

Program pre učiteľov fyziky z členských štátov CERNu

# Fyzika elementárnych častíc

## 2. symetrie

Martin Mojžiš

# objavené vs. vypočítané

$e$ <i>elektrón</i>	$\mu$ <i>mión</i>	$\tau$ <i>tau</i>
$\nu_e$ <i>e-neutrino</i>	$\nu_\mu$ <i><math>\mu</math>-neutrino</i>	$\nu_\tau$ <i><math>\tau</math>-neutrino</i>
$u$ up	$c$ charm	$t$ top
$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom

$\gamma$ fotón
$g$ gluón
$W^\pm, Z^0$ W a Z bozón
$H$ Higgs

vo výpočtoch hrala vždy významnú úlohu nejaká symetria

# symetrie – čo sú a ako sa prejavujú

- symetria fyzikálnej teórie:
  - nemennosť tejto teórie pri istom type transformácií (napríklad pri posunutíach, rotáciách, ...)
- prejavy symetrií:
  - zákony zachovania
  - degenerácia spektier
  - výberové pravidlá
- užitočnosť symetrií
  - uľahčujú niektoré výpočty ak je teória známa
  - umožňujú niektoré výpočty ak je teória známa

# symetrie a zákony zachovania

teoréma Emy Noether:

symetria fyzikálnej teórie  $\Rightarrow$  zákon zachovania

symetria	zákon zachovania
posunutia v priestore	hybnosti
posunutia v čase	energie
otočenia v priestore	momentu hybnosti
⋮	⋮

# symetrie a degenerácia spektier

degenerácia: rôzne kvantové stavy s rovnakou energiou

symetria  $\Rightarrow$  určitá degenerácia jednotlivých hladín

3-násobná  
degenerácia

úplná  
rotačná  
symetria

približná  
degenerácia

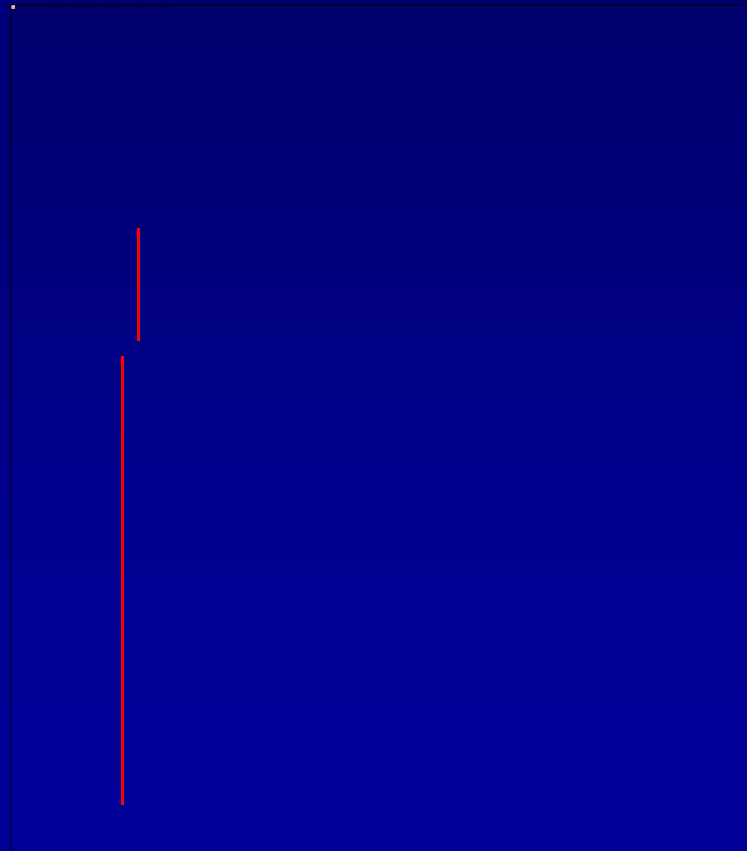
mierne  
narušená  
symetria

atóm vodíka – Zeemanov jav

# symetrie a výberové pravidlá

výberové pravidlá: niektoré procesy nemôžu prebiehať

symetria  $\Rightarrow$  určité výberové pravidlá



- niektoré prechody nepozorujeme
- dôvod: oni neprebiehajú
- dôvod: symetria
  
- povedané naozaj vedecky:  
amplitúda pravdepodobnosti pre tieto procesy je nulová a to práve z dôvodu symetrie

# ilustrácia symetrií: hmotnosti častíc

$e$ <i>elektrón</i>	1	$\mu$ <i>mión</i>	200	$\tau$ <i>tau</i>	3500	$\gamma$ <i>fotón</i>	0
$\nu_e$ <i>e-neutríno</i>	$\sim 0$	$\nu_\mu$ <i><math>\mu</math>-neutríno</i>	$< 0.5$	$\nu_\tau$ <i><math>\tau</math>-neutríno</i>	$< 60$	$g$ <i>gluón</i>	0
$u$ <i>up</i>	10	$c$ <i>charm</i>	2600	$t$ <i>top</i>	350000	$W^\pm$ <i>W bozón</i>	160000
$d$ <i>down</i>	20	$s$ <i>strange</i>	400	$b$ <i>bottom</i>	9000	$Z^0$ <i>Z bozón</i>	180000
						$H$ <i>Higgsov bozón</i>	?

# aké symetrie v tabuľke hmotností?

- $m_\nu \sim 0$  časopriestorové symetrie
- $m_u, m_d \sim 10$  izospinová  $SU(2)$  symetria
- $m_s \sim 100$   $SU(3)_f$  symetria
- $m_\gamma \sim 0$  kalibračná  $U(1)$  symetria
- $m_g \sim 0$  kalibračná  $SU(3)_c$  symetria
- $m_W, m_Z \sim 100000$  spontáne narušená kalibračná  $SU(2)_w$  symetria



# neutríno a zákony zachovania

## časopriestorové symetrie:

- posunutia

- v priestore
- v čase

hybnosť  $\vec{p}$

energia  $E$

- Lorentzove transformácie

- rotácie
- boosty  
(medzi inerciálnymi sústavami)

spin

hmotnosť

$$E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4$$

- zrkadlenia

- v priestore
- v čase

parita

# hybnosť a energia

$\beta$ -rozpad jadier



J. Chadwick 1914

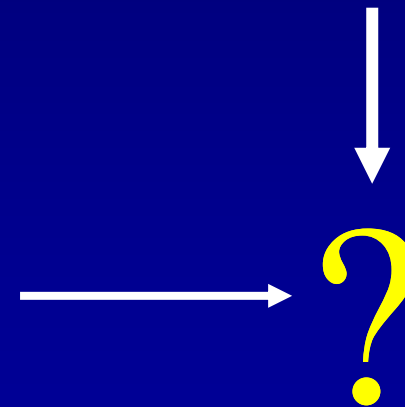
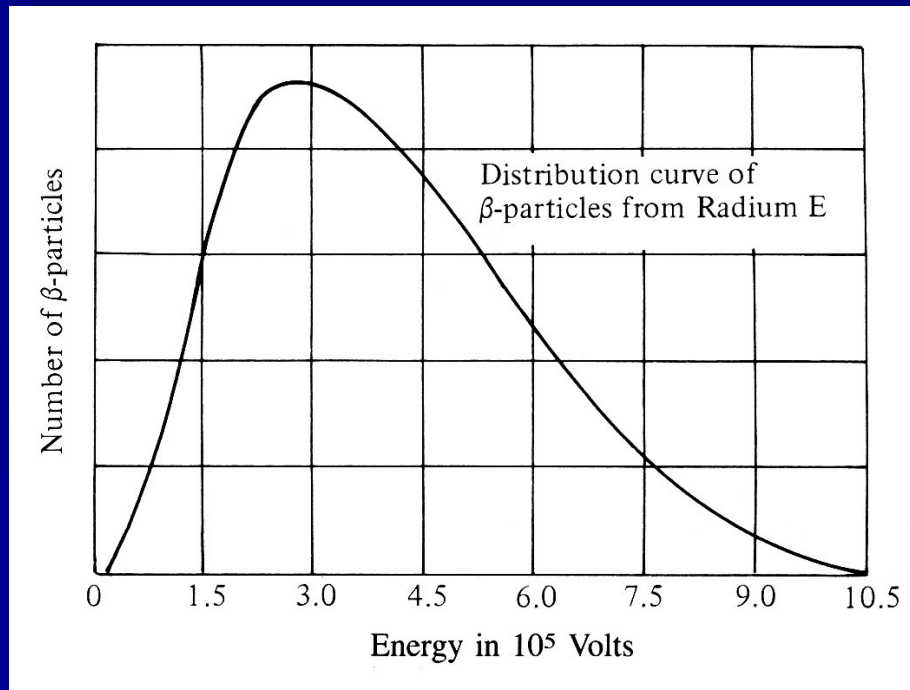
Radium E =  ${}^{210}\text{Bi}_{83}$

zachovanie energie a hybnosti

$$\vec{p}_{Bi} = \vec{p}_{Po} + \vec{p}_e$$

$$E_{Bi} = E_{Po} + E_e$$

dáva jednoznačnú hodnotu  $E_e$



energia sa nezachováva?

Original - Photocopy of PCC 0343  
Abschrift/15.12.56 PW

4. dec 1930

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst  
anzuhören bitte, Ihnen das Nähere auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $\alpha$ - und  $\text{Li-}\beta$  Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweigten Ausweg  
verfallen in den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energieeats  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
wäre von derselben Urdensenergie wie die Elektronenmasse sein und  
jedemfalls nicht grösser als  $0,01$  Protonenmasse. Das kontinuierliche  
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, d.h. dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Überbringer  
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente  
verlassen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dem  
nach wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe  
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis  
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein absolutes oder etwa  
höchst grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein  
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer sagt,  
gemusst und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum  
wird durch einen Ausbruch meines vertrieben Vorgängers im Amt,  
Herrn Beyer, beleuchtet, der mir kürzlich in Basel gesagt hat:  
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.-  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unakademisch  
bin.- Mit vielen Grüßen an Euch, sowie an Herrn Bask, Euer  
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

*drahé rádioaktívne dámy a páni*

*...prišiel som na zúfalý spôsob, ako  
zachrániť zákon zachovania energie*

*...v jadre by mohla existovať  
neutrálna častica, ktorú budem  
volať neutrón, so spinom  $1/2$  a  
hmotnosťou rádovo ako elektrón ...*

*...spojité beta spektrum sa dá  
pochopiť za predpokladu, že pri  
beta rozpade sa okrem elektrónu  
emituje aj neutrón tak, že súčet  
energií neutrónu a elektrónu je  
konštantný ...*

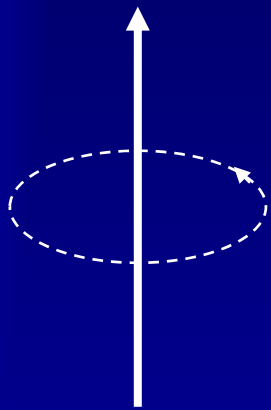
*W. Pauli*

**Pauliho „neutrón“ = neutríno**

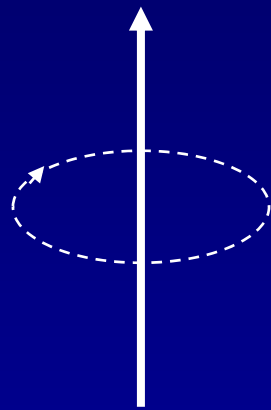
# spin a hmotnosť

spin 1/2

W.Pauli 1930



ľavotočivé  
neutríno



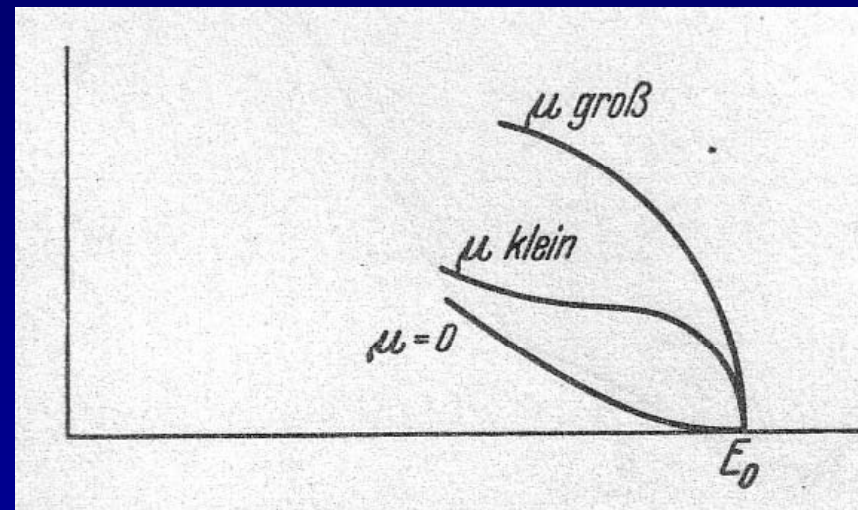
pravotočivé  
neutríno

! obrázky sú zavádzajúce !

teoretická predpoveď pre  $\beta$ -rozpad

E.Fermi 1933

$\mu$  = hmotnosť neutrína,  $E_0$  = maximálna energia elektrónu



experimentálne dáta:  $\mu = 0$

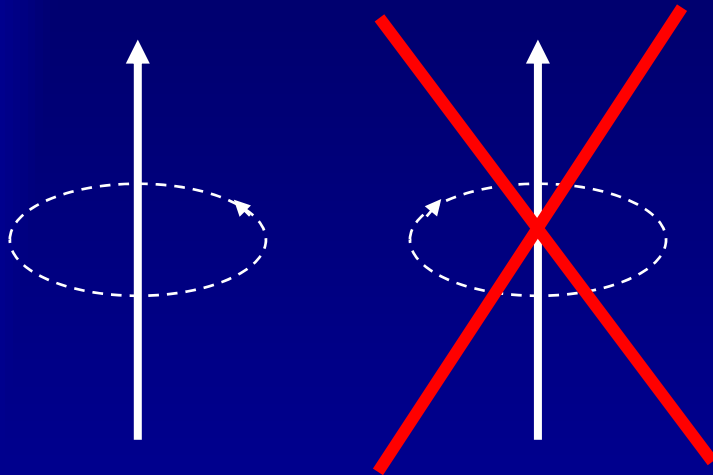
# parita

nezachovanie parity

T.D.Lee, C.N.Yang 1957

V-A teória slabých interakcií

maximálne nezachovanie parity



$$\Rightarrow \mu = 0$$

presne

ľavotočivé  
neutríno

pravotočivé  
neutríno

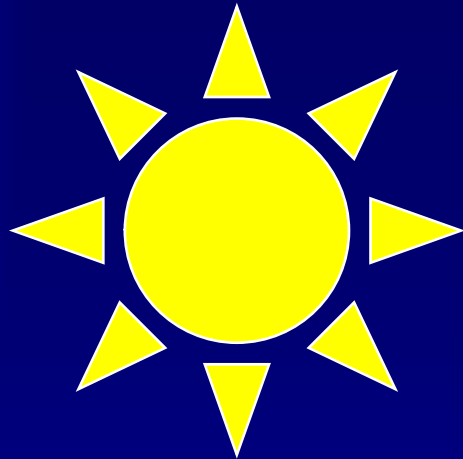
nulová hmotnosť  $\Rightarrow$  rýchlosť svetla  
rýchlosť svetla  $\Rightarrow$  nedá sa predbehnúť  
nedá sa predbehnúť  $\Rightarrow$  ľavotočivé vždy

! obrázky sú zavádzajúce !

## to jsou paradoxy

- Pauli tvrdohlavo trval na časopriestorových symetriách a to ho priviedlo k neutrínu
- Lee a Yang chladnokrvne odvrhli niektoré časopriestorové symetrie a neutrínu to nevadilo
- pre nulovú hmotnosť neutrína sme tým dokonca získali perfektné teoretické porozumenie
- ale dnes sa máme veľmi silné dôvody myslieť si, že táto hmotnosť nulová nie je

# nenulová hmotnosť neutrín



$\gamma, \nu_e$



experimentálne dáta:  
podstatne menej  $\nu_e$

teoretický výpočet:  
presné množstvo  $\nu_e$

## problém slnečných neutrín

teoretické riešenie: vyžaduje dve veci  
takzvaný mixing a nenulovú hmotnosť neutrín

experimentálne dáta: mixing potvrdený

# kvarky a degenerácia spektier

degenerácia energií &  $E = mc^2 \Rightarrow$  degenerácia hmotností

W.Heisenberg 1932

- neutrón a protón majú takmer rovnakú hmotnosť
- nie je to náhoda, ale prejav symetrie jadrových síl
- symetria: jadrové sily sa nemenia pri zámenách  $p \leftrightarrow n$
- symetrii sa hovorí izospinová  $SU(2)$  symetria

! symetria neznámej teórie !



kozmicke žiarenie

# $SU(2)$ symetria a pióny

H. Yukawa 1935

- teoretická predpoveď: pióny
- experimentálny objav: 1947  $\pi^\pm$   
1950  $\pi^0$
- hmotnosti:  $\pi^+$  a  $\pi^-$  rovnaké,  
 $\pi^0$  skoro také isté
- nekazí trojica  $SU(2)$  symetriu?
- nie
- $SU(2)$  pripúšťa 3-násobnú degeneráciu

C. Powell



! symetria neznámej teórie !

# $SU(2)$ symetria a podivné častice

50-te roky

- obrovské množstvo nových častíc
- väčšina z nich takzvané podivné
- všetky sa ukladali do multipletov (rovnaká hmotnosť aj iné vlastnosti)



$K^+ K^0 \quad \bar{K}^0 K^- \quad \eta^0$

$\Xi^0 \Xi^- \quad \Sigma^+ \Sigma^0 \Sigma^- \quad \Lambda^0$

! symetria neznámej teórie !

# $SU(3)$ symetria a osmoraká cesta

**M.Gell-Mann** Y.Neeman 1961

- hadróny sa ukladajú do oktetov
- *podobné* hmotnosti aj iné vlastnosti

$$\pi^+ \pi^0 \pi^- \quad K^+ K^0 \quad \bar{K}^0 K^- \quad \eta^0$$

$$p^+ n^0 \quad \Xi^0 \Xi^- \quad \Sigma^+ \Sigma^0 \Sigma^- \quad \Lambda^0$$

- mohol by to byť prejav degenerácie?
- aká symetria by za tým mohla byť?
- odpoveď:  $SU(3)$  symetria



! symetria neznámej teórie !

# $SU(3)$ symetria a kvarky

**M.Gell-Mann** G.Zweig 1964

- z čisto matematického hľadiska:  
oktety sú skladačky z tripletov
- a čo z fyzikálneho hľadiska:  
skladajú sa hadróny z niečoho?
- áno:  
trojica z tripletu sú reálne častice  
hovorí sa im kvarky  
hadróny sú ich viazané stavy (kvarky sú v nich uväznené)

! symetria neznámej teórie !

# rodiny a výberové pravidlá

$e$ $\mu$
$\nu$
$u$ $d$ $s$



$e$	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
$u$	$c$	$t$
$d$	$s$	$b$

# rozpady, ktoré neexistujú

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm \gamma$$

- prečo sa tento rozpad nepozoruje?
- že by nespĺňal nejaký zákon zachovania?
- riešenie: zachovávajúce sa leptónové čísla

	+1	-1	0
$L_e$	$e^- \nu_e$	$e^+ \bar{\nu}_e$	všetci ostatní
$L_\mu$	$\mu^- \nu_\mu$	$\mu^+ \bar{\nu}_\mu$	všetci ostatní

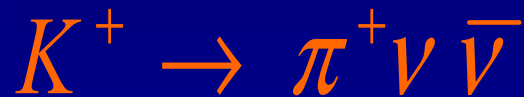
- všetky pozorované rozpady to rešpektujú

! symetria neznámej teórie !

# rozpady, ktoré takmer neexistujú

N.Cabbibo 1963

- univerzálnosť: slabé interakcie leptónov a hadrónov sú rovnaké
- kľúčový trik: takvaný mixing kvarkov (Cabbibov uhol) viac v 3.časti
- konečne aký-taký poriadok v slabých rozpadoch hadrónov
- nebolo ale jasné, prečo sú isté rozpady veľmi zriedkavé

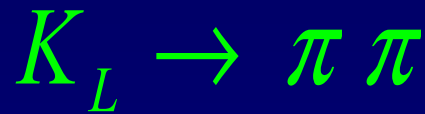


S.Glashow, J.Illiopoulos, L.Maiani 1970

- záchrana Cabbibovej teórie
- GIM mechanizmus
- leptón-hadrónová symetria
- nutné 2 dvojice kvarkov: treba  $c$  kvark

! symetria neznámej teórie !

# rozpady, ktoré existujú (ale mysleli sme, že existovať nemôžu)



J.Cronin, V.Fitch 1964

- nezachovanie CP symetrie
- C: zámena častíc a antičastíc
- P: zámena pravého a ľavého
- obrovské prekvapenie

M.Kobayashi, T.Maskawa 1973

- možnosť teoretického vysvetlenia nezachovanie CP symetrie
- mixing troch dvojíc kvarkov (CKM matica): treba  $t$  a  $b$  kvark



koniec druhej časti