

# INTRODUKTION TILL PARTIKELFYSIK

## Från atomer till kvarkar

En elementär historisk översikt av begrepp, upptäckter  
och vad som därigenom uppnåtts

En föreläsning för svenska gymnasieelever  
juni 2018

Redigerade av Göran Tranströmer

## Göran Tranströmer

Urstockholmare men ändå “allsvensk”

Civilingenjör teknisk fysik, Chalmers

Ph. D. från Lund

Lektor på KTH

Verksam (deltid) på CERN 1991-2011

## Kerstin Francke

Uppvuxen i Luleå

Civilingenjör teknisk fysik, KTH

Arbetat på Ericsson 1990-2003

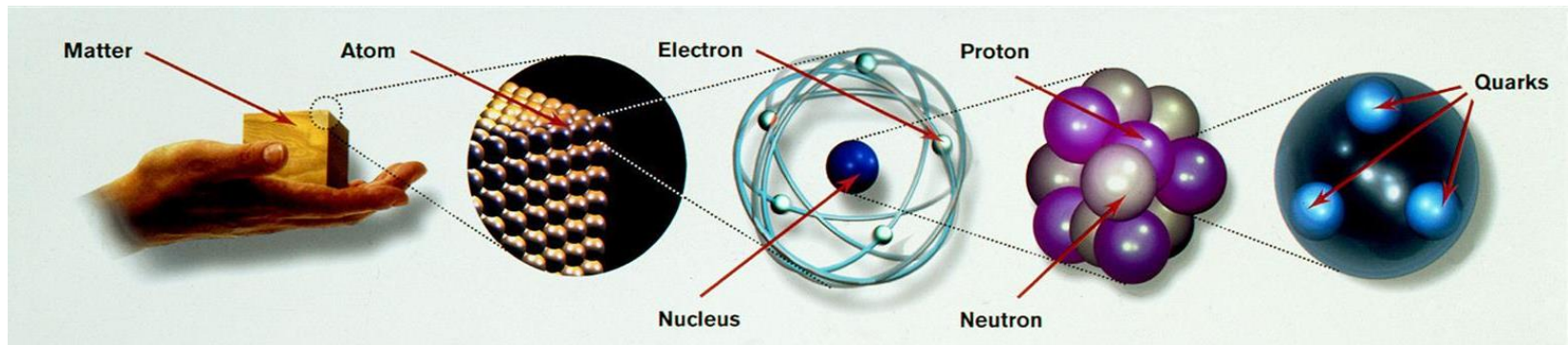
Arbetat på CERN 1992

Matte och fysiklärare på Blackebergs  
gymnasium i Bromma sedan 2005

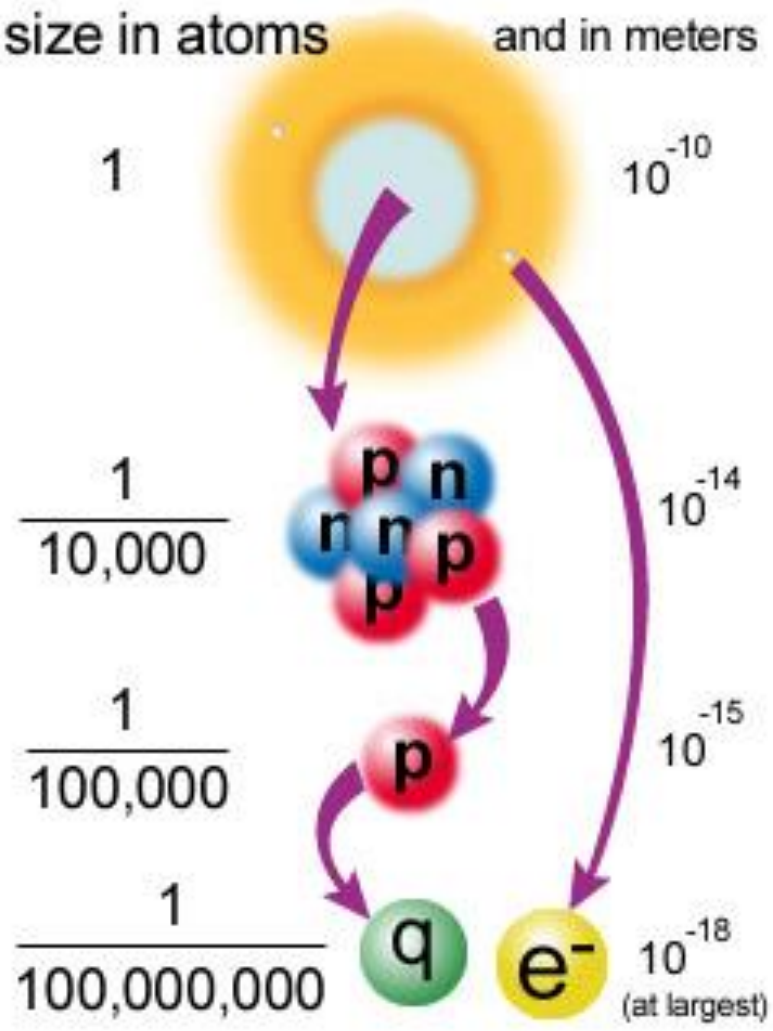
# Varför dagens föreläsning verkligen skall vara elementär

- Introduction to Experiments by Hans Danielsson
- Introduction to Accelerators by Roderik Bruce
- Why do we do particle physics research?  
by Tord Ekelöf
- Hunting Higgs by Tord Ekelöf
- Cosmology and antimatter by Michael Doser

# Vad består universum av?



size in atoms and in meters



# Atom

Demokritos (400 f. Kr.)

- Egentligen Leukippos (Demokritos lärare)
- Atomer – elementarpartiklar
- Allt är uppbyggt av tomhet eller av atomer

# De “elementära partiklarna” kring år 1900

Atomer av de 92 grundämnena:

1. Väte                      Massan av en väteatom  $M_H$   
 $\approx 1,7 \times 10^{-27}$  kg

2. Helium

3. Litium

.....

.....

92. Uran                      Massan  $\approx 238 M_H$

# Kvanttal

- Det finns fyra kvanttal som bestämmer en elektrons tillstånd i väteatomen (Impuls sidan 280)
- Huvudkvanttalet  $n = 1, 2, 3, \dots$
- Bankvanttalet  $l = 0, 1, 2, \dots (n - 1)$
- Magnetiska kvanttalet  $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$
- Spinnkvanttalet  $m_s = \pm \frac{1}{2}$



# Pauliprincipen

I kvantmekaniken är elektronens banor kring kärnan “kvantiserade”:  
**bara vissa specifika banor (karakteriserade av ett heltaligt kvanttal) är möjliga.**

**Exempel: tillåtna banradier och energier för väteatomens elektron**

$$R_n = \frac{4\pi\epsilon_0\eta^2 n^2}{me^2} \approx 0,53 \times 10^{-10} n^2 \text{ [m]}$$

$$E_n = -\frac{me^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \eta^2 n^2} \approx -\frac{13,6}{n^2} \text{ [eV]}$$

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

**I atomer med  $Z > 2$  finns bara två elektroner i den innersta banan – Varför?**

**SVAR (Pauli, 1925): två elektroner (spinn =  $1/2$ ) kan aldrig befinna sig i samma fysikaliska tillstånd**



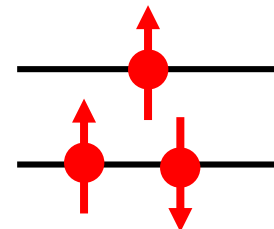
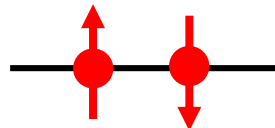
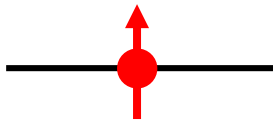
Wolfgang Pauli

Väte ( $Z = 1$ )

Helium ( $Z = 2$ )

Litium ( $Z = 3$ )

Lägsta energi  
tillståndet →



**Pauliprincipen gäller alla partiklar med halvtaligt spinn (kollektivt kallade fermioner)**

# Uppskattning av en typisk atomradie

Antal atomer/cm<sup>3</sup>:  $n = \frac{N_A}{A} \rho$        $N_A \approx 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (Avogadros tal)  
A: molmassan  
 $\rho$ : täthet

Atomens volym:  $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

Packningsgrad:  $f \approx 0.52 \text{ — } 0.74$

$$R = \left( \frac{3f}{4\pi n} \right)^{1/3}$$

**Exempel: Järn ( $A = 55,85 \text{ g}$ ;  $\rho = 7,87 \text{ g cm}^{-3}$ )**  
 **$R = (1,1 \text{ — } 1,3) \times 10^{-10} \text{ m}$**

# Upptäckten av en subatomär partikel: elektronen (1897)



**J.J. Thomson**

Studium av “katodstrålar” som var en elektrisk ström i rör vid mycket lågt tryck

Mätningar av elektronmassan:  $m_e \approx M_H/1836$

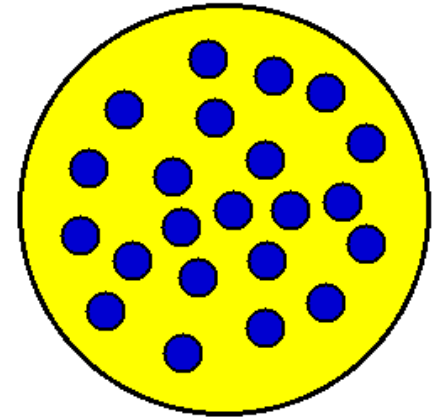
“Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen?” (J.J. Thomson)

- ATOMER ÄR INTE ELEMENTÄRA

# Plum Pudding Model

Thomsons atommodell:

- Elektriskt laddad sfär
- Radie  $\sim 10^{-10}$  m
- Positivt elektriskt laddad
- Elektroner (med negativ elektrisk laddning) var inbäddade i sfären



# Enheter inom partikelfysik

## Energi

### 1 elektronvolt (eV):

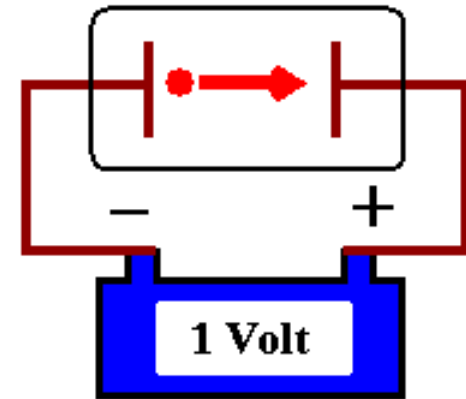
En partikels energi med elektrisk laddning =  $|e|$ ,  
som från början var i vila, efter att ha  
accelererats i en elektrostatisk potential = 1 Volt  
( $e = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ As}$ )

$$1 \text{ eV} = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### Multiplar:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} ; & 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} ; & 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} \end{array}$$

$$\text{Energien av en proton in LHC: } 7 \text{ TeV} = 1,12 \times 10^{-6} \text{ J}$$

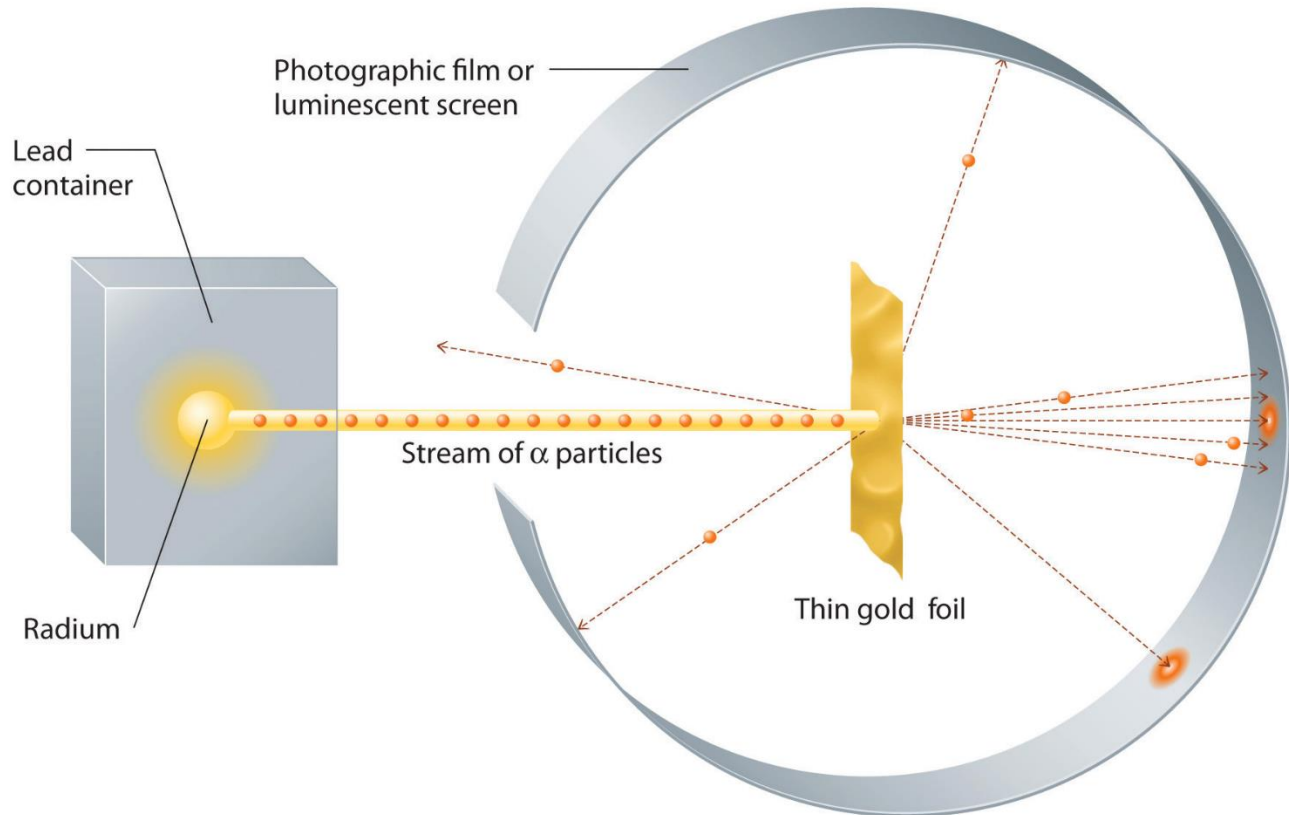


# 1909 – 13: Rutherfords spridningsexperiment

## Upptäckten av atomkärnan

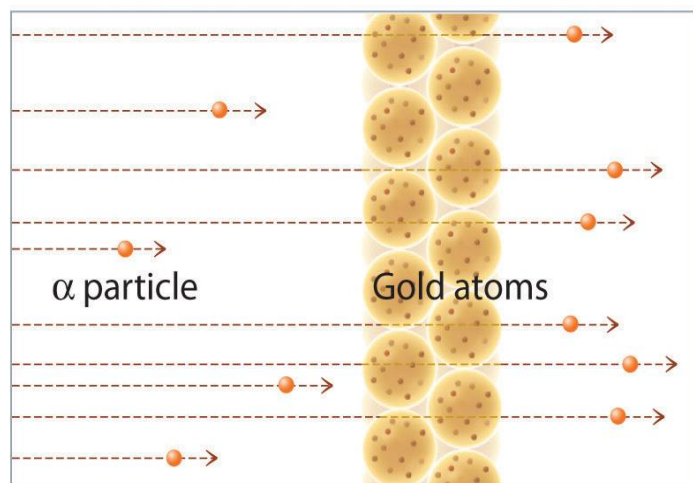


**Ernest Rutherford**



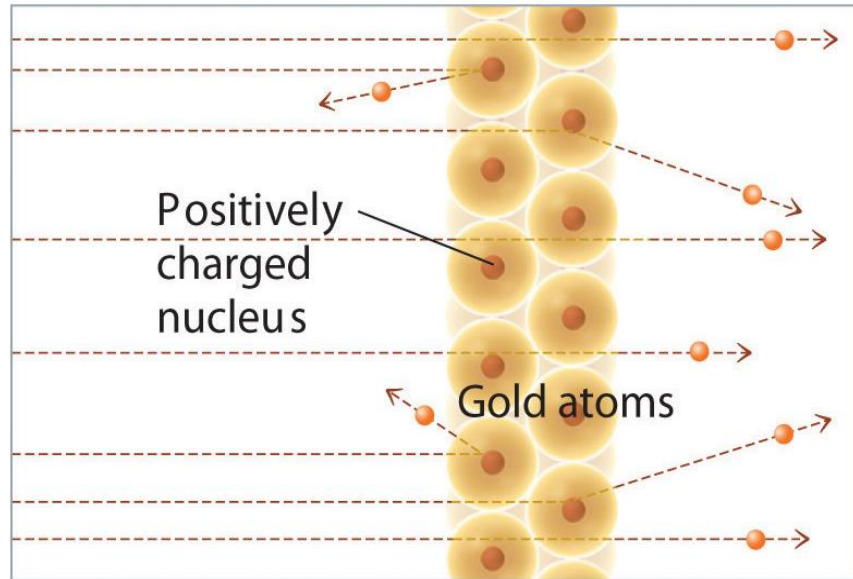
**$\alpha$ -partiklar** : Kärnor av heliumatomer som sänds ut spontant av tunga radioaktiva isotoper med typiska kinetiska energier mellan 4-10 MeV som ger typiska partikelhastigheter gör  $\alpha$ -partikeleln av  $0.05c$  ( $c$  : ljushastigheten i vakuum)

# Vad förväntade man sig?



För Thomsons atommodell är den elektriska laddningen som “ses” av  $\alpha$ -partikeln noll, så man förväntade sig därför att det inte skulle bli någon större spridning från infallsvinkeln (vinkelrätt infall)

# Vad man såg

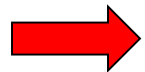


Med Rutherfords egna ord "It was quite the most incredible event that ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you had fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you."

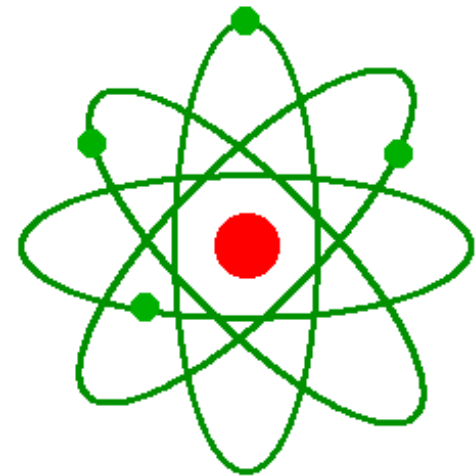


# Rutherfords observation:

Signifikant spridning av  $\alpha$ -partiklar vid stora vinklar, förenligt med en spridning förväntad för en sfär med radie  $\approx$  några  $\times 10^{-15}$  m och med en elektrisk laddning  $= Ze$ , där  $Z = 79$  (atomnumret för guld) och  $e = |\text{elektronladdningen}|$



**En atom består av en positivt laddad kärna omgiven av ett moln av elektroner**



**Kärnans radie  $\approx 10^{-15}$  m  $\approx 10^{-5}$  x atomens radie**

**Kärnans massa  $\approx$  atommassan (på 1‰ när)**

# De första ideerna om kärnans struktur (före 1932)

Observationer:

Massvärdena av lätta kärnor  $\approx$  multiplar av protonmassa

$\beta$ -sönderfall: spontant utsändande av elektroner från vissa radioaktiva kärnor

Hypotes:

Atomkärnan är ett system av protoner och elektroner, starkt bundna till varandra

Atomkärnan med atomnummer  $Z$  och masstal  $A$ :  
ett bundet system av  $A$  protoner and  $(A - Z)$  elektroner.

Kärnans totala elektriska laddning  $= [A - (A - Z)]e = Z e$

# Problem med denna modell?

Elektronen och protonens spinn =  $\frac{1}{2}\hbar$  (uppmätt)

Kvävekärnan ( $A = 14$ ,  $Z = 7$ ):

14 protoner + 7 elektroner = 21 spinn  $\frac{1}{2}$  partiklar

TOTALA SPINNET MÅSTE FÅ  
HALVTALSVÄRDEN

men kvävekärnans uppmätta spinn =  $1\hbar$  !

# UPPTÄCKTEN AV NEUTRONEN (1932)

Neutron: en partikel med en massa  $\approx$  protonmassan  
men utan elektrisk laddning

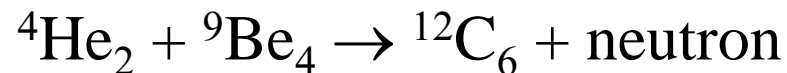
Lösningen på problemet med kärnans struktur:

En kärna med atomnummer  $Z$  och masstal  $A$ :  
ett bundet system av  $Z$  protoner and  $(A - Z)$  neutroner



**James Chadwick**

Neutronkällan in Chadwicks experiment: en  $^{210}\text{Po}$  radioaktiv källa  
(5 MeV  $\alpha$ -partiklar) blandat med beryllumpulver  $\Rightarrow$  utsändning av  
elektriskt neutral strålning som kunde tränga igenom flera centimeter  
av Pb:



## **Två frågor:**

Varför behövde Rutherford  $\alpha$ -partiklar för att bestämma atomkärnans radie?

Varför behöver vi enorma accelerators för att studera partikelfysik idag?

Svaret på båda frågorna får man från grundläggande principer i kvantmekanik (de Broglie)

# Hur fort går en $\alpha$ -partikel?

- Alla  $\alpha$ -partiklar som sänds ut av radioaktiva kärnor har rörelseenergier i intervallet 4-10 MeV.
- Är det en stor rörelseenergi?
- Måste man ta hänsyn till relativistiska effekter?  
(När bör man i så fall göra det?)

# Energi och rörelsemängd för relativistiska partiklar

(hastigheten  $v$  är jämförbar med ljushastigheten  $c$  (i vakuum) =  $2,99792 \times 10^8$  m/s)

Total energi:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Serieutveckling i potenser av  $(v/c)$ :

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots$$

↑  
energin  
associerad  
med vilomassa

↑  
"klassisk"  
kinetisk  
energi

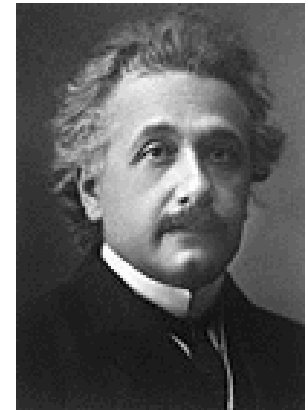
# Typiska verktyg för att studera föremål av mycket små dimensioner

		Upplösning- gräns
Optiska mikroskop	Synligt ljus	$\sim 10^{-6}$ m
Elektronmikroskop	Lågenergielektroner	$\sim 10^{-9}$ m
Radioaktiva källor	$\alpha$ -partiklar	$\sim 10^{-14}$ m
Acceleratorer	Högenergielektroner, protoner	$\sim 10^{-18}$ m

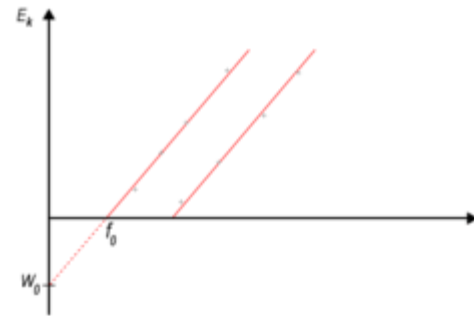
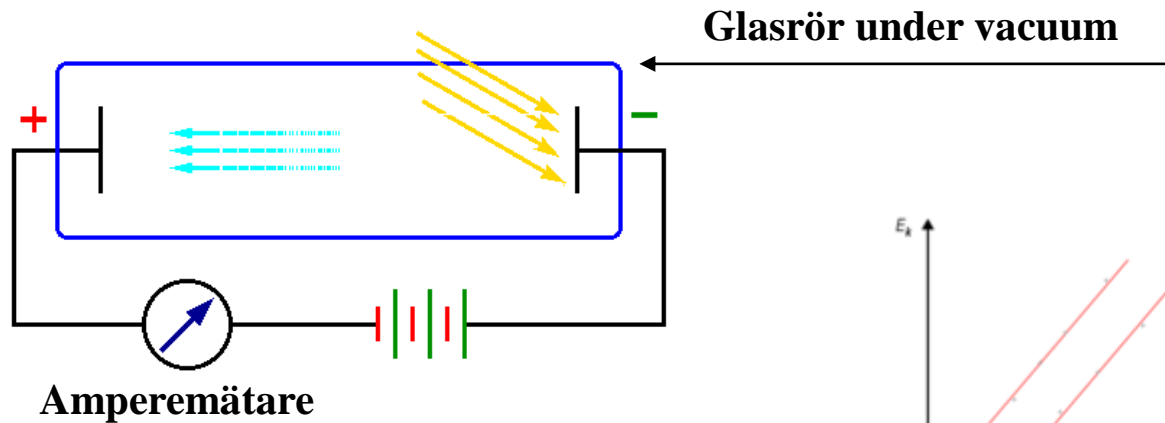


# Fotoelektrisk effekt:

## *Bevis för att ljus består av partiklar*



Albert Einstein



Observation av en tröskeeffekt som funktion av frekvensen på ljuset som faller in på elektroden med negativ spänning (fotokatoden):

**Om frekvensen  $\nu < \nu_0$  : blir strömmen = 0 (oberoende of ljusets flux)**

**Om frekvensen  $\nu > \nu_0$  : blir strömmen  $> 0$  (och proportionell mot fluxen)**

# Fotoelektrisk effekt:

Ljuset består av partiklar (“fotoner”)

Fotonens energi är proportionell mot frekvensen:

$$E = h \nu \quad (\text{Plancks konstant } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js})$$

Tröskelenergin, utträdesarbetet,  $E_0 = h\nu_0$ : den energi som behövs för att slå ut en elektron från en atom (beror bara på katodmaterialet)

## 1924: De Broglies hypotes

**Inte bara ljus, utan också materiepartiklar, har både våg- och partikelegenskaper**

**Sambandet mellan våglängd och rörelsemängd:**

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$h$ : Plancks konstant

$p = m v$  : partikelns rörelsemängd



Louis de Broglie

**Hypotesen konfirmerades snart genom observationen av diffraktionsmönstret då elektroner spreds mot kristaller, som visade att elektronen uppträdde som en våg (Davisson and Germer, 1927)**

**Våglängden på de  $\alpha$ -partiklar som Rutherford använde vid upptäckten av atomkärnan:**

$$\lambda = \frac{h}{m_{\alpha} v} \approx \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}}{(6,6 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (1,5 \times 10^7 \text{ m s}^{-1})} \approx 6,7 \times 10^{-15} \text{ m}$$

↑  
 $\alpha$ -particle  
mass

↑  
0,05 c

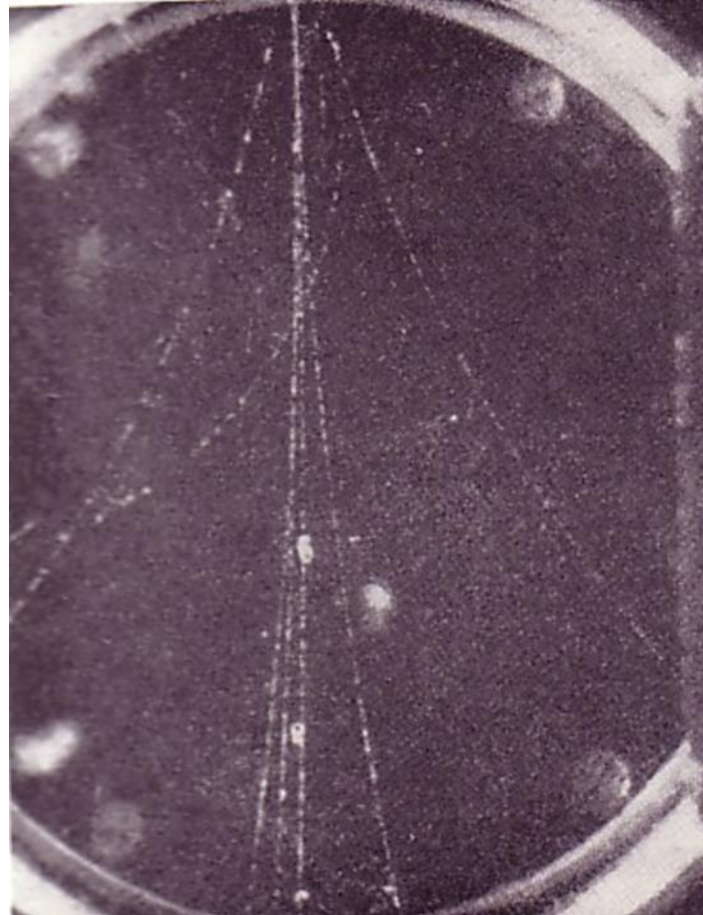
↑  
~ resolving power  
of Rutherford's  
experiment

# Antimateria

Paul Adrian Maurice Dirac gjorde 1928 en teoretisk modell (Diracekvationen) som gav som lösning att det borde finnas positiva elektroner som fick namnet "positroner" som upptäcktes 1932. Senare upptäckte man att alla partiklar har en antikopia som har exakt samma massa fast motsatt laddning. Om en partikel och en antipartikel kommer i kontakt med varandra, förintas de genom att deras massa omvandlas till energi, ofta i form av två fotoner. (Impuls sidan 373)

# Antimateria

Carl Davis Andersson  
kunde 1932  
experimentellt  
bekräfta antimateria  
(positroner) i kosmisk  
strålning som  
undersökts i en stor  
dimkammare



## Mer om antimateria

Eftersom positronen är elektronens *antipartikel* så annihilerar de och bildar (minst) två fotoner eftersom rörelsemängden måste bevaras

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \quad (Q = 1,022MeV)$$

## Mer om antimateria

1995 gjorde ett forskarlag på Cern nio antiväteatomer som bestod av en antiproton (LEAR) med en omgivande bunden positron. Den första atomen av antimateria hade skapats. Antiatomerna överlevde dock bara omkring 40 milliarddels sekund innan de annihilerade.

# Situationen inom partikelfysiken på 30-talet

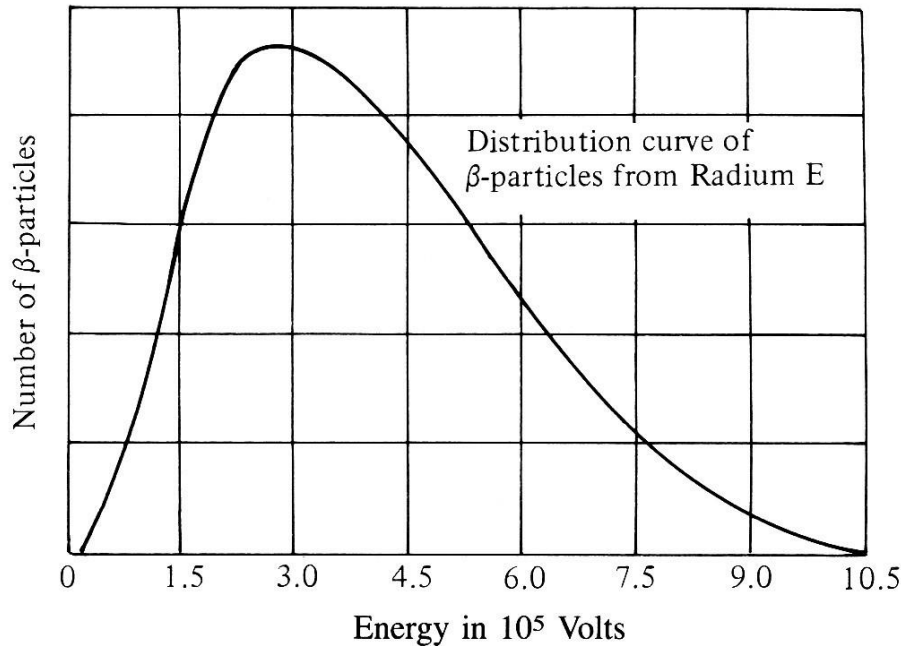
I slutet på 1930-talet så verkade det som om hela fysikens fundament var lagt inom det nya området *elementarpartikelfysik*. Den omgivande världen beskrevs väl med kända byggstenar, elektronen, protonen och den nyligen upptäckta neutronen. Neutrino var postulerad (men ännu inte detekterad).



# Neutriner

Ett mysterium i  $\beta$ -sönderfallet : elektronens kontinuerliga energispektrum

Första mätningen av James Chadwick (1914) fick NP 1935



Radium E:  $^{210}\text{Bi}_{83}$   
(en radioaktiv isotop som  
produceras i  
sönderfallskedjan av  $^{238}\text{U}$ )

I  $\beta$ -sönderfallet  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^-$ , blir utsända elektronen monoenergetisk:

$$\text{elektronens totala energi } E = [M(A, Z) - M(A, Z+1)]c^2$$

(då vi försummar den kinetiska energin på den rekylrande kärnan  $\frac{1}{2}p^2/M(A, Z+1) \ll E$ )

## December 1930: öppet brev från W. Pauli sänt till ett fysikermöte i 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

### NOTE

- Paulis neutron är en lätt partikel  $\Rightarrow$  inte neutronen som upptäcks av Chadwick ett år senare



Enrico Fermi

## Teorien för $\beta$ -sönderfall (E. Fermi, 1932-33)

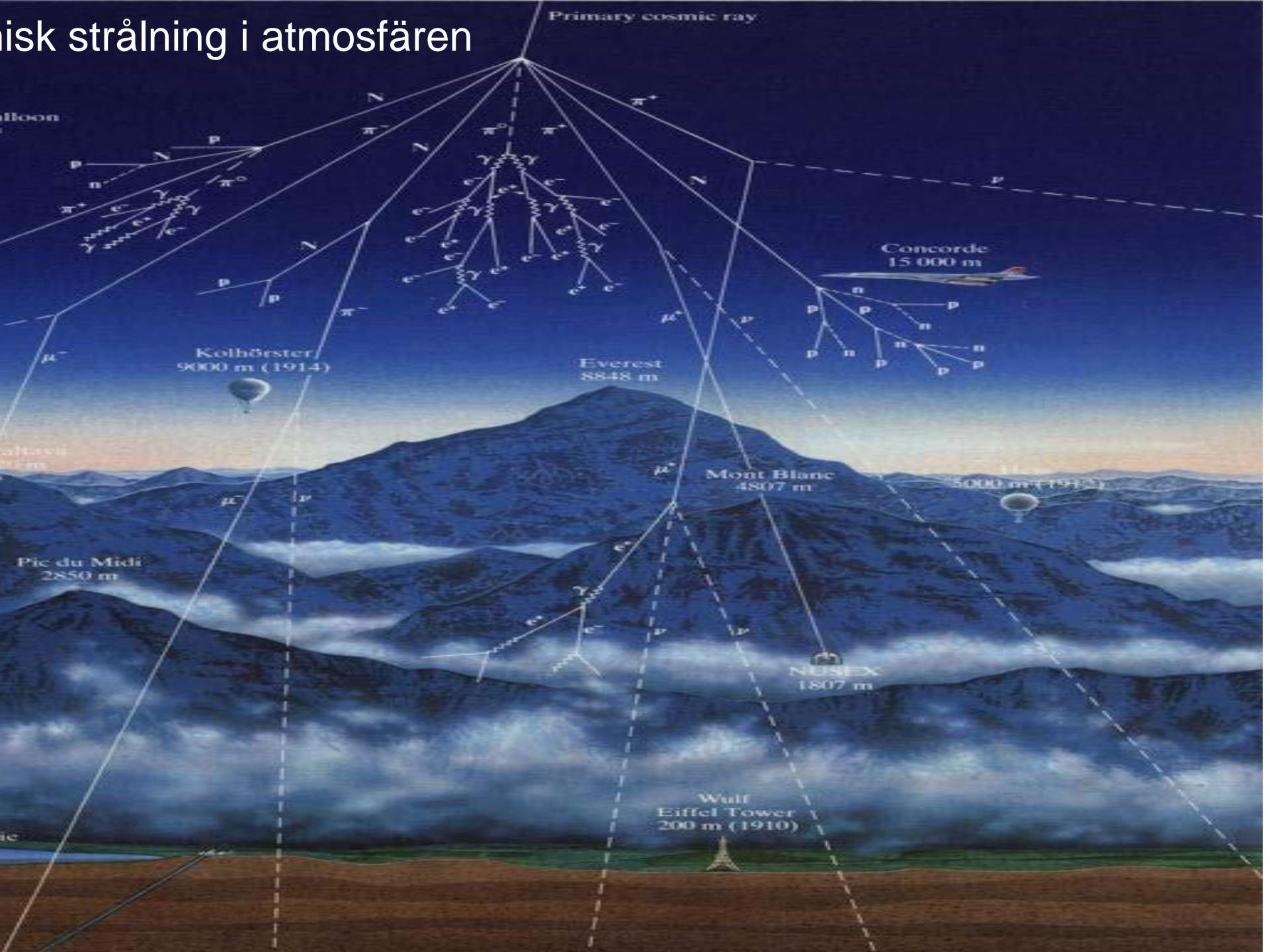
Flera lösningar till detta mysterium föreslogs under 30-talet, inklusive brott mot energiens bevarande i  $\beta$ -sönderfall

$$\beta^- - \text{sönderfall: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+ - \text{sönderfall: } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$(\text{t.ex. } {}^{14}\text{O}_8 \rightarrow {}^{14}\text{N}_7 + e^+ + \nu_e)$$

# Kosmisk strålning i atmosfären



Who ordered that muon? (Rabi, 1936, NP )

Medellivstiden för myoner, upptäckta i den kosmiskastrålningen är 2,2 mikrosekunder.

Den negativt laddade myonen sönderfaller till en elektron, en antielektronneutrino och en myonneutrino.

Den positivt laddade myonen (myonens antipartikel!) sönderfaller till en positron, en elektronneutrino och en antimyonneutrino.

1962:  $\bar{\nu}_\mu$  upptäcks vid Brookhaven  
AGS(en 30 GeV protonsynkrotron körd  
vid 17 GeV för neutrinoexperimentet)

## Ytterligare en neutrino!

De två neutrinerna i ovanstående sönderfall är olika och en ny neutrino, tauneutrino ( $\nu_\tau$ ) upptäcktes på SLAC 1975 då man också identifierade en ny lepton, tau ( $\tau$ ), som liksom elektronen och myonen sålunda har en "egen" associerad neutrino.

# SLAC



Stanford Linear Accelerator (3,2 km lång)

- Protonens inre struktur upptäcktes
- Här upptäcktes tau-leptonen och charmkvarken
- Maximal energi för elektroner var 50 GeV

# Leptonfamiljerna

Vi kan tilldela var och en av leptonerna ett leptontal

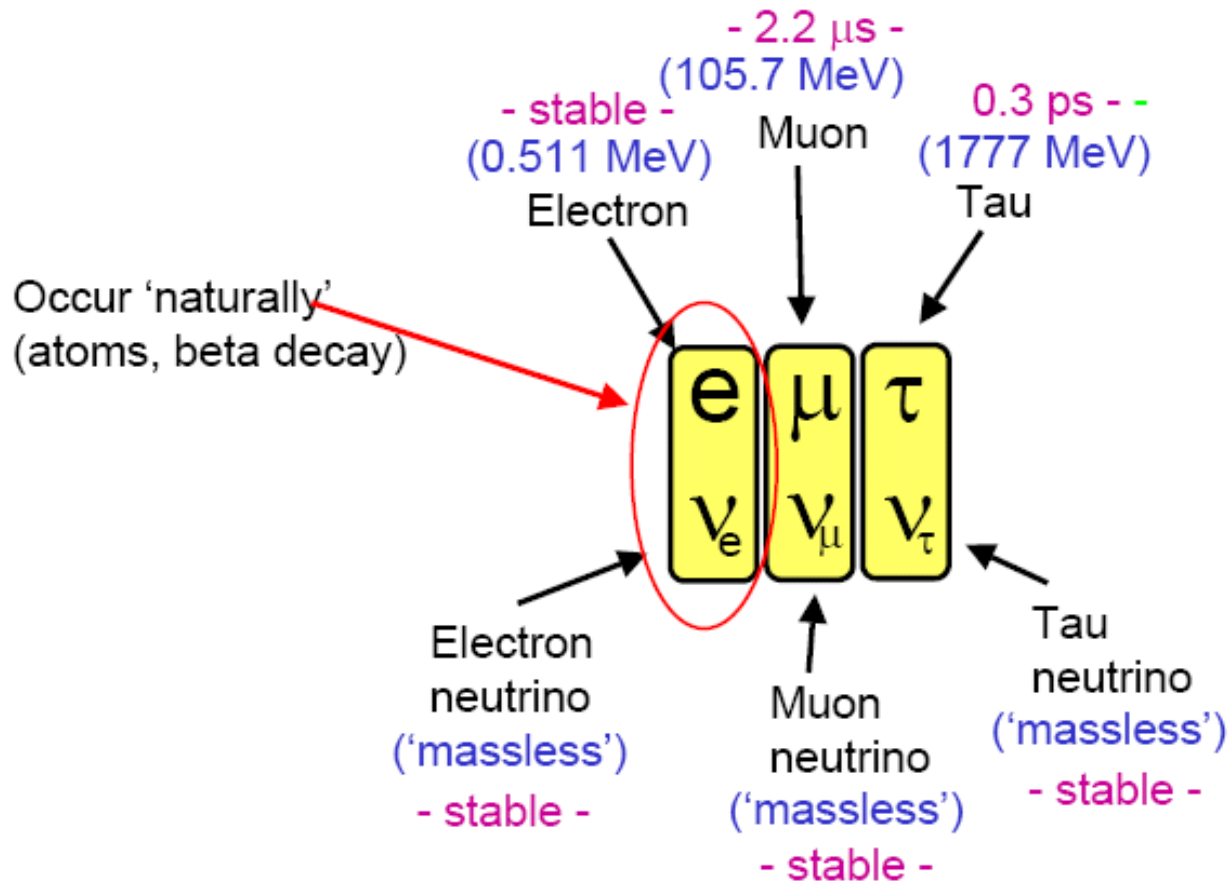
$L = +1$  för partikeln och

$L = -1$  för antipartikeln i *varje familj*.

Detta betyder att det finns tre leptontal,  $L_e$ ,  $L_\mu$  och  $L_\tau$  som vart och ett måste bevaras i alla partikelreaktioner.

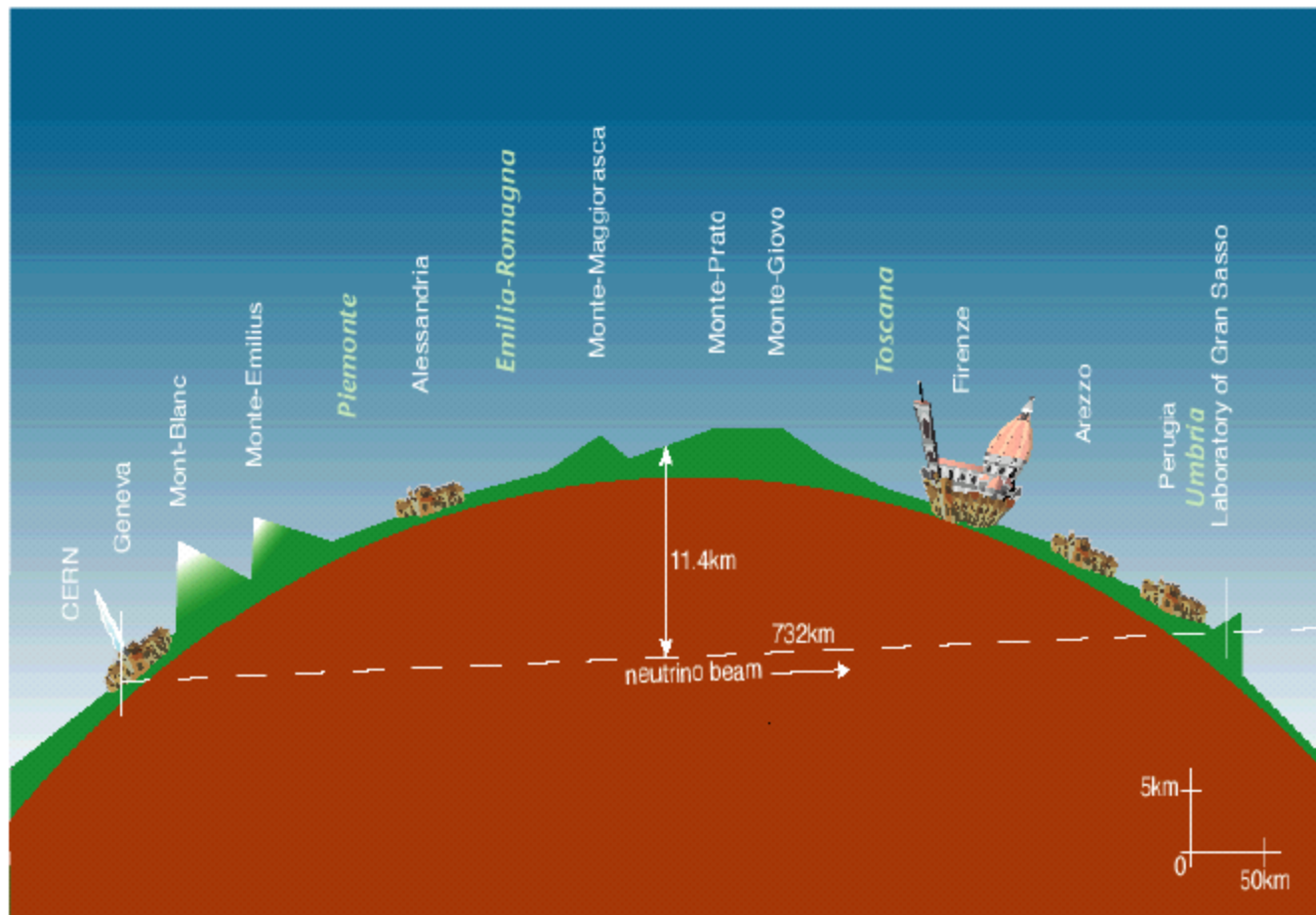


# The Leptons, spin-1/2 particles



# CNGS, Cern Neutrinos to Gran Sasso (2006)

## Myonneutriner går 732 km i jordskorpan



# S-kvarken

Det pastorala tillståndet från 1930 ändras dock snabbt och snart fanns det mer än 200 "elementarpartiklar", med namn som muon ( $\mu$ ), pion ( $\pi$ ), kaon (K) och sigma ( $\Sigma$ ). Alla dessa partiklar är instabila och har livstider på mellan  $10^{-6}$  s och  $10^{-23}$  s.

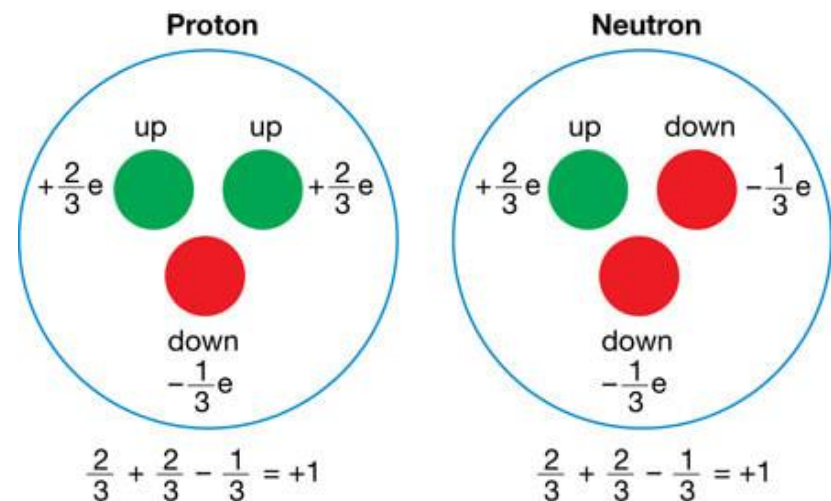
# 1964: Murray Gell-Mann – Teoretisk modell

Matematisk modell med tre grundelement och med vars hjälp man kunde förutsäga de då kända partiklarna inom gruppen hadroner. Kvarkar – upp-, ned- och särkvark (u, d, s) och motsvarande antikvarkar. Dessa kvarkar bildar baryoner och mesoner.

Baryoner har halvtaligt spinn och är därför fermioner.

Mesoner har heltaligt spinn och är därför bosoner.

Inga fria kvarkar observerades!



# Kvarkmodellen, baryoner och antibaryoner

Baryoner: tre kvarkar bundna tillsammans

Antibaryoner: tre antikvarkar bundna tillsammans

Exempel på baryoner utan strangeness:

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

Exempel på baryoner med strangeness  $-1$ :

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

Exempel på baryoner med strangeness  $-2$ :

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

# Förutsägelsen och upptäckten av $\Omega^-$ partikeln

## En framgång för kvarkmodellen

“Dekuplet” of spin  $\frac{3}{2}$  baryoner

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

$\Omega^-$ : bundet tillstånd av tre *s*-kvarkar med den lägsta massan  
och totalt rörelsemängdsmoment =  $3/2 \Rightarrow$  

Pauliprincipen fordrar att de tre kvarkarna inte kan vara identiska

# Kvarkmodellen, mesoner

## Mesoner: kvark – antikvark par

Eksempel på meson utan strangeness:

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

Eksempel på mesoner med strangeness:

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

# Ännu fler kvarkar!

*Charmkvark* eller c-kvark (SLAC 1974)

*Bottomkvark* eller b-kvark (Fermilab 1977)

*Topkvark* eller t-kvark (Fermilab 1995)



# Klassificering av partiklar

Vi kan klassificera partiklar genom att se vilket spinn de har (i enheter av  $\hbar$ )

<b>Spinn 0</b>	$\frac{1}{2}$	<b>1</b>	<b><math>\frac{3}{2}</math></b>
$\pi$	e	$W^+$	$\Omega^-$
K	$\mu$	$W^-$	
	$\nu$	$Z^0$	
	p		
	n		

# Partikelns spinn har avgörande betydelse!

Partiklar med halvtaligt spinn kallas *fermioner*

Fermioner lyder Pauli principen som utsäger att bara en partikel kan uppta ett givet kvanttillstånd.

(Fermioner lyder Fermi-Dirac statistik)

Partiklar med heltaligt spinn kallas *bosoner*

Bosoner lyder INTE Pauliprincipen vilket innebär att ett obegränsat antal partiklar kan ha samma tillstånd samtidigt.

Bosoner lyder Bose-Einstein statistisk

## Materia består av fermioner:

KVARKAR	upp/up	u
	ner/down	d
	charm/charm	c
	sär/strange	s
	topp/top	t
	botten/bottom	b

LEPTONER	elektronneutrino	$\nu_e$
	elektron	e
	myonneutrino	$\nu_\mu$
	myon	$\mu$
	tauneutrino	$\nu_\tau$
	tau	$\tau$

# Materiepartiklarna kan delas upp i tre familjer

FAMILJ	KVARKAR		LEPTONER	
1	u +2/3	d -1/3	$\nu_e$ 0	e -1
2	c +2/3	s -1/3	$\nu_\mu$ 0	$\mu$ -1
3	t +2/3	b -1/3	$\nu_\tau$ 0	$\tau$ -1

Vanlig materia består bara av partiklar från familj 1

Partiklarna i familj 2 och 3 existerade i stor omfattning vid universums uppkomst (13,8 miljarder år sedan)

## Andra sätt att klassificera partiklar

Vi kan klassificera partiklar genom att se vilka krafter som verkar på dem

*Hadroner* påverkas av den *starka* kraften

*Leptoner* påverkas av den *svaga* kraften


# Det finns 4 krafter och alla kraftförmedlare är bosoner

Typ	Styrka	Räckvidd	Förmedlare
stark	1	$10^{-15}$ m	gluon (8 st)
elektromagnetisk	$10^{-2}$	$\infty$	foton
svag	$10^{-5}$	$10^{-16}$ m	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$
gravitation	$10^{-38}$	$\infty$	graviton

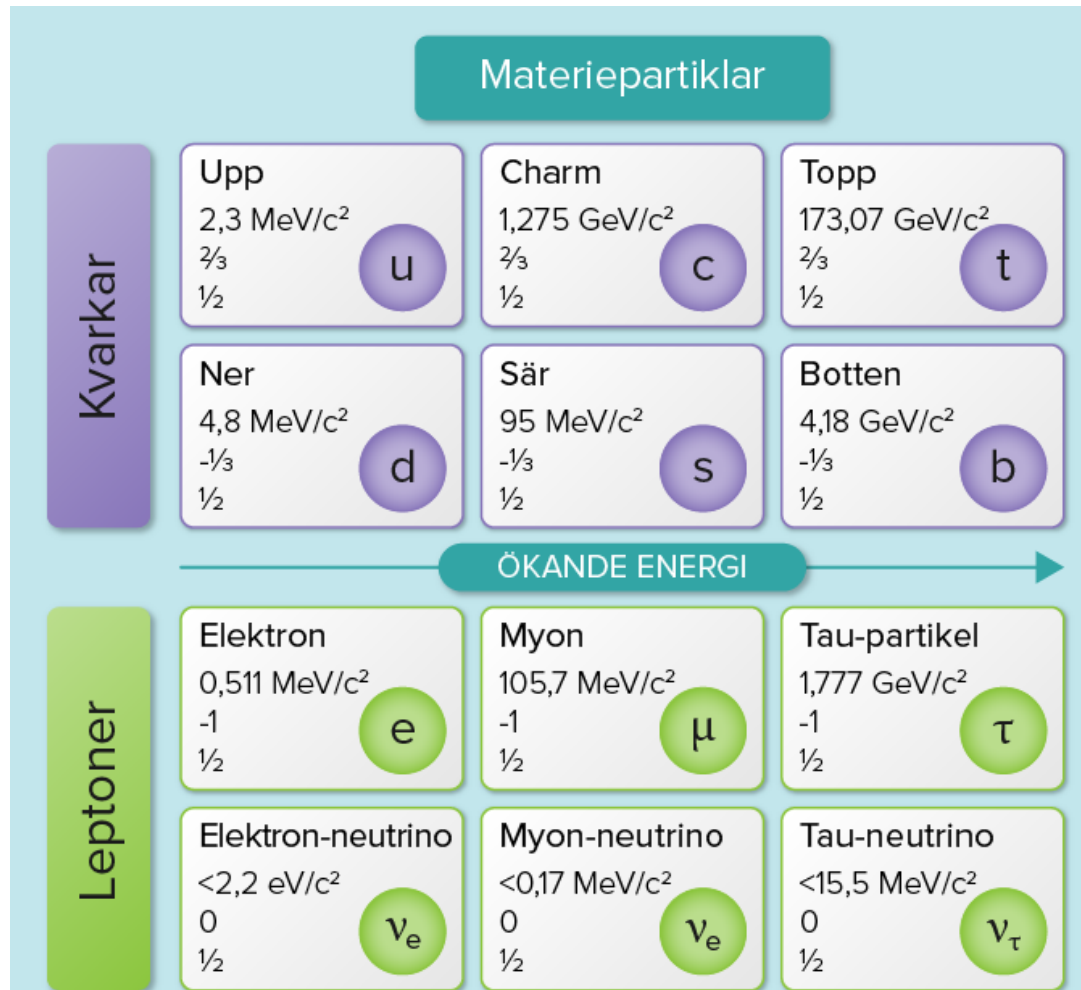


# Naturens krafter

- Starka kraften
- Elektromagnetiska kraften
- Svaga kraften
- Gravitationen
- Higgsmekanismen

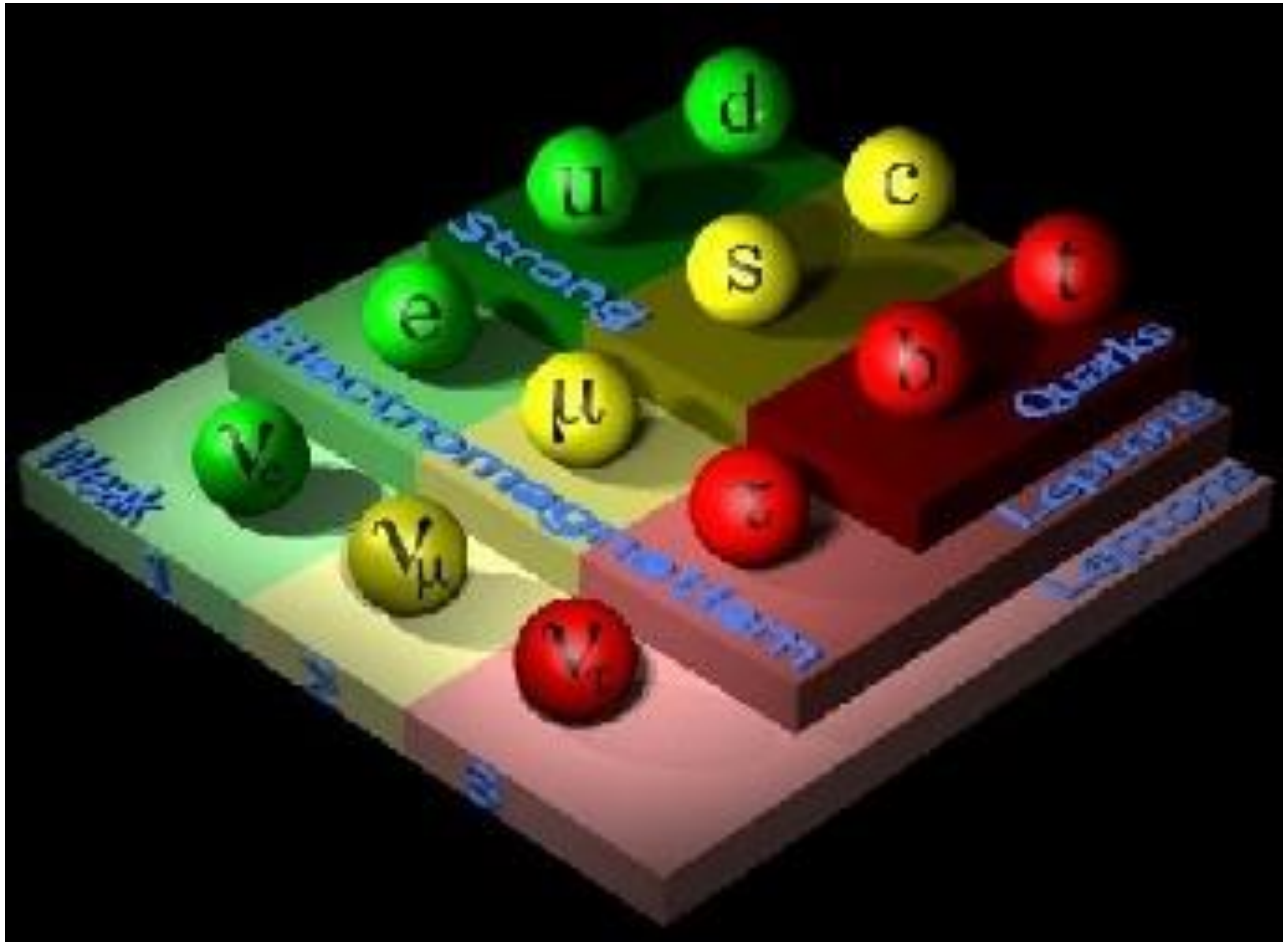
Kraft- eller förmedlarpartiklar	Higgsbosonen						
<p>Gluon</p> <p>0 0 1</p> <p>g</p>	<p>Higgsboson</p> <p>126 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>0 0</p> <p>H</p>						
<p>Foton</p> <p>0 0 1</p> <p>γ</p>							
<p>Z-boson</p> <p>91,2 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>0 1</p> <p>Z</p>	<p>Nyckel</p> <table><thead><tr><th>Namn</th><th>Symbol</th></tr></thead><tbody><tr><td>Massa</td><td rowspan="3">X</td></tr><tr><td>Laddning</td></tr><tr><td>Spinn</td></tr></tbody></table>	Namn	Symbol	Massa	X	Laddning	Spinn
Namn	Symbol						
Massa	X						
Laddning							
Spinn							
<p>W-boson</p> <p>80,4 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>±1 1</p> <p>W</p>							

Kvarkar och leptoner tycks i nuläget vara fundamentala partiklar som indelar sig “naturligt” i tre familjer i vad som kallas *Standardmodellen (The Standard Model)*.





# Standardmodellen

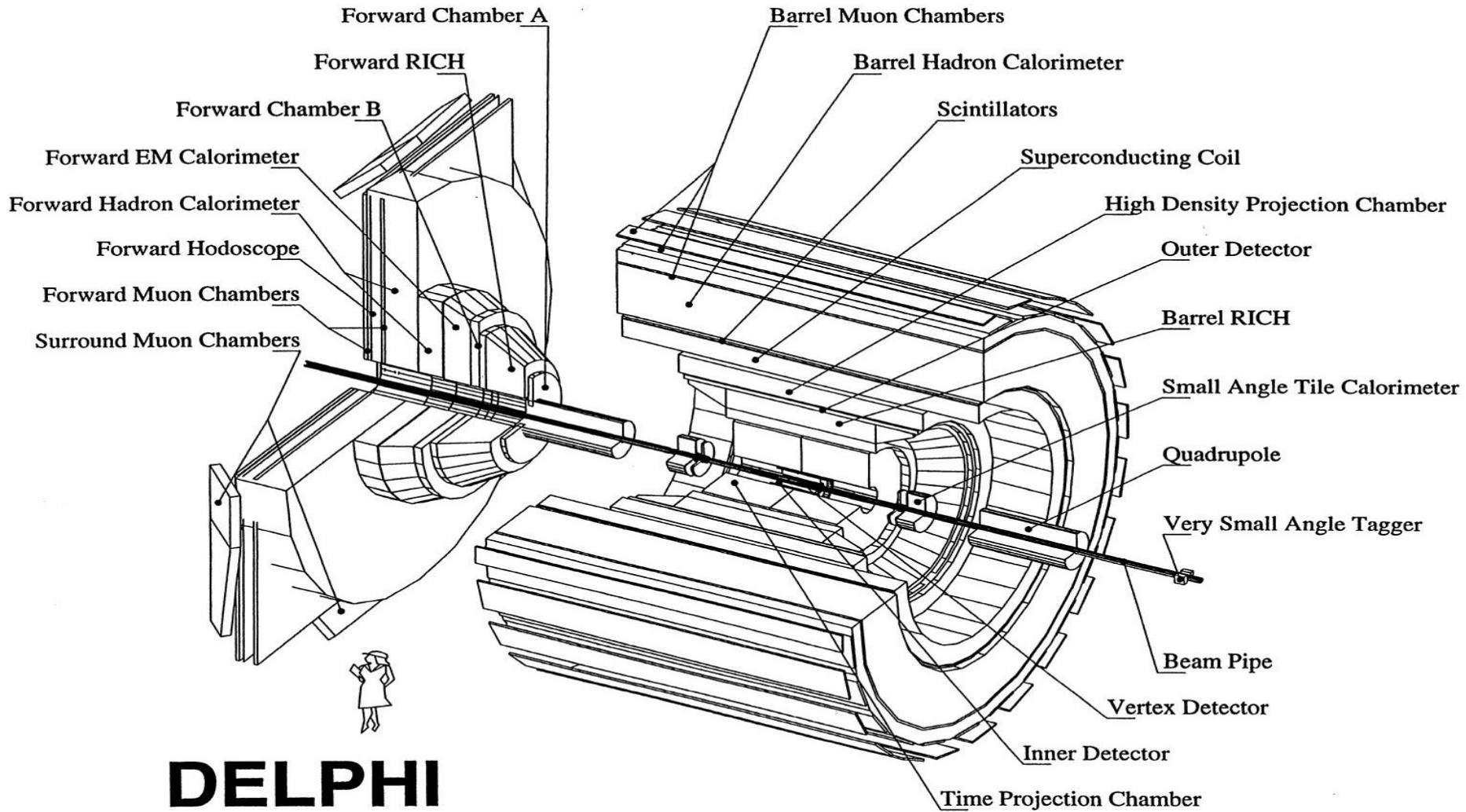


# Standardmodellen förklarar inte

- Asymmetrin mellan materia och antimateria
- Hur neutrino får sin massa
- Samband mellan elektrosvaga och starka krafter
- Vad mörk materia består utav? (NGC1052DF2)
- Gravitationen
- Kanske svårast av allt: vad är mörk energi (repulsiv tyngdkraft?)?

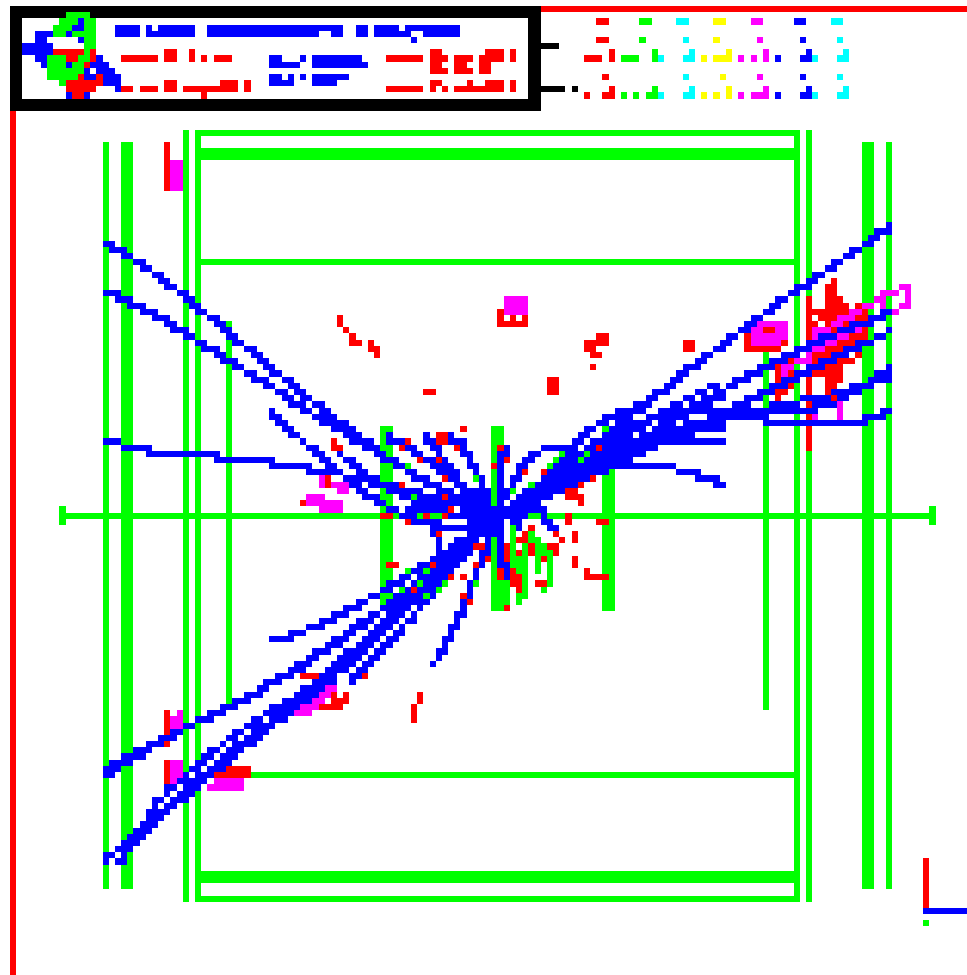
Nostalgiskt efterspel från förra  
årtusendet

# DELPHI-detektorn vid LEP



# DELPHI

Tre-jet-event  $Z^0 \rightarrow q-qbar-gluon \rightarrow$  hadroner  
i DELPHI-detektorn vid LEP



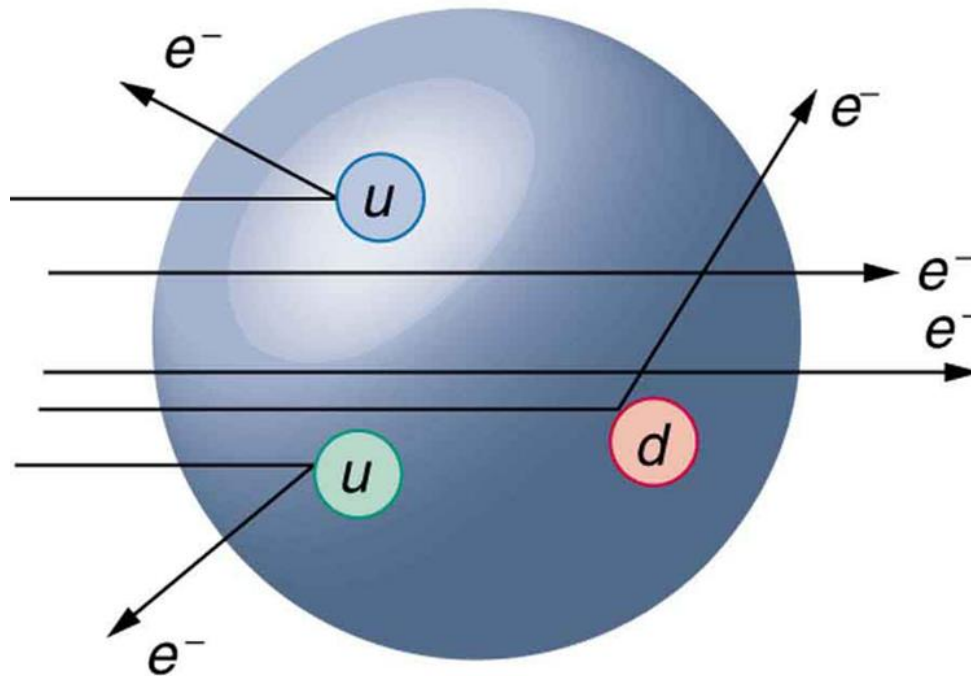
I	particle/jet	KS	KF	orig	p_x	p_y	p_z	E	m
1	(b)	14	5	0	-27.890	18.989	-30.235	45.580	5.000
2	(b~)	14	-5	0	27.890	-18.989	30.235	45.580	5.000
3	(CMshower)	11	94	1	.000	.000	.000	91.160	91.160
4	(b)	14	5	3	-25.748	17.531	-27.913	49.036	25.594
5	(b~)	13	-5	3	25.748	-17.531	27.913	42.124	5.000
6	(b)	14	5	4	-23.826	11.186	-26.767	41.248	17.091
7	(g)	14	21	4	-1.922	6.344	-1.146	7.788	3.923
.....									
95	(K0)	11	311	85	-.903	.127	-.946	1.405	.498
96	(pi0)	11	111	85	-1.369	.342	-.766	1.611	.135
97	K_L0	1	130	95	-.903	.127	-.946	1.405	.498
98	gamma	1	22	96	-.425	.057	-.277	.511	.000
99	gamma	1	22	96	-.944	.286	-.488	1.100	.000
100	<CLUSjet>	31	97	1	25.355	-17.358	27.916	41.855	5.325
101	<CLUSjet>	31	97	2	-20.718	2.044	-16.720	28.120	8.820
102	<CLUSjet>	31	97	3	-4.637	15.314	-11.196	21.184	8.209
	sum:				.000	.000	.000	91.160	91.160







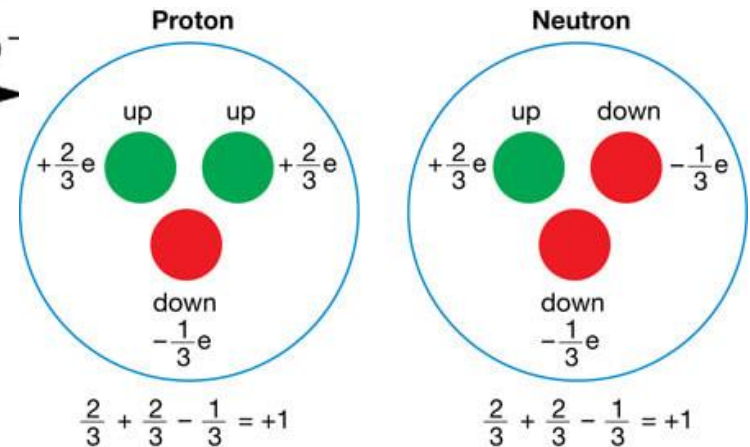
# Slutet av 1960-talet: kvarkarnas existens



Proton

OBS! Inga fria kvarkar existerar

Enhetsladdningar fortfarande sant för fria partiklar



Robert Andrews Millikan tog en magisterexamen i klassisk litteratur 1891 vid Oberlin College, och doktorerade i fysik 1895 vid Columbia University, New York.



År 1910 publicerade han sina första resultat från ett experiment med oljedroppar för att bestämma elektronens laddning (därefter upprepat av generationer av fysikstudenter). Elektronens laddning, den så kallade elementarladdningen, är en av de grundläggande fysikaliska konstanterna, och det är mycket viktigt att känna till dess värde med stor noggrannhet. Hans experiment mätte kraften som verkade på mängder av små laddade oljedroppar som hölls svävande med ett elektriskt fält som motverkade gravitationen. Med kännedom om fältets styrka kunde laddningen på dropparna bestämmas, och efter många mätningar kunde Millikan visa att den alltid var en multipel av ett gemensamt värde, elektronladdningen  $e = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ As}$

# S-kvarken

Kaonen, K-meson, subatomär partikel med spinn 0 samt med massan  $494 \text{ MeV}/c^2$  för de elektriskt laddade  $K^+$  och  $K^-$  och  $498 \text{ MeV}/c^2$  för den neutrala  $K^0$ . observerades i den kosmiska strålningen av Cecil Powell 1949 och är den lättaste av särpartiklarna (som innehåller en särkvark).

- Vad är tolkningen av att det finns en elektron med negativ energi?
- Varje elektron måste ha en ”spegelbild”.
- De spegelbildspartiklar som har följande symmetri: samma massa, omvänd laddning och omvänt spinn kallar vi populistiskt för antipartiklar.
- De har egenskapen att om de stöter på sin partikel så kommer de att annihilera.
- På samma sätt har varje kvark en antikvark.

# Två förvånande resultat:

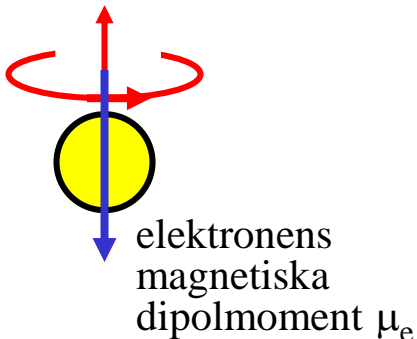
- Till varje lösning av Diracekvationen med en elektronenergi  $E > 0$  finns en annan tillhörande lösning med  $E < 0$

Vad är den fysikaliska tolkningen av dessa lösningar med “negativ energi”?

- Vid elektronens rörelse i ett elektromagnetiskt fält uppträder en term som beskriver den potentiella energien av ett magnetiskt dipolmoment i ett magnetiskt fält,

⇒ Det finns två lösningar: Partiklar som har ett magnetiskt dipolmoment riktat åt motsatt riktning mot spinnet och partiklar som har magnetiskt dipolmoment riktat i samma riktning som spinnet.

Vanliga elektronens spinn



$$\mu_e = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 5,79 \times 10^{-5} \text{ [eV/T]}$$