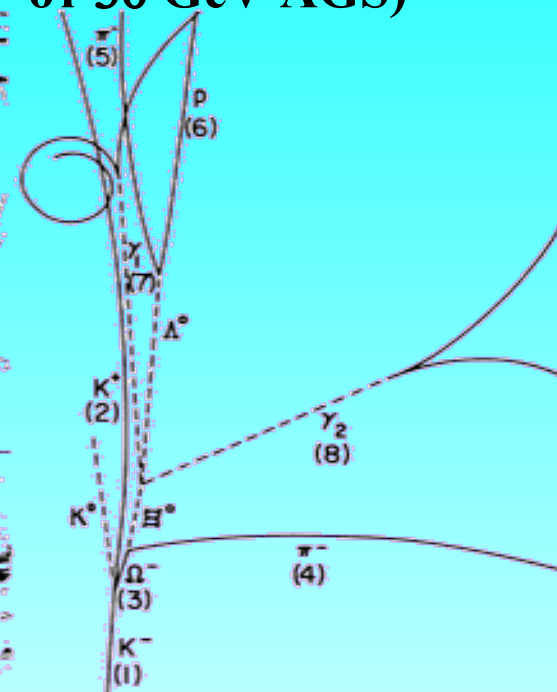
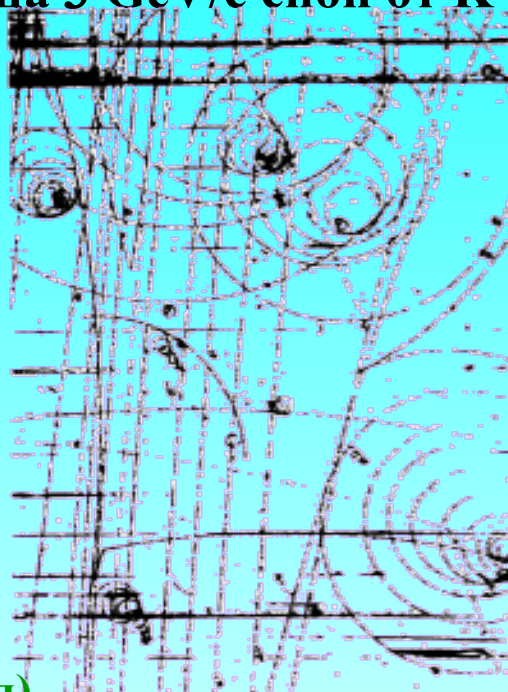
$\Lambda \rightarrow \pi^- + p$   
( $\Delta S = 1$  слаб разпад)

$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  (електромагнитен разпад)

двата  $\gamma$ -кванта преминават в  $e^+e^-$  в течен водород

(много сполучливо събитие, защото средният свободен пробег за  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  в течен водород е  $\sim 10$  m)

**Масата на  $\Omega^-$ , измерена от това събитие =  $1686 \pm 12$  MeV/c<sup>2</sup>**



# Дълбоко нееластично разсейване

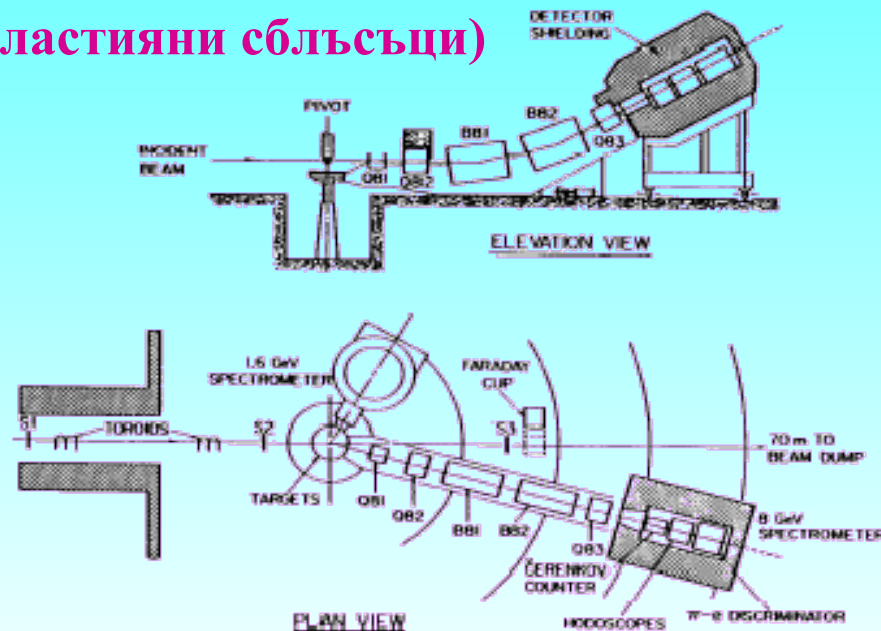
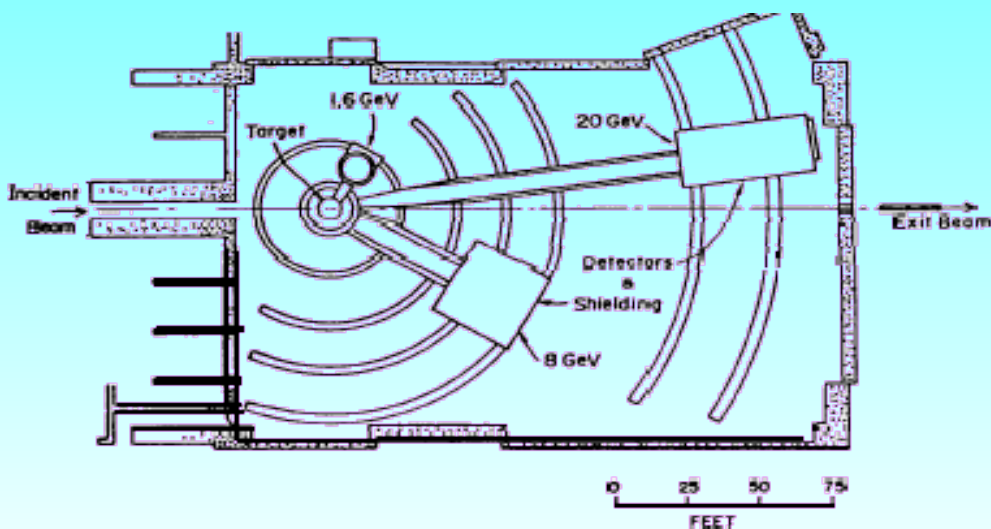
**Електрон-протонно разсейване, използващо 20 GeV електронен сноп от дългия две мили линеен ускорител в Stanford (1968 – 69).**

**Съвременната версия на оригиналния ексеримент на Ръдърфорд:**

**разделителна способност  $\approx$  дължината на вълната за 20 GeV електрон  $\approx 10^{-15}$  cm**

**Три магнитни спектрометра за детектиране на разсеяния електрон:**

- 20 GeV спектрометър (изследва еластично разсейване  $e^- + p \rightarrow e^- + p$ )
- 8 GeV спектрометър(изследва нееластично разсейване  $e^- + p \rightarrow e^- + \text{hadrons}$ )
- 1.6 GeV спектрометър (изучава свръх нееластияни сблъсъци)





Еластично разсейване на електрони от точков заряд  $|e|$  при високи енергии:  
диференциално сечение в система център на масите (формула на Mott)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 (\hbar c)^2 \cos^2(\theta/2)}{8E^2 \sin^4(\theta/2)} \equiv \sigma_M \quad \left( \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \right)$$

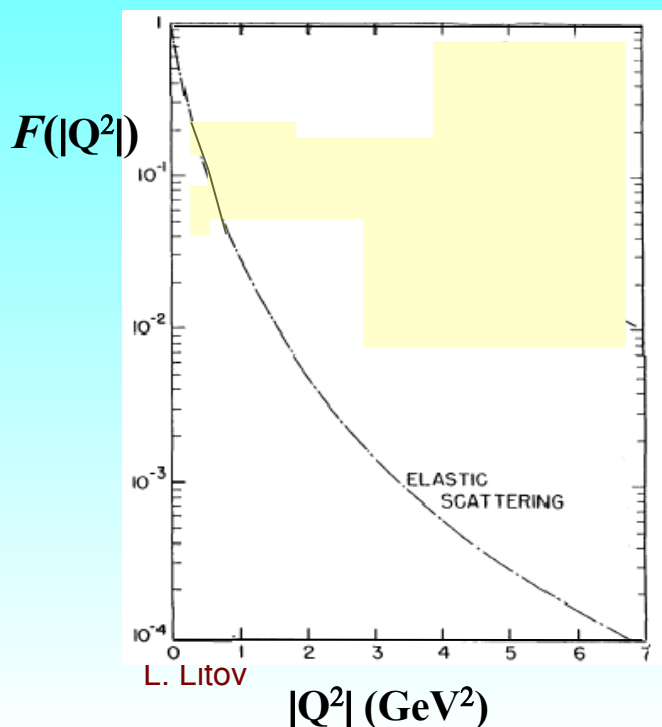
Разсейване от не-точково зарядово разпределение:  $\sigma_M$  се умножава на  
“формфактор”:

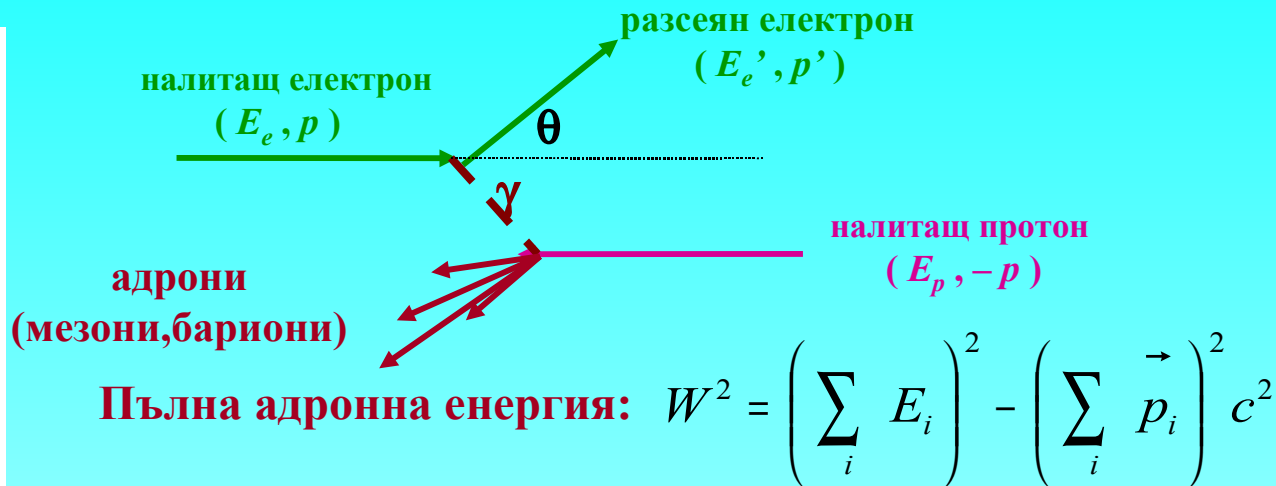
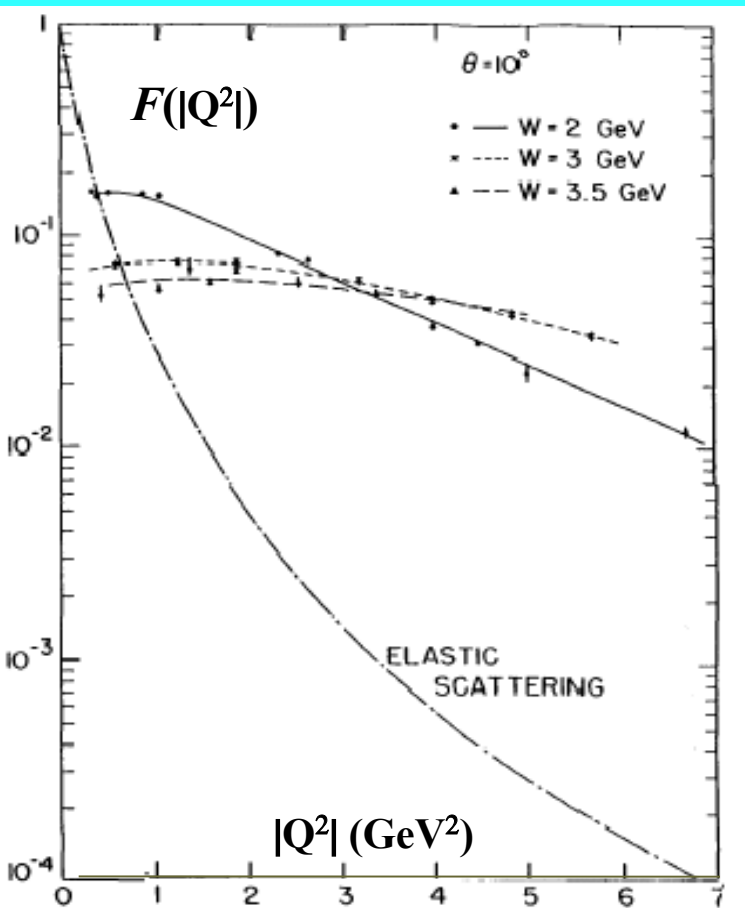
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = F(|Q^2|) \sigma_M$$

$|Q| = \hbar / D$  : маса на обменения виртуален фотон  
 $D$  : линеен размер на областта от мишената,  
 допринасяща за разсейването  
 Увеличавайки  $|Q| \Rightarrow$  намалява се електричният  
 заряд на мишената

$F(|Q^2|) = 1$  за точкова частица

$\Rightarrow$  протонът не е точкова частица





**За дълбоко нееластични сблъсъци, сечението зависи слабо от  $|Q^2|$ , говорещо за сблъсък с ТОЧКОВ обект**

**Дълбоко нееластичните електрон-протон сблъсъци са еластични сблъсъци с точкови, електрически зарядени, със спин  $1/2$  съставни части на протона, носещи част  $x$  от импулса на налитащия протон**

Всяка съставна част се описва с електричния ѝ заряд  $e_i$  (в единици  $|e|$ )

и с неговото разпределение  $x$  ( $dN_i/dx$ ) (“структурна функция”)

Ако тези съставни са  $u$  и  $d$  кварките, тогава дълбоко-нееластичните  $e - p$  сблъсъци дават информация за специфична комбинация на структурни функции:

$$\left( \frac{dN}{dx} \right)_{e-p} = e_u^2 \frac{dN_u}{dx} + e_d^2 \frac{dN_d}{dx}$$

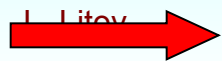
Сравнение на  $\nu_\mu - p$  и  $\bar{\nu}_\mu - p$  дълбоко нееластични сблъсъци при високи енергии при предположението, че тези сблъсъци са също и еластично разсейване от кварки

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{hadrons} : \quad \bar{\nu}_\mu + d \rightarrow \mu^- + u \quad (\text{зависи от } dN_d/dx)$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \text{hadrons} : \quad \nu_\mu + u \rightarrow \mu^+ + d \quad (\text{зависи от } dN_u/dx)$$

(Взаимодействията на неутрино не зависят от електричния заряд)

Всички експериментални резултати за дълбоки нееластични  $e - p$ ,  $\nu_\mu - p$ ,  $\bar{\nu}_\mu - p$  сблъсъци се съгласуват с  $e_u^2 = 4/9$  и  $e_d^2 = 1/9$



съставните на протона са кварките

Проблем с  
барион  
 $J=3/2$

$$\Delta^{++} \Rightarrow u \uparrow u \uparrow u \uparrow$$

Той има симетрична вълнова функция, но е фермион.  
Противоречие с принципа на Паули –  
вълновата функция трябва да е антисиметрична  
Решението – ново квантово число - цвят

$$N_c = 3 \quad q^\alpha, \quad \alpha = 1, 2, 3$$

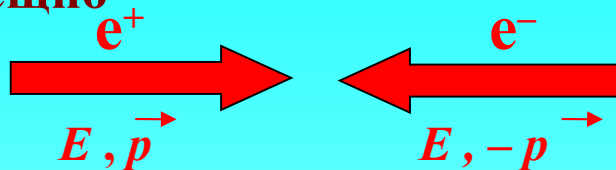
Тогава

$$\Delta^{++} = \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} u_\alpha \uparrow u_\beta \uparrow u_\gamma \uparrow$$

В общия случай

$$B = \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma} |q_\alpha q_\beta q_\gamma \rangle \quad M = \frac{1}{\sqrt{3}} \delta^{\alpha\beta} |q_\alpha \bar{q}_\beta \rangle$$

Два снопа с противоположни посоки в един и същ магнитен пръстен, сблъскващи се насрещно



Процес в две стъпки:  $e^+ + e^- \rightarrow$  виртуален фотон  $\rightarrow f + \bar{f}$

$f$ : произволна заредена елементарна частица със спин  $1/2$  ( $\mu$ , кварк)

(изключва се  $e^+e^-$  еластично разсейване)

Енергия и импулс на виртуалния фотон:  $E_\gamma = 2E, p_\gamma = 0 \Rightarrow Q^2 = E_\gamma^2 - p_\gamma^2 c^2 = 4E^2$

Сечение за  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ :

$$\alpha = e^2/(\hbar c) \approx 1/137$$

$e_f$ : електричен заряд на  $f$  (в  $|e|$ )

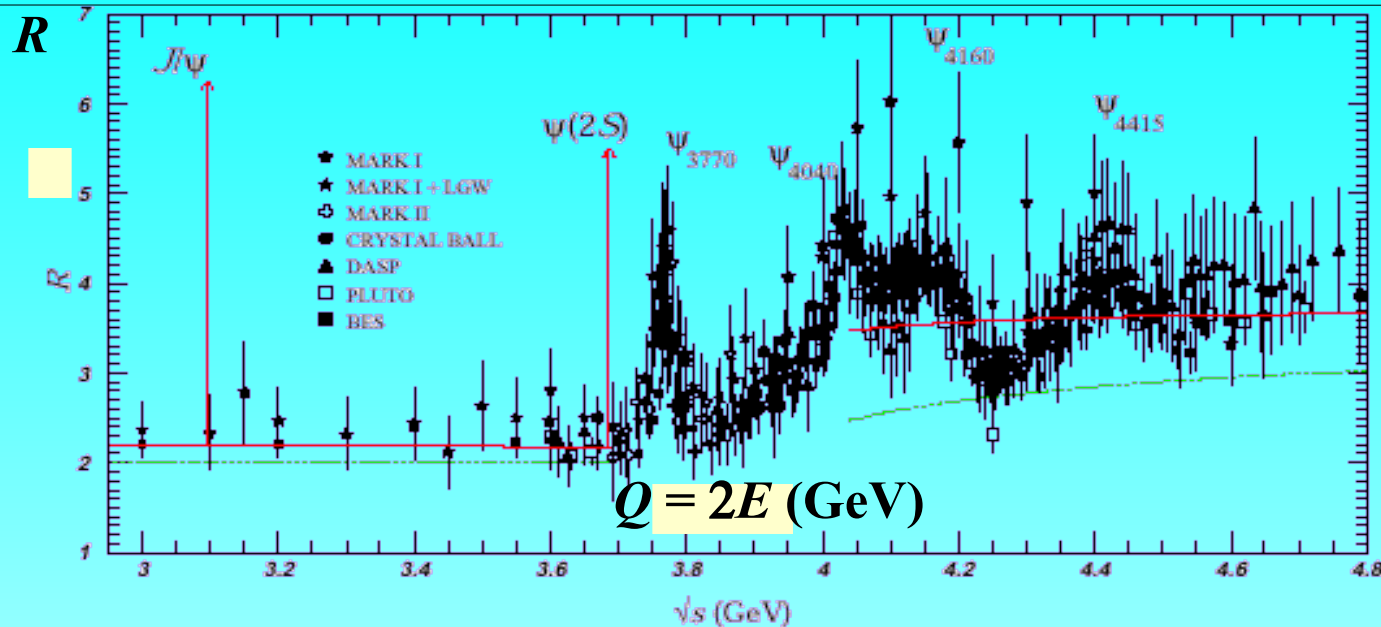
$\beta = v/c$  за излитащата частица  $f$

$$\sigma = \frac{2\pi \alpha^2 \hbar^2 c^2}{3Q^2} e_f^2 \beta (3 - \beta)$$

(точно потвърдена формула за  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )

Допускане:  $e^+e^- \rightarrow$  кварк ( $q$ ) + антикварк ( $\bar{q}$ )  $\rightarrow$  адрони  
 $\Rightarrow$  при енергии  $E \gg m_q c^2$  (за  $q = u, d, s$ )  $\beta \approx 1$ :

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = e_u^2 + e_d^2 + e_s^2 = \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} = \frac{2}{3}$$



▪ За  $Q < 3.6 \text{ GeV}$   $R \approx 2$ . Ако всеки кварк съществува в три различни състояния,  $R \approx 2$  е в съответствие с  $3 \times (2/3)$ . Това би решило проблема с  $\Omega^-$ .

▪ Между 3 и 4.5 GeV, върховете и структурите се дължат на раждането на кварк-антикварк свързани състояния и резонанси на четвърти кварк (“charm”, c) с електричен заряд  $+2/3$

▪ Над 4.6 GeV  $R \approx 4.3$ . Освен  $R \approx 2$  (от  $u, d, s$ ) +  $3 \times (4/9) = 3.3$  от добавянето на c кварка. Данните предполагат раждане на допълнителна елементарна частица със спин  $1/2$  и електричен заряд = 1 (по-късно определена като  $\tau$  – лептон) (без силно взаимодействие) с маса  $\approx 1777 \text{ MeV}/c^2$ .

## Leptons

	Electric Charge		Electric Charge
Tau	-1	Tau Neutrino	0
Muon	-1	Muon Neutrino	0
Electron	-1	Electron Neutrino	0

## Quarks

	Electric Charge		Electric Charge
Bottom	-1/3	Top	2/3
Strange	-1/3	Charm	2/3
Down	-1/3	Up	2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

*The particle drawings are simple artistic representations*