J. Lukierski Gdańsk 09. 2003

OD MODELU STANDARDOWEGO DO M-TEORII

1859 – 1925	1.	Podstawowe relatywistyczne modele teoriopolowe.
1968 – 1971	2.	Model standardowy teorii cząstek elementarnych.
1921 – 1925	3.	Pierwsze rozszerzenie: wprowadzenie dodatkowych wymiarów i modele typu Kaluzy-Kleina.
~1975	4.	Drugie rozszerzenie: *,-9/ wprowadzenie supersymetrii i teorii supersymetrycznych.
~1980	5.	11-wymiarowa supergrawitacja : pierwsza Teoria Wszystkiego.
~1985 – 84	6.	Trzecie rozszerzenie: wprowadzenie elementarnych strun i superstrun.
~1985 – 90	7.	10-wymiarowe superstruny jak o druga Teoria Wszystkiego.
~1995 – 98	8.	Ostatnia unifikacja: M-teoria i trzecia Teoria Wszystkiego.
~2003	9.	Co dalej?

1. PODSTAWOWE RELATYWISTYCZNE MODELE TEORIOPOLOWE

(w czterowymiarowej czasoprzestrzeni $x \equiv (\vec{x}, t)$)

Koncepcja teoriopolowa cząstek:

Pole kwantowe czastek $\xrightarrow{\text{transformacja Fouriera}}$ **operatory kreacji i anihilacji**

a) Najprostszy przykład – pole elektromagnetyczne

(Maxwell, 1859)

Potencjały elektro-magnetyczne $A_\mu(x)$ $\xrightarrow{\text{transformacja Fouriera}}$ **operatory kreacji i anihilacji fotonów**

(kwanty światła)

Natężenie pola:

$$F_{\mu\nu}(x) = (\vec{E}(x), \vec{H}(\vec{x})) = \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x)$$

Równanie Maxwella:

$$\partial^\mu F_{\mu\nu}(x) = e j_\nu \underbrace{(x)}$$

Stała sprzężenia = ładunek elektryczny

Prąd elektryczny

Symetrie wewnętrzne: $U(1) \cong O(2)$

Pole elektromagnetyczne – pole cechowania dla U(1)

b) Pole Yanga-Millsa – nieAbelowe pole cechowania **(1954)**

$$A_\mu^r(x) = n \quad \text{potencjałow Yanga - Millsa}$$

$$r = 1.....n$$

Stałe strukturalne grupy

$$F_{\mu\nu}^r(x) = \partial_\mu A_\nu^r - \partial_\nu A_\mu^r + \underbrace{f_{st}^r A_\mu^s A_\nu^t}_{\textbf{Nieliniowość}}$$

n natężeń pól YM

$$(\nabla^\mu)^{rs} F_{\mu\nu}^s(x) = g j_\nu^r(x)$$

Kowariantna pochodna **n lokalnych prądów YM**

Elektromagnetyczne pole A_μ => pole Yanga-Millsa A_μ^r

(Abelowe pole cechowania) **(nieAbelowe pole cechowania)**

SYMETRIE

WEWNĘTRZNE: $U(1) \cong O(2)$ => grupa G

n parametrów ciągłych

$$(SU(2): n = 3, SU(3): n = 8, ...)$$

c) Teoria grawitacji ⇔ ogólna teoria względności Einsteina **(1915)**

Opis teoriopolowy:

$g_{\mu\nu}(x)$ – pole grawitacyjne

$$R_{\mu\nu\rho\tau}(x) = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 g_{\mu\rho}}{\partial x_\nu \partial x_\tau} + \ldots\ldots\ldots$$ – natężenie pola.

$$g^{\nu\rho} R_{\mu\nu\rho\tau} = R_{\mu\tau}$$ **– tensor Ricci**

Równanie Einsteina:

$$\underbrace{R_{uv}(x) - \frac{1}{2} g_{uv}(x) R_\rho{}^\rho(x)}_{\text{tensor Einsteina}} = \kappa \underset{\uparrow}{T_{uv}}(x)$$

tensor Energii-pędu

Opis geometryczny:

$g_{\mu\nu}(x)$ **– metryka zakrzywionej czasoprzestrzeni**

$R_{\mu\nu\rho\tau}(x)$ **– tensor krzywizny**

Teoria względności Einsteina ⇔ Geometria Riemmanna

Dynamika pola grawitacyjnego zadana zakrzywieniem geometrii Riemmanna czasoprzestrzeni.

d) Pole Diraca opisujące cząstki ze spinem $\frac{1}{2}$ (elektrony, protony, ...)

$\Psi_\alpha(x)$ - spinor Diraca.

$\alpha = 1.....4$

~1928
Równanie Diraca

$$(\gamma^\mu \partial_\mu - m)_{\alpha\beta} \psi_\beta(x) = 0$$

Swobodny elektron i pozyton, proton…

Macierze 4x4 Diraca

Aby pola spinorowe mogły oddziaływać z polem Yanga-Millsa musi ich być więcej niż jedno

$$\psi_\alpha(x) \to \psi_{\alpha,k}(x) \qquad k = 1 \ldots N$$

Z pola $\psi_\alpha(x)$ można zbudować prąd elektryczny.

$$j_\mu(x) = \overline{\psi}_\alpha(x)(\gamma_\mu)_{\alpha\beta}\psi_\beta(x)$$

Z pól $\psi_{\alpha,k}$ konstruujemy prąd nieAbelowy

$$j_\mu^r(x) = \overline{\psi}_{\alpha;k}(x)(\gamma_\mu)_{\alpha\beta}(\tau^r)_{kl}\psi_{\beta,l}(x)$$

generatory symetrii wewnętrznych

2. MODEL STANDARDOWY (~1970)

a) Model kwarkowy - cząstki oddziałujące silnie – hadrony – są zbudowane z kwarków
18 kwarkowych pol spinorowych Diraca:

$$q^{(1)}_{\alpha,k}(x),\ldots\ldots\ldots\ldots q^{(6)}_{\alpha,k}(x) \longleftarrow$$ **sześć zapachów**

α=1,…4 – składowe spinora, k =1,2,3 – trzy kolory
Cząstki fizyczne (protony, neutrony, -mezony…)

$\bar{q}q$ - bozony, qqq - fermiony

b) Dynamika kwarków jest zadana przez CHROMODYNAMIKĘ
opisującą oddziaływanie pól kwarkowych z polami Yanga-Millsa dla grupy symetrii kolorowych SU(3):

gluony: A^r_μ r = 1….8 (ilość generatorów SU(3))

8 czterowektorow opisujących pola cechowania - pola gluonowe

STRUKTURA MODELU STANDARDOWEGO:

1) oddziaływania silne <=> chromodynamika
2) oddziaływania elektromagnetyczne zostały zunifikowane z oddziaływaniami słabymi: model Salama – Weinberga (Glashow) opisany przez pola Yanga-Millsa dla grupy SU(2)xU(1) oddziałujące z polami Diraca (kwarki i leptony) oraz skalarnymi polami Higgsa
3)oddziaływania grawitacyjne - oddzielnie

Wszystkie oddziaływania dzielą się na:

i) sektor modelu standardowego, opisujący oddziaływania silne i elektrosłabe
grupa symetrii wewnętrznych:
SU(3)xSU(2)xU(1)

ii) sektor grawitacji - siły grawitacyjne są uniwersalne i najsłabsze, ich dynamika jest zadana rozkładem mas w czasoprzestrzeni (masa = ładunek grawitacyjny)
ISTOTNE:
Aby opisać procesy (np. rozpraszanie, anihilacje, produkcje) cząstek elementarnych powinniśmy stosować teorię kwantową

klasyczna teoria pola $\xrightarrow{\textbf{kwantowanie}}$ kwantowa teoria pola

Chromodynamika → Kwantowa Chromodynamika

Model Salama - Weinberga → Kwantowy model Salama-Weinberga

Grawitacja → Kwantowa grawitacja

Kwantowa teoria pola służy do wyliczeń efektów kwantowych, istotnych dla małych odległości.

PIERWSZY PROBLEM: RENORMALIZOWALNOŚĆ

Model standardowy po kwantowaniu można sformułować jako poprawną kwantową teorię pola gdyż jest renormalizowalny

renormalizowalność → schemat wyciągania skończonych poprawek kwantowych

Niestety teoria grawitacji Einsteina po kwantowaniu JEST NIERENORMALIZOWALNA

Teoria grawitacji do chwili obecnej opiera się skutecznie próbom naprawienia tego defektu, chociaż pewien postęp został osiągnięty (Ashtekar, Lewandowski 1990-) - ciągle aktualny problem kwantowych poprawek grawitacyjnych

NALEŻY ZMODYFIKOWAĆ TEORIĘ EINSTEINA?

DRUGI PROBLEM: UNIFIKACJA

i) dlaczego mamy trzy różne oddziaływania w Modelu Standardowym, minimum 19 niezależnych parametrów?

ii) jaka jest relacja pomiędzy sektorem cząstek elementarnych (model standardowy) i sektorem grawitacji? Czy można te dwa sektory zunifikować?

i) prowadzi do tzw. modeli Wielkiej Unifikacji w sektorze cząstek elementarnych (zmniejszenie liczby niezależnych parametrów w modelu standardowym)

$$SU(3)xSU(2)xU(1) \longrightarrow SU(5),SO(10)$$

ii) prowadzi do poszukiwania takich modeli, które unifikują symetrie wewnętrzne i czasoprzestrzenne

$$\underset{\textbf{(cząstki elementarne)}}{\text{symetrie wewnętrzne}} + \underset{\textbf{(grawitacja)}}{\text{symetrie czasoprzestrzeni}} \subset \underset{\textbf{supergrupa}}{\overset{}{\underset{\uparrow}{G}}}$$

„No-go theorem" gdy nie ma supersymetrii!
Idea unifikacji doprowadziła do opisu teorii w wymiarach D = 4 + N, oraz do wprowadzenia supersymetrii

3. PIERWSZE ROZSZERZENIE: DODATKOWE WYMIARY CZASOPRZESTRZENI

Teorie Kaluzy-Kleina: najważniejsze są oddziaływania grawitacyjne

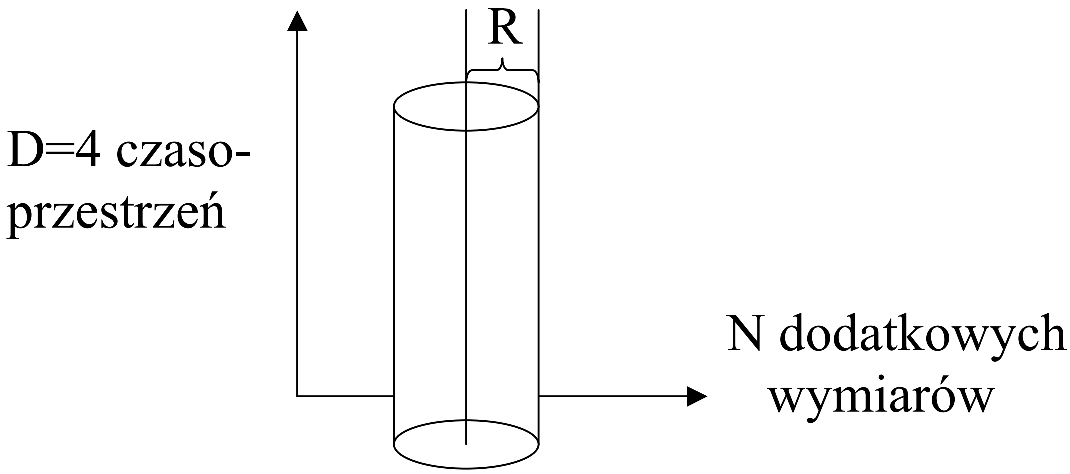
grawitacja w D=4 + N → grawitacja w D=4 + teoria Yanga-Millsa + pola skalarne

Unifikacja oddziaływań w ramach wielowymiarowej grawitacji → rozszerzenie koncepcji Einsteinowskiej geometryzacji na inne oddziaływania

1921-25 → unifikacja grawitacji i elektromagnetyzmu w D = 5 (Kaluza, Klein)

1968 - → unifikacja grawitacji i teorii Yanga-Millsa w D > 5 (Kerner, Cho)

W standardowym podejściu Kaluzy-Kleina świat jest cylindryczny



Dodatkowe wymiary są „skompaktyfikowane"

R = długość Plancka $\cong 10^{-33}$ cm
Na tych odległościach oddziaływania grawitacyjne są porównywalne z oddziaływaniami cząstek elementarnych

RESUME: idea geometryzacji oddziaływań Einsteina + założenie cylidrycznosci „naszego" świata w D = 4 + N

UWAGI:

1) Ostatnio **(1998 -)** założenie cylindryczności odrzucone – scenariusz naszego świata jako 3-brany → związek z „nową teorią strun"

2) Teoria Kaluzy-Kleina pozostawia poza unifikacją pola spinorowe, np. pola Diraca – tylko unifikacja pól bozonowych

UNIFIKACJA NIEPEŁNA!

4. DRUGIE ROZSZERZENIE: WPROWADZENIE SUPERSYMETRII

Zaproponowano uogólnienie transformacji symetrii które przekształcają cząstki skalarne (spin 0) w cząstki o spinie ½ itp.

Nowe parametry symetrii to tzw. liczby antyprzemienne (algebra Grassmanna):

$$\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_2 \alpha_1 = 0 \rightarrow \xi_1 \xi_2 + \xi_2 \xi_1 = 0$$

liczby antyprzemienne ←→ opis geometryczny fermionów

Supersymetryczne modele teoriopolowe muszą zawierać pola o rożnych spinach. Każde pole ma „partnera supersymetrycznego" (różnica spinu = 1/2) koniecznego do zrealizowania supersymetrii

Supergrawitacja w D = 4:

pole grawitonu	pole grawitino
$g_{\mu\nu}(x)$	$\psi_{\mu\alpha}(x)$
spin 2	spin 3/2

Supergrawitacja = teoria supersymetrycznie oddziałujących pól grawitacyjnych i grawitonowych

ZALETY SUPERGRAWITACJI:

1)Wprowadzenie supersymetrii pozwala na unifikacje bozonów i fermionów, a wielowymiarowa supergrawitacja może w jednym modelu opisywać wszystkie pola o spinie 0,1/2,1,3/2 i 2 – tyle ile potrzeba do pełnej unifikacji!

Dodatkowe wymiary powinny pomieścić reprezentację fundamentalną symetrii modelu standardowego:

SU(3)xSU(2)xU(1) → 7 wymiarów
4 2 1 dodatkowych

2) Wprowadzenie supersymetrii łagodzi rozbieżności (nieskończoności) w teorii – teoria po supersymetryzacji jest bardziej renormalizowalna.
Kwantowa supergrawitacja jest zdecydowanie mniej osobliwa niż kwantowa grawitacja.

5. 11-WYMIAROWA SUPERGRAWITACJA - PIERWSZA TEORIA WSZYSTKIEGO

Teoria Wszystkiego → Kompletna unifikacja (wszystkie oddziaływania) + teoria renormalizowalna

Pierwsza taka teoria została zaproponowana ok. r.1980. Była to D = 11 supergrawitacja.

Idee wielowymiarowości + supersymetrii:

11-WYMIAROWA SUPERGRAWITACJA

$\Updownarrow$ $\Updownarrow$

D=4 ROZSZERZONA (N=8) SUPERGRAWITACJA

Rozszerzony multiplet supersymetryczny:

1 – grawiton
8 – pól grawitino
28 – pól Yanga-Millsa
56 – pól Diraca
70 – pól skalarnych (Higgsa)

PROBLEMY:

i) Tylko wprowadzając złożone kwarki (48 pól Diraca) i leptony z tzw preonów (56 pól Diraca w multiplecie supersymetrycznym) można próbować dopasowywać spektrum cząstek elementarnych

Nastepny etap złożoności cząstek elementarnych? Brak potwierdzenia eksperymentalnego.

ii) NIESTETY w pierwszej Teorii Wszystkiego nie wszystkie rozbieżności są usunięte, są one ukryte w dalszych rzędach rachunku zaburzeń

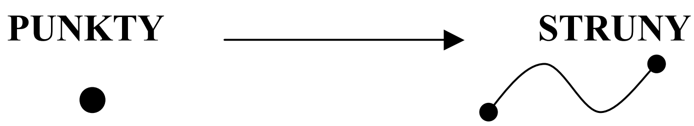
→ a więc TEORIA NIERENORMALIZOWALNA!

6. TRZECIE ROZSZERZENIE: WPROWADZENIE ELEMENTARNYCH STRUN I SUPERSTRUN.

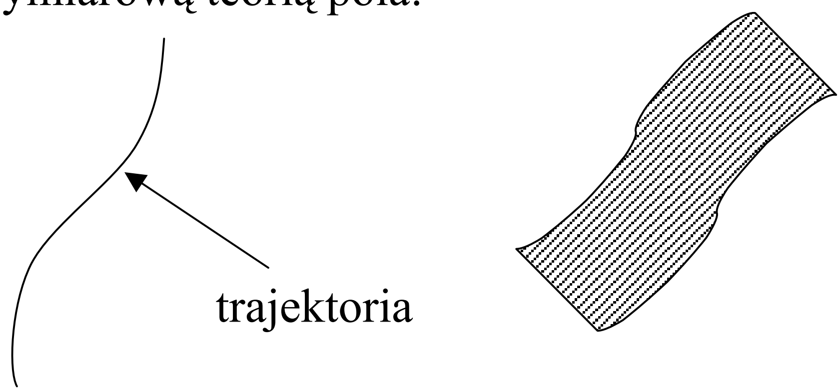
Uogólnienie, które wprowadza skończoność poprawek kwantowych w D=11 supergrawitacji

→ idea teorii nielokalnej

gdyż przyczyna nierenormalizowalności leży w lokalizacji punktowej oddziaływań.



Mechanika punktów materialnych jest zastąpiona dwuwymiarową teorią pola:



Mechanika standardowa

$X_{\mu}(t)$

Mechanika strun = 2-wymiarowa teoria pola

$$X_{\mu}(\sigma, t)$$

(fundamentalna rola dwuwymiarowych teorii pola w teorii strun)

Spektrum wzbudzeń struny – po skwantowaniu klasycznej mechaniki strun – nieskończona liczba różnych cząstek (trajektorie Regge)

$$t = 0:\ X_\mu(0), P_\mu(0) \leftrightarrow X_\mu(\sigma,0) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{in\sigma} a_{\mu,n}$$

$\longleftarrow$ **kwantowanie** $\longrightarrow$

a_μ, a_μ^+ $\Longleftrightarrow$ $a_{\mu,n}, a_{\mu,n}^+ = a_{\mu,-n}$

Jeden rodzaj cząstek

n=0,1,2,3.....
nieskończona liczba cząstek

Ważny krok:

struny $\xrightarrow{\textbf{supersymetria}}$ **superstruny**

poruszają się w przestrzeni x_μ

poruszają się w superprzestrzeni (x_μ, θ_α)

Geometryczny opis supersymetrii → superprzestrzeń

$$X_\mu = (\vec{x}, t) \Rightarrow (x_\mu, \theta_\alpha) \longleftarrow$$ dodatkowe antyprzemienne współrzędne

$(x_\mu, \theta_\alpha) \longrightarrow$ kwantowanie opisuje bozony i fermiony

Superprzestrzeń pozwala na wprowadzenie supergeometrii dokładnie przy pomocy geometrycznego przepisu Einsteina:

geometria	supergeometria
$\Downarrow$	$\Downarrow$
dynamiczna teoria zakrzywionej czaso-przestrzeni	dynamiczna teoria zakrzywionej superprzestrzeni

D=11 superprzestrzeń : (X_μ, θ_A)

$$\mu = 0,1....10 \qquad A = 1,2....32$$

KWANTOWA TEORIA STRUN I SUPERSTRUN:
Nie istnieją struny i superstruny jako teorie kwantowe w dowolnym wymiarze (np. nie ma kwantowych strun w D=11)

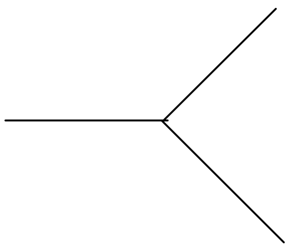
Teoria kwantowych strun ➔ istnieje jako teoria konsystentna z postulatem symetrii relatywistycznych w D=26
Teoria kwantowych superstrun ➔ istnieje jako teoria konsystentna z postulatem relatywistycznych supersymetrii w D=10

SUPERSTRUNA <=> SUPERPOZYCJA TRZECH PODSTAWOWYCH IDEII

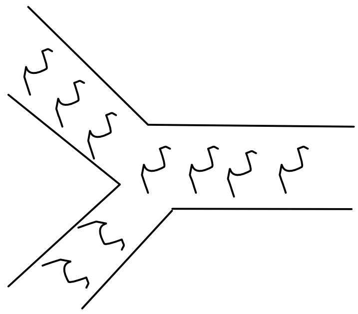
→ wielowymiarowość
→ supersymetria
→ struktura niepunktowa elementarnych obiektów

7. **10-WYMIAROWE STRUNY JAKO DRUGA TEORIA WSZYSTKIEGO.**

W 1984 r. Green i Schwarz wprowadzili konkretny model 10 – wymiarowej superstruny, który po skwantowaniu nie prowadzi do nieskonczonych poprawek kwantowych.



wierzchołek dla cząstek punktowych



wierzchołek w kwantowej teorii strun

(podstawowy element przy konstrukcji tzw. diagramów Feynmana)

UNIFIKACJA + RENORMALIZOWALNOSC!

Problemy:

i) Brak jakiejkolwiek jednoznaczności przy przejściu od modelu superstrun do modelu standardowego:

$D = 10 = 4 + 6 \longleftarrow$ nieskończony zbiór możliwych konfiguracji w dodatkowych sześciu wymiarach.

ii) Skonstruowano w latach osiemdziesiątych pięć różnych kwantowych dziesięciowymiarowych teorii strun, o różnych (bardzo dużych) grupach symetrii .

Którą teorię superstrun wybrać?

8. OSTATNIA UNIFIKACJA: M – TEORIA JAKO TRZECIA TEORIA WSZYSTKIEGO.

Okazało się , że poza piątką kwantowych superstrun w D=10 mamy bardzo wiele obiektów niepunktowych, rozciągłych, w różnych wymiarach.
Dla przykładu w D=11 istnieje:

-supermembrana – M2–superbrana
-super-5-brana – M5–superbrana

p-brany = obiekty p-wymiarowe
p-superbrany = supersymetryczne obiekty p-wymiarowe

0 – brana - cząstka
1 – brana - struna
2 – brana - membrana
…………………………

Powstała długa lista obiektów rozciągłych w różnych wymiarach, które są ze sobą jednak połączone pewnymi procedurami przyporządkowania parametrów: stałych sprzężenia, małych i dużych energii etc.

Powstała

SIATKA OBIEKTÓW DUALNYCH

⇨ **druga rewolucja strunowa, „nowa teoria strun” z dużą liczbą elementarnych rozciągłych obiektów.**

PYTANIE:
Czy cała ta bogata spektroskopia obiektów elementarnych (superstrun, super-p-bran etc.) nie może być opisana jako różne stany jednej dynamicznej teorii?
trzecia Teoria Wszystkiego <==> M- TEORIA

	M-other		brak zgody
M:	M-ystery	=>	w zakresie
	M-atrix		terminologii

DWA WARUNKI KORESPONDENCJI HISTORYCZNEJ:

1. Pięć teorii dziesięciowymiarowych superstrun jest zawartych w M-teorii
2. W specjalnej granicy z M-teorii można otrzymać D=11 supergrawitację.

TRZECIA TEORIA WSZYSTKIEGO => UOGÓLNIENIE PIERWSZEJ I DRUGIEJ TEORII WSZYSTKIEGO

CO WIEMY TERAZ O M-TEORII?

i) Jest to (prawdopodobnie?) teoria 11-wymiarowa (D=12 – F-teoria, D=13 – S-teoria)

ii) Jeżeli teoria jest 11-wymiarowa, to znamy opis algebraiczny jej symetrii

Townsend 1997 M-ALGEBRA => uogólnienie standardowej supersymetrii HŁS

32 superładunki, 528 ładunków bozonowych

iii) obok wymiarów czasoprzestrzennych (nawet rozszerzonych a la Kaluza-Klein) należy wprowadzić nowe wymiary innego typu niż w teorii Kaluzy-Kleina:

Propozycja podstawowa:

$D = 11$	=>	$D = 11+517 = 528$
czasoprzestrzeń		uogólniona czasoprzestrzeń

iv) Wydaje się prawdopodobne, że czasoprzestrzeń nie jest opisana geometrią elementarną – geometria spinorowa jest bardziej podstawowa niż czasoprzestrzenna:

spinory, twistory: elementarna geometria	czasoprzestrzeń: współrzędne złożone

(powrót do idei Rzewuskiego, Penrose etc.)

Odpowiednik geometryczny złożoności cząstek elementarnych:

proton złożony z: fundamentalnych kwarków	<=>	czas i przestrzeń złożona z fundamentalnych współrzędnych spinorowych

9. CO DALEJ?

W ostatnich latach dwie równoległe alternatywne koncepcje na „froncie badań” w teorii oddziaływań fundamentalnych:

1) M-TEORIA

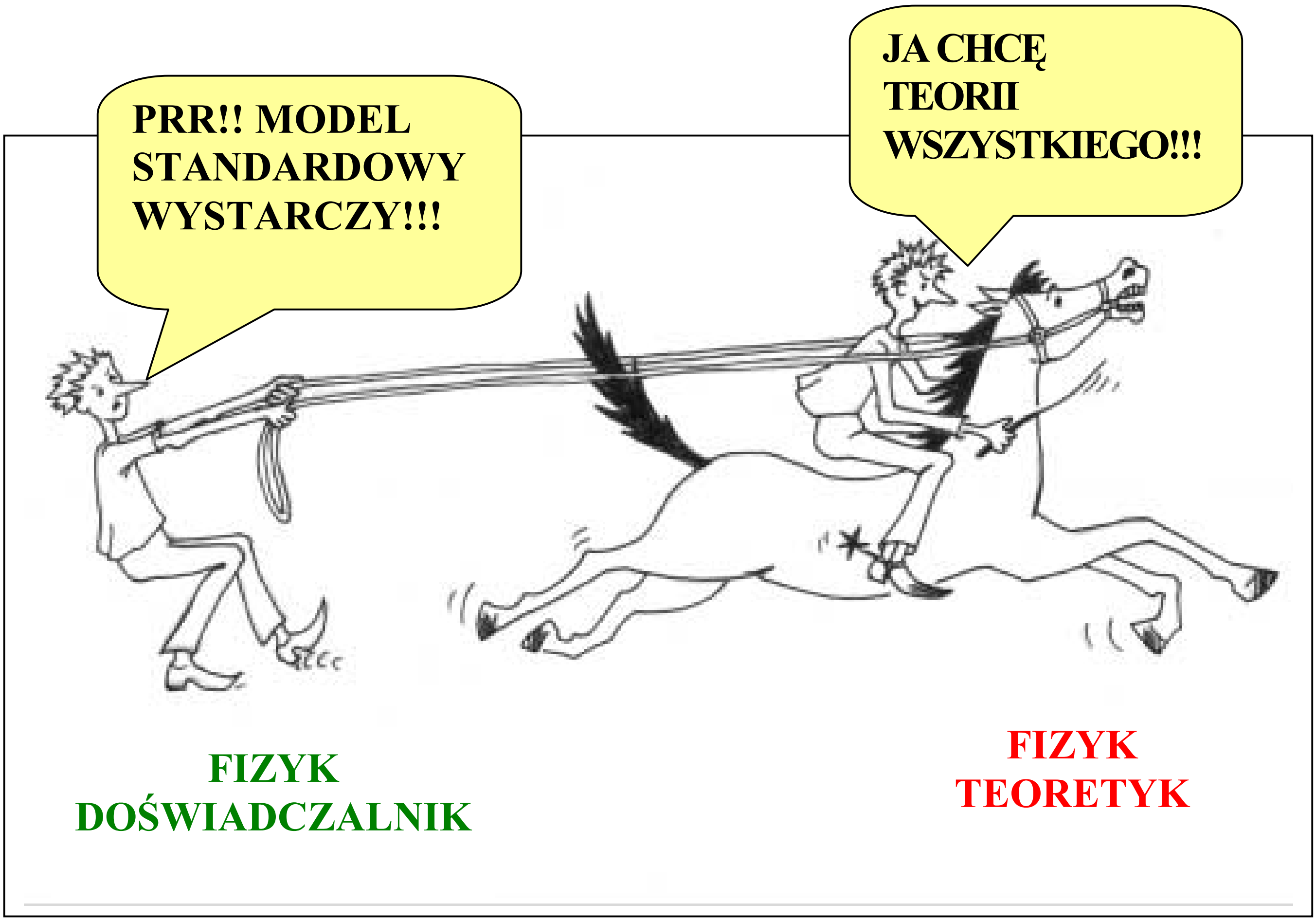
2) NIEPRZEMIENNE GEOMETRIE

Struny, M-teoria:	**Nieprzemienna geometria**
$x_\mu \Rightarrow (x_\mu, \ldots .)$	$x_\mu \Rightarrow x_\mu$
$\updownarrow$	$\updownarrow$
„klasyczne” wymiary	nieprzemienne wymiary
Symetrie i supersymetrie Klasyczne	**Grupy i supergrupy kwantowe**

Dwa kierunki badań, które mają wspólny cel:

KONSYSTENTNA KWANTOWA TEORIA GRAWITACJI JAKO INTEGRALNA CZĘŚĆ W PEŁNI ZUNIFIKOWANEGO MODELU ODDZIAŁYWAŃ FUNDAMENTALNYCH

Przyszła czwarta Teoria Wszystkiego: M-teoria z elementami geometrii nieprzemiennej?


PRR!! MODEL STANDARDOWY WYSTARCZY!!!
JA CHCĘ TEORII WSZYSTKIEGO!!!
FIZYK DOŚWIADCZALNIK
FIZYK TEORETYK