

MODELUL STANDARD AL FIZICII PARTICULELOR

- **Modelul Standard** - teorie care descrie **trei** dintre cele **patru** forțe fundamentale cunoscute (*interacțiuni electromagnetice, slabe și puternice* – cu excepția gravitației) din univers și care clasifică toate particulele elementare cunoscute
- Formularea actuală - mijlocul anilor 1970 odată cu confirmarea experimentală a existenței quarcilor.
- Ulterior, dovezile cuarcului top (1995), neutrinel tau (2000) și bosonul Higgs (2012) au adăugat mai multă credibilitate Modelului Standard.
- **Modelul Standard** a prezis diferite proprietăți ale curenților neutri slabi și ale bosonilor W și Z cu mare precizie.
- Modelul Standard este în prezent cea mai bună descriere a lumii subatomice, însă nu este un model complet și nu explică o serie de observații.
- Exemple de întrebări importante la care Modelul Standard nu răspunde:
 - ✓ Ce este materia întunecată?
 - ✓ Ce s-a întâmplat cu antimateria după Big Bang?
 - ✓ De ce există trei generații de quarci și leptoni cu o masă atât de diferită?
 - ✓ Bosonul Higgs este o componentă esențială a Modelului Standard ca cea mai simplă manifestare a mecanismului Brout-Englert-Higgs?
 - ✓ Există și alte tipuri de bosoni Higgs sunt prezise de alte teorii care merg dincolo de Modelul Standard?
 - ✓ Etc.

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS matter constituents

spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e lightest neutrino*	(0-0.13) × 10 ⁻⁹	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_μ middle neutrino*	(0.009-0.13) × 10 ⁻⁹	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ heaviest neutrino*	(0.04-0.14) × 10 ⁻⁹	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27}$ kg.

Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_3 for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g. Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

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

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

$e^+ e^- \rightarrow B^0 \bar{B}^0$

An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

BOSONS force carriers

spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W⁻	80.39	-1			
W⁺	80.39	+1			
Z⁰	91.188	0			

Color Charge
Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), neutron (udd), lambda Λ (uds), and omega Ω^- (sss). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ (u \bar{d}), kaon K^+ (u \bar{s}), B^0 (d \bar{s}), and η_c (c \bar{c}). Their charges are +1, -1, 0, 0 respectively.

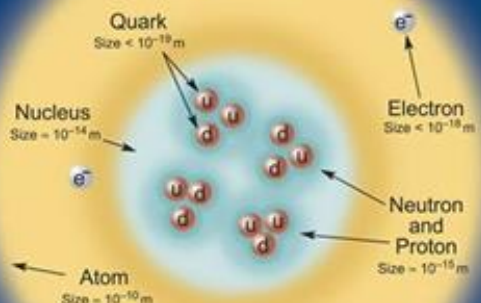
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory

©2004 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see

CPEPweb.org

Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

CLASIFICAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

Quarci



Up



Down



Charm



Strange



Top



Beauty

Leptoni



Electron



Neutrino Electron



Muon



Neutrino Muon



Tau



Neutrino Tau

Bosoni



Photon



Gluon



Z⁰



W⁻



W⁺



Higgs



Graviton

CLASIFICAREA ȘI CARACTERIZAREA PARTICULELOR ELEMENTARE

Posibilități de clasificare
a particulelor elementare

După mărimi fizice

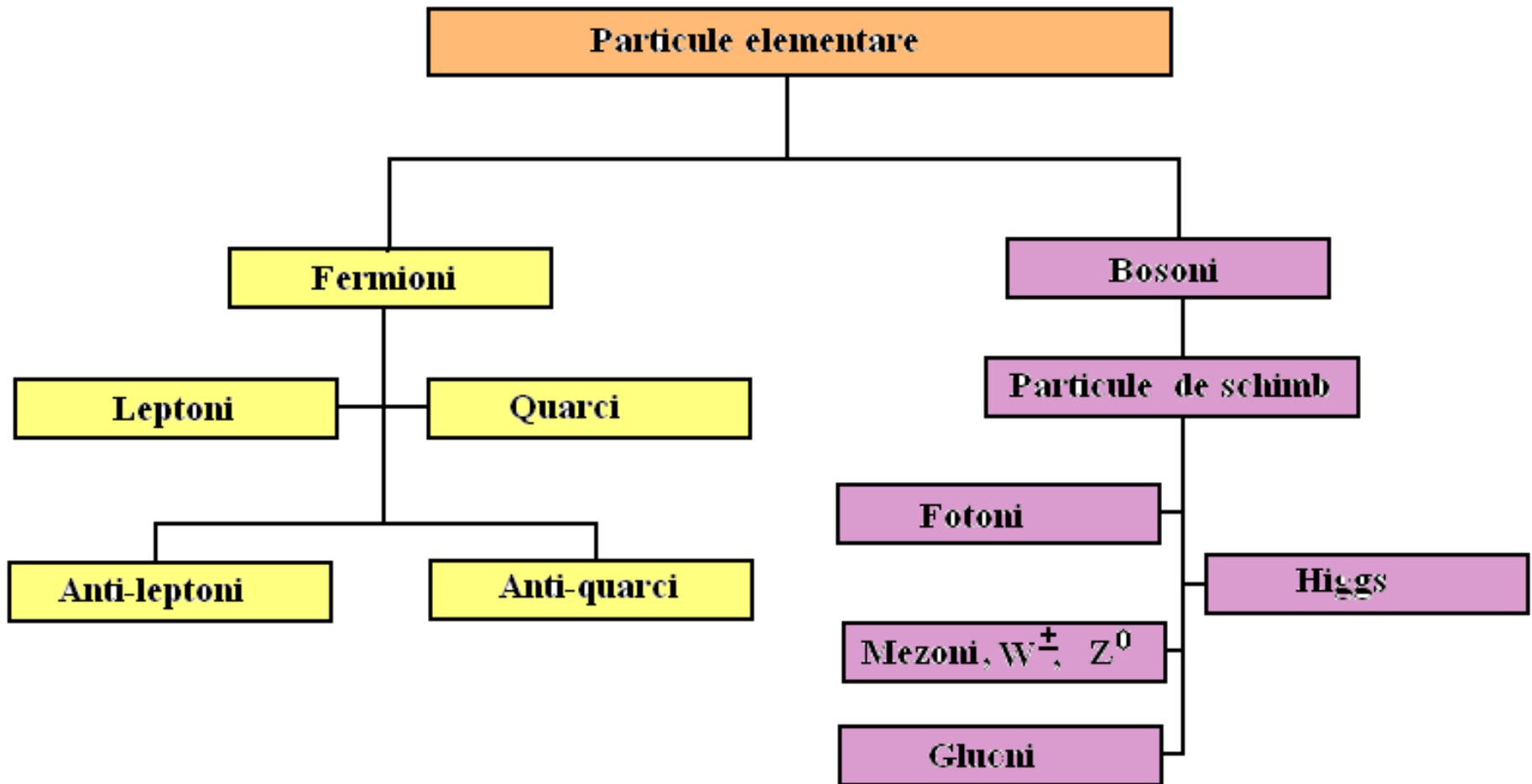
- masa de repaus
- sarcina electrică
- spin
- moment magnetic,
- viață medie
- etc.

După proprietăți cuantice

- paritate
- izospin
- număr leptonic
- numărul barionic
- stranietate
- culoare
- modul de dezintegrare
- tipurile de interacțiune
- etc.

➤ O clasificare practică poate fi făcută în funcție de statistica cuantică care descrie comportarea particulelor (*spinul particulelor*)

- spin semiîntreg - Fermi-Dirac (*fermioni*)
- spin întreg - Bose-Einstein (*bosoni*)



Fermionii

- **Statistica Fermi-Dirac** - arată distribuția particulelor cu spin semiîntreg peste stările de energie ale unui sistem aflat în echilibru termic - probabilitatea ca un anumit nivel de energie să fie ocupat de o particulă (*fermion*)

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\varepsilon_i - E_F)kT} + 1}$$

- Distribuția pentru un sistem de particule în stări de energie ε_i :

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\varepsilon_i - E_F)kT} + 1}$$

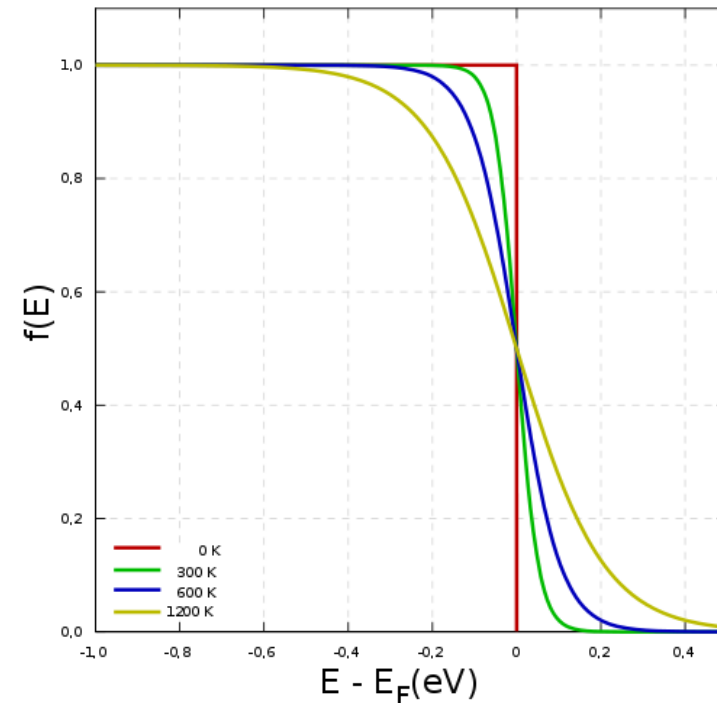
n_i – este numărul de particule în starea de energie ε_i

g_i – este gradul de degenerare al stării (*densitatea de stări*)

E_F – este energia nivelului Fermi (*valoarea maximă a energiei pe care o poate lua un sistem de fermioni, la temperatura de zero absolut*).

k – constanta Boltzmann

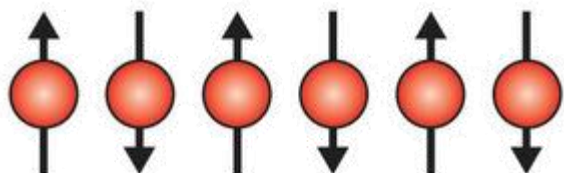
T – temperatura.



➤ **Fermionii – caracteristici cuantice**

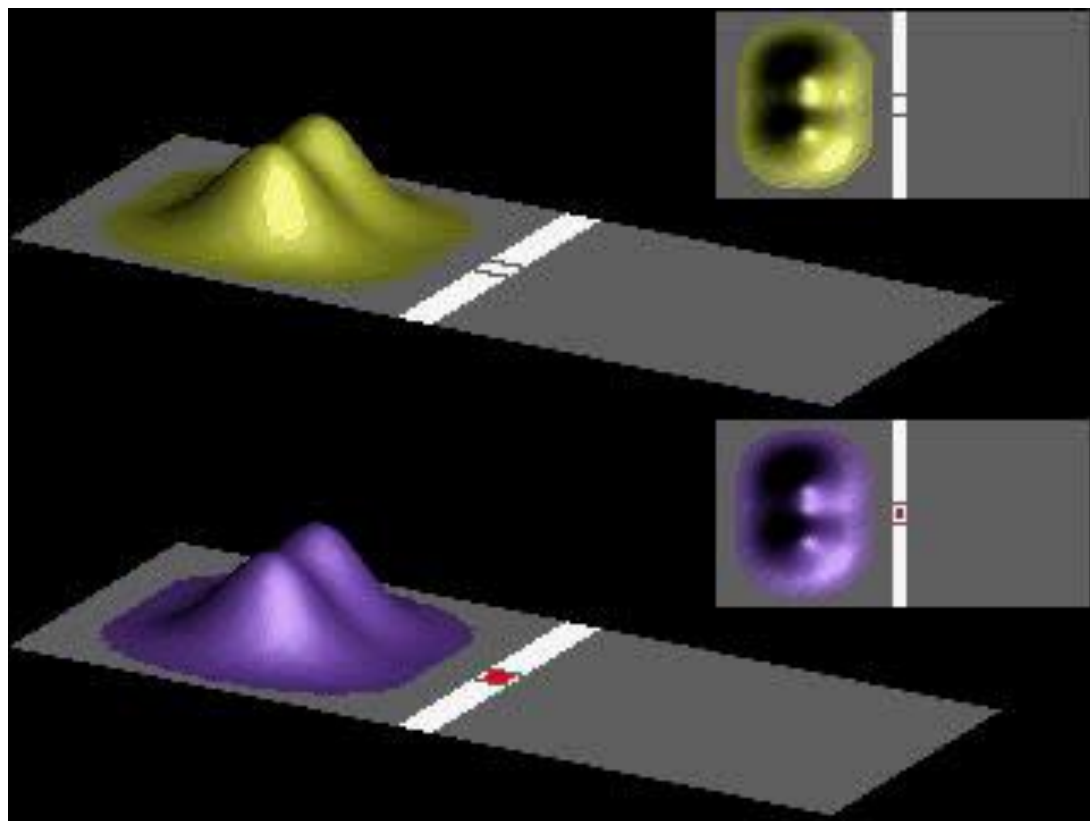
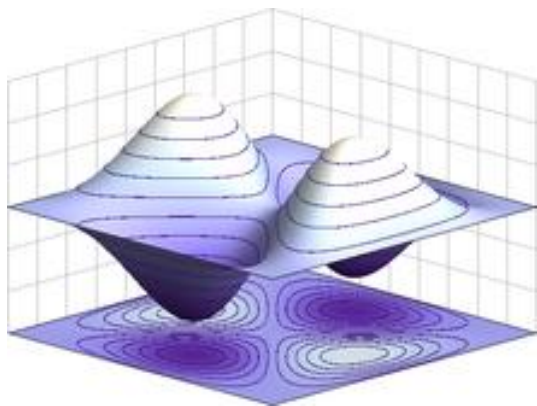
- ✓ sunt particule care nu se disting unele de altele
- ✓ se supun principiului de excluziune al lui Pauli (*numai o particulă poate exista în același timp, într-o anumită stare cuantică*)

➤ Funcția de undă totală a fermionilor trebuie să fie antisimetrică la schimbarea fiecărei perechi de fermioni



➤ Funcțiile de undă Ψ_1 și Ψ_2 , își schimbă semnul la permutare

$$\Psi_{12} \xrightarrow{1 \rightarrow 2} -\Psi_{21}$$




Interschimbul maximului și minimului a probabilității de distribuție

Leptoni

	Sarcina electrică		Sarcina electrică
Tau	 -1	Neutrino Tau	 0
Muon	 -1	Neutrino Muon	 0
Electron	 -1	Neutrino Electron	 0

Quarci

	Sarcina electrică		Sarcina electrică
Bottom	 -1/3	Top	 2/3
Strange	 -1/3	Charm	 2/3
Down	 -1/3	Up	 2/3

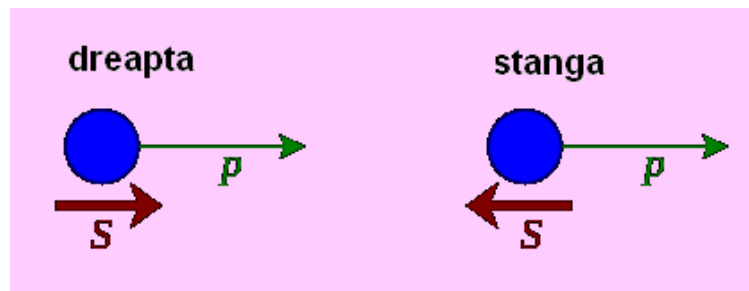
fiecare quarc are 3 culori :  R,  B,  G

Leptonii

- Denumirea de **Lepton** (greacă – *Leptos* – *subțire, mic*) a fost folosit prima dată de către fizicianul Léon Rosenfeld, în 1948
- Fiecare lepton este caracterizat de o “*aromă*” și pentru fiecare lepton, există o antiparticulă, cunoscută sub numele de antilepton, care diferă de lepton doar prin faptul că unele dintre proprietățile sale au mărime **egală**, dar semn **opus**.







(„**flavour**” (*aromă*) – *specie de particulă elementară caracterizată de o serie de numere cuantice*)

- O proprietate principală este legată de conceptul de lepton, este cea de **elicitate**.
- **Elicitatea** unei particule este *direcția vectorului spin în raport cu vectorul impuls*; particule cu spin în aceeași direcție cu impulsul lor, au **elicitatea dreapta** iar cele cu vectorii spin și impuls cu direcții opuse, au **elicitate stânga**



Proprietăți generale ale leptonilor

- Există trei „arome” (*flavours*) ale leptonilor încărcăți electric (*electronul e* , *miuonul μ* și *leptonul tau τ*) și trei ale leptonilor neutri (*neutrino electronic ν_e* , *neutrino miuonic ν_μ* și *neutrino tau ν_τ*).
- Toți leptonii încărcăți au o singură unitate electrică negativă sau pozitivă, depinzând de faptul dacă sunt particule sau antiparticule
- **Leptonii încărcăți** au două stări de spin semiîntreg(1/2),
- **Leptonii neutri** (*neutrini și antineutrini cu sarcina zero*), au tot două stări de spin semiîntreg și o singură elicitate; *neutrini au elicitate stânga*, iar *antineutrini elicitate dreapta*
- Leptonii pot fi găsiți în mod independent.
- Cuplajul leptonilor cu bosonii etalon (W , Z , H) este independent de aromă (*aceasta proprietate este numită **universalitate leptonică***)
- Există șase tipuri de leptoni (*arome*) grupate în trei generații
- Toate aceste șase particule au antiparticule corespunzătoare

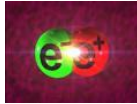
LEPTONI		
Prima familie	 electron	 neutrino electronic
A doua familie mai masivi	 miuon	 neutrino miuonic
A treia familie foarte masivi	 tau	 neutrino tau

$$M_e < M_\mu < M_\tau$$

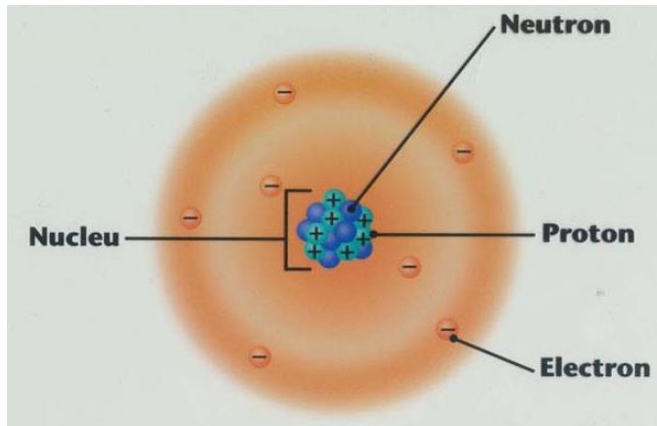
Categoria	Nume	Simbol	Sarcina electrică (e)	Masa (Mev/c²)
leptoni/antileptoni încărcați	electron/pozitron	e^-/e^+	-1/+1	0.511
	miuon/antimiuon	μ^-/μ^+	-1/+1	105.7
	lepton tau/antilepton tau	τ^-/τ^+	-1/+1	1777
leptoni/antileptoni neutri	neutrino/antineutrino electronic	$\nu_e / \bar{\nu}_e$	0	$<2.2 \cdot 10^{-6}$
	neutrino/antineutrino miuonic	$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$	0	<0.17
	neutrino/antineutrino tau	$\nu_\tau / \bar{\nu}_\tau$	0	<15.5

Leptoni încărcați

Electronul și pozitronul

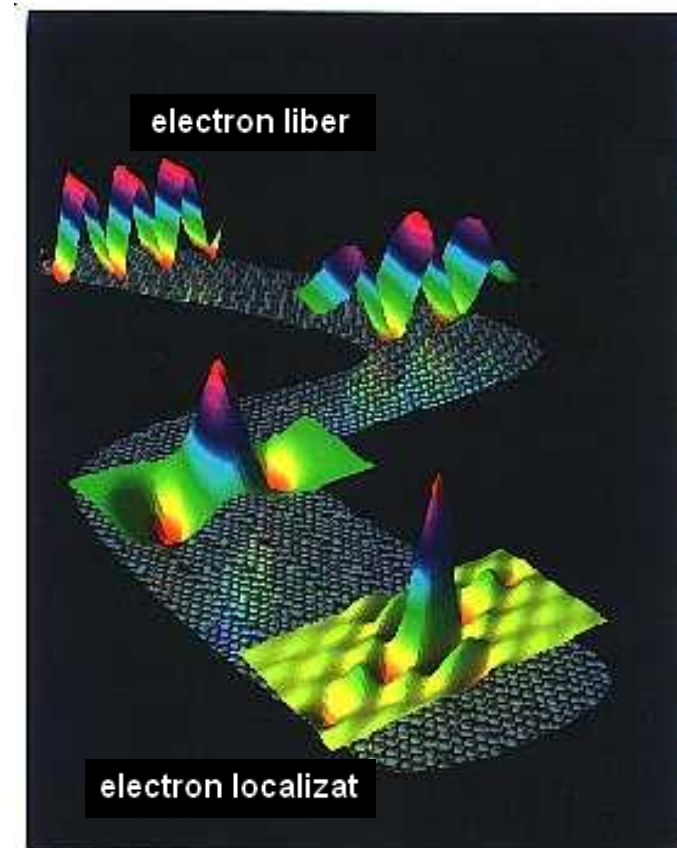


- **Electronul** - particulă purtătoare de sarcină electrică negativă: $e = -1.6021765 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 - ✓ Este considerat a fi o particulă elementară.
 - ✓ Masa gravifică aproximativ $9.109 \times 10^{-31} \text{ Kg}$ ($5.489 \times 10^{-4} \text{ uam}$)
 - ✓ Echivalența masă de repaus – energie: 0.511 MeV .
 - ✓ Timpul mediu de viață: $>4.6 \cdot 10^{26} \text{ ani}$



Proprietăți cuantice

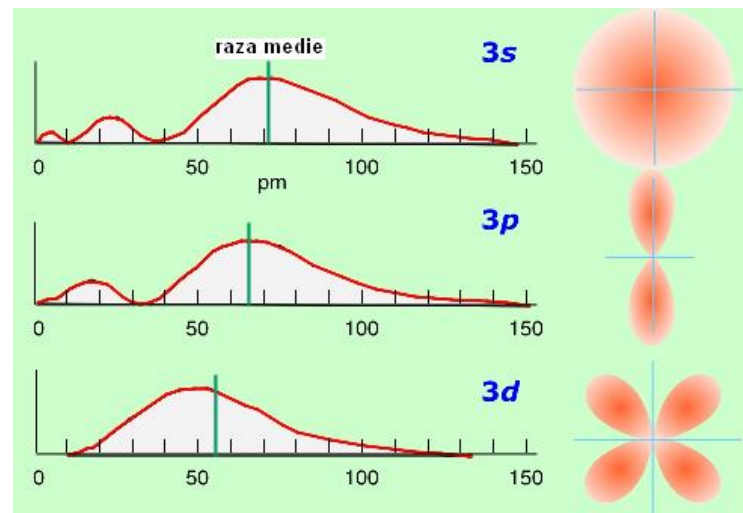
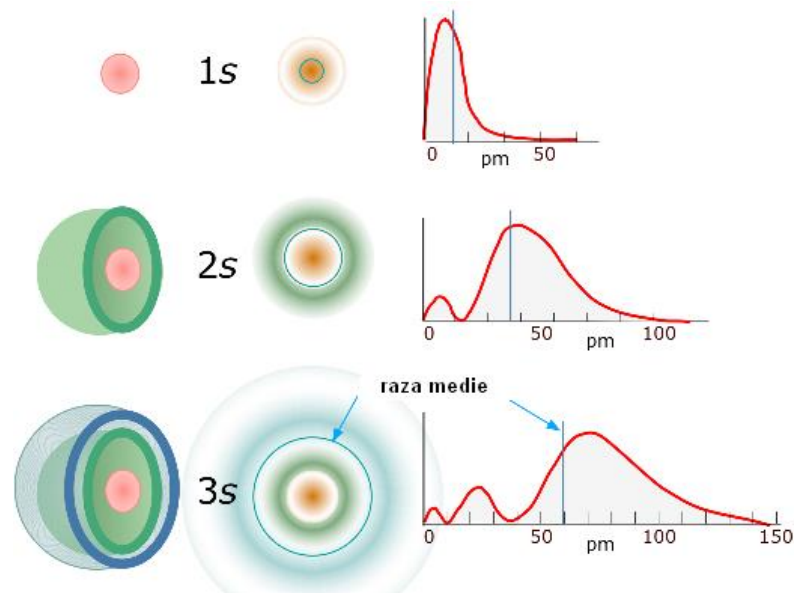
- **Stările cuantice** ale unui electron sunt date de funcția de undă cu valori în spațiu și timp.
- Evoluția în timp poate fi calculată folosind legile mecanicii cuantice (*ec. Schrödinger*)



➤ Starea unui electron într-un atom este dată de **patru numere cuantice** care definesc proprietățile orbitalului în care se găsește electronul:

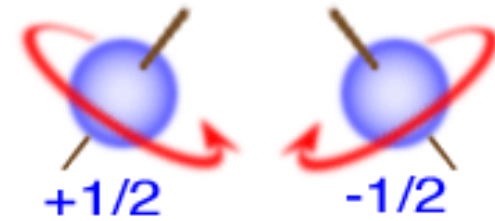
➤ **Numărul cuantic principal**, notat $n \geq 1$. Acesta cuantifică energia totală a orbitalului și distanța electronului față de nucleul atomului: nivelele electronice se împart în pături K, L, M,.

➤ **Numărul cuantic azimutal**, notat l , cu valori între 0 și $n-1$. Acesta împarte o pătură în subpături, determinând tipul orbitalului, cunoscut ca și numărul de noduri în graficul densității de sarcină



➤ **Numărul cuantic de spin** – notat **s**, cu valorile **-1/2** sau **+1/2**

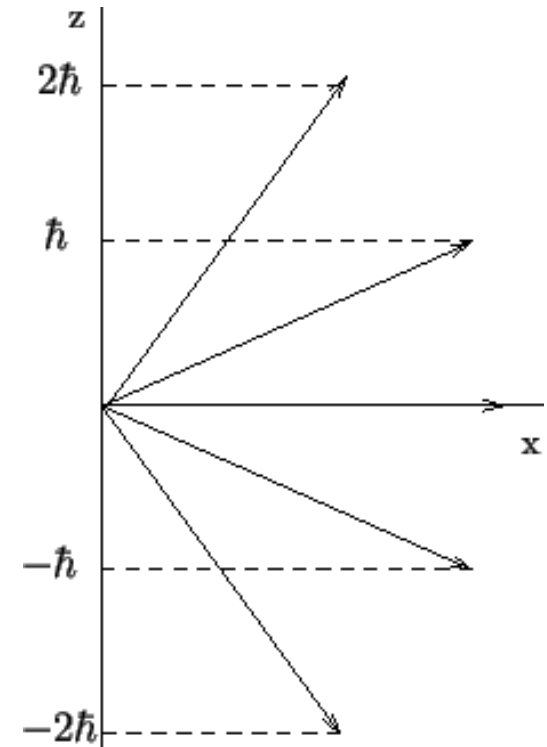
- ✓ Spinul este o proprietate intrinsecă a electronului, independentă de celelalte numere cuantice.



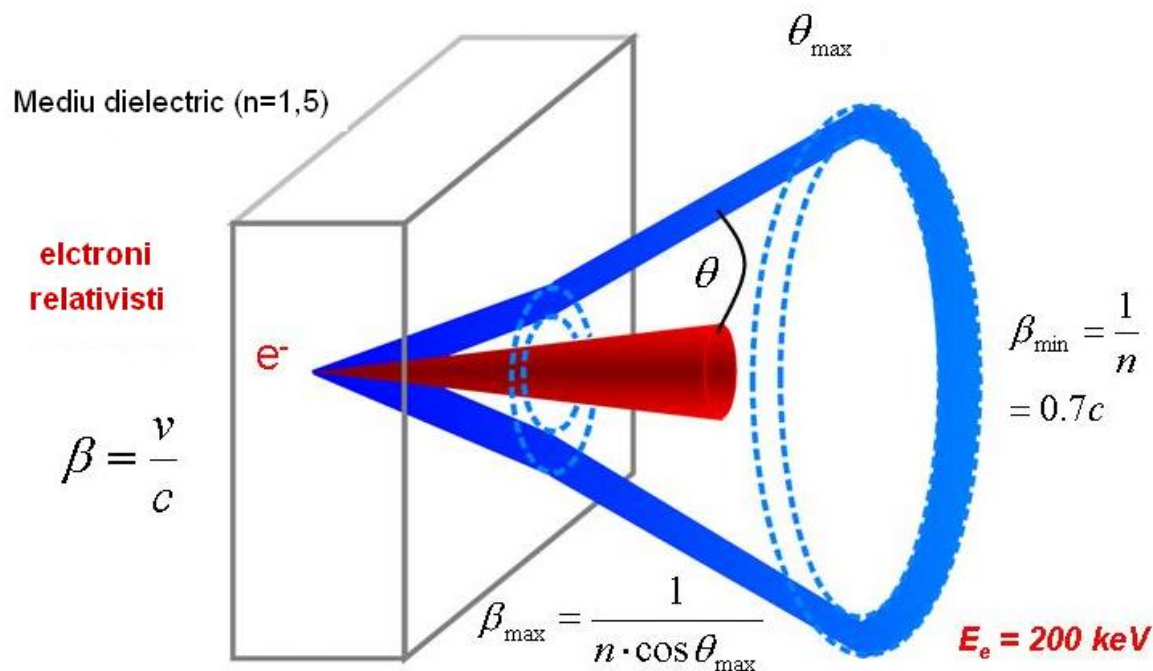
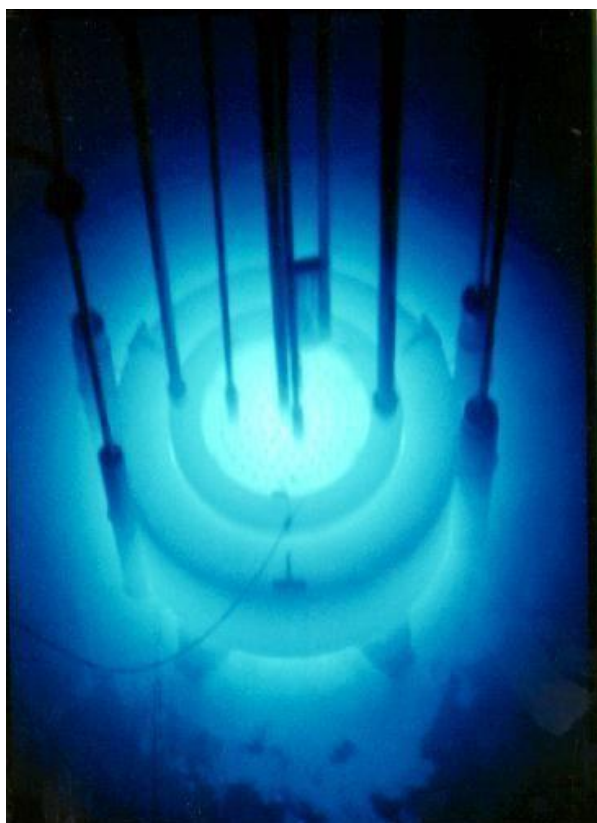
➤ **Numărul cuantic magnetic** - notat **m**, cu valori cuprinse între **-l** și **+l**, inclusiv 0.

- ✓ Caracterizează transferul de energie al unui orbital atomic datorat câmpului magnetic extern (*efectul Zeeman*).
- ✓ Acest număr indică orientarea în spațiu a momentului magnetic.

$$L_z = m \cdot \hbar ; m = -l, -l+1, \dots, l-1, +l$$



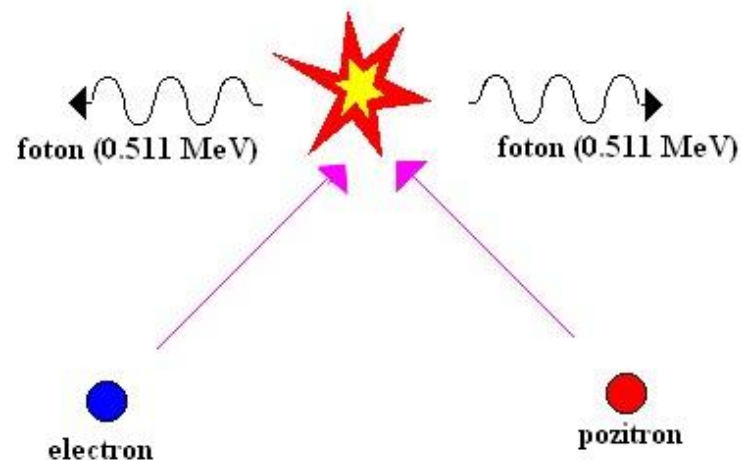
- **Viteza** tipică a electronului este $0.75c$, însă atunci când traversează un mediu dielectric (ex. apa, unde viteza locală a luminii este mai mică decât în vid), electronii traversează temporal mediu, cu o viteză mai mare decât lumina (**efect Cerenkov**) și generează radiație de natură electromagnetică, numită **radiație Cerenkov** (spoturi de lumină albastră)



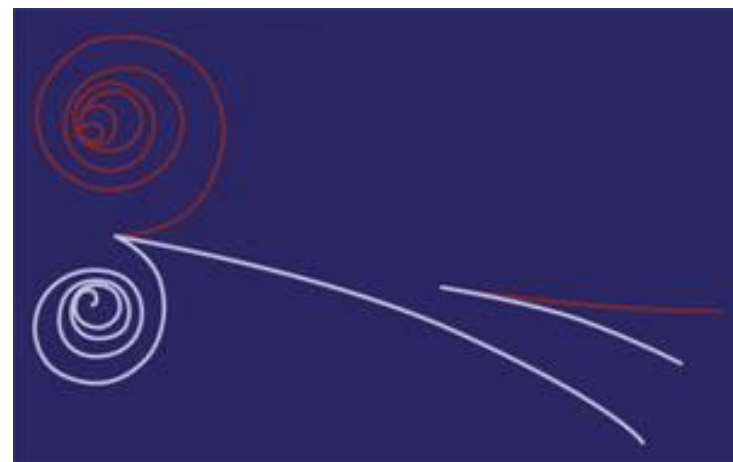
Pozitronul

- **Pozitronul** sau **antielectronul** este antiparticula electronului și are aceleași caracteristici cu ale electronului cu excepția sarcinii care este pozitivă (+1).

- Interacțiunea la energie joasă a unui pozitron cu un electron conduce la procesul de anihilare electron-antielectron, generându-se doi fotoni situați în spectrul radiațiilor gamma.

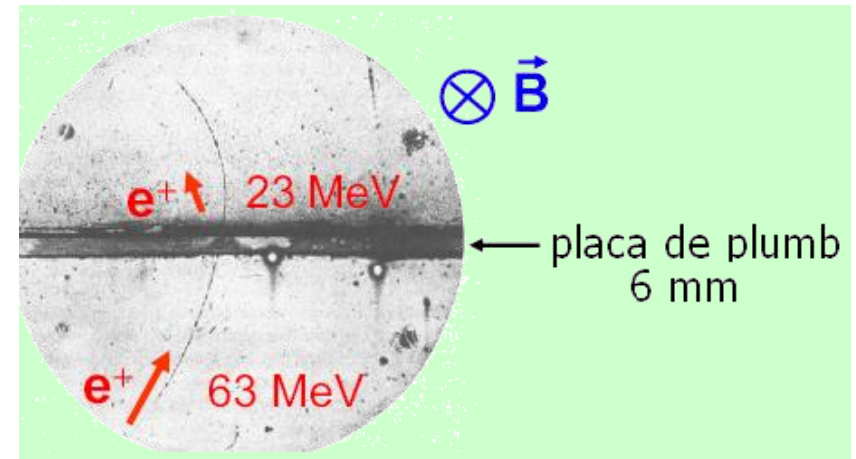
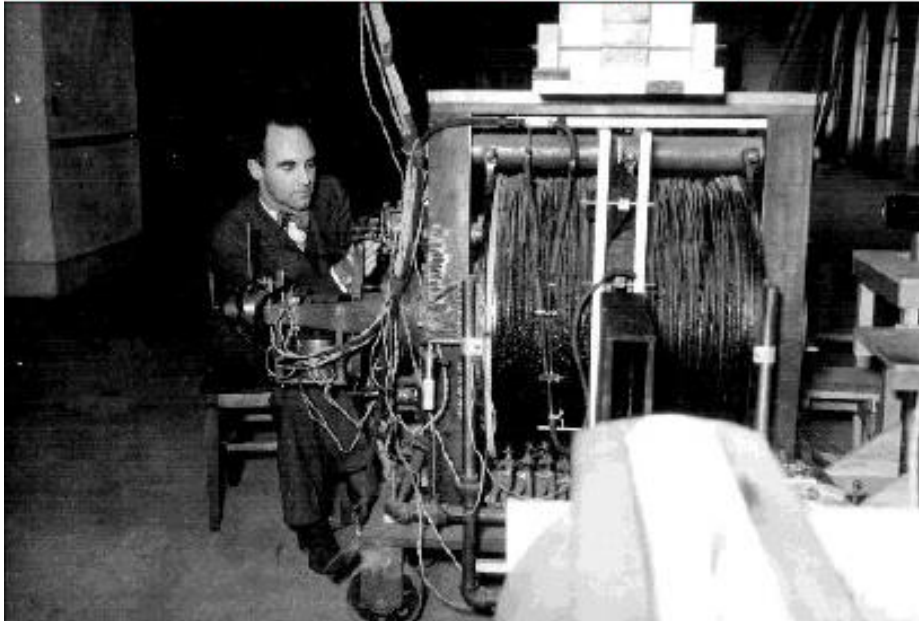


- Existența pozitronilor a fost postulată prima dată de către Paul Dirac în 1928, ca o consecință a **ecuației Dirac**.
- În 1932 pozitronii au fost descoperiți de către Carl D. Anderson în radiația cosmică (*a denumit această particulă **pozitron***).



➤ *Pozitronul a fost descoperit prin trecerea de radiații cosmice prin "camera cu ceață".*

C.D.Anderson, Phys Rev 43 (1933) 491




✓ Curbura în câmp magnetic arată că este vorba de o particulă cu aceeași masă cu cea a electronului, însă cu sarcina pozitivă: "pozitronul"

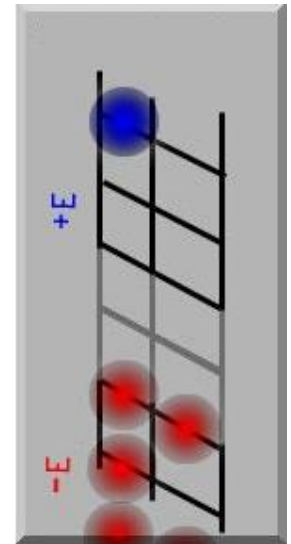
$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad \text{2 soluții:} \quad E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

➤ Două domenii ale energiei:

$$m_0 c^2 \leq E < \infty \quad \text{și} \quad -\infty \leq E < -m_0 c^2$$

electron





➤ O particulă care se mișcă în spațiu liber are o energie cinetică și o energie de repaus, $m_0 c^2$. Pentru ca energia totală să fie negativă, ar trebui ca masa să fie negativă – *dilema masei negative – două interpretări*

✓ Dacă s-ar realiza un sistem de doi electroni cu sarcină negativă ($-e$), dar cu mase egale și de semne opuse ($\pm m$), atunci fiecare electron ar acționa asupra celuilalt cu o forță de respingere, fiind accelerați continuu în același sens, viteza crescând la infinit. *O cu masă negativă – se mișcă în sens contrar acțiunii forței exercitate !*

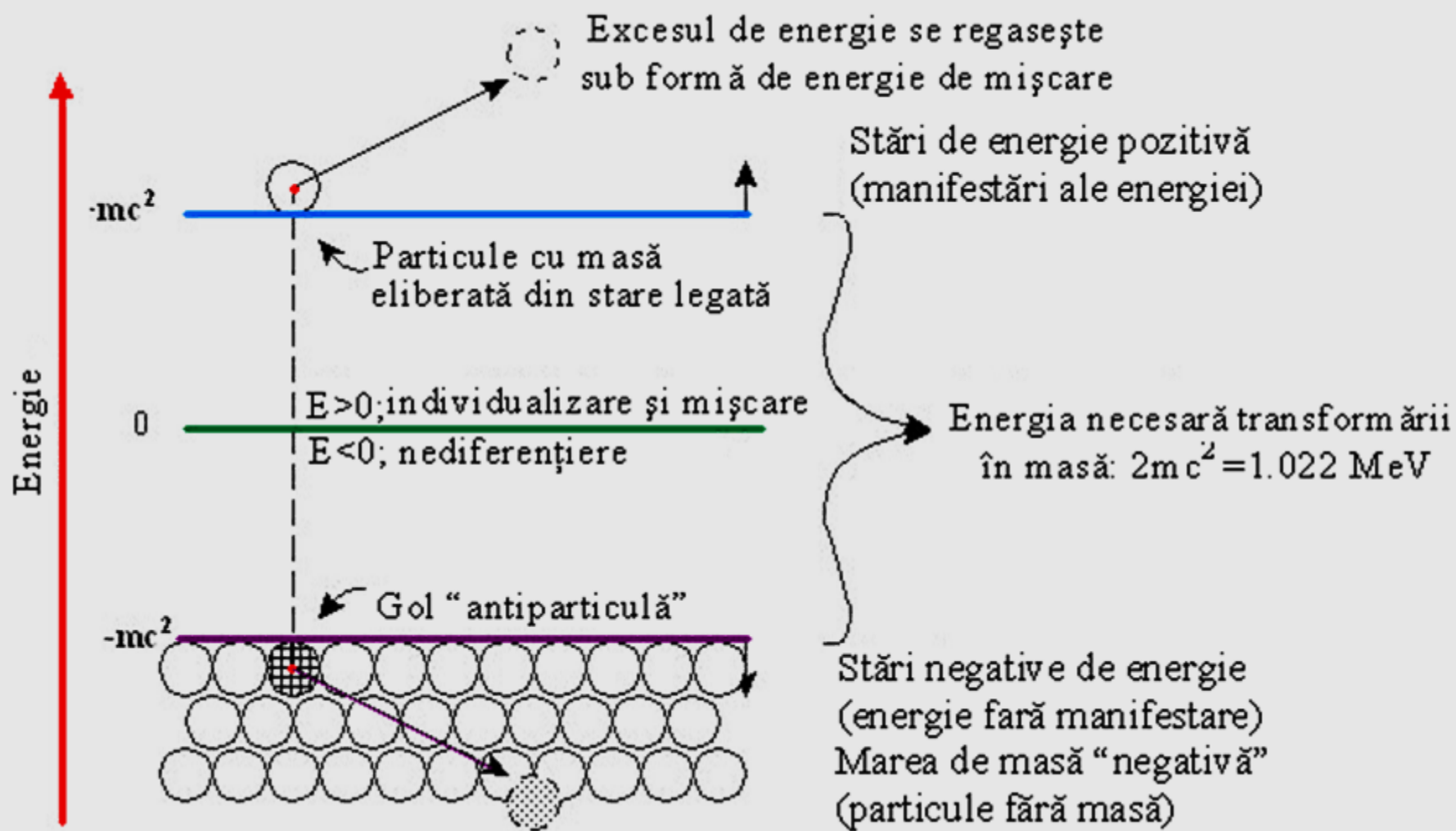
✓ A doua serie de valori ale energiei electronului poate fi interpretată natural, dacă se presupune existența unor electroni cu masă pozitivă ($m > 0$) și cu sarcină pozitivă ($+e$), care să satisfacă raportul dintre sarcină și masă:

$$\frac{-e}{-m} = \frac{+e}{+m}$$

Interpretarea Dirac

- Nivelele cu energie negativă există și se pot umple cu electroni, al căror număr se determină pe baza principiului de excluziune a lui Pauli. Acest spațiu vid nu are proprietăți materiale și de aceea nu este posibil să se observe în condiții normale. Un electron cu masă pozitivă ar trebui să cedeze atâta energie, încât masa lui să devină negativă.
- Electronii cu “masă negativă” din “*vidul Dirac*”, pot să absoarbă energie de la câmpul electromagnetic ($h\nu$) de energie suficient de mare (gama) care să permită saltul la o stare neocupată (*o stare de energie pozitivă*), în care electronul are masă pozitivă.
- În urma acestui proces, “*vidul perfect*”, ocupat complet de electroni în stare de energie negativă, se transformă într-un “vid imperfect” din care lipsește un electron cu masă negativă (o particulă de sarcină $-e$ și masă $-m$). Acest lucru este echivalent cu prezența unei particule cu sarcina $-(-e)=+e$ și masa $-(-m)=+m$. Intrucât această particulă aparentă, are o masă pozitivă egală cu masa electronului, se va comporta normal față de reacțiunea la o forță și diferă doar prin sarcină; **pozitron**





- Energia inițială a electronului în vidul perfect (E_i) este data de relația:

$$E_i = - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Prin absorbție de energie E_γ , energia electronului de viteză u , se "materializează" într-o stare de energie pozitivă :

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = E_\gamma - \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Din conservarea energiei – energia fotonului E_γ care interacționează cu un electron din starea de energie negativă și pe care îl conduce în starea de energie pozitivă, rezultă :

$$E_\gamma = h\nu = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

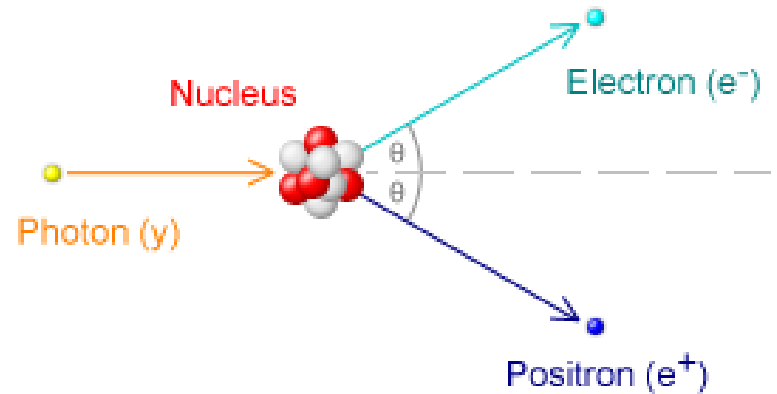
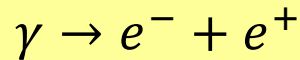
- În funcție de impulsuri: p_{e^-}, p_{e^+}

$$E_\gamma = h\nu = \sqrt{p_{e^-}^2 + m_0^2 c^4} + \sqrt{p_{e^+}^2 + m_0^2 c^4}$$

- Energia minimă (*particule în repaus $u=v=0$*)

$$E_\gamma = 2m_0c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

- Un foton crează electron și un “gol” interpretat ca un pozitron; **generare de perechi**:

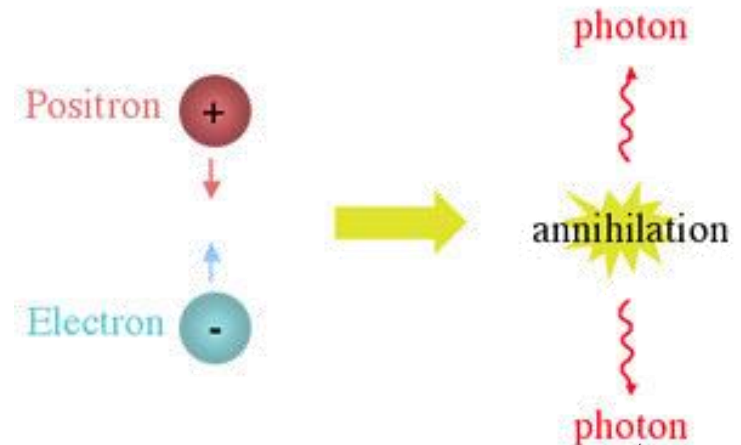
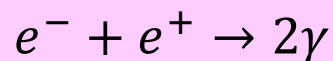


Observație

- Generarea de perechi **nu se produce în spațiul liber**, ci în prezența unui câmp (*câmp nuclear-coulombian*) care asigură conservarea impulsului în interacțiunea foton-nucleu

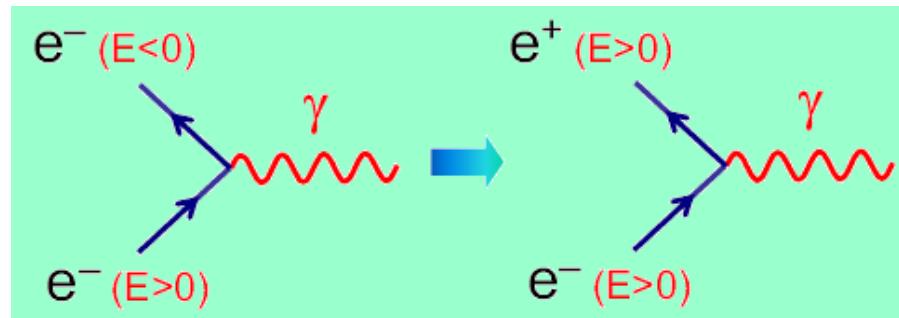
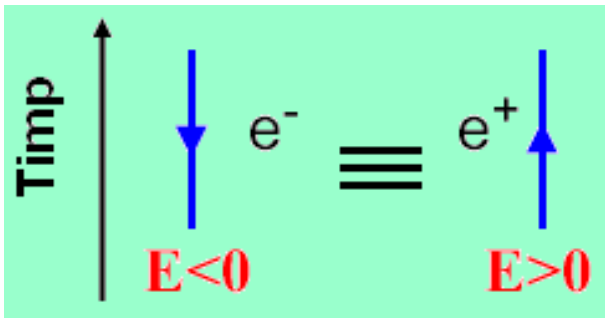
- **Proces invers:**

- ✓ Un electron de masă pozitivă ocupă “golul” din “*vidul imperfect*” (pozitronul), se restabilește “*vidul perfect*” în care electronul și pozitronul dispar, emitându-se radiație gama: ***anihilare de perechi***



Interpretarea Feynman-Stückelberg

- Soluția de energie negativă este interpretată fie ca o particulă de energie negativă, care se propagă înapoi în timp (*situație neverosimilă*), sau echivalent, o anti-particulă cu energie pozitivă care se propagă în viitor



$$e^{-i(-E)(-t)} \rightarrow e^{-iEt}$$

- ✓ în diagrama Feynman săgeata pentru anti-particulă se propagă în spate pe axa timpului corespunzând soluției energiei negative

- ✓ Astfel este mai convenabil să se lucreze pentru antiparticule cu funcții de undă în care energia este pozitivă

$$E = |\sqrt{|\vec{p}|^2 + m^2}|$$

Mezonii μ (miuonii)

- Particule elementare cu sarcină electrică negativă și spin $1/2$ (fermioni) μ^-

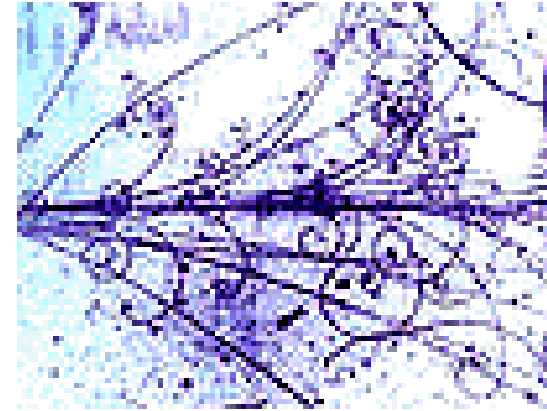
Viața medie $2.2 \mu\text{s}$

Masa estimată $105.7 \text{ MeV}/c^2$ ($206.77 m_e$)

Antiparticula miuonul pozitiv μ^+

Nu există miuon neutru

- ✓ *Miuonii au fost descoperiti de către Carl D. Anderson în 1936, în radiațiile cosmice.*

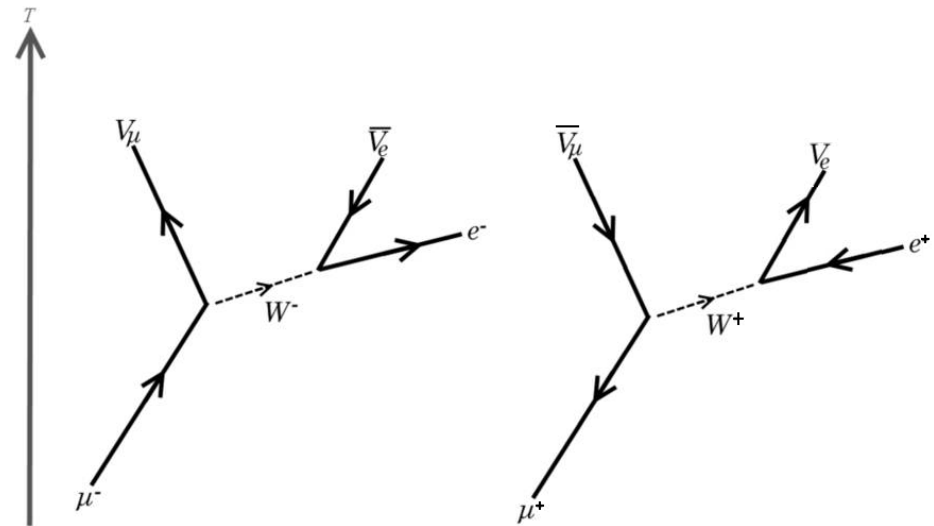
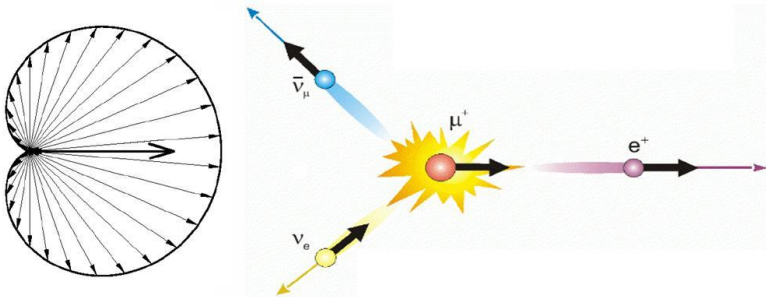


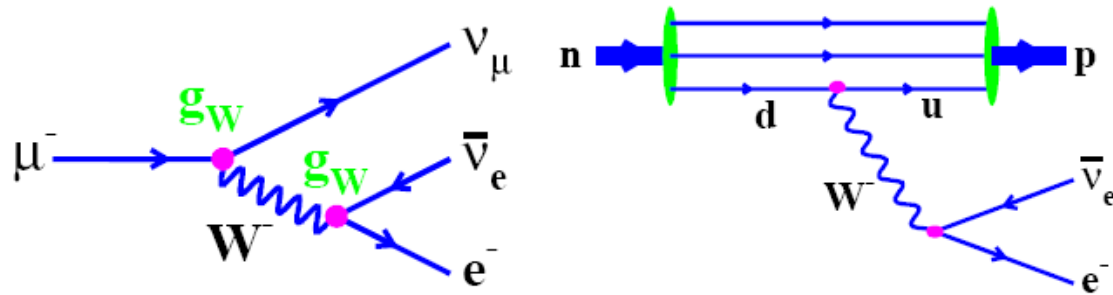
Dezintegrarea miuonului

- Se dezintegrează prin interacțiuni slabe

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

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





➤ Lărgimea de dezintegrare

$$\Gamma_{\mu} = \frac{1}{\tau_{\mu}} = \frac{G_F^2}{192\pi^3} m_{\mu}^5$$

unde G_F este constanta de cuplaj Fermi

$$G_F = \frac{\sqrt{2}}{8} \left(\frac{g_W}{m_W c^2} \right)^2 (\hbar c)^3$$

g_W - constanta de cuplaj a interacțiunii slabe
 m_W - masa bosonului W
 c - este viteza luminii
 \hbar - constanta Planck redusă .

➤ Constanta de cuplaj Fermi (G_F) pentru cele două tipuri de dezintegrare

$$G^{\mu} = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$G^{\beta} = (1.136 \pm 0.003) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$\frac{G^{\beta}}{G^{\mu}} = 0.974 \pm 0.003$$

Concluzie:

➤ Tăria interacțiunii slabe de dezintegrare pentru miuoni/electroni este aproape aceeași ca pentru dezintegrarea prin quarci up/down

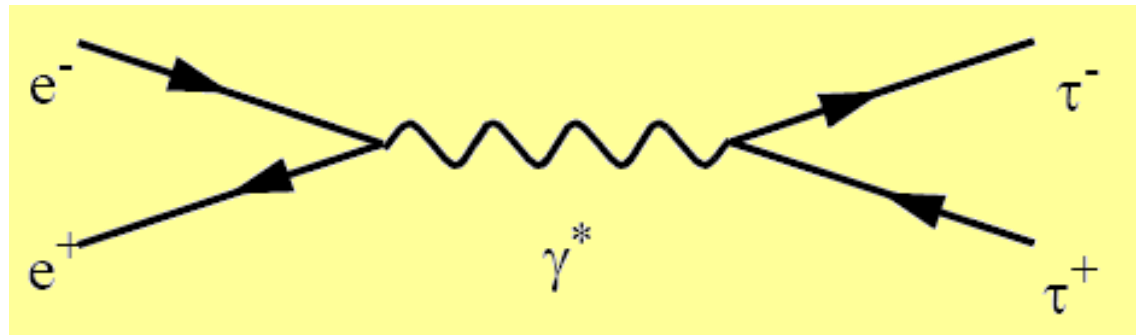
Leptonul Tau (τ^-)

Leptonul tau (*tauonul*)

- particula elementară încărcată negativ
- timp de viață $2.910^{-13}s$
- masa $1777 \text{ MeV}/c^2$
- Spinul $1/2$ (*fermion*)
- antiparticula este conjugata de sarcină τ^+

- Tauonul a fost detectat la o serie de experimente între 1974 și 1977 de către Martin Lewis Perl cu colegii săi de la SLAC - grupul LBL (*Stanford Linear Accelerator Center, Lawrence Berkeley National Laboratory*) în ciocniri la energie înaltă $e^+ e^-$

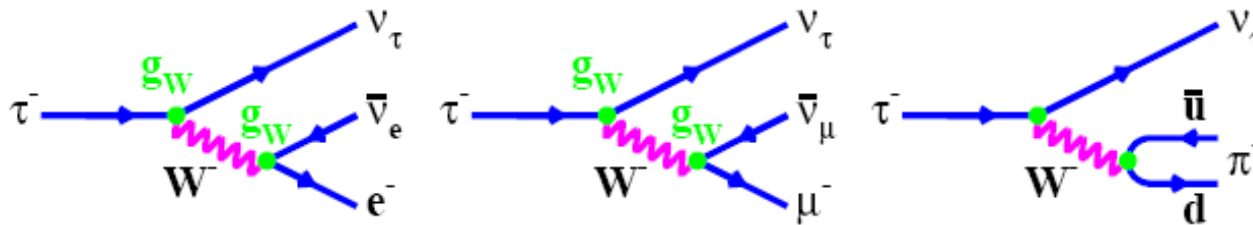
$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$$



➤ Dezintegrarea leptonului Tau

$$m_\tau > m_\mu, m_\pi$$

- ✓ Tauonul este singurul lepton care se poate dezintegra în hadroni (*masele altor leptoni sunt prea mici*)
- ✓ Modurile de dezintegrare este prin interacțiunea slabă.
- ✓ Există mai multe moduri posibile de dezintegrare



➤ Frația de dezintegrare (**Br**) este predominant hadronică

- ★ $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ (17.8 ± 0.1 %)
- ★ $\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ (17.3 ± 0.1 %)
- ★ $\tau^- \rightarrow \text{hadroni}$ (64.7 ± 0.2 %)

$$\frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau)}{Br(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} = 0.9726$$

➤ Se consideră, că leptonul tau poate forma atomi exotici și alte particule subatomice încărcate.

- ✓ Unul dintre acestea ar consta dintr-un antitauon și un electron: $\tau^+ e^-$
- ✓ Altul ar fi un atom de oniu $\tau^+ \tau^-$ numit **ditauonium** sau **tauonium** care este greu de detectat din cauza duratei de viață extrem de scurte a tauonului necesar pentru a forma acest atom la energii non-relativiste (*durata medie de viață a stărilor fundamentale ale tauoniumului este mult mai lungă decât durata medie de viață a unui singur lepton τ*).