Symetrie v časticovej fyzike

Mikuláš Gintner,
Katedra fyziky, ŽU

seminár JSMF

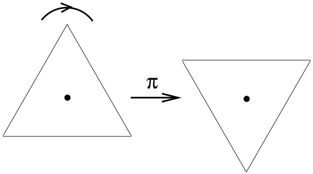
1.4.2008

Obsah

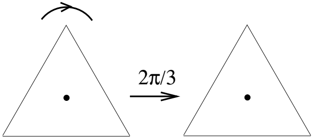
Obsah

Geometrické symetrie

transformácia:

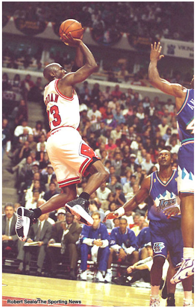


symetria:



Fyzikálne symetrie

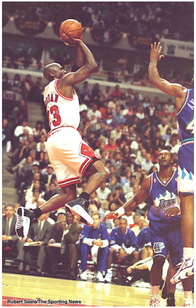
Chicago Bulls *vs.* **Los Angeles Lakers**



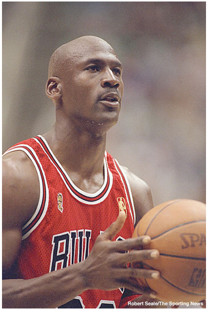
Chicago

Fyzikálne symetrie

Chicago Bulls *vs.* **Los Angeles Lakers**



Chicago

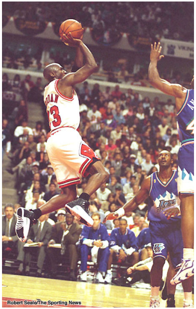


L.A.

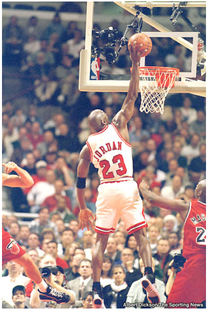
?

Fyzikálne symetrie

Chicago Bulls *vs.* **Los Angeles Lakers**



Chicago



L.A.

Fyzikálne symetrie

rovnaké zákony ...

- na rôznych miestach
- v rôznych časoch
- v rôznych smeroch
- ...

Fyzikálne symetrie

rovnaké zákony ...

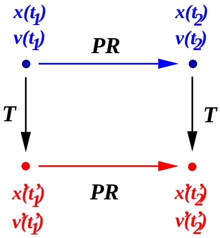
- na rôznych miestach
- v rôznych časoch
- v rôznych smeroch
- ...

zákony = pohybové rovnice

$$m\frac{d^2\vec{r}(t)}{dt^2} = \vec{F}(\vec{r}(t), \frac{d\vec{r}(t)}{dt}, t)$$

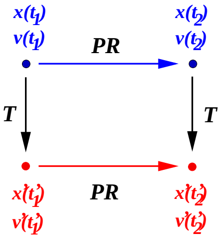
Fyzikálne symetrie

pohybová rovnica:
- diferenciálna rovnica
- veľa riešení
- počiatočné podmienky



Fyzikálne symetrie

pohybová rovnica:
- diferenciálna rovnica
- veľa riešení
- počiatočné podmienky



grupa:

množina G s binárnou operáciou

1. $a \circ b \in G$
2. $\exists e \in G : e \circ g = g$
3. $\exists g^{-1} \in G : g^{-1} \circ g = e$
4. $a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c$

diskrétne grupy: zrkadlenie,...
spojité grupy (Lie): rotácie,...
grupa symetrií

E.Noether teorém

každej spojitej symetrii fyzikálneho systému prislúcha ZZ

- posunutia v čase $\rightarrow$ ZZE
- posunutia v priestore $\rightarrow$ ZZH
- rotácie v priestore $\rightarrow$ ZZMH

Prečo je sila vektor?

rotácie:

$$\vec{F} \to \vec{F}' = R\vec{F}$$

$$\vec{a} \to \vec{a}' = R\vec{a}$$

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \to \quad \vec{F}' = m\vec{a}'$$

veličiny - vhodné transformačné vlastnosti

Lagrangián

Účinok:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\vec{r}, \vec{v}, t)\; dt$$

Princíp najmenšieho účinku:

$$\delta S = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{\partial L}{\partial \vec{r}}$$

Lagrangián

Účinok:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\vec{r}, \vec{v}, t)\ dt$$

Princíp najmenšieho účinku:

$$\delta S = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{\partial L}{\partial \vec{r}}$$

Lagrangián $L(\vec{r}, \vec{v}, t) \Rightarrow$ PR

Lagrangián

Účinok:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\vec{r}, \vec{v}, t)\; dt$$

Princíp najmenšieho účinku:

$$\delta S = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{\partial L}{\partial \vec{r}}$$

Lagrangián $L(\vec{r}, \vec{v}, t) \Rightarrow$ PR

invariantnosť L zaručuje invariantnosť PR

Galileiho princíp relativity

zákony KM sú rovnaké vo ∀ IVS

$$GT \begin{cases} \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{V}t \\ t' &= t \\ \vec{v}' &= \vec{v} - \vec{V} \end{cases}$$

Galileiho princíp relativity

zákony KM sú rovnaké vo ∀ IVS

$$GT \begin{cases} \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{V}t \\ t' &= t \\ \vec{v}' &= \vec{v} - \vec{V} \end{cases}$$

Maxwellove rovnice <u>nie sú</u> invariantné voči GT !

Einsteinov princíp relativity

$\forall$ zákony sú rovnaké vo $\forall$ IVS

$$LT \begin{cases} x' &= \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \\ t' &= \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \\ v' &= \frac{v - V}{1 - vV/c^2} \end{cases}$$

Einsteinov princíp relativity

∀ zákony sú rovnaké vo ∀ IVS

$$LT \begin{cases} x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} & \xrightarrow{V \ll c} \quad x - Vt \\ t' = \frac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} & \xrightarrow{V \ll c} \quad t \\ v' = \frac{v - V}{1 - vV/c^2} & \xrightarrow{V \ll c} \quad v - V \end{cases}$$

Einsteinov princíp relativity

∀ zákony sú rovnaké vo ∀ IVS

$$LT \begin{cases} x' = \dfrac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} & \xrightarrow{V \ll c} \quad x - Vt \\ t' = \dfrac{t - (V/c^2)x}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} & \xrightarrow{V \ll c} \quad t \\ v' = \dfrac{v - V}{1 - vV/c^2} & \xrightarrow{V \ll c} \quad v - V \end{cases}$$

Maxwellove rovnice sú invariantné voči LT

$$\Downarrow$$

$$\boxed{c' = c}$$

Einsteinov princíp ekvivalencie

$\forall$ zákony sú rovnaké vo $\forall$ VS

$$m_G = m_Z$$

Einsteinov princíp ekvivalencie

$\forall$ zákony sú rovnaké vo $\forall$ VS

$$m_G = m_Z$$

$$\Downarrow$$

Teória gravitácie (VTR)

Obsah

Objavovanie zákonov mikrosveta

základná experimentálna metóda časticovej fyziky:
zrážky častíc $\longrightarrow$ pozorovanie produktov

DÁTA $\longrightarrow$ SYMETRIE $\longrightarrow$ TEÓRIA

Objavovanie zákonov mikrosveta

základná experimentálna metóda časticovej fyziky:
zrážky častíc $\longrightarrow$ pozorovanie produktov

DÁTA $\longrightarrow$ SYMETRIE $\longrightarrow$ TEÓRIA

teoretické nástroje:

1. PR $\to$ invariant transformácií symetrie
2. veličiny $\to$ trafo podľa reprezentácií grupy symetrie
3. ŠTR $\to$ LT $=$ základná grupa symetrie
4. QM $\to$ pravdepodobnostný charakter
5. bodovosť elementárnych častíc

3+4+5 $\Rightarrow$ QTP

Lorentzove transformácie a typy častíc

LT:

- priestorové rotácie
- boosty

reprezentácie:

- skalár
- spinor
- 4-vektor
- ...

reprezentácia	spin	častica
skalár	0	Higgs
R,L-spinor	1/2	leptóny, kvarky
4-vektor	1	fotón, gluón, $W^{\pm}$, Z
...	...	...

spin → štatistika $\begin{cases} \text{bozóny}, & s = 0, 1, 2, \ldots \\ \text{fermióny}, & s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \ldots \end{cases}$

Diskrétne transformácie

- priestorová inverzia P (parita): $\vec{r} \to -\vec{r}$

skalár	$\to$	$\pm$skalár
R-spinor	$\leftrightarrow$	L-spinor
4-vector	$\to$	$(1, \mp 1, \mp 1, \mp 1)$4-vector

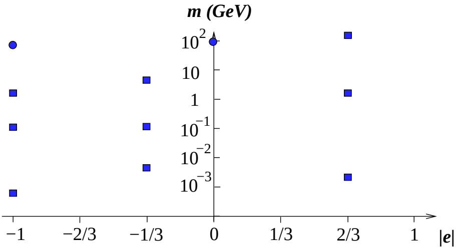
- časová inverzia T: $t \to -t$

skalár	$\to$	skalár
R(L)-spinor	$\to$	R(L)-spinor
4-vector	$\to$	$(-1, 1, 1, 1)$4-vector

P, T – symetrie klasickej fyziky

Interné transformácie a symetrie

- iné ako ČP transformácie:



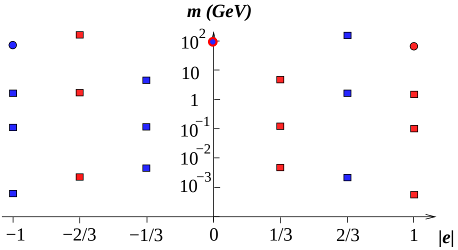
Interné transformácie a symetrie

- iné ako ČP transformácie:

- nábojové združenie C:

častica	$\leftrightarrow$	antičastica
náboj		-náboj

- diskrétna symetria



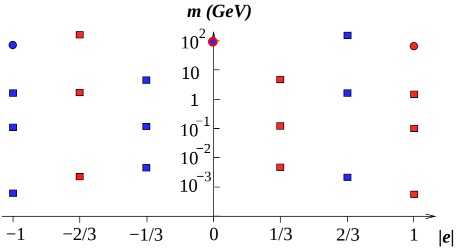
Interné transformácie a symetrie

- iné ako ČP transformácie:

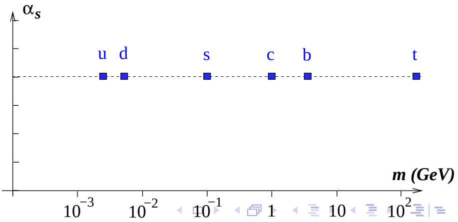
- nábojové združenie C:

  častica $\leftrightarrow$ antičastica
  náboj -náboj

  - diskrétna symetria



- silná interakcia nezávisí na "vôni" kvarku



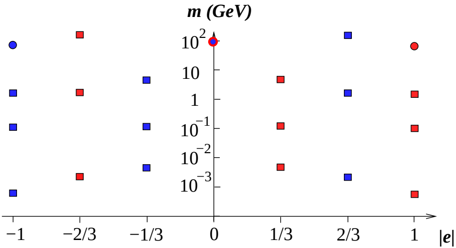
Interné transformácie a symetrie

- iné ako ČP transformácie:

- nábojové združenie C:

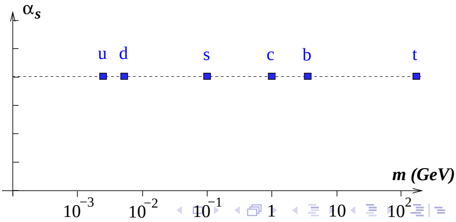
  častica $\leftrightarrow$ antičastica
  náboj -náboj

  - diskrétna symetria



- silná interakcia nezávisí na "vôni" kvarku

- ...



C, P, T SYMETRIE

teorém: CPT transformácia je univerzálnou symetriou QTP

interakcia	$\boldsymbol{P}$	$\boldsymbol{C}$	$\boldsymbol{CP}$	$\boldsymbol{CPT}$
gravit	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
elmag	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
silná	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
slabá	nie	nie	?	$\checkmark$

Obsah

Narušenie parity v slabých interakciách

L

leptóny			kvarky		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

interagujú slabo

R

leptóny			kvarky		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

neinteragujú slabo

Narušenie parity v slabých interakciách

L

leptóny			kvarky		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

interagujú slabo

R

leptóny			kvarky		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
e	μ	τ	d	s	b

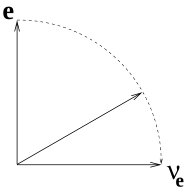
neinteragujú slabo

$$\Downarrow$$

narušenie P symetrie!!!

CP symetria je narušená slabými interakciami v kvarkovom sektore

Symetrie slabého Lagrangiánu



$SU(2)_L$-doublet:

$$\Psi_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

$SU(2)_L$-trafo:

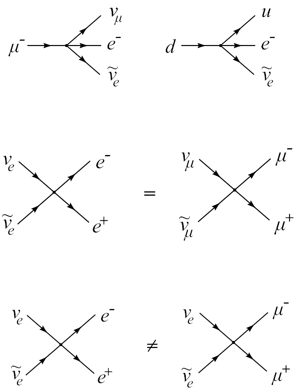
$$\Psi_L \to U(g)\Psi_L$$

$$\ell_R \to \ell_R$$

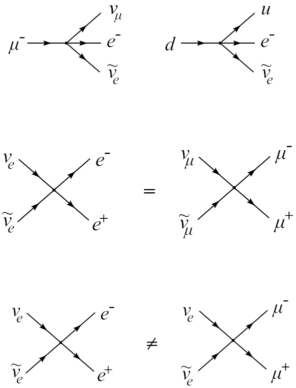
Symetrie slabého Lagrangiánu:

$$\boxed{\text{LT} + CPT + SU(2) + \not{C}}$$

Slabý Lagrangián - priame interakcie fermiónov

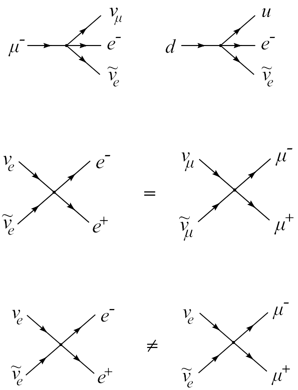


Slabý Lagrangián - priame interakcie fermiónov



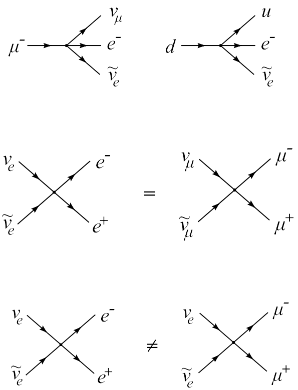
$$\mathcal{L}_W = K(\ell_L) + K(\ell_R) + m\,\underbrace{\left(\ell_L^\dagger \ell_R + \ell_R^\dagger \ell_L\right)}_{\text{nie } SU(2)}$$

Slabý Lagrangián - priame interakcie fermiónov



$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_W \quad = \quad & K(\ell_L) + K(\ell_R) + m\,\underbrace{\left(\ell_L^\dagger \ell_R + \ell_R^\dagger \ell_L\right)}_{\text{nie } SU(2)} \\
& + a I_a(\ell_L) + \frac{b}{\Lambda} I_b(\ell_L) + \ldots
\end{aligned}
$$

Slabý Lagrangián - priame interakcie fermiónov

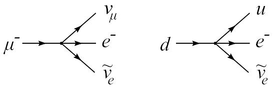


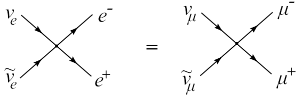
$$\mathcal{L}_W = K(\ell_L) + K(\ell_R) + m \underbrace{(\ell_L^\dagger \ell_R + \ell_R^\dagger \ell_L)}_{\text{nie } SU(2)}$$

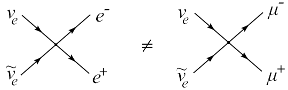
$$+ a I_a(\ell_L) + \frac{b}{\Lambda} I_b(\ell_L) + \dots$$

$$[\mathcal{L}_W] = E^4, [I_a] = E^4, [I_b] = E^5, \dots$$

Slabý Lagrangián - priame interakcie fermiónov







$$\mathcal{L}_W = K(\ell_L) + K(\ell_R) + m \underbrace{(\ell_L^\dagger \ell_R + \ell_R^\dagger \ell_L)}_{\text{nie } SU(2)}$$

$$+ a I_a(\ell_L) + \frac{b}{\Lambda} I_b(\ell_L) + \ldots$$

$$[\mathcal{L}_W] = E^4, [I_a] = E^4, [I_b] = E^5, \ldots$$

- Fermiho teória
- platnosť: $E \ll \Lambda$
- $m = 0$

Slabý Lagrangián - kalibračná symetria

globálna $SU(2)$:

$$\Psi_L(x) \to U\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

lokálna (kalibračná) $SU(2)$:

$$\Psi_L(x) \to U(x)\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

Slabý Lagrangián - kalibračná symetria

globálna $SU(2)$:

$$\Psi_L(x) \to U\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

lokálna (kalibračná) $SU(2)$:

$$\Psi_L(x) \to U(x)\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

lokálna $SU(2)$ symetria $\mathcal{L}_W \Rightarrow$ 3 vektorové polia (kalibračné bozóny):

$$\vec{W}_\mu = (W_\mu^1, W_\mu^2, W_\mu^3) \to W_\mu^+, W_\mu^-, Z_\mu^0$$

Slabý Lagrangián - kalibračná symetria

globálna $SU(2)$:

$$\Psi_L(x) \to U\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

lokálna (kalibračná) $SU(2)$:

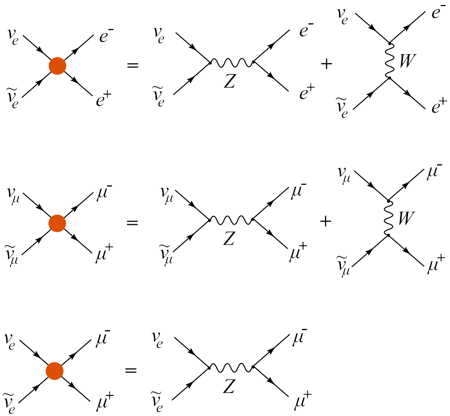
$$\Psi_L(x) \to U(x)\Psi_L(x), \qquad \ell_R(x) \to \ell_R(x)$$

lokálna $SU(2)$ symetria $\mathcal{L}_W \Rightarrow$ 3 vektorové polia (kalibračné bozóny):
$\vec{W}_\mu = (W_\mu^1, W_\mu^2, W_\mu^3) \to W_\mu^+, W_\mu^-, Z_\mu^0$

$$\mathcal{L}_W = \underbrace{K(\ell_L) + K(\ell_R) + K(\vec{W}) + g_W I(\vec{W}, \Psi_L) + J(\vec{W}, \vec{W}, g_W)}_{\mathcal{L}_0} + \ldots$$

Slabý Lagrangián - nulové hmotnosti

- $\mathcal{L}_0$ stačí na opis slabej fyziky pri $\forall E$
- súhlasí s experimentom do ≈ 200 GeV
- nulové hmotnosti fermiónov a kalib. bozónov



Spontánne narušenie symetrie

- rešpektuje $SU(2)$ symetriu
- generuje hmotnosti pre kalibračné bozóny
- generuje hmotnosti pre fermióny

Spontánne narušenie symetrie

- rešpektuje $SU(2)$ symetriu
- generuje hmotnosti pre kalibračné bozóny
- generuje hmotnosti pre fermióny

Kandidáti:

1. Higgsovo pole lineárnym spôsobom (SM), $m_H < 1$ TeV:
   - 4 skalárne polia
   - $\mathcal{L}_W =$ konečný počet členov: platnosť $\forall E$
   - Higgsov bozón

Spontánne narušenie symetrie

- rešpektuje $SU(2)$ symetriu
- generuje hmotnosti pre kalibračné bozóny
- generuje hmotnosti pre fermióny

Kandidáti:

1. Higgsovo pole lineárnym spôsobom (SM), $m_H < 1$ TeV:
   - 4 skalárne polia
   - $\mathcal{L}_W$ = konečný počet členov: platnosť $\forall E$
   - Higgsov bozón
2. $m_H \geq 1$ TeV alebo Higgsovo pole nelineárnym spôsobom
   - 4 alebo 3 skalárne polia
   - $\mathcal{L}_W$ = nekonečný počet členov: platnosť $E \leq 1$ TeV
   - Higgsov bozón nie je nutný

Obsah

Supersymetria (SUSY)

symetrie SM: LT + lokálna $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Supersymetria (SUSY)

symetrie SM: LT + lokálna $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Coleman-Mandula teorém:

- *povolené trafos v QTP komutujú s LT*
- *nemenia spin*

SUPERSYMETRIA (SUSY)

symetrie SM: LT + lokálna $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

Coleman-Mandula teorém:

- *povolené trafos v QTP komutujú s LT*
- *nemenia spin*

superalgebras (graded algebras): $[\ ,\ ] \rightarrow \{\ ,\ \}$

- *nie sú zahrnuté v CM teoréme*
- *bozón* $\leftrightarrow$ *fermión*
- *SUSY QTP:* $\mathbf{dim} \leq \mathbf{11}$
- *superstruny*

Supersymetrická QTP

SUSY časticové spektrum:

particle	**spin**	**sparticle**	**spin**
quark	$1/2$	squark	0
lepton	$1/2$	slepton	0
photon	1	photino	$1/2$
gluon	1	gluino	$1/2$
$W^{\pm}$	1	wino	$1/2$
Z^0	1	zino	$1/2$
Higgs	0	higgsino	1

Supersymetrická QTP

SUSY časticové spektrum:

particle	**spin**	**sparticle**	**spin**
quark	$1/2$	squark	0
lepton	$1/2$	slepton	0
photon	1	photino	$1/2$
gluon	1	gluino	$1/2$
$W^{\pm}$	1	wino	$1/2$
Z^0	1	zino	$1/2$
Higgs	0	higgsino	1

PLUSY:

- v súlade s meraniami
- rieši fine-tuning
- unifikácia interakčných konštánt
- kandidát na tmavú hmotu
- súčasť superstrún
- lokálna SUSY $\Rightarrow$ supergravity (gravitón, gravitíno)

MÍNUSY:

- SUSY je spontánne narušená
- SUSY častice neboli objavené

Superstruny (ako teória sveta)

QTP = ŠTR + QM + bodové častice (interakcie)

Superstruny = ŠTR + QM + lineárne "častice" (interakcie)

SUPERSTRUNY (AKO TEÓRIA SVETA)

QTP = ŠTR + QM + bodové častice (interakcie)

Superstruny = ŠTR + QM + lineárne "častice" (interakcie)

- VTR (gravitácia)
- kalibračné interakcie
- konečná teória bez divergencií
- SUSY
- rozmer časopriestoru = 26 alebo 10 (kompaktifikácia)
- kontakt s experimentom
- chýba malý bezr. parameter pre syst. poruch. výpočty
- neriešia kozmologickú konštantu
- veľa riešení a veľa vákuí

Superstruny (ako inšpirácia)

- nová matematika (Witten – Fieldsova medaila)
- dualita $\rightarrow$ riešenie QCD

Pár myšlienok na záver

- symetrie $\rightarrow$ fundamentálne princípy
- pozorovaná príroda symetriu nevykazuje
- citlivosť na energiu
- narušenie symetrie pri nízkych energiách

Obsah

5 Appendix

The Coleman-Mandula Theorem

(Wess, Bagger: Supersymmetry and Supergravity, p.4)
assumptions:

1. the S-matrix is based on a local, relativistic QFT in 4-dim spacetime
2. there are only a finite number of different particles associated with 1-particle states of a given mass
3. there is an energy gap between the vacuum and the 1-particle states

implications: the most general Lie algebra of symmetries of the S-matrix contains:

1. energy-momentum operator P_μ
2. the Lorentz rotation generator $M_{\mu\nu}$
3. a finite number of Lorentz scalar operators which belong to the Lie algebra of a compact Lie group