Dodatkowe wymiary

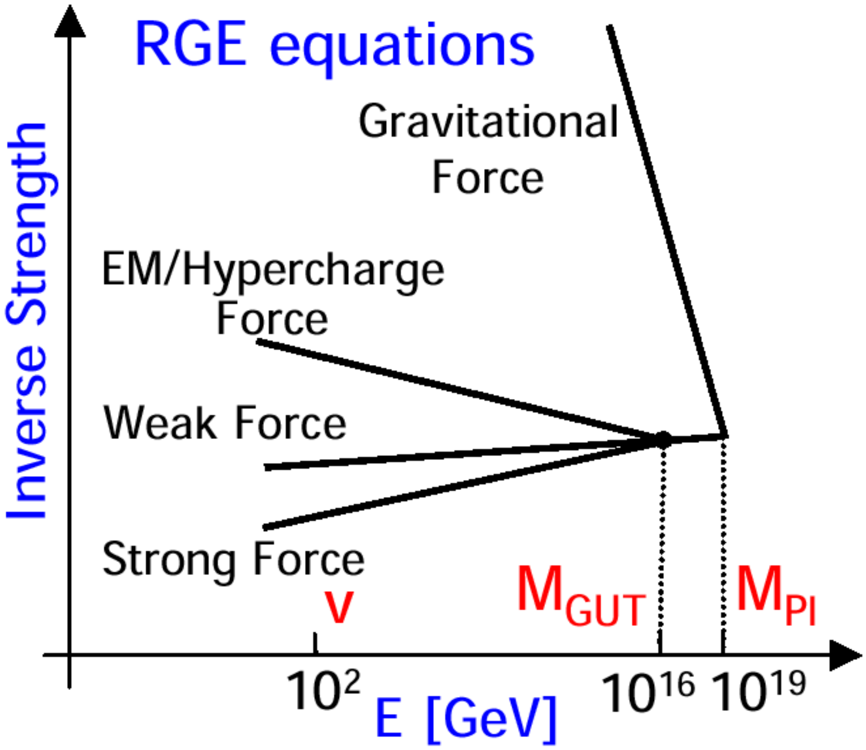
Elementy fizyki cząstek elementarnych
Wykład XII

- Dodatkowe wymiary
- Jak dobrze znamy grawitacje
- Grawitacja w świecie cząstek
- Perspektywy

Dodatkowe wymiary

Skala Plancka

Problem hierarchii w Modelu Standardowym:
skala unifikacji $M_{GUT} \gg \nu$ (skala łamania symetrii EW)



Grawitacja:
unifikacja dopiero przy skali

$$M_{Pl} \sim \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} \sim 10^{19}\ GeV$$

co odpowiada skali odległości

$$R_{Pl} \sim 10^{-35}\ m$$

Jednak skala M_{Pl} musi być tak duża tylko przy 3 wymiarach przestrzennych !...

Dodatkowe wymiary

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

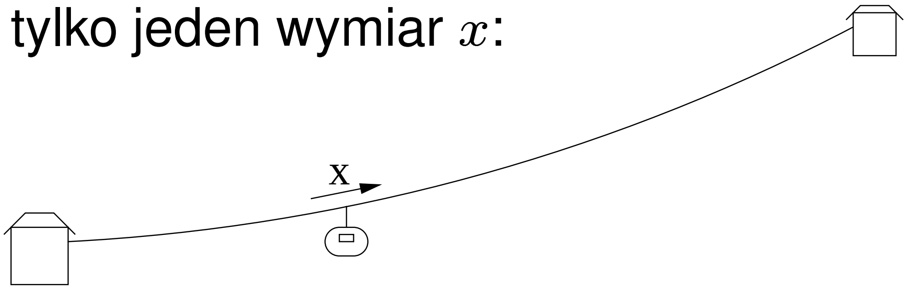
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

$\Rightarrow$ **NIE** - jeśli pytamy o nieskończone wymiary

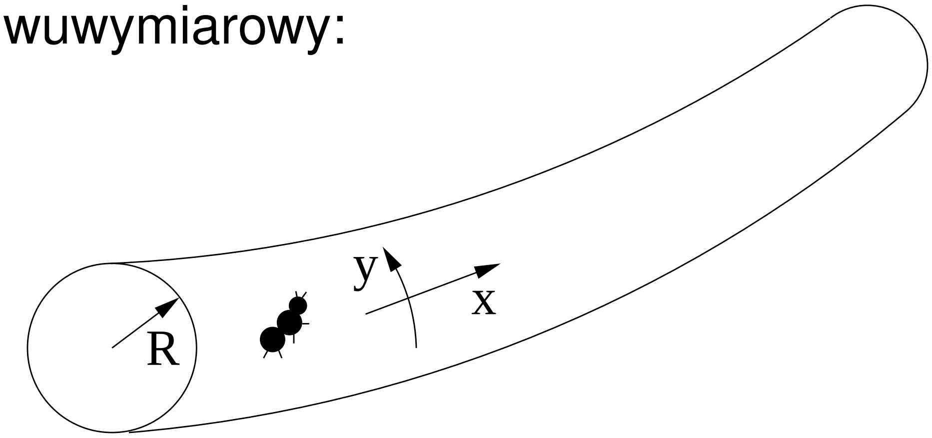
$\Rightarrow$ **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone

Przykład I

Gdy rozpatrujemy ruch wagonika kolejki linowej przyjmujemy, że lina ma tylko jeden wymiar x:



Ale dla mrówki, która idzie po tej linie jest to świat dwuwymiarowy:



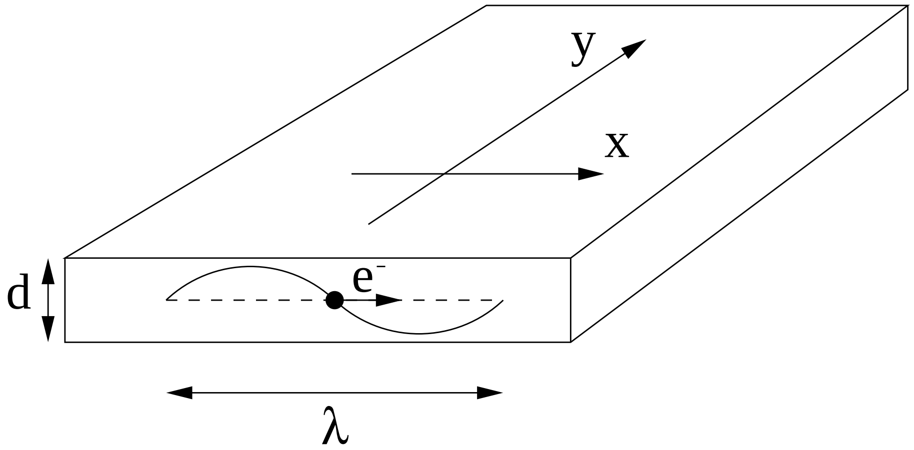
y jest współrzędną cykliczna.

Zauważamy ją dopiero gdy przyglądamy się linie z rozdzielczością $\Delta < R$

Dodatkowe wymiary

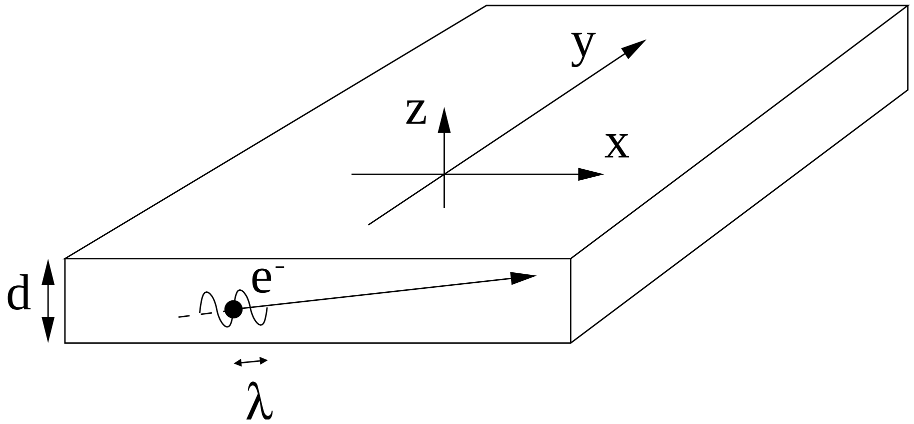
Przykład II

Elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu.



Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d \Rightarrow$ ruch dwuwymiarowy. “Wzudzenie” w kierunku prostopadłym nie jest dostępne energetycznie. (kwantowy efekt Halla).

Ale jeśli w tej samej warstwie metalu znajdzie się wysokoenergetyczny elektron ($\lambda < d$)



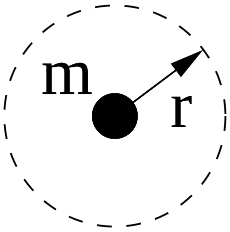
jego ruch musimy opisywać w trzech wymiarach...

Dodatkowe wymiary

Grawitacja

Przyjmijmy, że nasz świat jet $1+3+n$ wymiarowy (n dodatkowych wymiarów przestrzennych).

Jak będą wtedy wyglądały oddziaływania grawitacyjne ?



Pole powierzchni kuli w $(3+n)$ wymiarach:

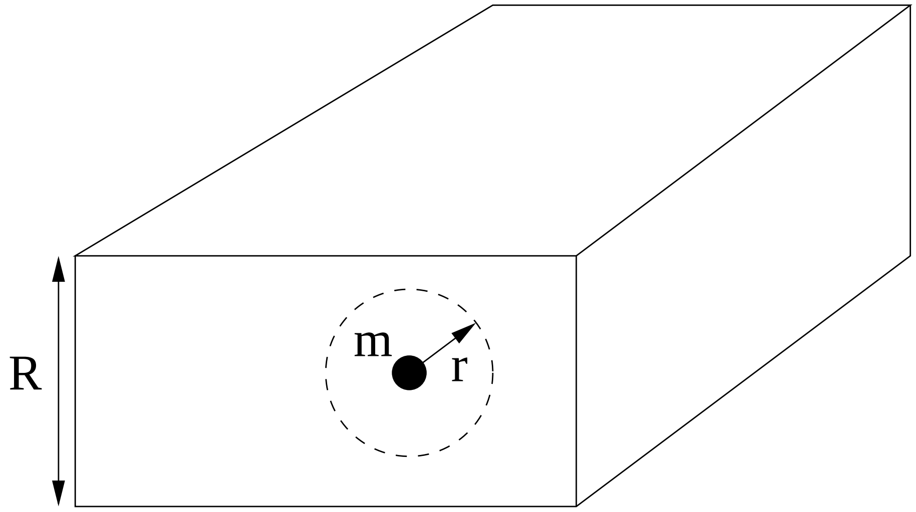
$$S^{(3+n)} \sim r^{n+2}$$

Siła grawitacyjna, z Prawa Gaussa:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{M_S^{n+2}} \frac{1}{r^{n+2}}$$

gdzie M_S jest efektywną skalą Plancka w $3+n$ wymiarach

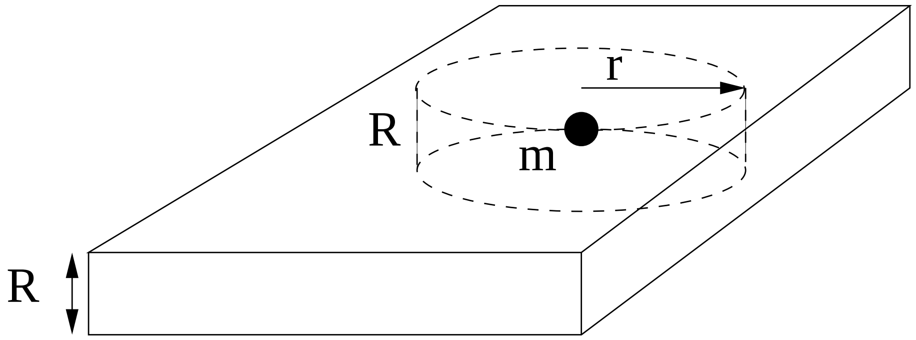
Takie podejście jest słuszne tylko dla $r \ll R$, gdy testujemy grawitację na bardzo małych odległościach:



Dodatkowe wymiary

Grawitacja

Gdy badamy oddziaływania na odległościach $r \gg R$:



Pole powierzchni “walca” w $(3+n)$ wymiarach:

$$S^{(3+n)} \sim R^n \, r^2$$

Siła grawitacyjna, z Prawa Gaussa:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{M_S^{n+2} \, R^n} \frac{1}{r^2}$$

Na dużych odległościach widoczne są tylko 3 wymiary
⇒ odtwarzamy “klasyczną” grawitację Newtona...

Skalą unifikacji grawitacji jest teraz

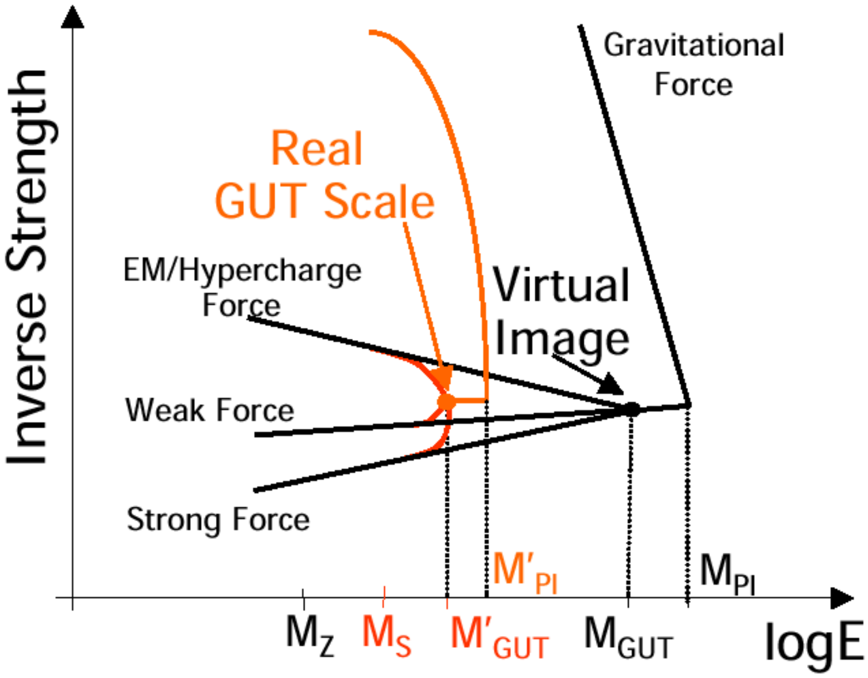
$$M_S = \sqrt[n+2]{M_{Pl}^2 \left(\frac{R}{2\sqrt{\pi}}\right)^{-n}}$$

M_S może być nawet rzędu 1 TeV, wszystko zależy od n i R
⇒ rozwiązanie problemu hierarchii

Dodatkowe wymiary

Unifikacja

Gdy skala energii przekracza $1/R$
ewolucja stałych sprzężenia “przyspiesza”:



$\Rightarrow$ możliwa jest unifikacja wszystkich oddziaływań na dużo niższych skalach.

Przyjmując M_S 1 TeV:

$$R = \frac{1}{2\sqrt{\pi} M_S}\left(\frac{M_{Pl}}{M_S}\right)^{2/n} \propto \begin{cases} 8\times10^{12}\, m, & n=1 \\ 0.7\, mm, & n=2 \\ 3\, nm, & n=3 \\ 6\times10^{-12}\, m, & n=4 \end{cases}$$

Jakie są ograniczenia doświadczalne na R ?

Grawitacja

Prawo Newtona

Przez 20 lat zastanawiał się nad spadającym jabłkiem...

W 1687 roku przedstawił prawo powszechnego ciążenia:

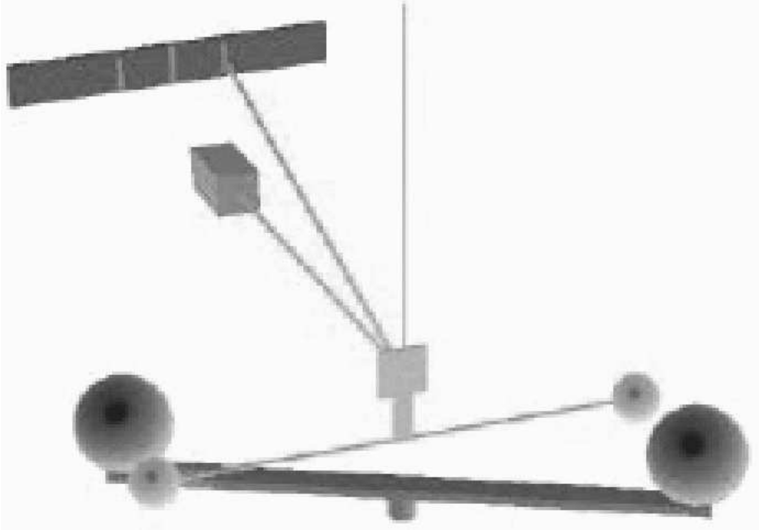
$$F_G = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G_N \approx 6.7\ 10^{-11}\ \frac{m^2}{kg\ s^2} \approx 6.7\ 10^{-39}\ GeV^{-2}$$

z zależności typu $\frac{1}{r^2}$ wynikają prawa Keppler'a...

Doświadczenie Cavendisha

Pierwszy pomiar oddziaływań grawitacyjnych
w laboratorium (1798):



waga skręceń użyta do pomiaru siły przyciągania
między masami ⇒ potwierdzenie prawa Newtona

Grawitacja

Ograniczenia doświadczalne

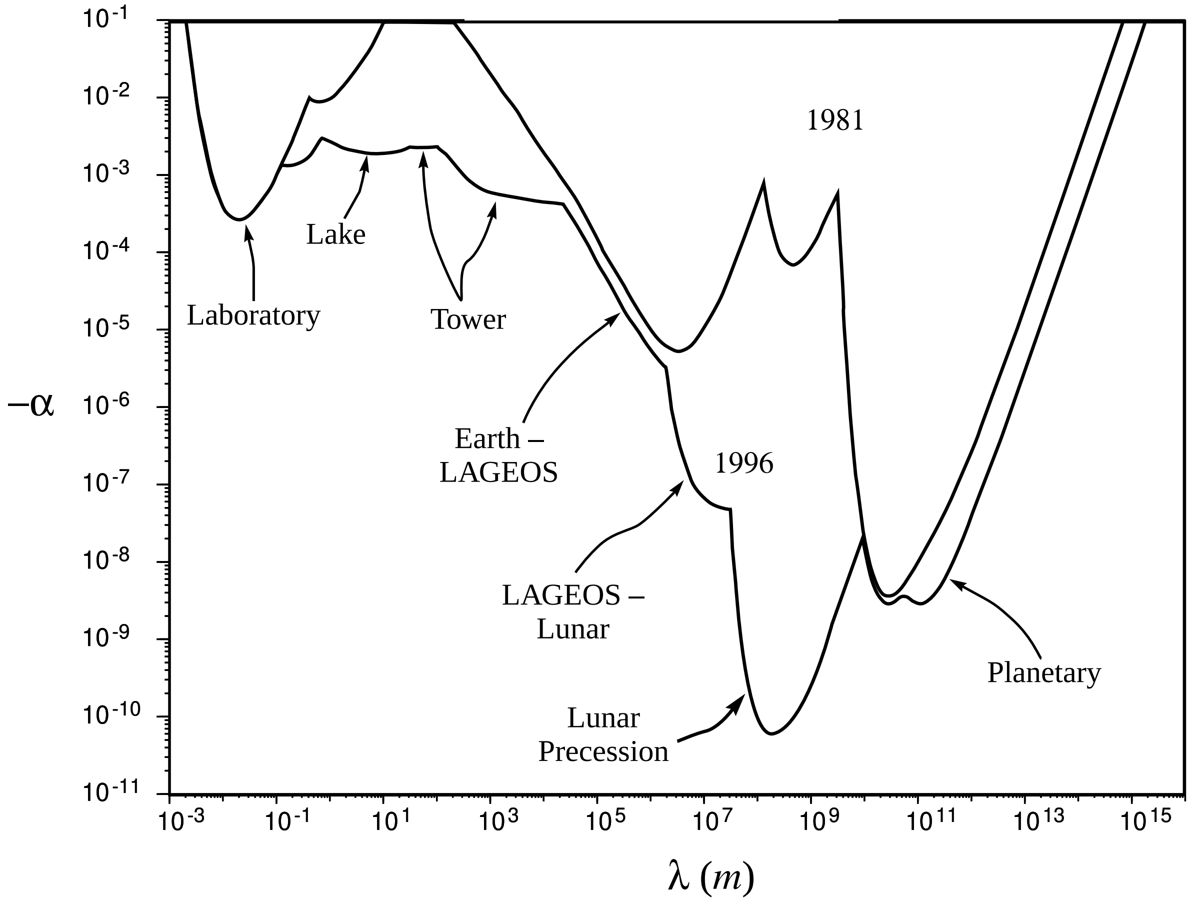
Wygodna parametryzacja odstępstw od prawa Newtona (dla potencjału grawitacyjnego)

$$V(r) \ = \ -G_N \frac{m_1 m_2}{r}(1+\alpha e^{-r/\lambda})$$

λ - skala odległości na której testujemy grawitację

α - względne odchylenie ("łamanie")

Wyniki dostępne w 1996 roku (górne ograniczenia na α):



Najdokładniej przetestowany układ Ziemia-Księżyc

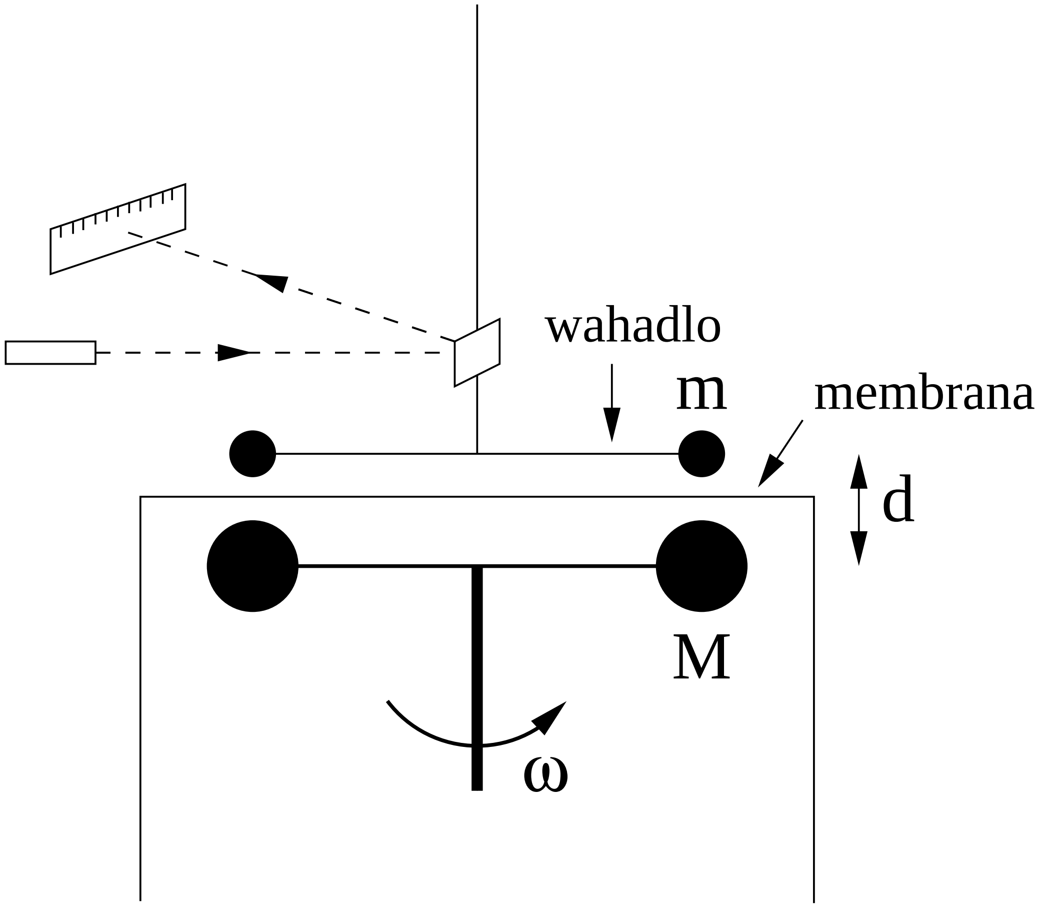
Pomiary labroartoryjne: $\lambda > 2$ mm

Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Nowy, bardzo precyzyjny pomiar grawitacji
na małych odległościach, $\lambda \leq 1$ mm

Idea podobna do doświadczenia Cavendisha:



Duża masa obraca się ruchem jednostajnym **pod** wahadłem,
wprowadzając je w drgania z częstością $\sim \omega$

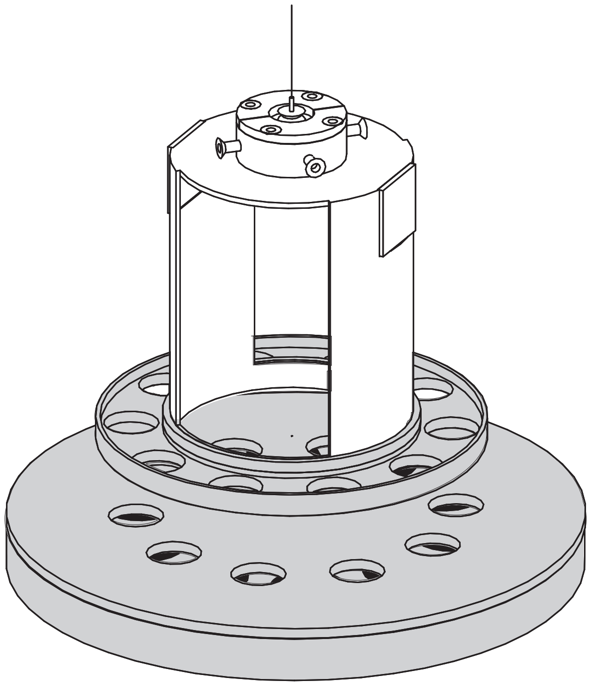
$\Rightarrow$ dużo lepsza kontrola błędów systematycznych
w porównaniu z pomiarem “statycznym”

Membrana: dodatkowa izolacja obu części układu

Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Rzeczywisty układ doświadczalny (z pominięciem membrany):

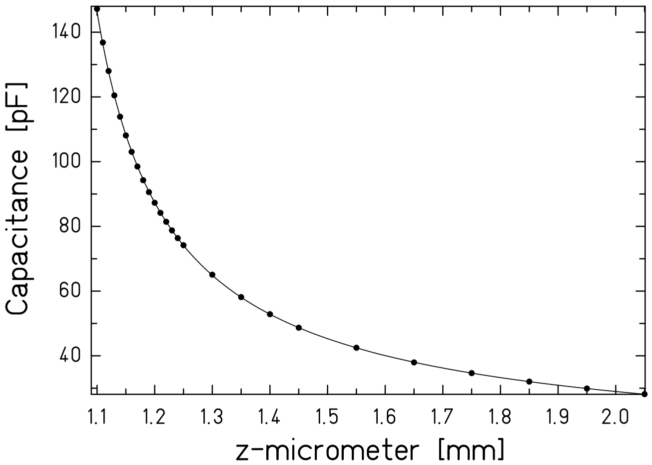


Zamiast kul - 10 otworów w wahadle i dysku “napędzającym”

Średnicz wahadła ~ 60 mm, precyzja wykonania $\pm 2.5\ \mu m$!

Grubość membrany oddzielającej: $20\ \mu m$

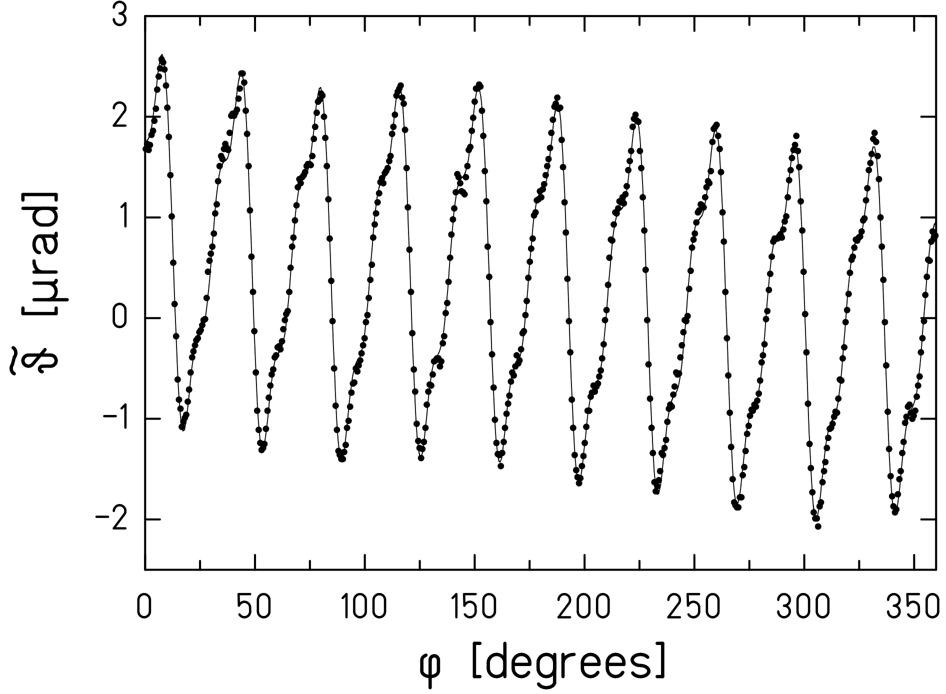
Pojemnościowy pomiar odległości (kondensator płaski):



Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Wyniki pomiarów: jeden cykl obrotu dysku “napędzającego”

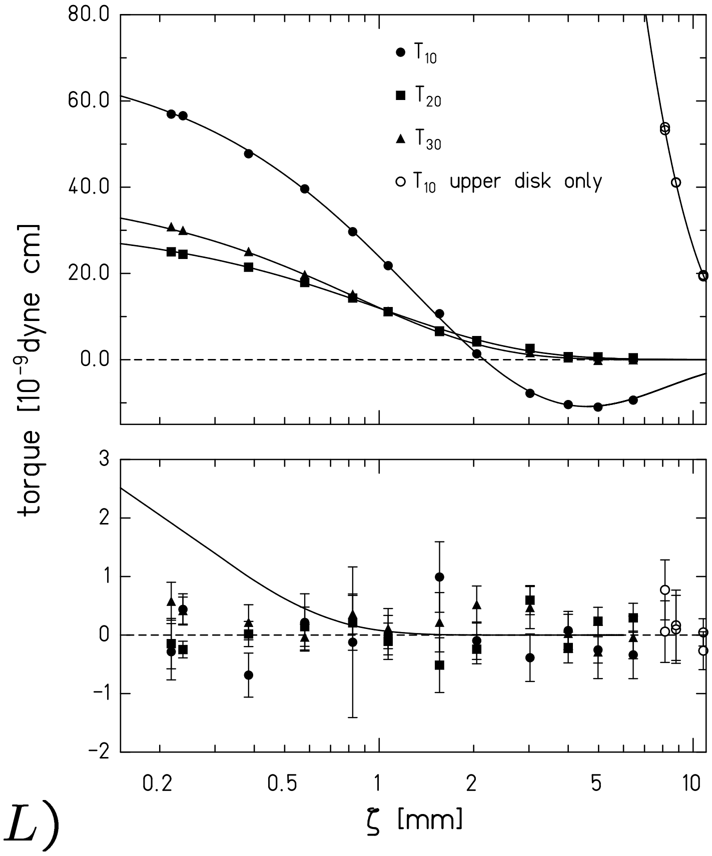


Momenty sił z analizy charmonicznej:

Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami

Dla $n = 2$:

$$R \; < \; 150\, \mu m$$
$$M_S \; > \; 4.0\, TeV \quad (95\% CL)$$



Grawitacja

Ograniczenia astrofizyczne

$n = 1$
wykluczone już z obserwacji Układu Słonecznego
($M_S \sim 1$ TeV wymaga $R \sim 10^{12}$ m)

$n = 2$
Bardzo silne ograniczenia astrofizyczne i kosmologiczne:

- emisja grawitonów przy zapadaniu się supernowych
  Neutrin z SN1987A: $M_S >$ 30 TeV, $R <$ 0.7 μm
- Promieniowanie γ z rozpadu grawitonów
  $M_S >$ 450 TeV, $R <$ 3 nm
- Temperatura powierzchni gwiazd neutronowych
  $M_S >$ 1700 TeV, $R <$ 0.2 nm

$\Rightarrow$ też praktycznie wykluczona

$n \geq 3$
Ograniczenia astrofizyczne i kosmologiczne dużo słabsze
$\Rightarrow$ obszar zainteresowań fizyki cząstek

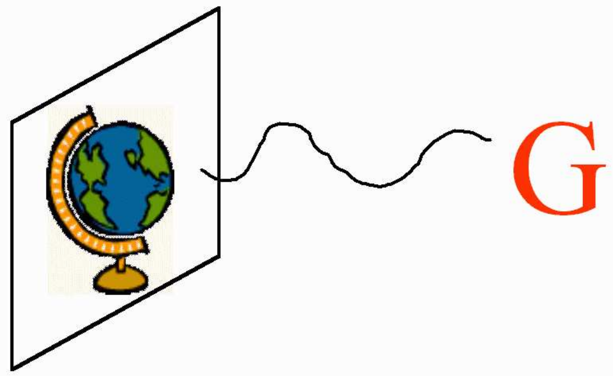
Model

Precyzyjne pomiary fizyki cząstek wykluczają istnienie "zwykłych" dodatkowych wymiarów.
Musimy wprowadzić pewne modyfikacje:

Model ADD

Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

Cząstki Modelu Standardowego "żyją" w 1+3 wymiarach. Dodatkowe wymiary dostępne są tylko dla grawitonów



Grawitacja dalej jest słaba ($\sim \frac{1}{M_{Pl}^2}$)

Ale w 1+3 wymiarach grawiton widoczny jest jako szereg stanów o masach:

$$m_i \;=\; i \cdot \Delta m \qquad i = 0, 1, 2 \ldots$$

Kolejne stant "wzbudzone" odpowiadają kwantyzacji pędu w dodatkowych wymiarach:

$$\Delta m \;\sim\; \frac{1}{R} \;\sim\; M_S \left(\frac{M_S}{M_{Pl}} \right)^{\frac{2}{n}}$$

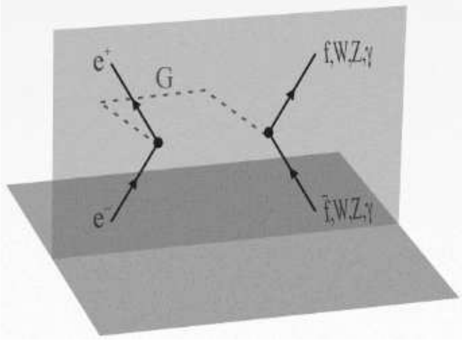
Δm bardzo małe ⇒ dużo dostępnych stanów
⇒ wzmocnienie oddziaływań grawitacyjnych ($\sim \frac{1}{M_S^2}$)

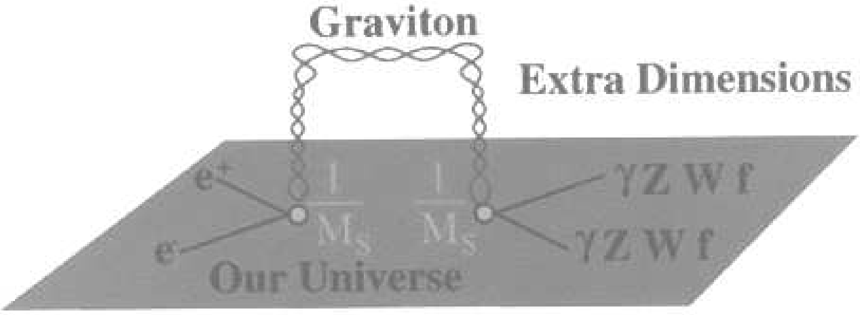
Poszukiwania

Wymiana grawitonów

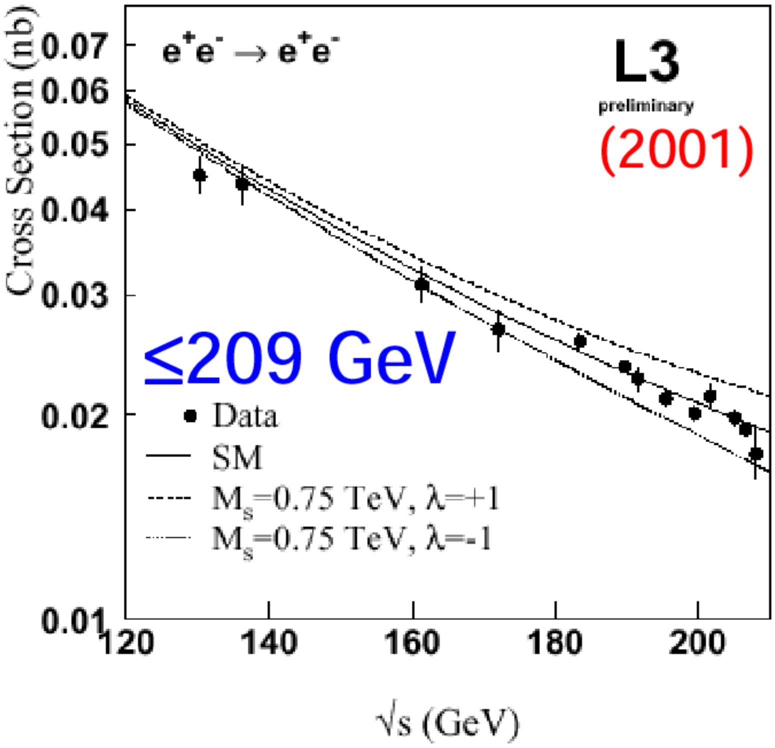
Przy skalach $\sqrt{s} \sim M_S$ wymiana grawitonów może dawać wkład porównywalny do wymiany γ i Z°.

Sygnału poszukiwano w produkcji par fermionów w LEP:





Przykładowe wyniki współpracy L3:

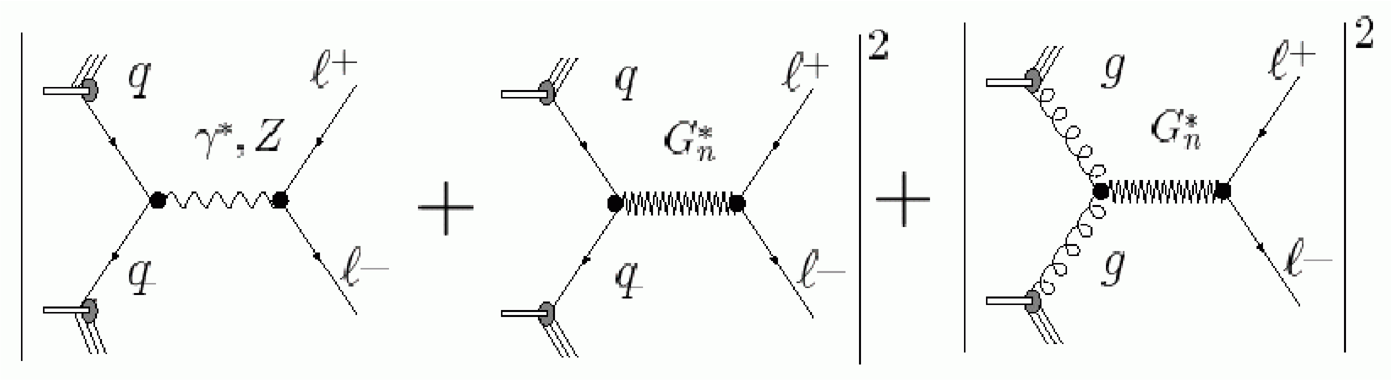


brak odchyleń od SM ⇒ $M_S >$ ~1.0 TeV

Poszukiwania

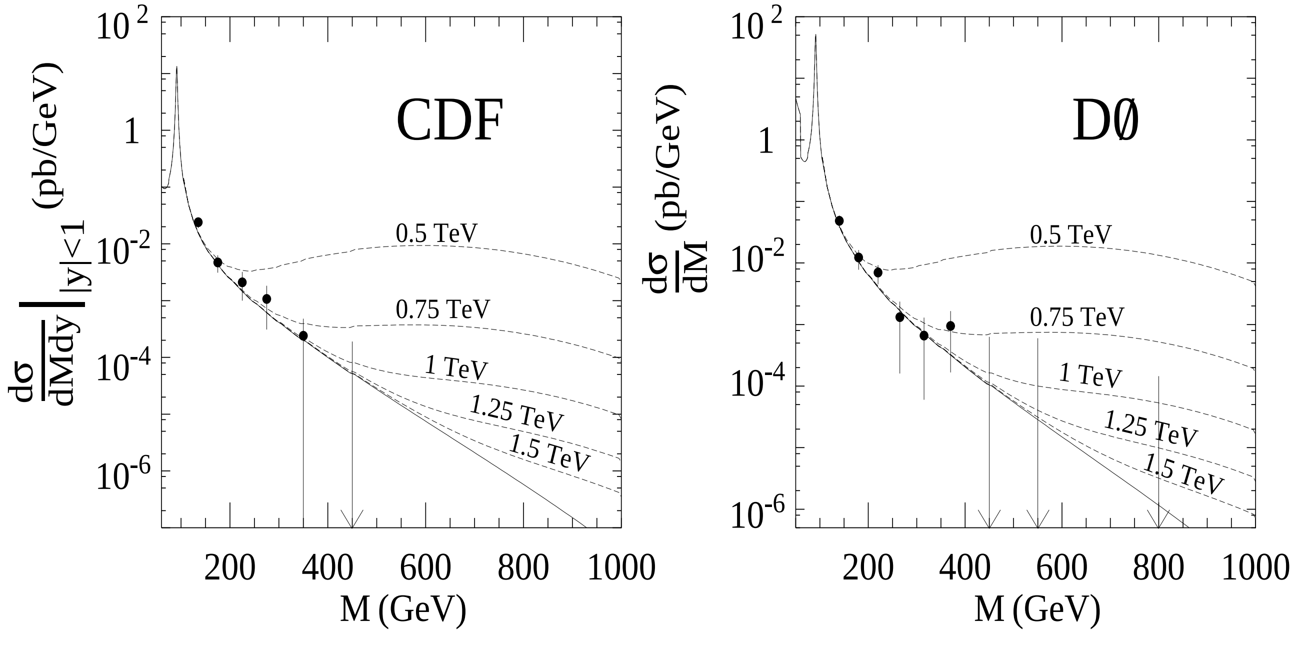
Wymiana grawitonów

Istotny wkład oczekiwany także w produkcji par leptonów w zderzeniach $p\bar{p}$ (proces Drell'a-Yan'a):



Dodatkowy wkład od gluonów (nieobecny w SM) !!!

Wyniki eksperymentów przy Tevatronie:



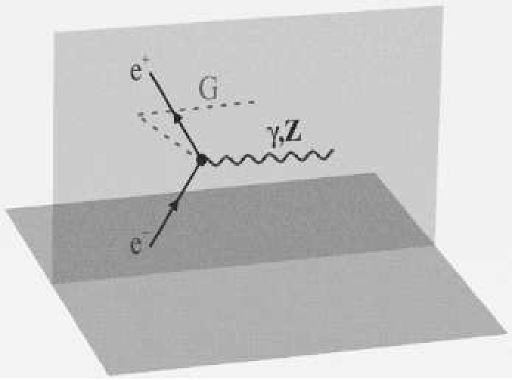
Dobra zgodność z SM ⇒ $M_S >$ 1.0-1.0 TeV

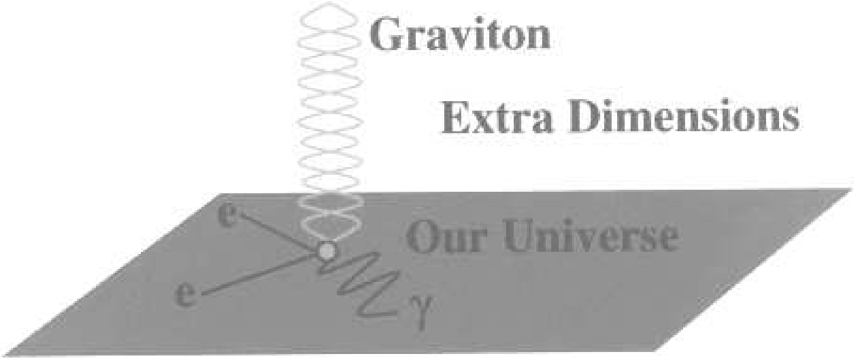
Podobne wyniki z pomiaru NC DIS w HERA ($M_S >\sim$0.8 TeV)

Poszukiwania

Produkcja grawitonów

Emisja grawitonu w dodatkowe wymiary
$\Rightarrow$ brakująca energia i pęd (podobnie jak przy emisji ν)





Poszukiwanie w LEP: $e^+e^- \rightarrow \gamma\, G$

główne tło: $e^+e^- \rightarrow \gamma\, Z^\circ$

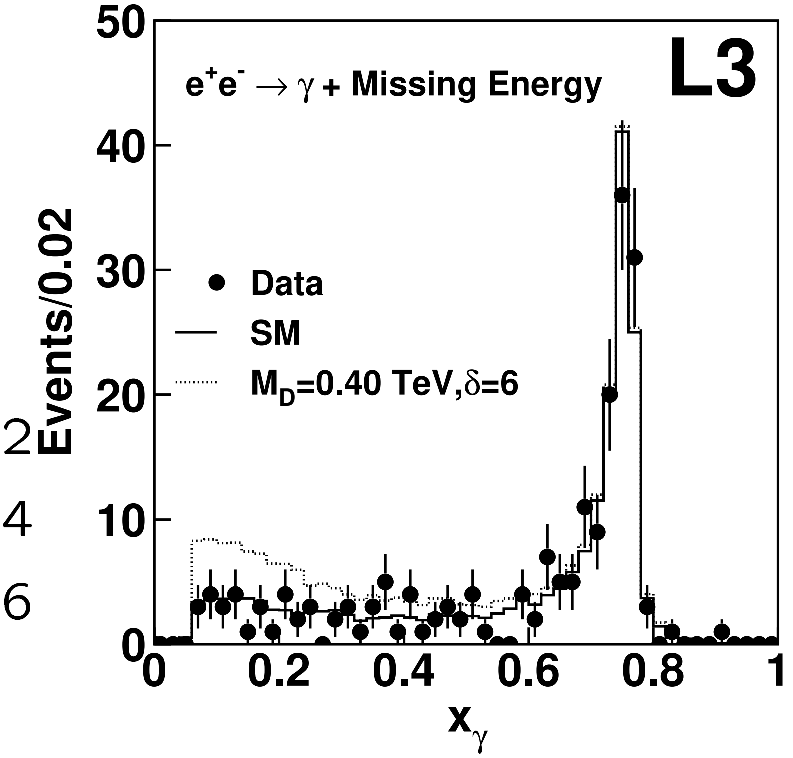
$$Z^\circ \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

Wyniki L3:

rozkład $x_\gamma = E_\gamma/E_e$

Brak odchyleń $\Rightarrow$

$$\begin{aligned} M_S \;>\; & 1.0\,TeV \quad n=2 \\ & 0.7\,TeV \quad n=4 \\ & 0.5\,TeV \quad n=6 \\ & (95\%CL) \end{aligned}$$

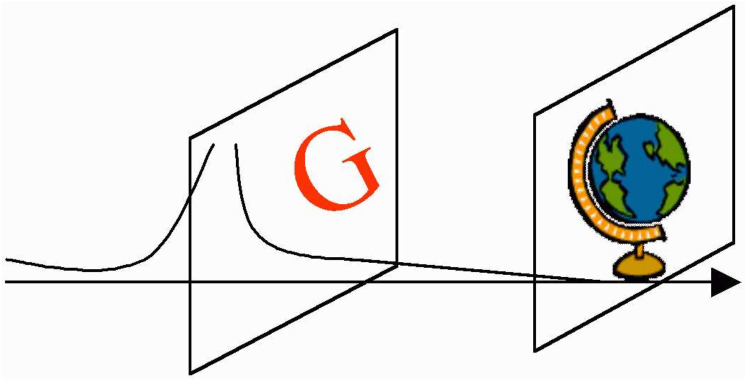


Model

Model R-S

Randal, Sundrum (1999)

Tylko jeden dodatkowy wymiar,
ale bardziej skomplikowana metryka:



Grawitacja silna na równoległej “ścianie”,
tłumiona (poprzez metrykę) w naszym świecie

Model przewiduje dyskretne widmo grawitonów.
Kolejne stany odległe są o:

$$\Delta m \quad \sim \quad 1\ TeV$$

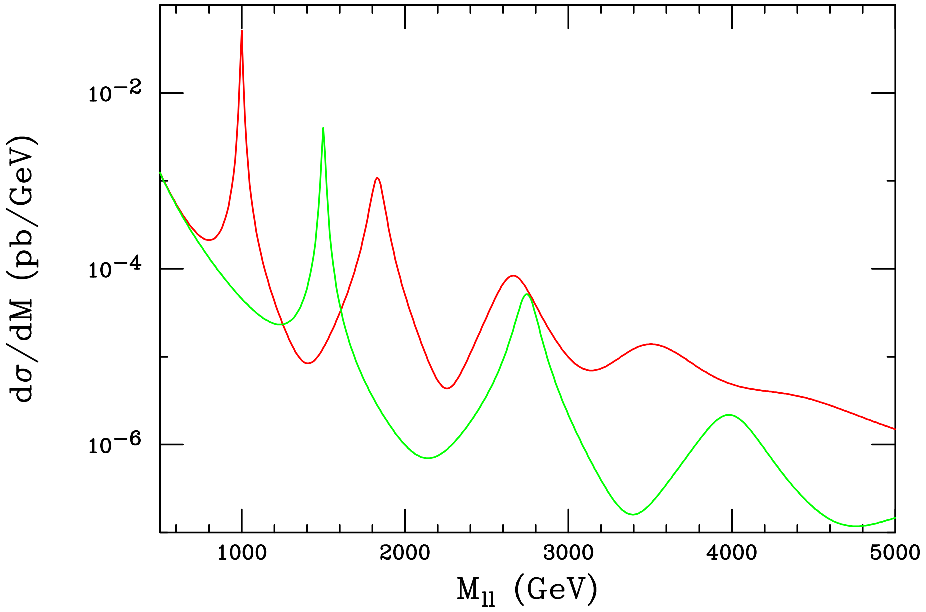
⇒ poszukiwanie stanów rezonansowych

Obecne eksperymenty - zbyt małe energie
⇒ musimy poczekać na LHC...

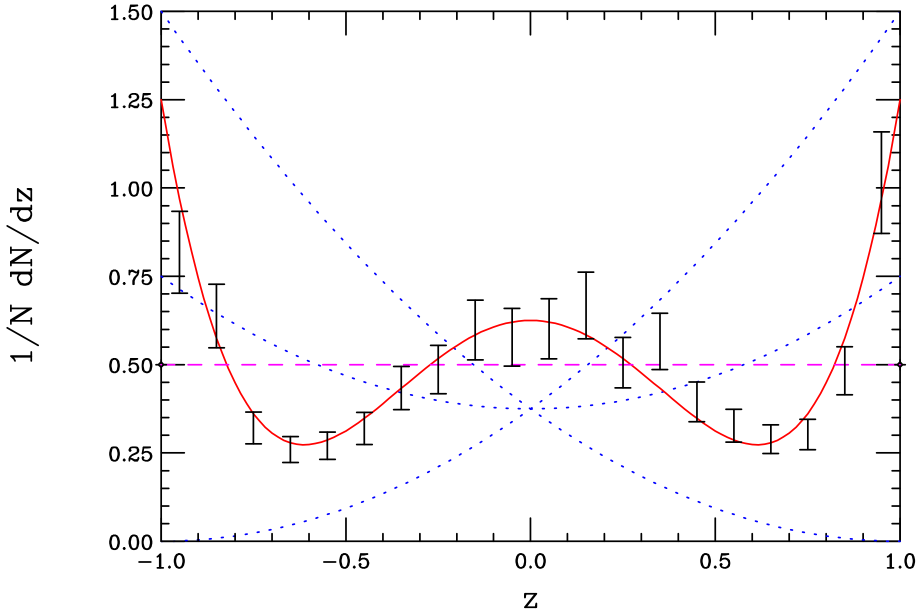
Perspektywy

Poszukiwanie rezonansów

Przekrój czynny na proces Drell'a-Yan'a w LHC, przyjmując $m_1 = 1$ TeV i 1.5 TeV (R-S model):



Wymiana grawinonu daje charakterystyczny rozkład kątowy (wymiana obiektu o spinie 2):



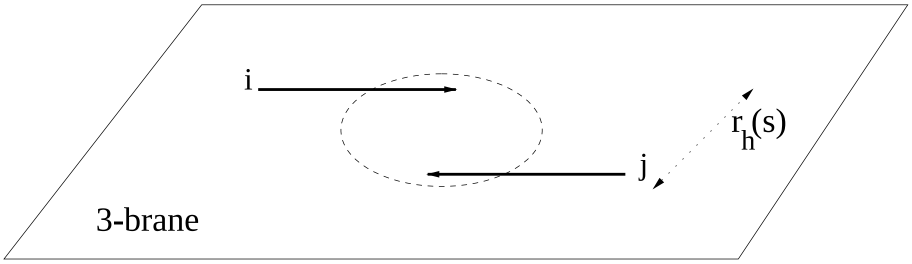
z=cos θ

Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

Gdy dostępna energia przekroczy M_S możliwa staje się produkcja czarnych dziur !

czarna dziura = obiekt związany siłami grawitacyjnymi



Promień Schwarzschielda dla masy $m_{BH} = \sqrt{\hat{s}}$:

$$R_S \sim \frac{1}{M_S}\left(\frac{\sqrt{\hat{s}}}{M_S}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Przekrój czynny na produkcję czarnej dziury:

$$\sigma_{BH}(s) \approx \pi R_S^2 \sim s^{\frac{1}{n+1}}$$

⇒ szybko rośnie z energią. Może być bardzo duży !!!

W LHC ($\sqrt{s} = 14$ TeV; $n = 6$):

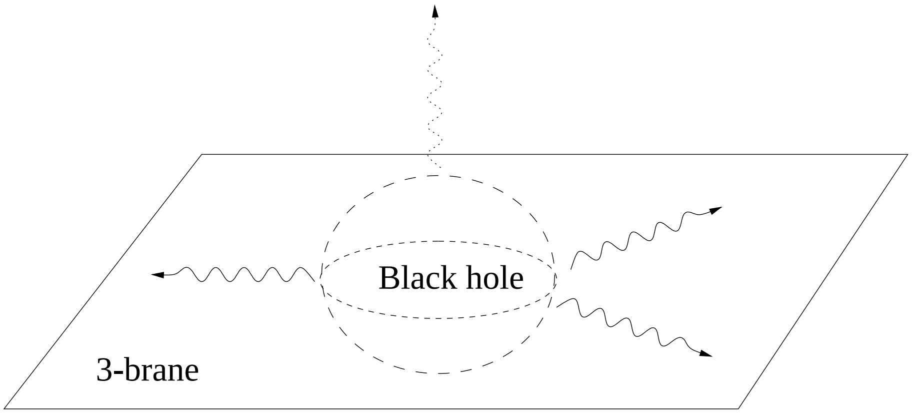
$$m_{BH} \geq 5\,TeV \Rightarrow 1\ \text{BH/s}$$
$$m_{BH} \geq 10\,TeV \Rightarrow 3\ \text{BH/dzień}$$

⇒ fabryka czarnych dziur

Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

Czarna dziura “paruje” emitując izotropowo wysokoenergetyczne cząstki:



Część energii ucieka w dodatkowe wymiary (grawitony), ale większość powinna być widoczna.

Sygnatura
⇒ wzrost przekroju czynnego dla dużych mas
⇒ zwiększona produkcja wysokoenergetycznych leptonów i fotonów ($\geq$ 100 GeV)

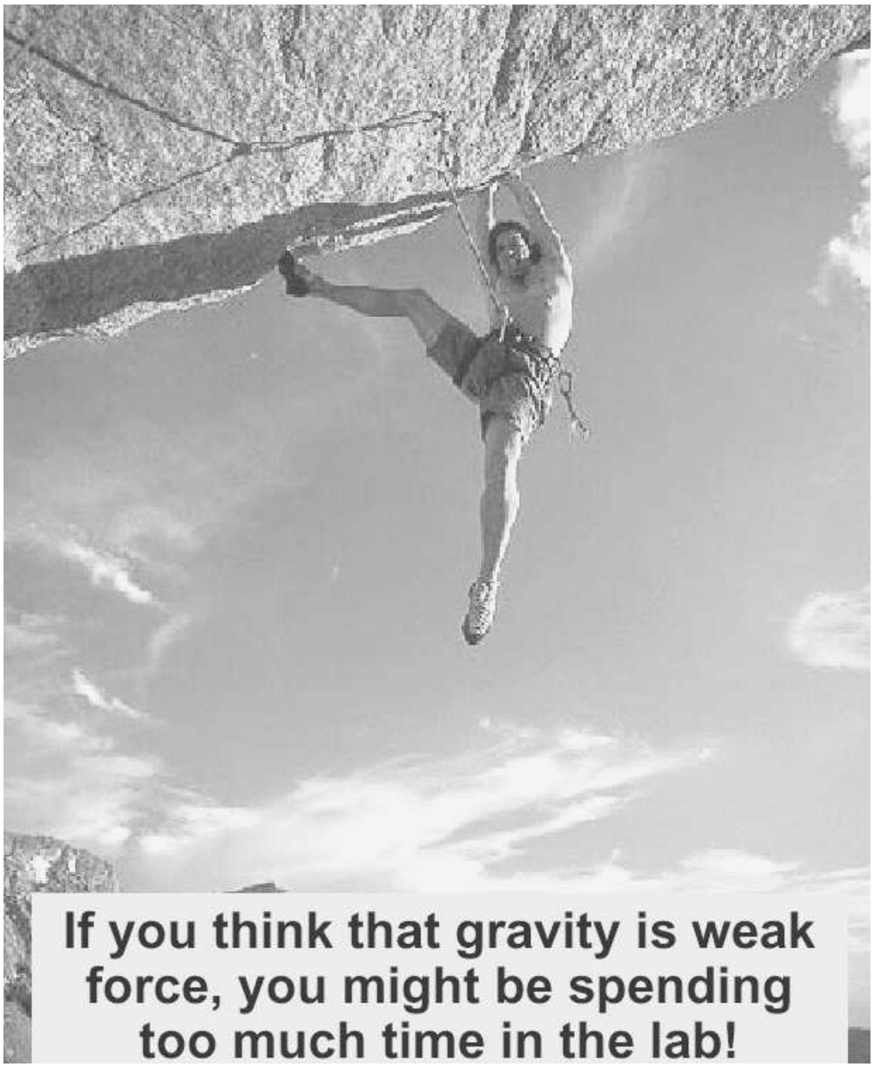
Średni czas życia czarnej dziury $\tau \sim 10^{-29}s$, ale w szczególnych przypadkach możiwe też stany metastabilne...

Podsumowani

On 2/15/00 patent 6,025,810 was issued to David Strom for a "hyper-light-speed antenna." The concept is deceptively simple: "The present invention takes a transmission of energy, and instead of sending it through normal time and space, it pokes a small hole into another dimension, thus sending the energy through a place which allows transmission of energy to exceed the speed of light." According to the patent, this portal "allows energy from another dimension to accelerate plant growth." - from the AIP's "What's New", 3/17/00

Dodatkowe wymiary zostały już...

opatentowane !...



Jeśli myślisz, że grawitacja jest słaba ...