

Dodatkowe wymiary

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład XI

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

Dodatkowe wymiary

Skala Plancka

Problem hierarchii w Modelu Standardowym:

skala unifikacji $M_{GUT} \gg \nu \sim M_W$

(skala łamania symetrii EW)

Grawitacja:

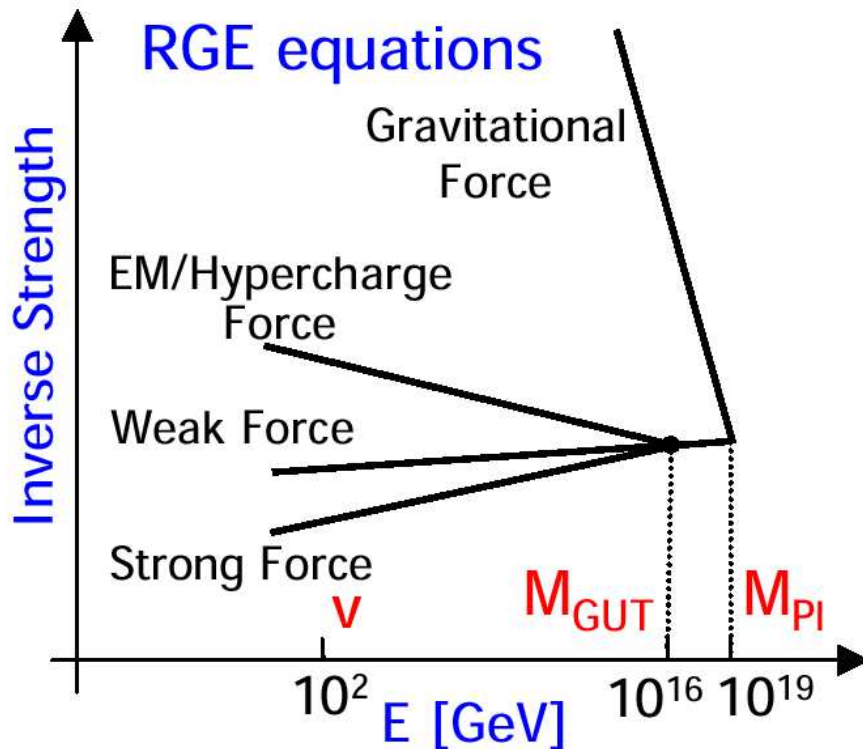
unifikacja dopiero przy skali

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

co odpowiada skali odległości

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

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



Dodatkowe wymiary

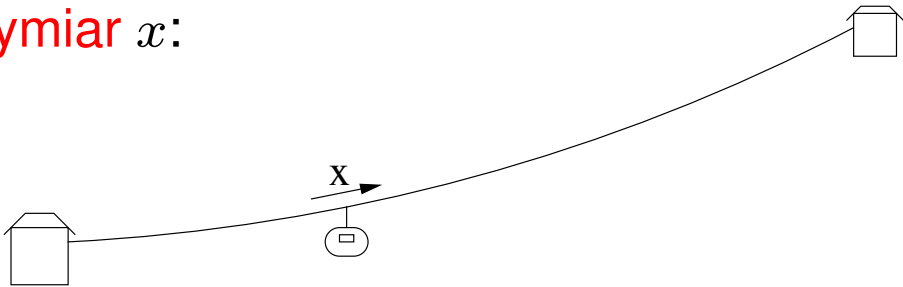
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

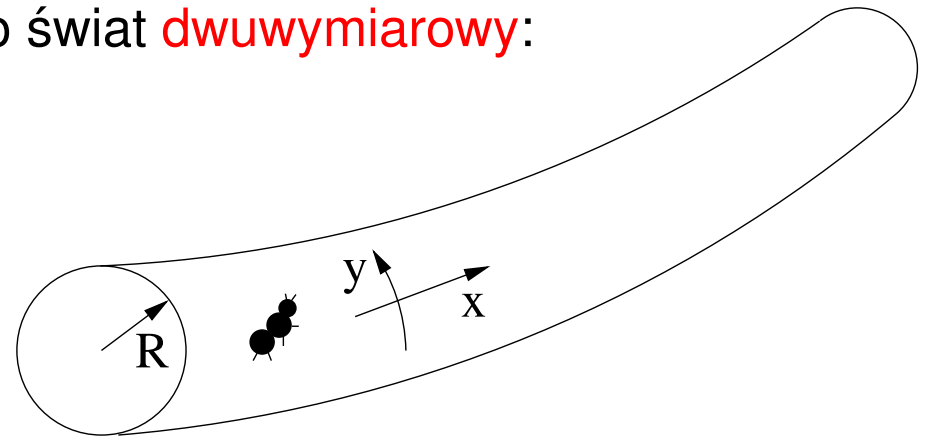
NIE - jeśli tylko nieskończone wymiary... **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone !

Przykład I

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



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



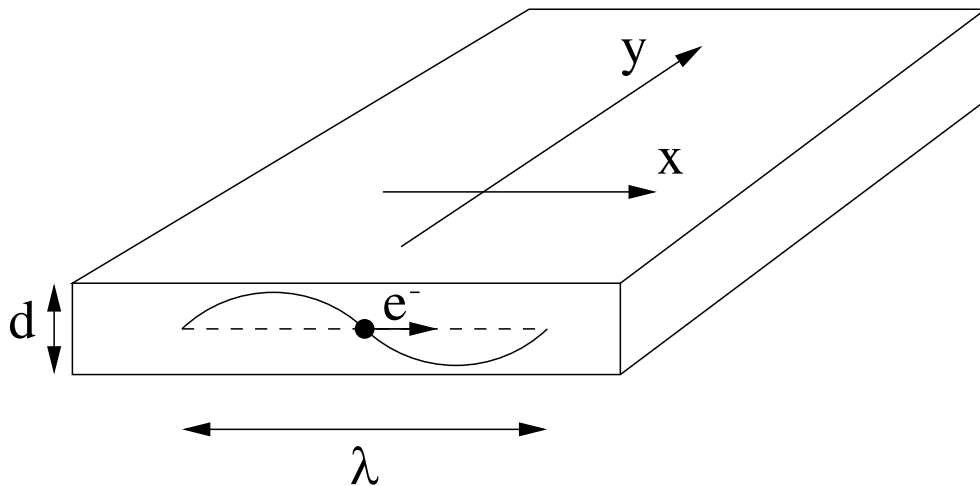
y jest współrzędną cykliczną.

Drugą współrzędną zauważamy dopiero gdy przyglądamy się z rozdzielczością $\Delta < R$

Dodatkowe wymiary

Przykład II

Elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



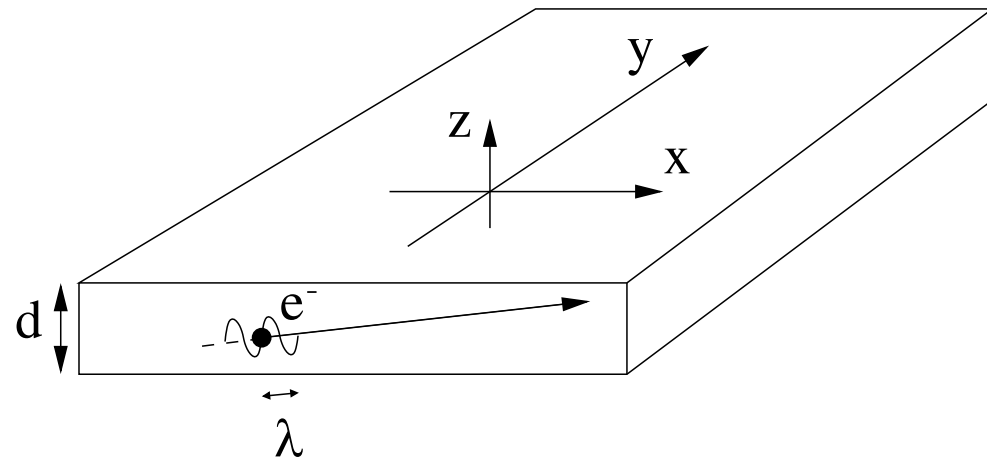
Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

\Rightarrow ruch dwuwymiarowy.

“Wzbudzenie” w kierunku prostopadłym
nie jest dostępne energetycznie.

(kwantowy efekt Halla).

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



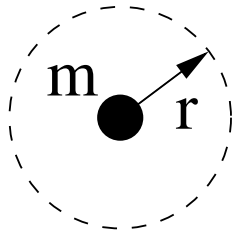
jego ruch musimy opisywać w trzech
wymiarach...

Dodatkowe wymiary

Grawitacja

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

Jak będzie wtedy wyglądała grawitacja ?



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

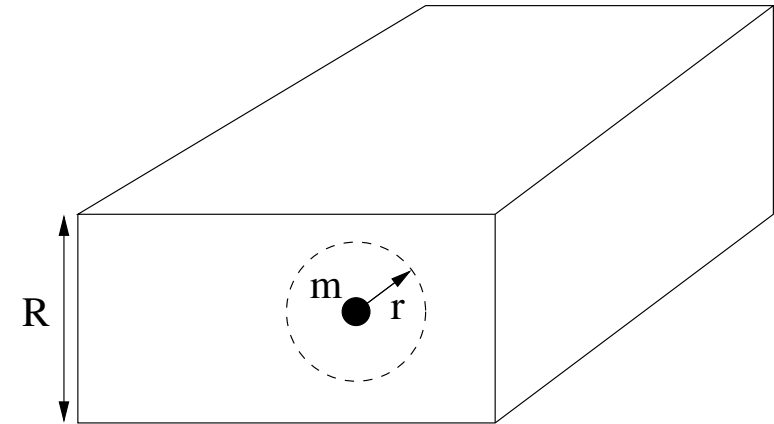
$$S(3+n) \sim r^{n+2}$$

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

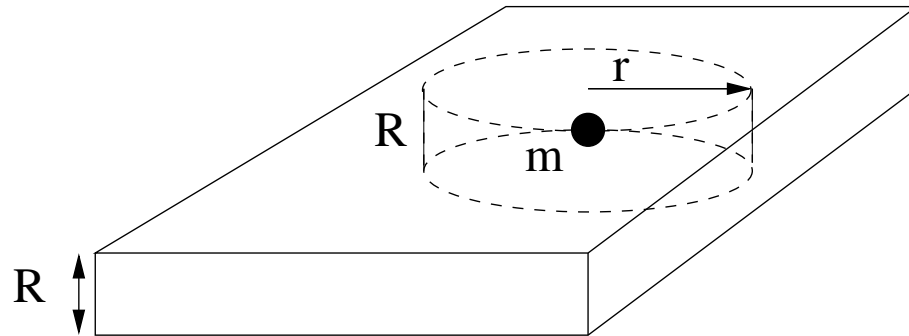
Takie podejście jest słuszne tylko dla $r \ll R$, gdy testujemy grawitację na bardzo małych odległościach:



Dodatkowe wymiary

Grawitacja

Gdy badamy oddziaływania na “dużych” odległościach $r \gg R$:



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

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

Siła grawitacyjna, z **Prawa Gaussa**:

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

Na dużych odległościach widoczne są tylko **3 wymiary**

\Rightarrow 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

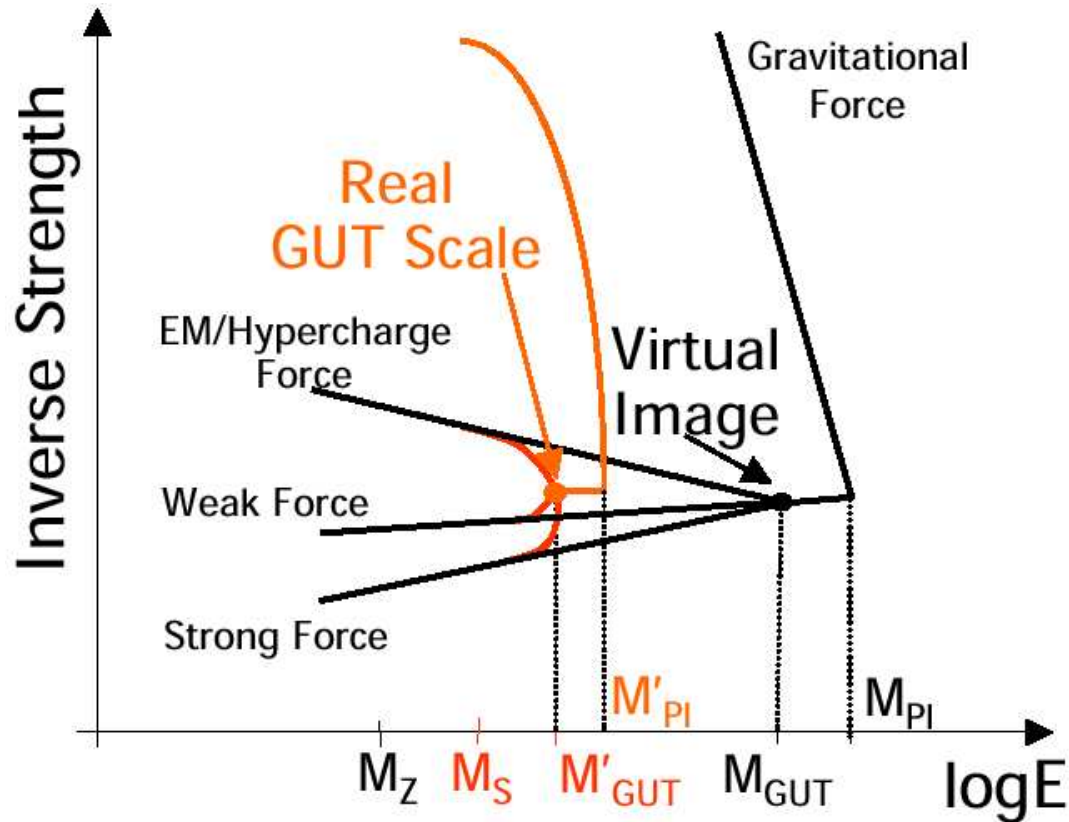
\Rightarrow rozwiązanie **problemu hierarchii**

Dodatkowe wymiary

Unifikacja

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

⇒ możliwa jest **unifikacja** wszystkich oddziaływań na dużo **niższych skalach** !



Przyjmując M_S 1 TeV:

$$R = \frac{1}{2\sqrt{\pi}M_S} \left(\frac{M_{Pl}}{M_S} \right)^{2/n} \propto \begin{cases} 8 \times 10^{12} m, & n=1 \\ 0.7 mm, & n=2 \\ 3 nm, & n=3 \\ 6 \times 10^{-12} m, & n=4 \end{cases}$$

Jakie są ograniczenia doświadczalne ?

Grawitacja

Prawo Newtona

Przez 20 lat zastanawiał się nad spadającym jabłkiem...

W 1687 roku przedstawił prawo powszechnego ciążenia:

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

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

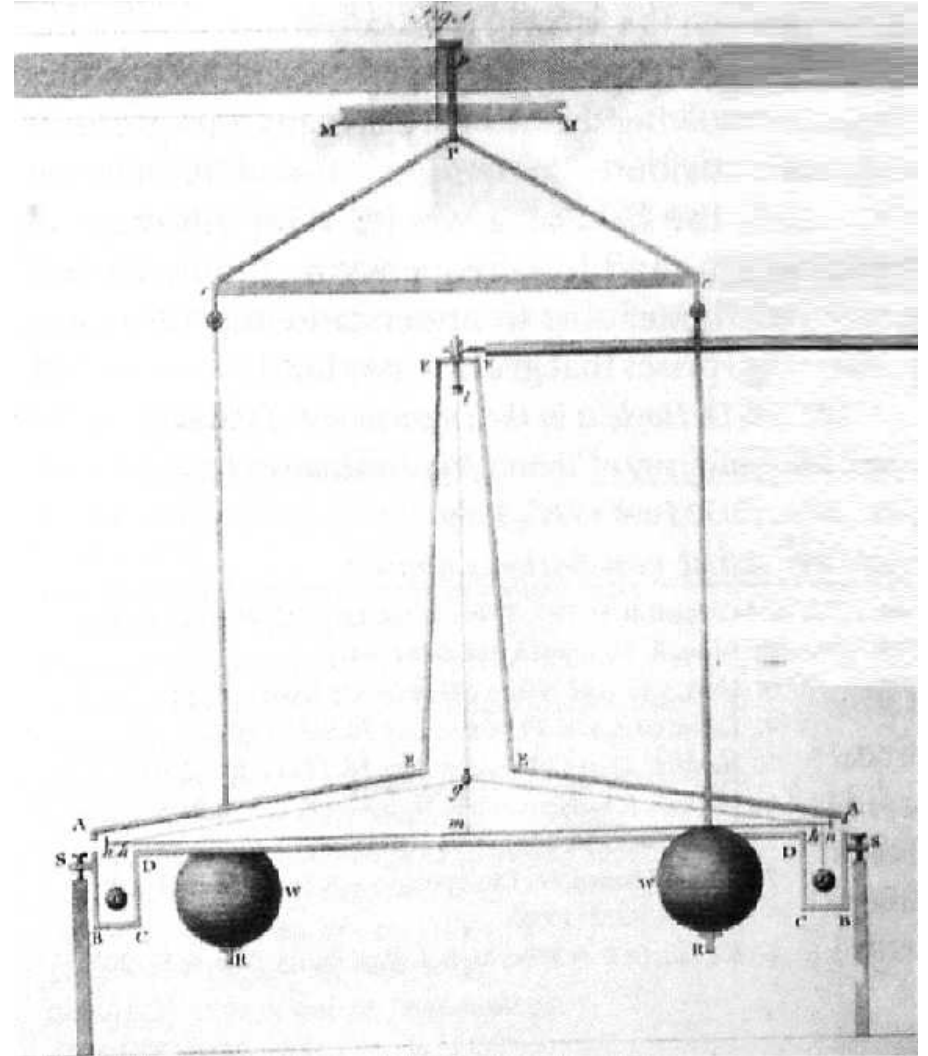
z zależności typu $\frac{1}{r^2}$ wynikają prawa Keppler'a...

Pierwszy pomiar w laboratorium

⇒ waga skręceń Cavendish'a

⇒ potwierdzenie prawa Newtona

Doświadczenie Cavendisha (1798)



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

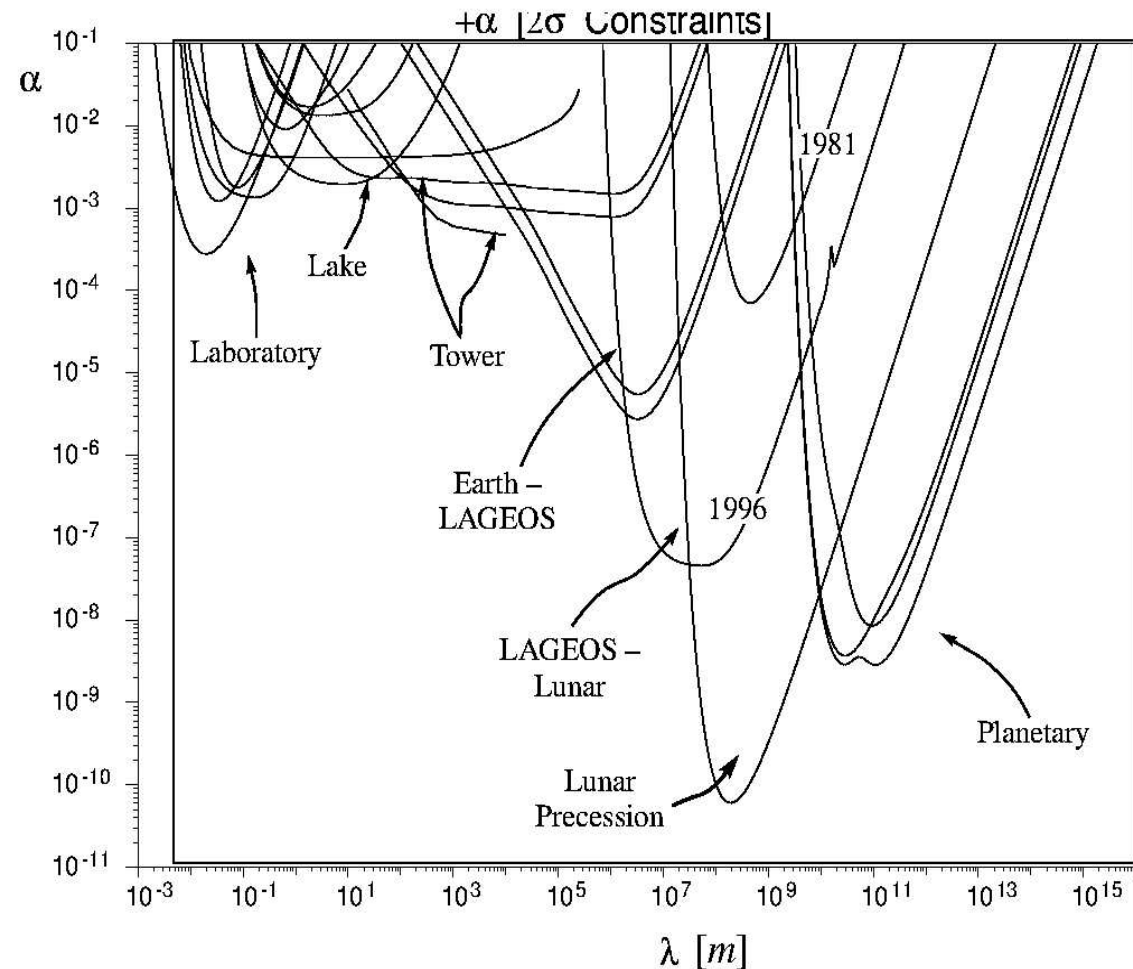
α - względne odchylenie ("łamanie")

Najdokładniej przetestowany układ:

Ziemia-Księżyc

Pomiary labroartoryjne: $\lambda > 2 \text{ mm}$

Wyniki dostępne w 1996 roku
(górne ograniczenia na α)



Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

(University of Washington)

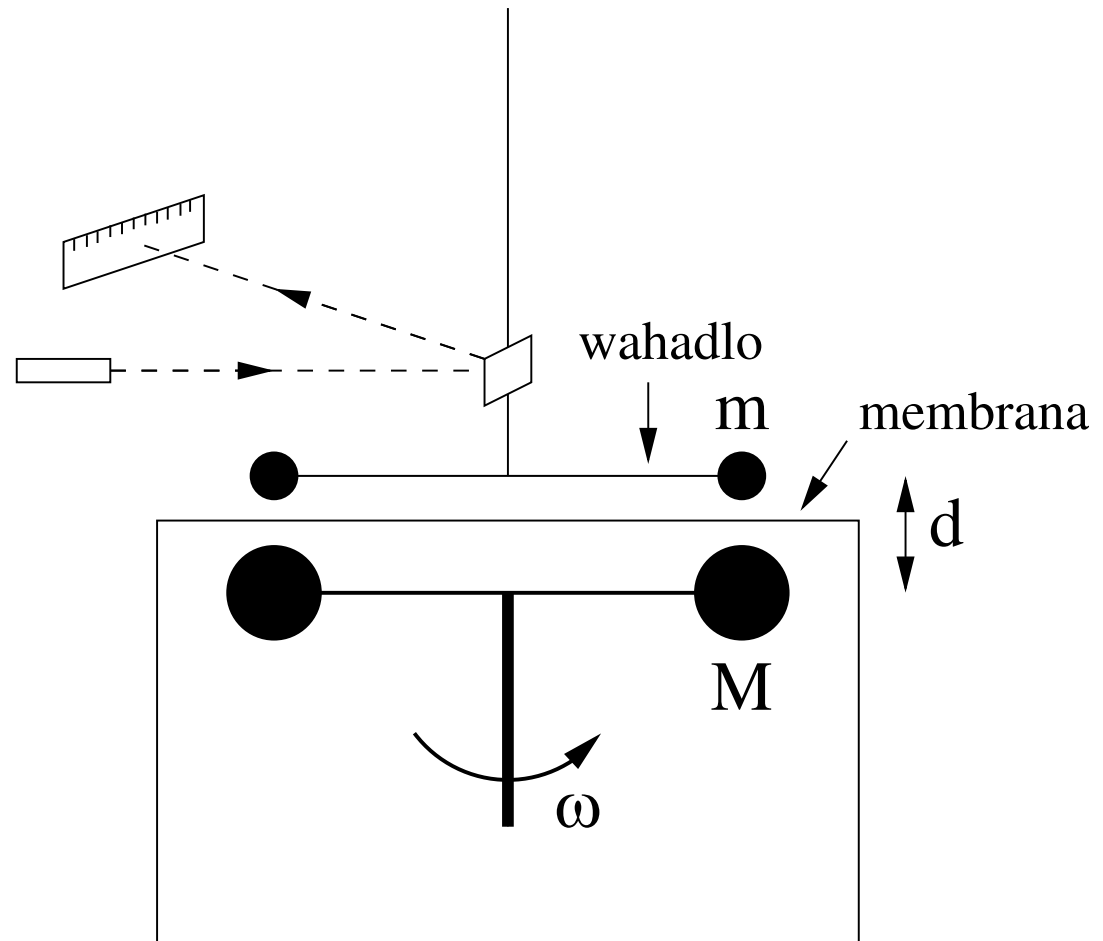
Nowy, bardzo precyzyjny **pomiar grawitacji** na małych odległościach, $\lambda \leq 1 \text{ mm}$

Idea podobna do klasycznego doświadczenia **Cavendisha**.

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

⇒ dużo lepsza kontrola **błędów systematycznych** w porównaniu z pomiarem “statycznym”

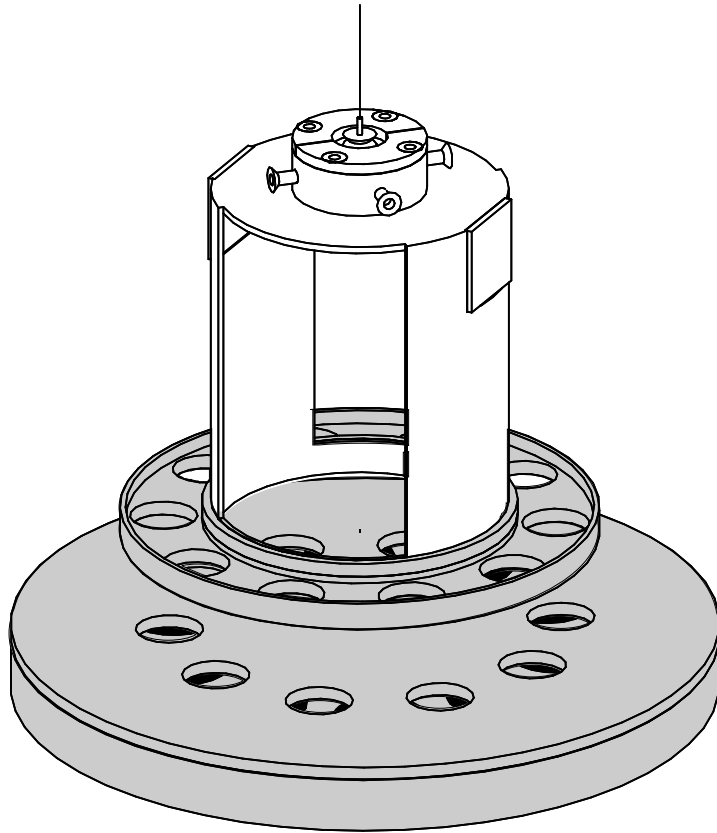
Membrana: dodatkowa izolacja obu części układu



Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Rzeczywisty układ doświadczalny
(z pominięciem membrany):

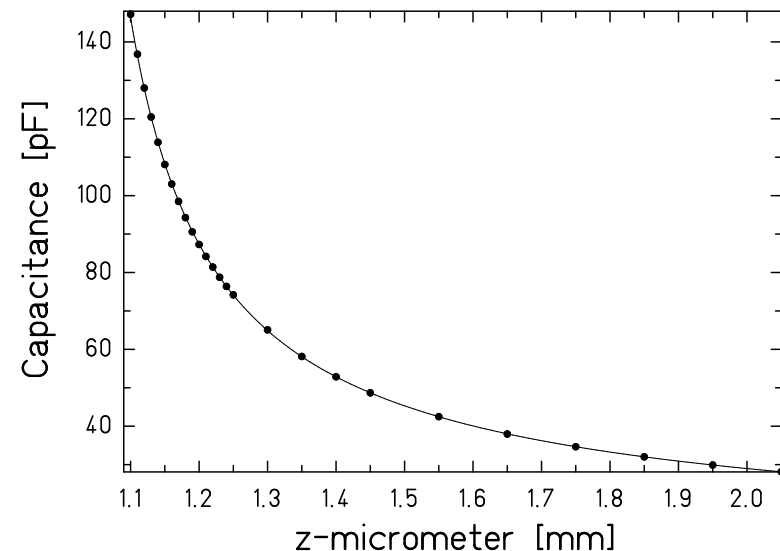


Zamiast kul - 10 otworów w wahadle
i dysku “napędzającym”

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

Grubość membrany oddzielającej: $20 \mu m$

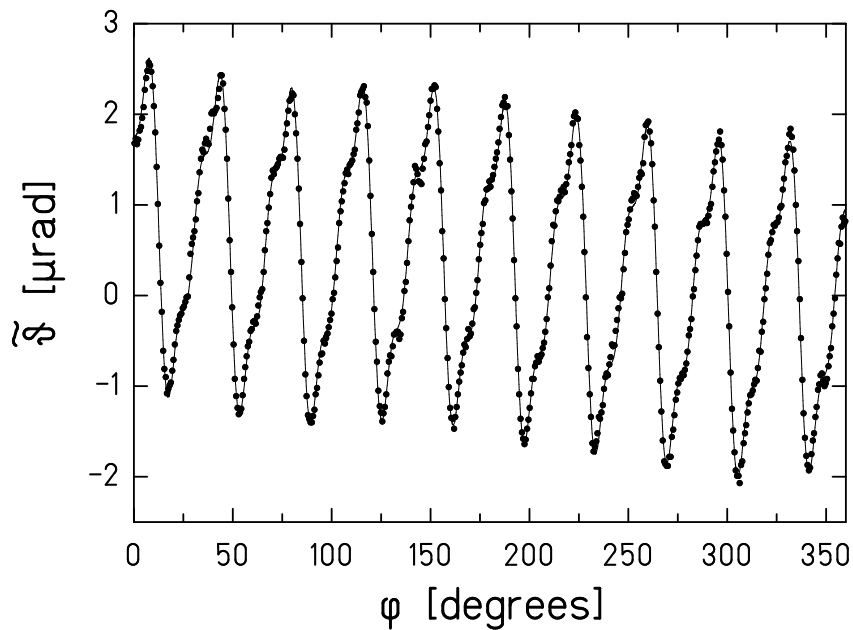
Pojemnościowy pomiar odległości
(kondensator płaski):



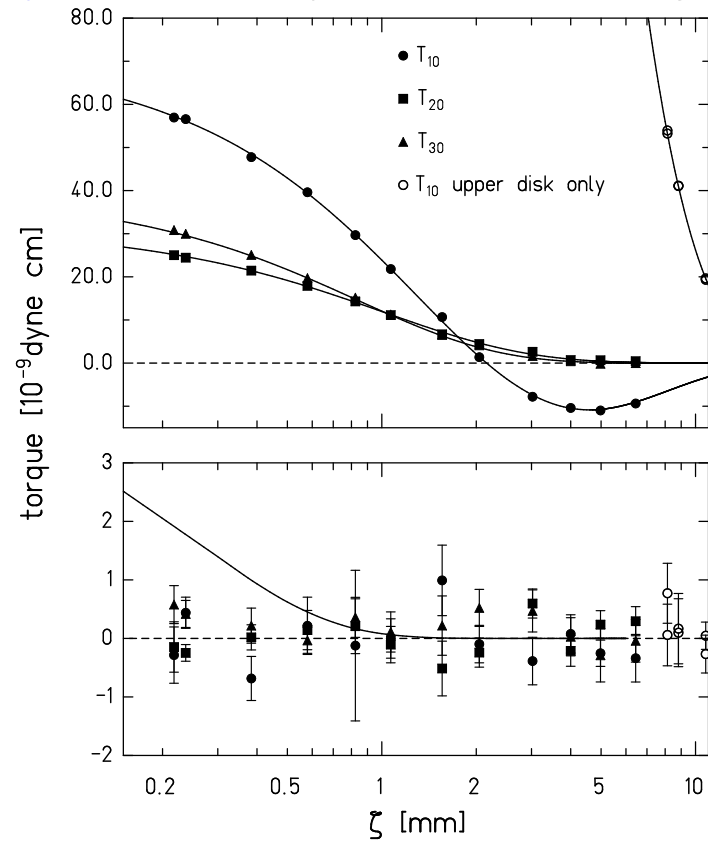
Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Wyniki pomiarów: jeden cykl obrotu dysku “napędzającego”



Momenty sił z analizy charmonicznej:



Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami. Dla $n = 2$:

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

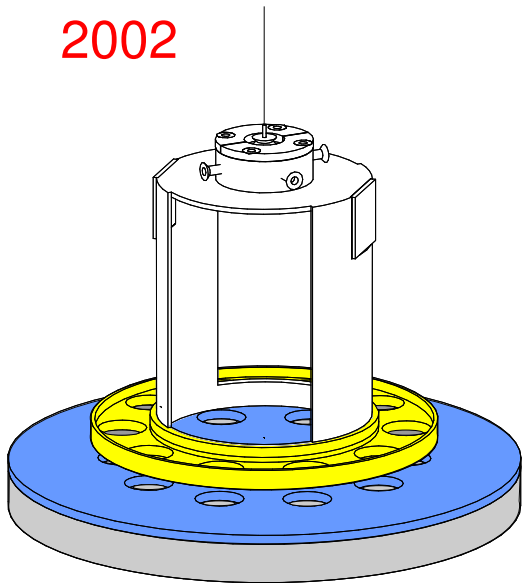
Grawitacja

Nowe pomiary

Eksperyment Eöt-Wash

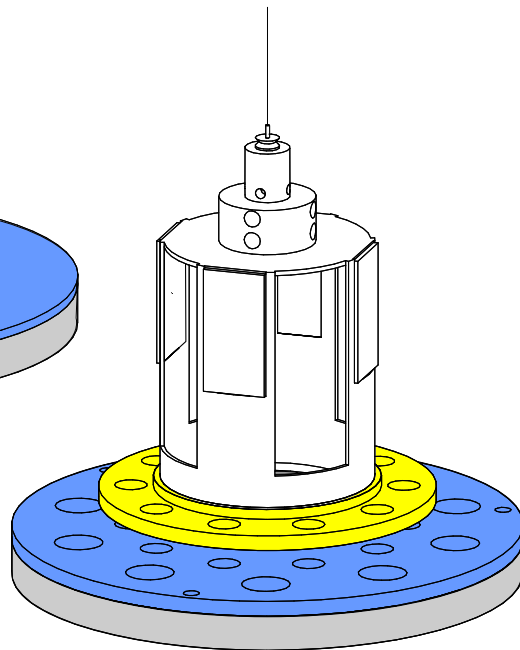
optymalizacja rozkładu masy w wahadle

2002

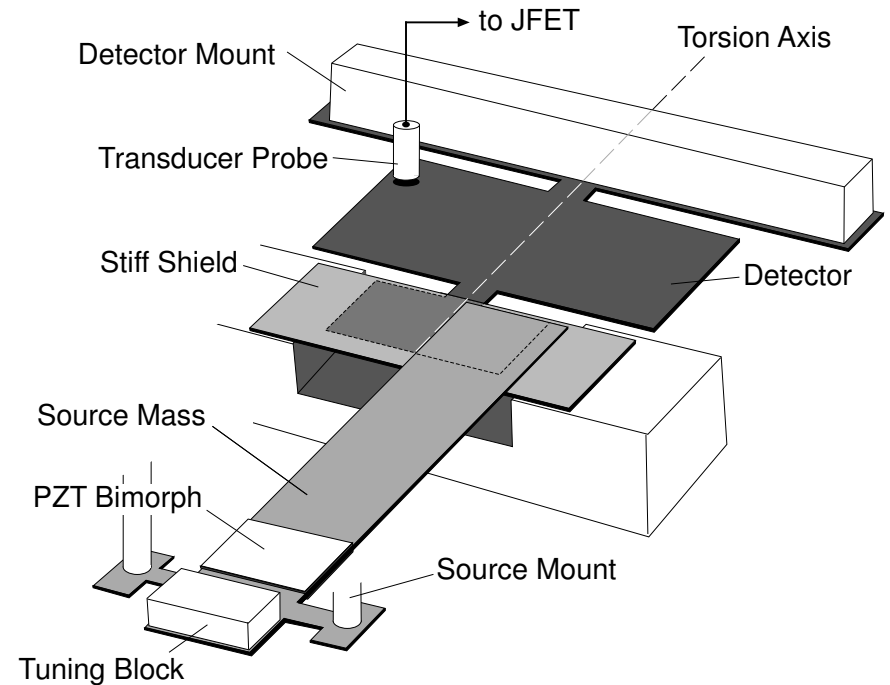


5 cm

2004



University of Colorado (2003)



Poszukiwanie rezonansu wywołanego oddziaływaniami grawitacyjnymi

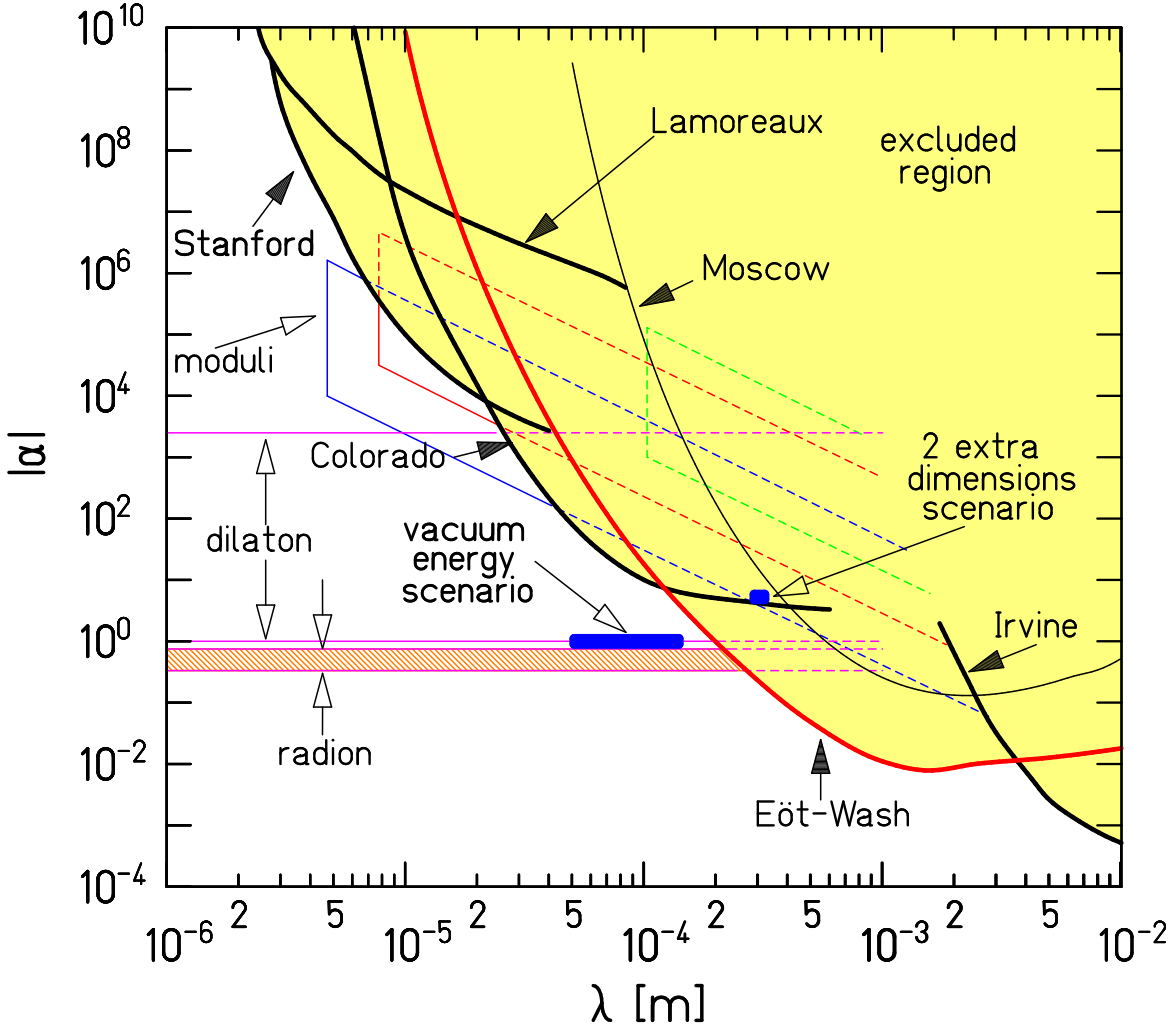
Drgająca płytka wolframowa ($305 \mu\text{m}$) pobudza do drgań drugą płytkę ($195 \mu\text{m}$)

Grawitacja

Zestawienie wyników

Aktualne ograniczenia na parametr α (2004)

“Zwykłe” dodatkowe wymiary
 $|\alpha| \sim 4 \Rightarrow$



Grawitacja

Ograniczenia astrofizyczne

$$n = 1$$

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

$$n = 2$$

Bardzo silne ograniczenia astrofizyczne i kosmologiczne:

- emisja grawitonów przy zapadaniu się supernowych
neutrin z SN1987A $\Rightarrow M_S > 30 \text{ TeV}, R < 0.7 \mu\text{m}$
- promieniowanie γ z rozpadu grawitonów $M_S > 450 \text{ TeV}, R < 3 \text{ nm}$
- temperatura powierzchni gwiazd neutronowych $M_S > 1700 \text{ TeV}, R < 0.2 \text{ nm}$
 \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” (otwartych dla wszystkich cząstek) 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** \Rightarrow

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

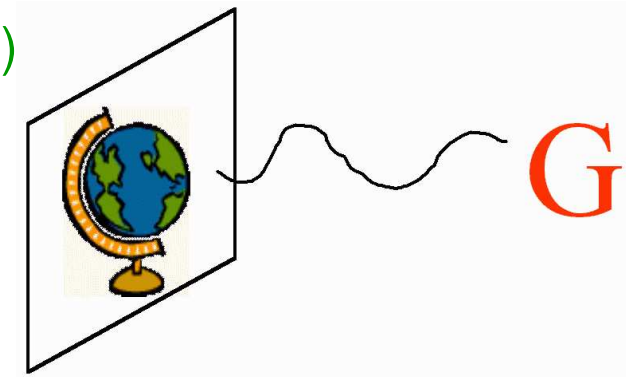
Ale w 1+3 wymiarach grawiton widoczny jest jako szereg stanów o masach:

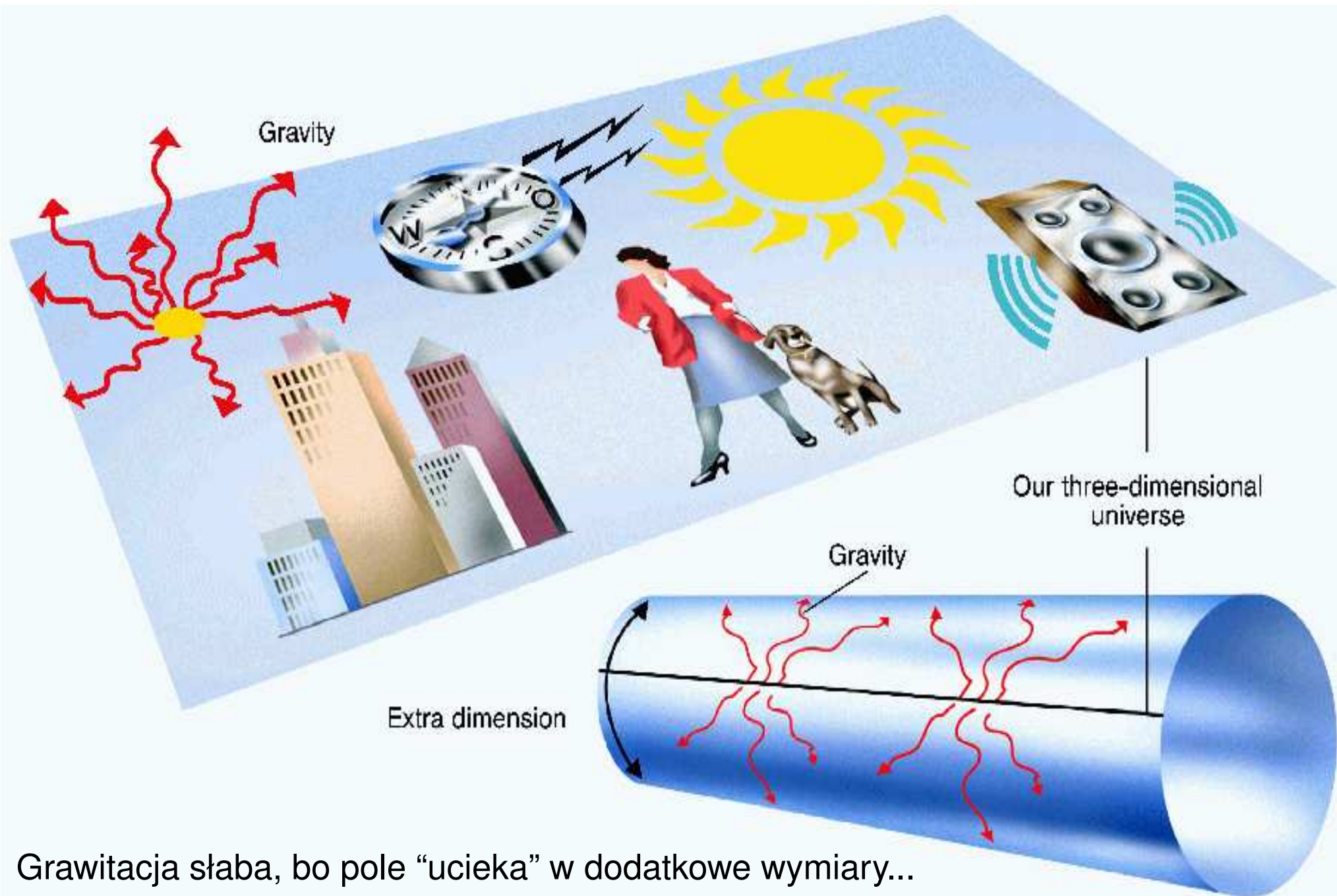
$$m_i = i \cdot \Delta m \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Kolejne stany “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 \Rightarrow **dużo** dostępnych **stanów** \Rightarrow wzmocnienie grawitacji ($\sim \frac{1}{M_S^2}$)





Grawitacja słaba, bo pole “ucieka” w dodatkowe wymiary...

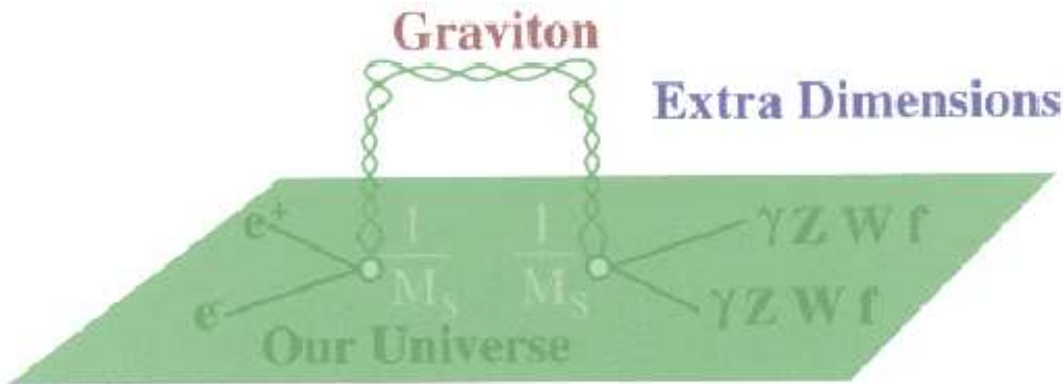
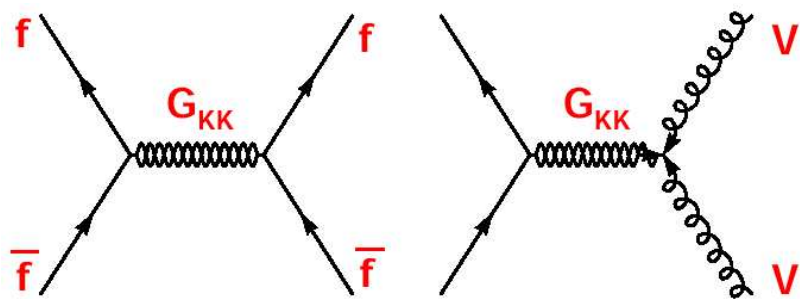
Poszukiwania

Wymiana grawitonów

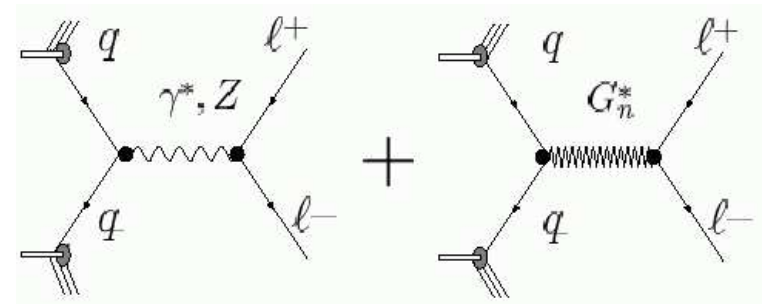
Przy skalach $\sqrt{s} \sim M_S$ wymiana grawitonów może być porównywalna z wymianą γ i Z^0 .

LEP: wkład do produkcji par cząstek

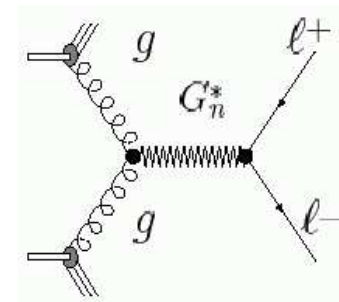
$$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}, W^+W^-, ZZ, \gamma\gamma$$



$p\bar{p}$: wkład do produkcji par leptonów (proces Drell'a-Yan'a)



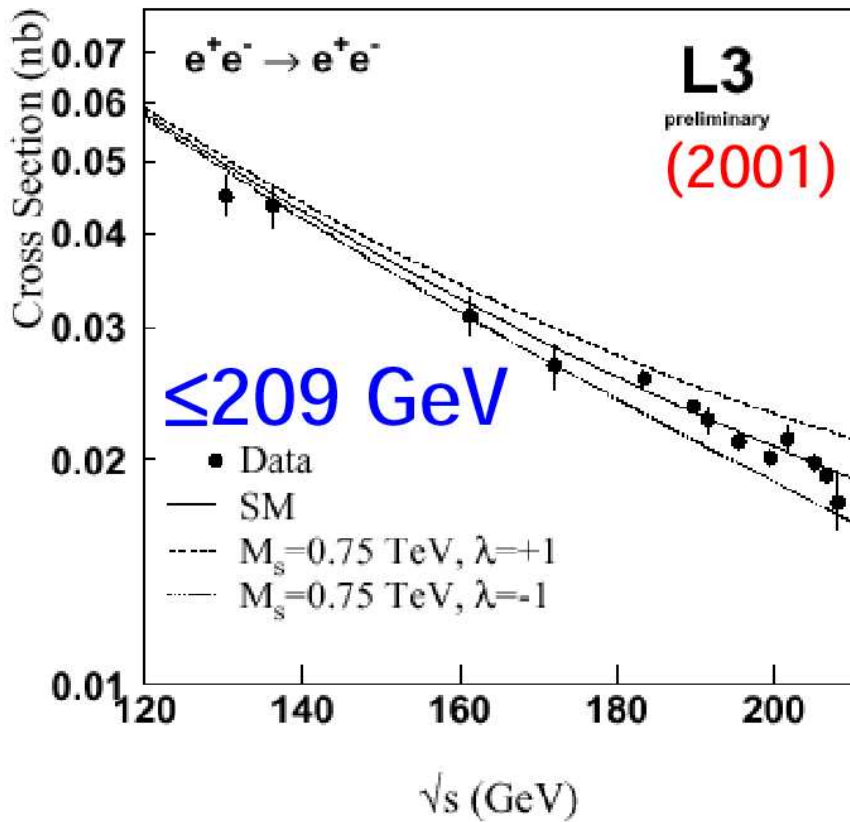
Dodatkowy wkład od gluonów !!! (nieobecny w SM)



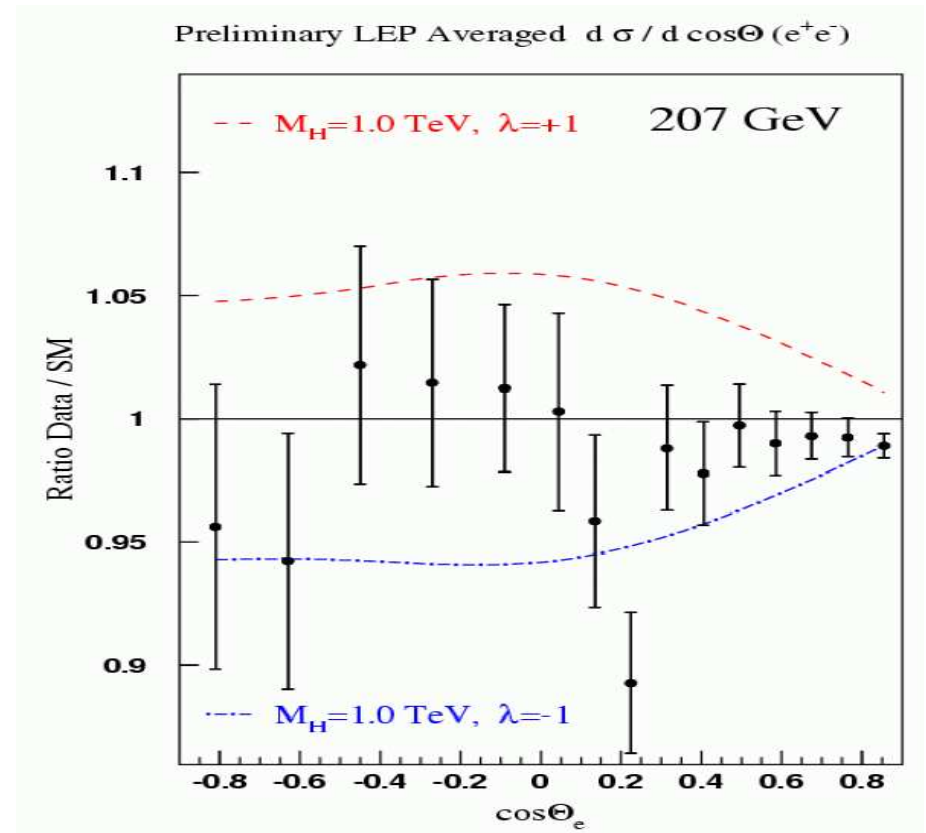
Poszukiwania

Wymiana grawitonów

Przykładowe wyniki współpracy L3:



Zestawienie wyników LEP przy $\sqrt{s} = 207$ GeV:

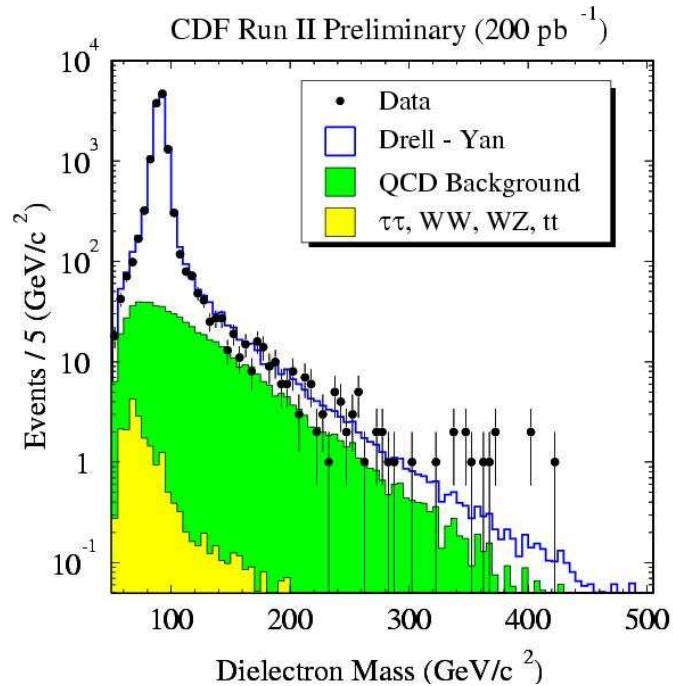


brak odchyień $\Rightarrow M_S > 1.1 - 1.2$ TeV

Poszukiwania

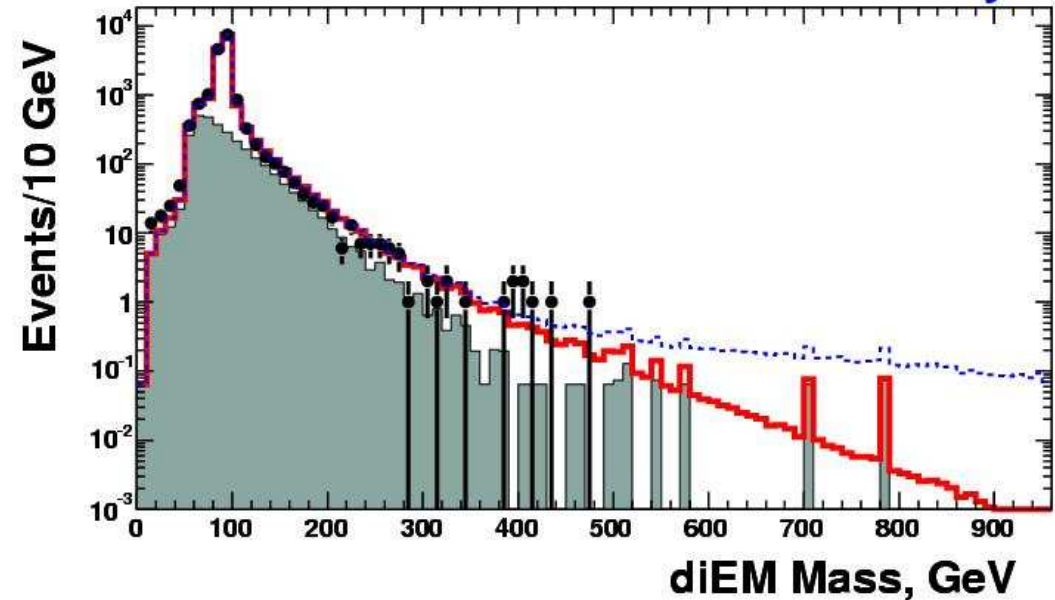
Wymiana grawitonów

Nowe wyniki eksperymentów przy Tevatronie: $p\bar{p} \rightarrow e^+e^-, \gamma\gamma$



diEM Mass Spectrum

DØ Run II Preliminary

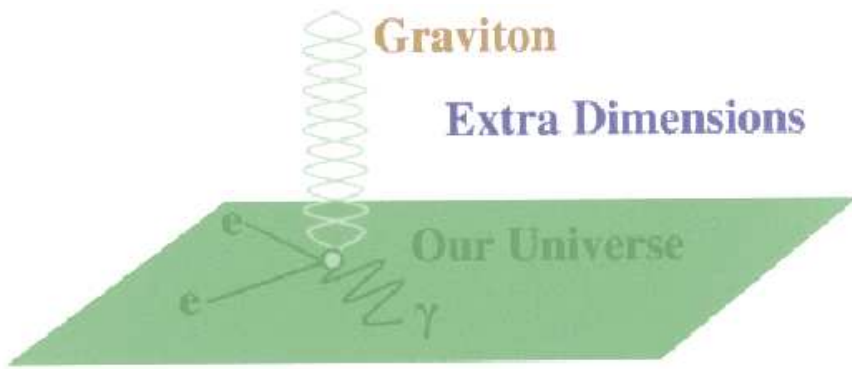


Dobra zgodność z SM $\Rightarrow M_S > 1.2-1.3$ TeV

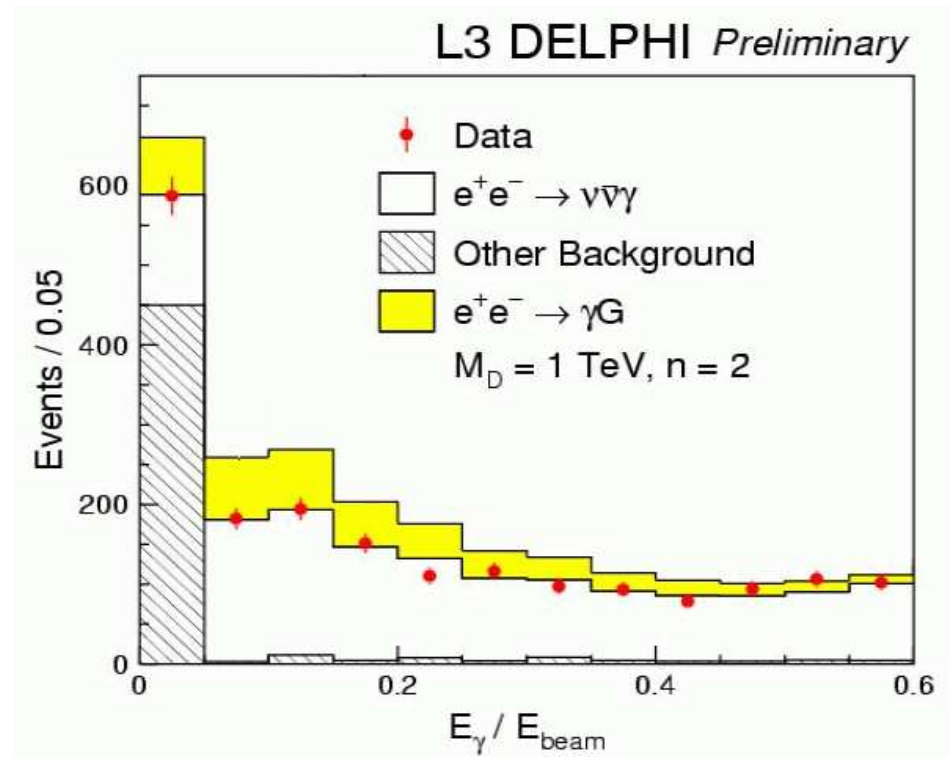
Poszukiwania

Produkcja grawitonów

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



Rozkład energii mierzonych fotonów:



Poszukiwanie w LEP:

$$e^+e^- \rightarrow \gamma G$$

główne tło:

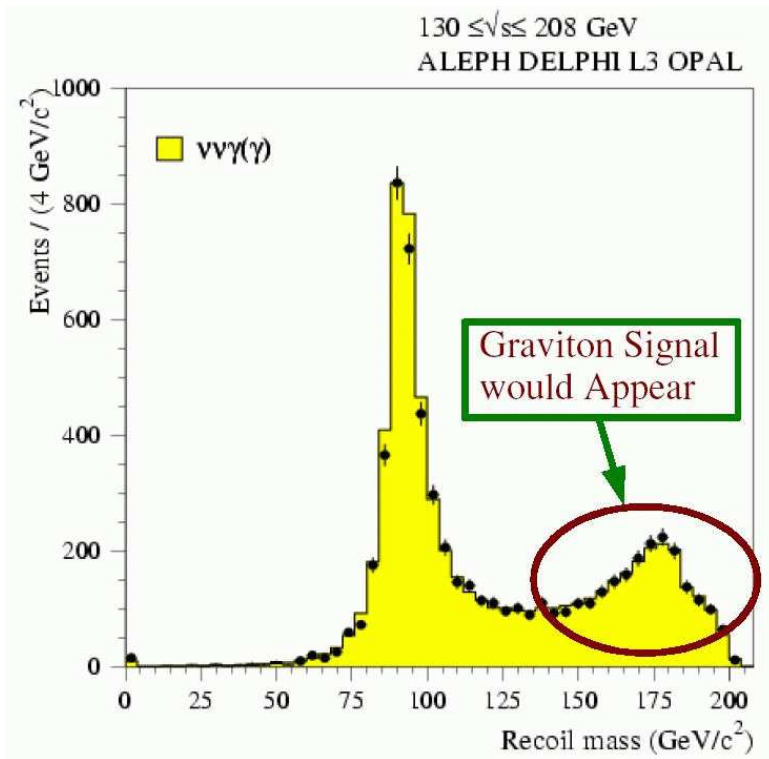
$$e^+e^- \rightarrow \gamma Z^0$$

$$Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$$

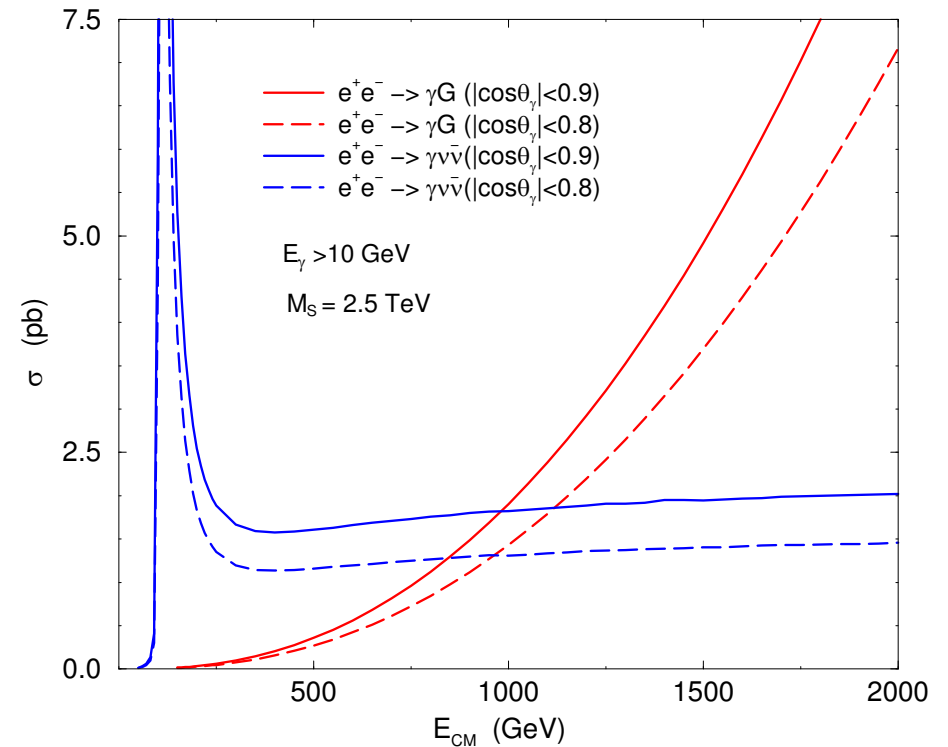
Poszukiwania

Produkcja grawitonów

Przypadki jednofotonowe: **brakująca masa (z zasad zachowania)**



Porównanie przekrojów czynnych dla sygnału i tła:



Aby podnieść limity potrzebne wyższe energie !...

Brak odchyień

$$\Rightarrow M_S > \sim 1.6 \text{ TeV} \quad n = 2$$

Model

Model R-S

Randal, Sundrum (1999)

Tylko **jeden** dodatkowy **wymiar**, ale bardziej skomplikowana **metryka**.

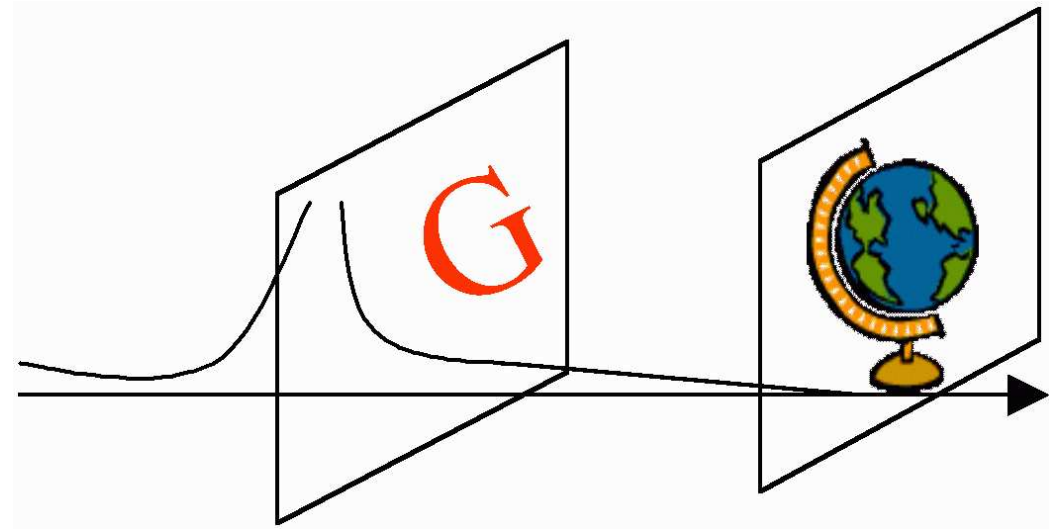
Grawitacja silna na równoległej “**ścianie**”,
jest **tłumiona** (poprzez **metrykę**) w
“naszym” świecie (“**ścianie**”)

Model przewiduje **dyskretne** widmo
(**stanów wzbudzonych**) **gravitonów**.

Kolejne stany odległe są o:

$$\Delta m \sim 1 \text{ TeV}$$

⇒ poszukiwanie **produkcji**
stanów **rezonansowych**



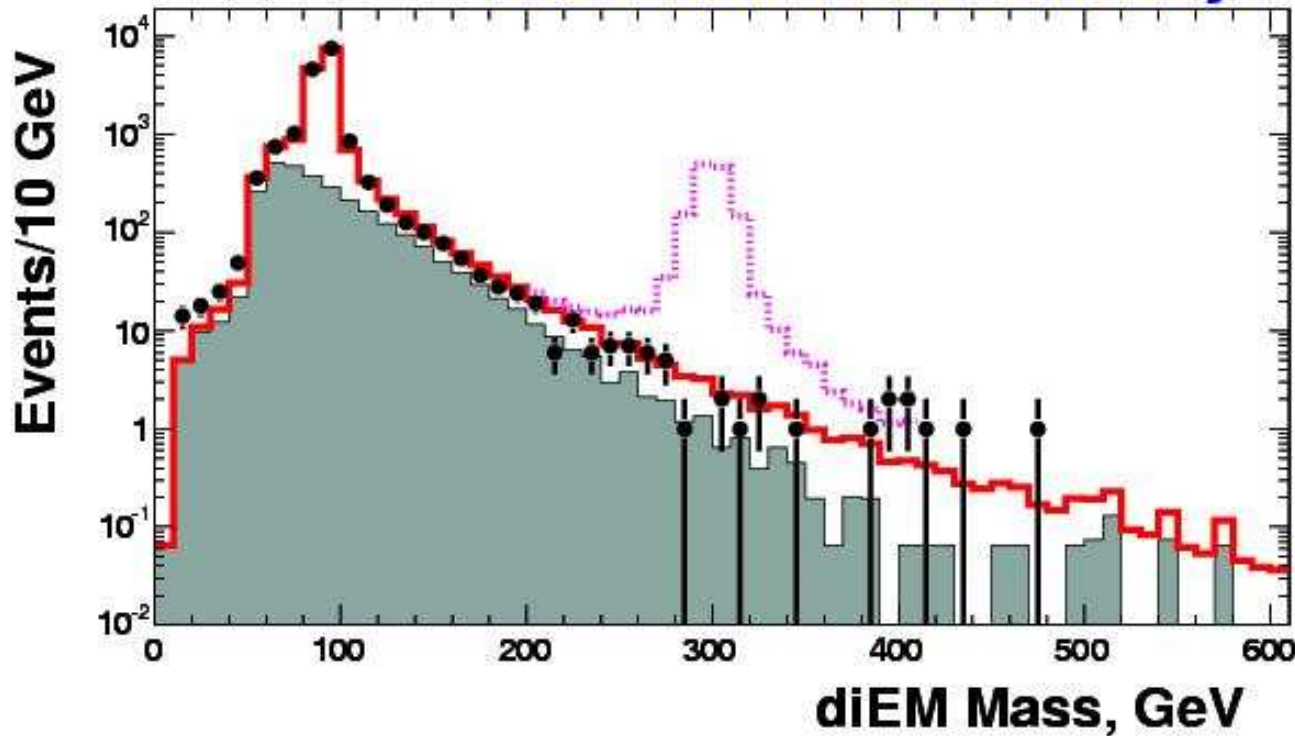
Poszukiwania

Produkcja stanów rezonansowych (R-S model)

Przekrój czynny na proces Drell'a-Yan'a w Tevatronie (oczekiwania dla $m_1 = 300$ GeV)

diEM Mass Spectrum

DØ Run II Preliminary



masa niezmiennicza l^+l^-

$M_S > 0.8$ TeV

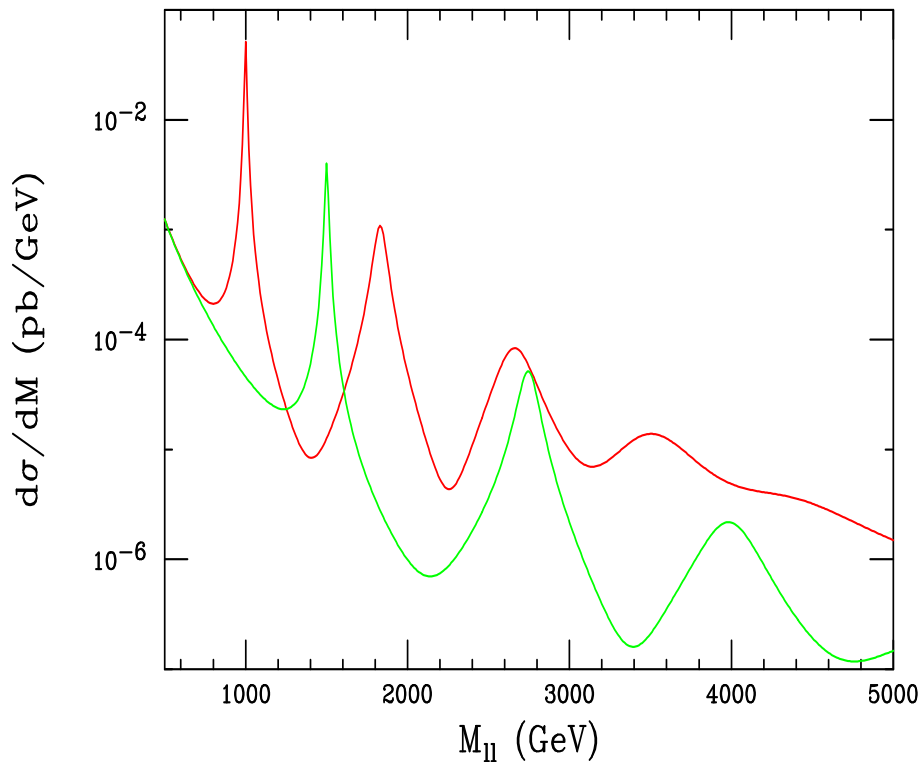
Obecnie wciąż zbyt małe energie \Rightarrow musimy poczekać na LHC...

Perspektywy

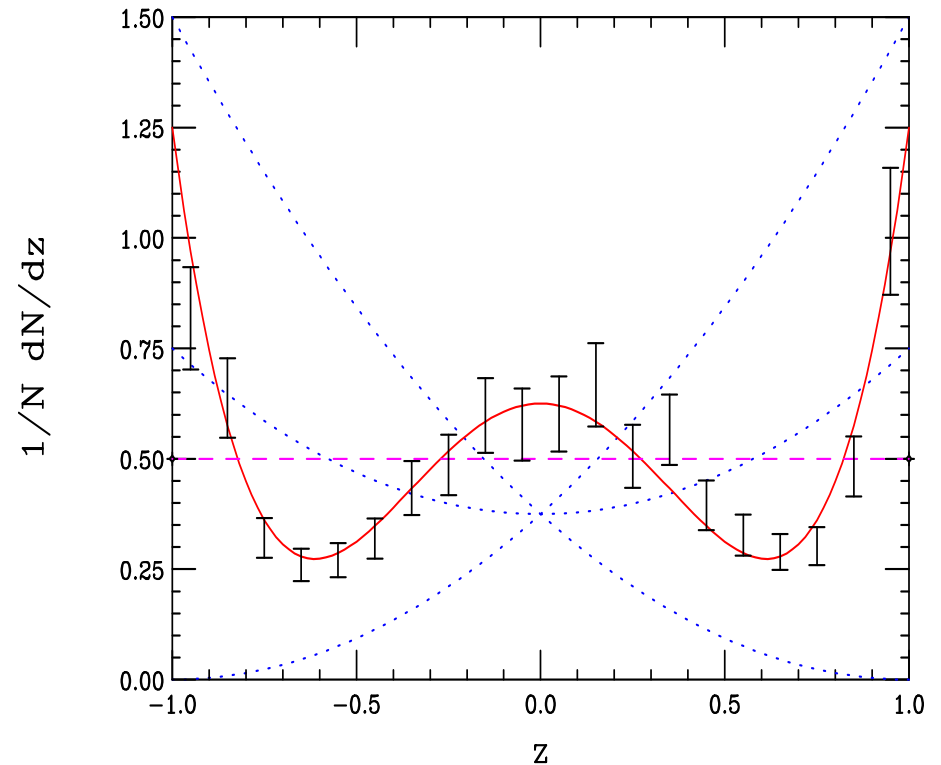
Poszukiwanie rezonansów (R-S model)

Przekrój czynny na proces Drell'a-Yan'a w LHC, przyjmując $m_1 = 1$ TeV i 1.5 TeV

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



masa niezmiennicza l^+l^-

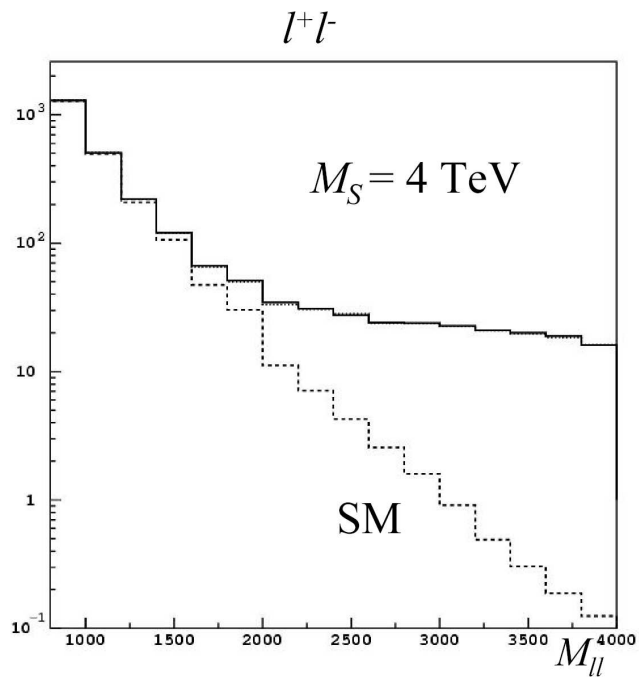


$z = \cos \theta$

Perspektywy

Oczekiwane sygnały w LHC

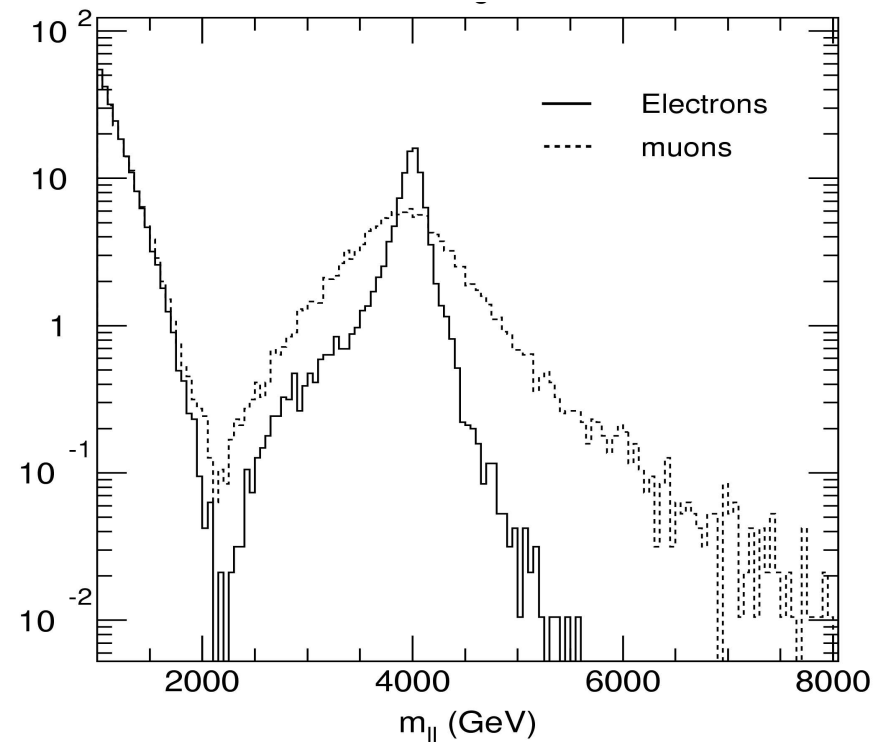
Wirtualna wymiana grawitonów



masa niezmiennicza l^+l^-

Zakres poszukiwań: 9 TeV

Produkcja stanów rezonansowych



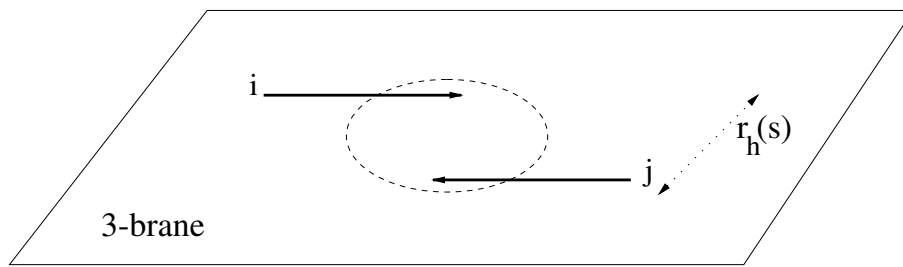
6 TeV

Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

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

czarna dziura \equiv obiekt związany grawitacyjnie



Promień **Schwarzschilda** 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:

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

\Rightarrow szybko rośnie z energią.
Może być bardzo duży !!!


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

$m_{BH} \geq 5$ TeV \Rightarrow 1 BH/s
 $m_{BH} \geq 10$ TeV \Rightarrow 3 BH/day
 \Rightarrow **fabryka czarnych dziur**

W USA były pomysły zamknięcia RHICu, żeby nie wyprodukował czarnej dziury!

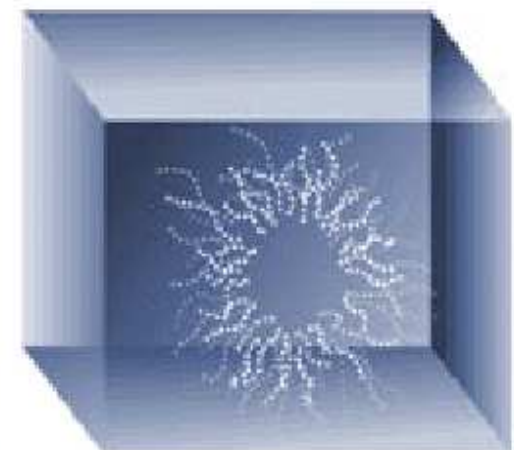
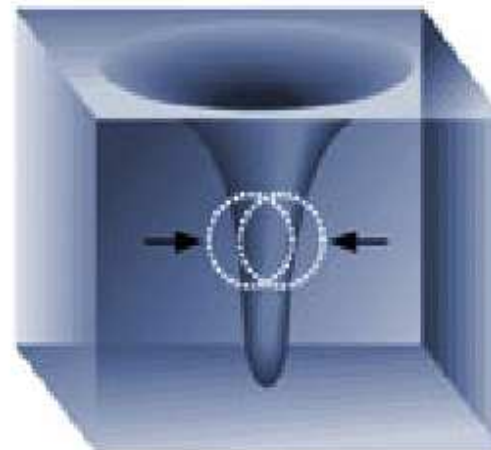
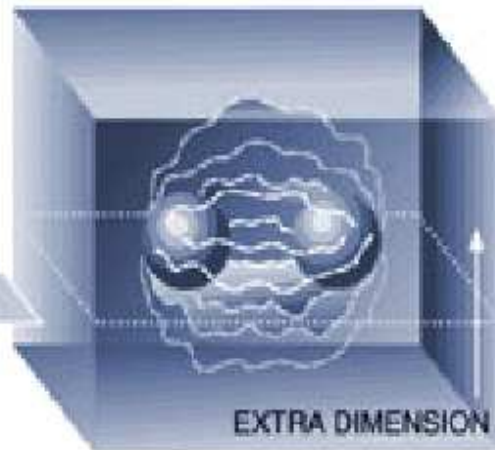
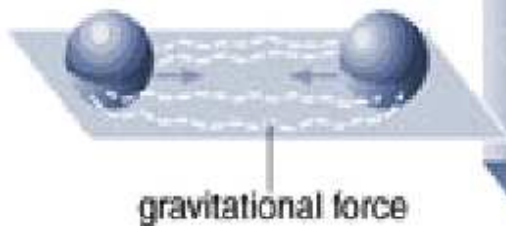
Trzeba było wszystko tłumaczyć...

Black Holes on Demand

NYT, September 11, 2001 

Scientists are exploring the possibility of producing miniature black holes on demand by smashing particles together. Their plans hinge on the theory that the universe contains more than the three dimensions of everyday life. Here's the idea:

Particles collide in three dimensional space, shown below as a flat plane.



As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.

When the particles are extremely close, they may enter space with more dimensions, shown above as a cube.

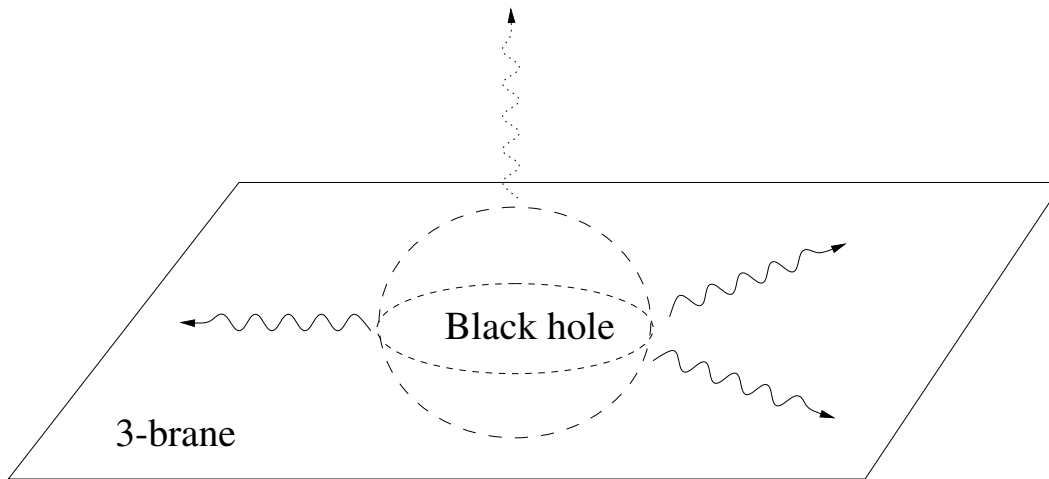
The extra dimensions would allow gravity to increase more rapidly so a black hole can form.

Such a black hole would immediately evaporate, sending out a unique pattern of radiation.

Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

Czarna dziura “paruje” emitując **izotropowo** **wysokoenergetyczne** cząstki:



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

⇒ kolejny stan, którego możemy poszukiwać

Sygnatura:

- ⇒ wzrost przekroju czynnego dla **dużych mas**
- ⇒ zwiększona produkcja **wysokoenergetycznych** leptonów i fotonów ($\geq 100 \text{ GeV}$)

Średni **czas życia** czarnej dziury

$$\tau \sim 10^{-29} \text{ s}$$

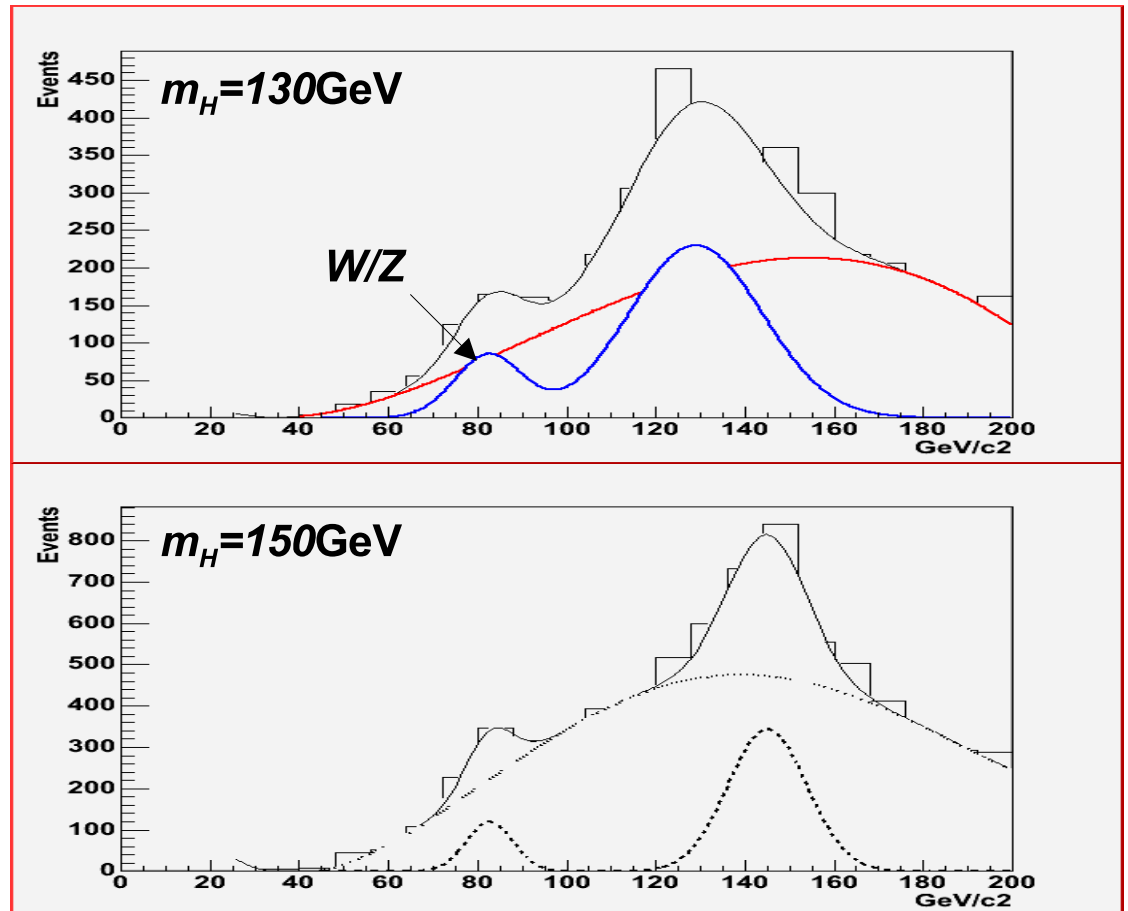
ale w szczególnych przypadkach możliwe też stany metastabilne...

Perspektywy

Rozpady czarnych dziur

Wśród produktów rozpadu ciężkiej czarnej dziury chętnie pojawiałyby się... **bozon Higgsa**

Przewidywane rozkłady rekonstruowanej masy par jetów z rozpadów czarnych dziur \Rightarrow



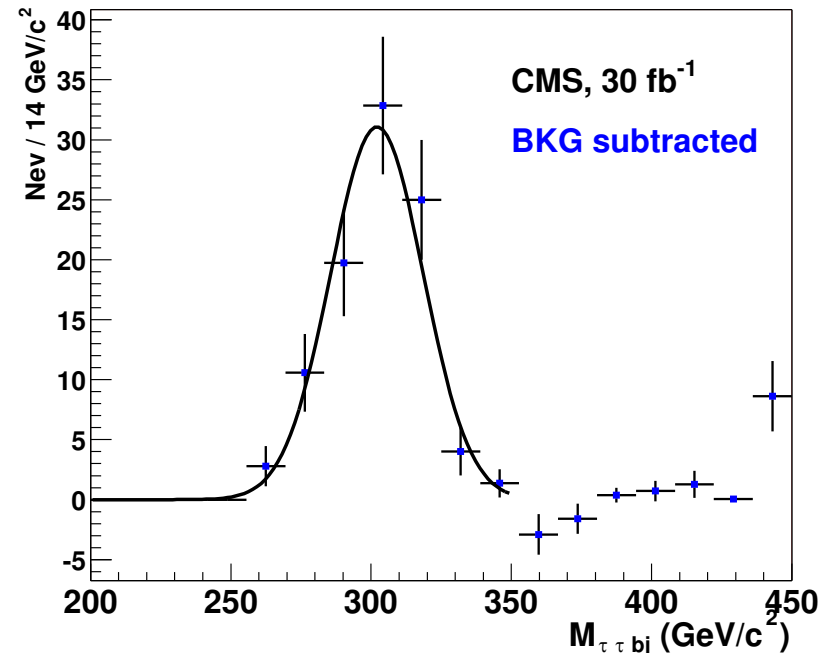
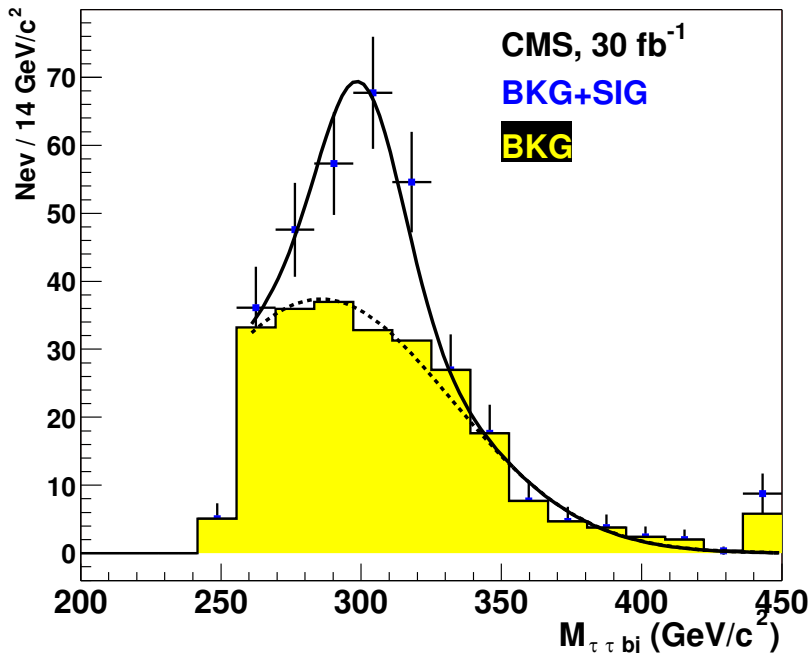
Perspektywy

Radion

W modelu Randal-Sundrum pojawia się dodatkowa cząstka: Radion

Możliwości rekonstrukcji w LHC przypadków

$$pp \rightarrow \Phi \rightarrow hh \rightarrow b\bar{b} \tau^+ \tau^-$$



Radion ma takie same liczby kwantowe jak bozon Higgsa, może się z nim mieszać !

Perspektywy

Kosmologia

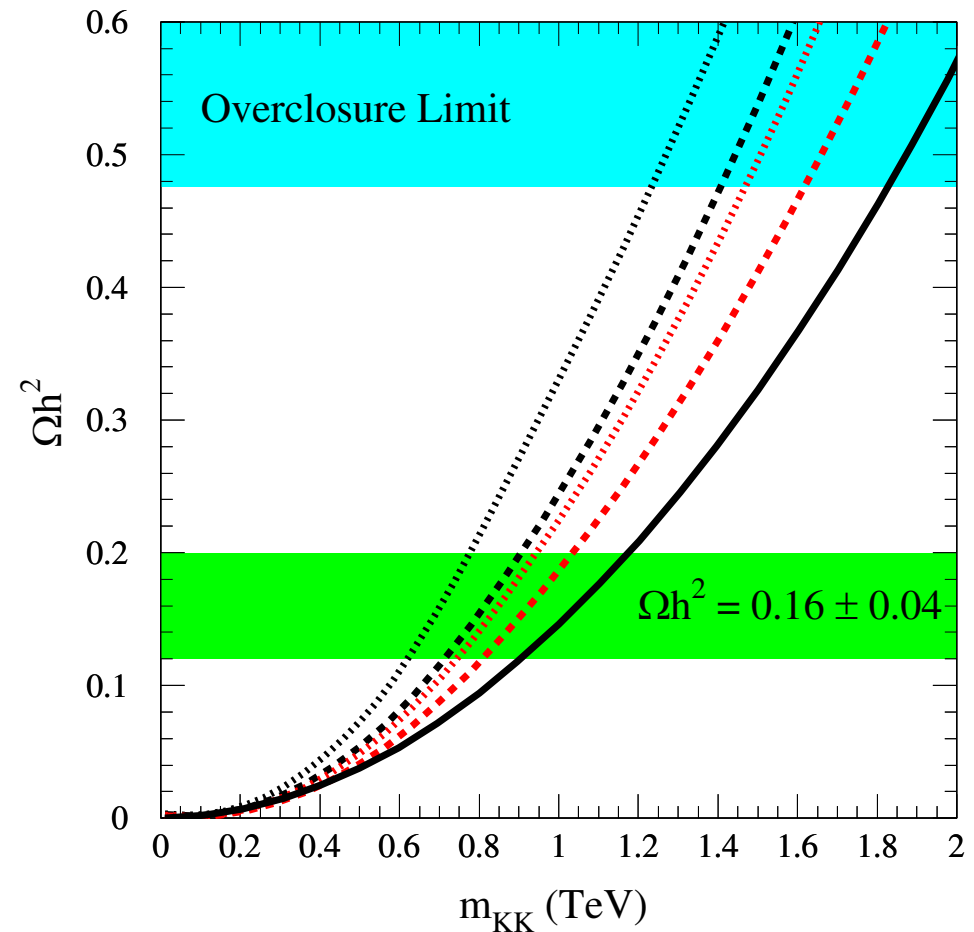
Dodatkowe wymiary mogłyby także wytłumaczyć obecność “ciemnej materii” we Wszechświecie.

Ciemną materią mogłyby być stany **wzbudzone** cząstek, czyli energia “schowana” w **dodatkowych wymiarach**.

Przewidywana gęstość **ciemnej materii** pochodzącej od stanów **wzbudzonych fotonów**, w funkcji ich masy \Rightarrow

Porównując z obserwacjami:

$$m_{\gamma^*} \approx 800 - 1000 \text{ GeV}$$

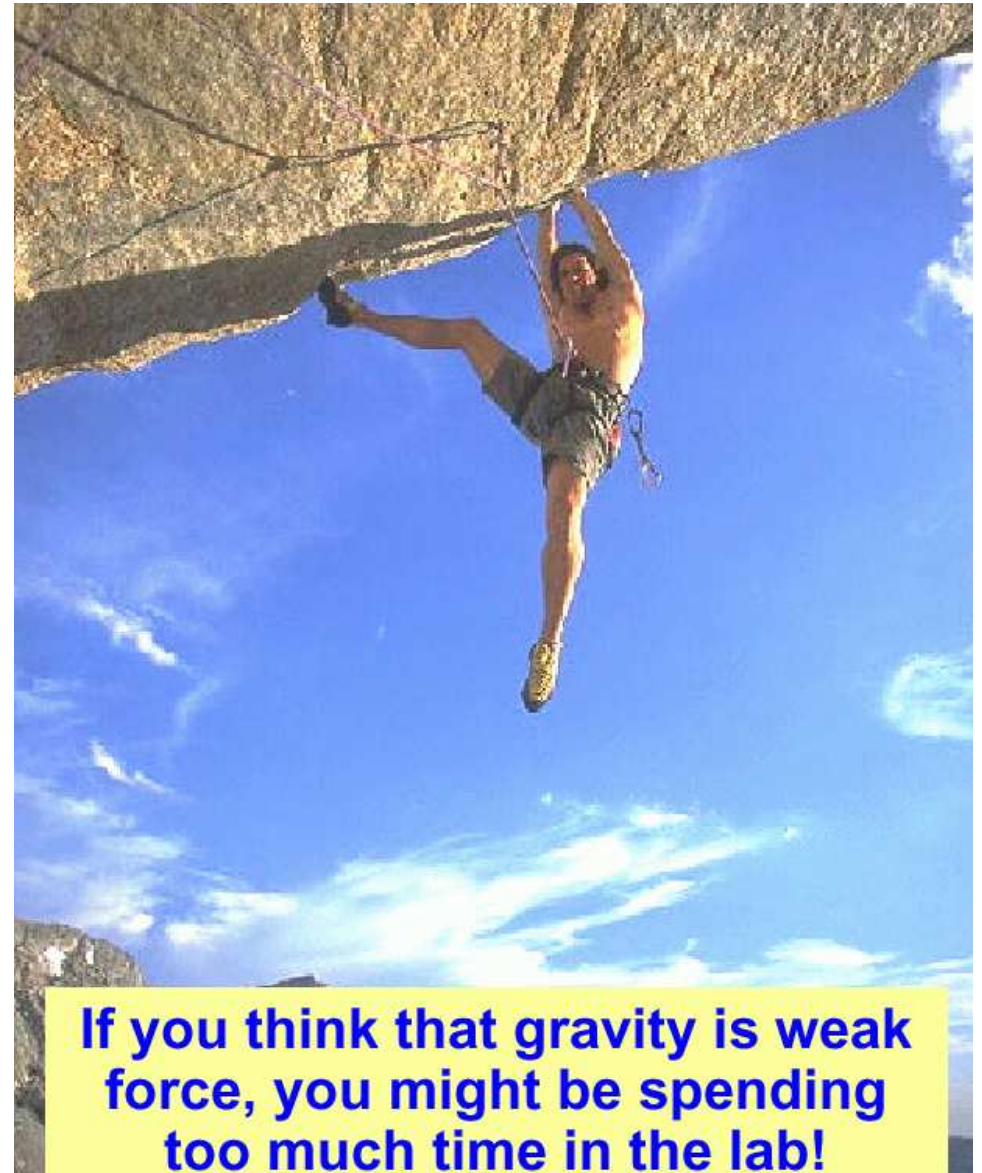


Podsumowani

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 **gravitacja** jest **słaba**...
prawdopodobnie spędzasz za dużo
czasu w **laboratorium!** ⇒



**If you think that gravity is weak
force, you might be spending
too much time in the lab!**