Rozszerzenia Modelu Standardowego

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład XIII

- Mały Higgs
- Dodatkowe wymiary

⇒ Jak dobrze znamy grawitacje

⇒ Grawitacja w świecie cząstek

- Nowe oddziaływania WW

Rozszerzenia Modelu Standardowego

Problem hierarchii

Jak "ustabilizować" masę Higgsa (duże poprawki $\sim \Lambda^2$) ?

⇒ doprowadzić do "automatycznego" kasowania się poprawek

⇒ SUPERSYMETRIA

⇒ dodać nowe oddziaływania/cząstki przy skali $\Lambda' \ll \Lambda$
Wiele możliwości. Przykładowe

"MAŁY HIGGS"   NOWE SPRZĘŻENIA $W^{\pm}$

⇒ obniżyć skalę Λ do ~ 1 TeV

⇒ DODATKOWE WYMIARY

Mały Higgs

Aby rozwiązać problem hierarchii musimy wprowadzić "nową fizykę" przy skalach $\sim$1 TeV.

To jednak nie musi być supersymetria.

W ostatnich latach pokazano, że kasowanie rozbieżnych poprawek do masy bozonu Higgsa można także uzyskać dodając nowe cząstki tego samego rodzaju:

- nowy ciężki fermion $T \Rightarrow$ kasowanie poprawek od t
- nowe ciężkie bozony W_H i $Z_H \Rightarrow$ kasowanie poprawek od $W^{\pm}$ i Z°
- nowe skalary $\Rightarrow$ kasowanie (samo)poprawek Higgsa

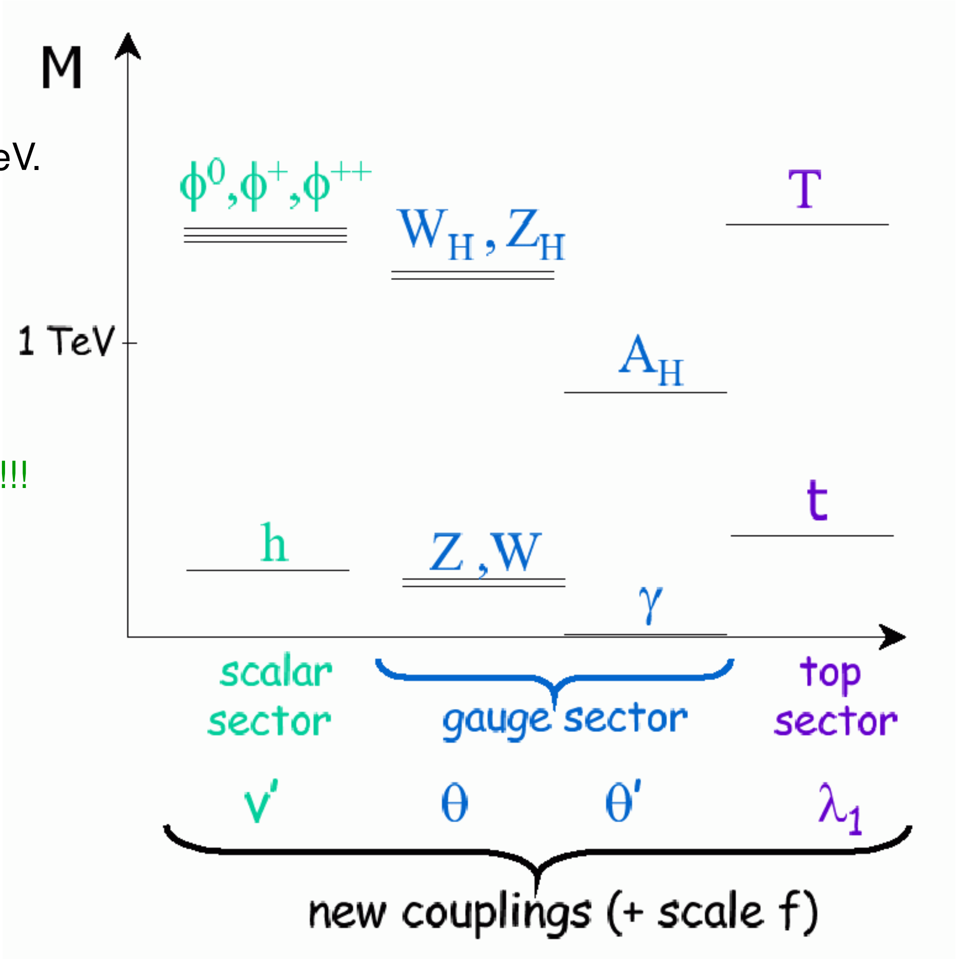
Kasowanie uzyskujemy poprzez odpowiedni wybór sprzężeń nowych cząstek.

Nie rozwiązujemy problemu hierarchii do skali GUT, ale odsuwamy go do skali $\sim$10 TeV...

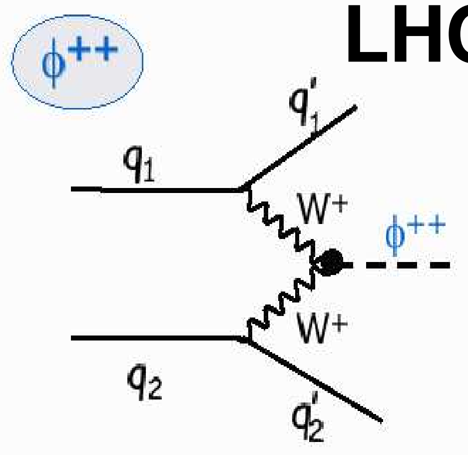
Wszystkie nowe cząstki powinny mieć masy rzędu 1 TeV.

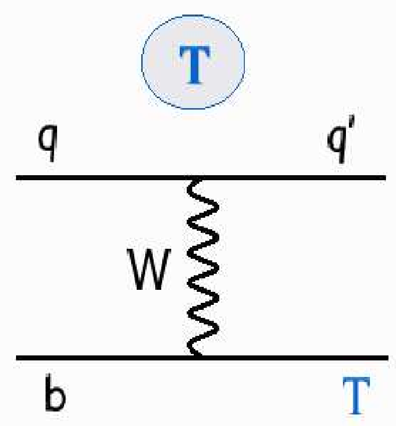
$\Rightarrow$ łatwe do znalezienia w przyszłych eksperymentach

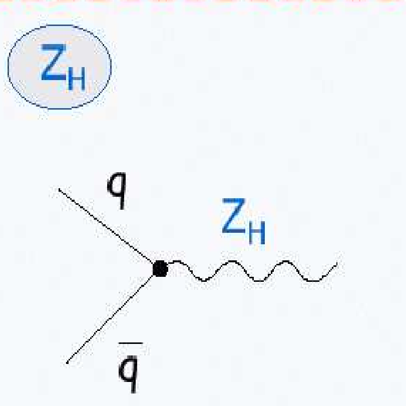
Podwójnie naładowany Higgs !!!



LHC







VBF mechanism

$\sigma \sim (v')^2$

v' should be small

$\phi^{++} \to W^+W^+$

large SM bkg

Wb fusion

$\sigma \sim (\lambda_1)^2$

$\lambda_1 \sim 1$ but suppressed by *b*-quark PDF.

$T \to \underbrace{bW, tZ}_{\text{clear signal}}$

$q\bar{q}$ annihilation

$\sigma \sim (\cot\theta)^2$

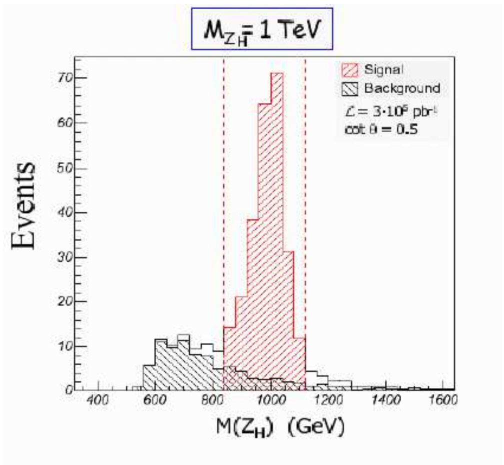
Wide range in $\cot\theta$ possible.

$Z_H \to \underbrace{e^+e^-}_{\text{clear signal}}$

Mały Higgs

Little Higgs Searches with ATLAS

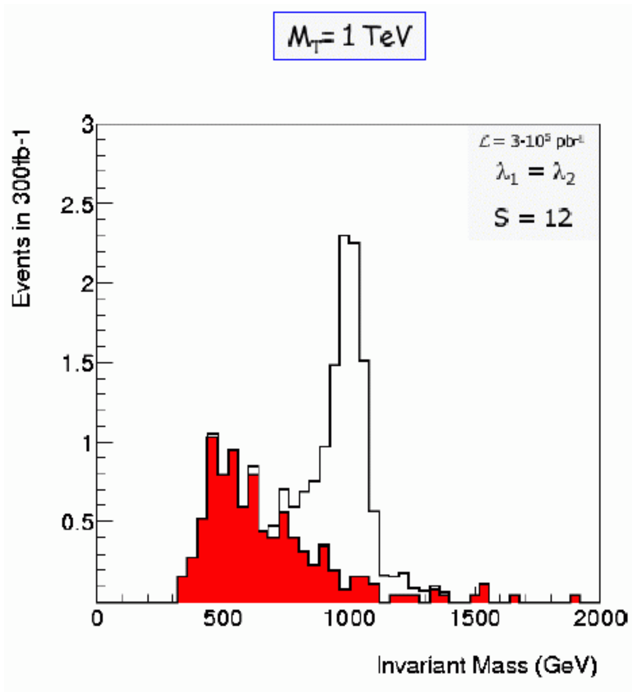
E.Ros, EPS'2003



b-tag: $\varepsilon_b = 50\%$, $R_u = 100$

Inside mass window:

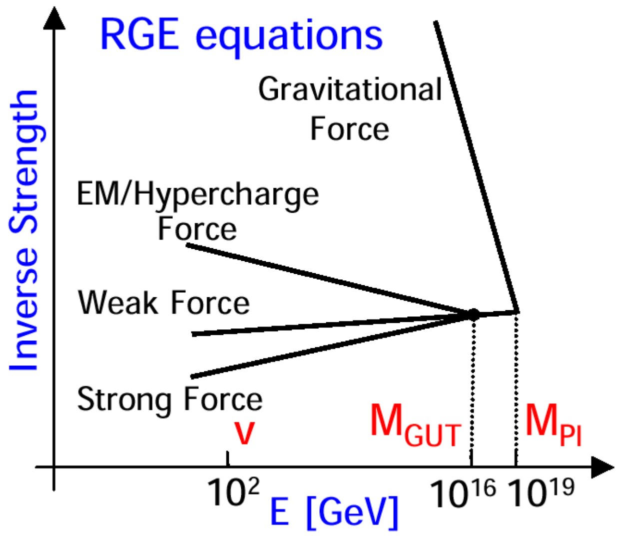
$$\left.\begin{array}{l} S = 195 \\ B = 16 \end{array}\right\} \quad \frac{S}{\sqrt{B}} = 50$$



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

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

co odpowiada skali odległości

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

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

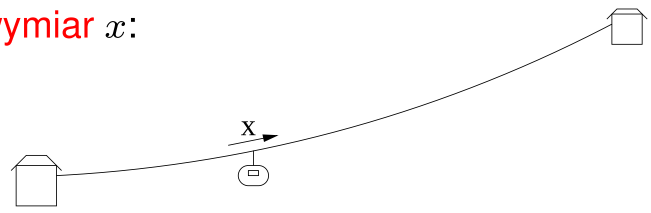
Dodatkowe wymiary

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

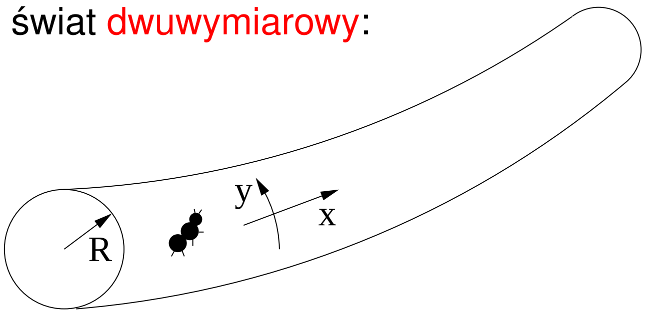
NIE - jeśli tylko nieskończone wymiary... **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone !

Przykład I

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



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



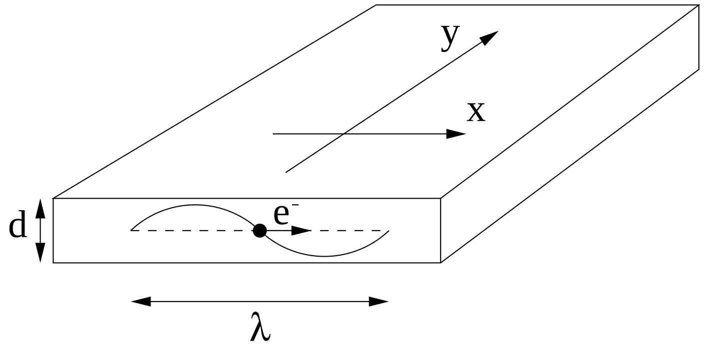
y jest współrzędną cykliczna.

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

Dodatkowe wymiary

Przykład II

Elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



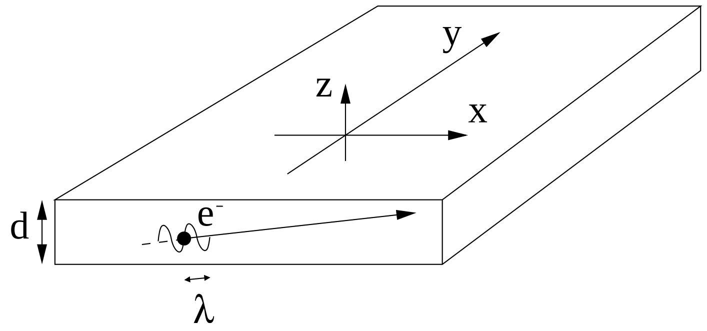
Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

$\Rightarrow$ 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 $(\lambda < d)$



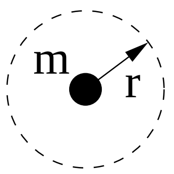
jego ruch musimy opisywać w trzech wymiarach...

Dodatkowe wymiary

Grawitacja

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

Jak będzie wtedy wyglądała grawitacja ?



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

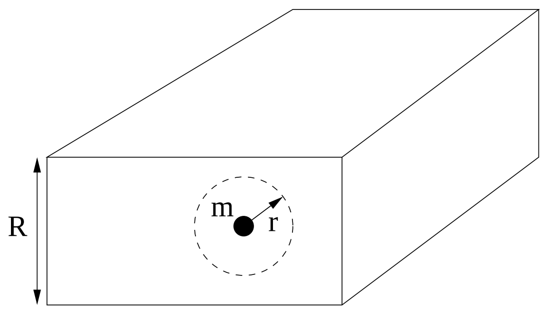
$$S^{(3+n)} \sim r^{n+2}$$

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

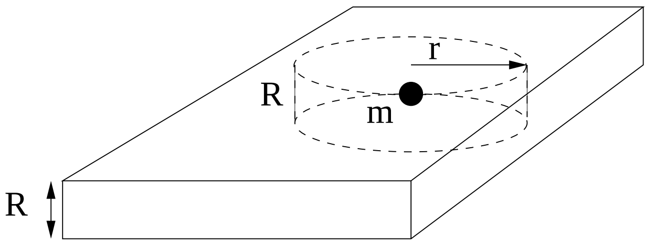
Takie podejście jest słuszne tylko dla $r \ll R$, gdy testujemy grawitację na bardzo małych odległościach:



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:

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

Na dużych odległościach widoczne są tylko 3 wymiary

⇒ odtwarzamy "klasyczną" grawitację Newtona...

Skalą unifikacji grawitacji jest teraz

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

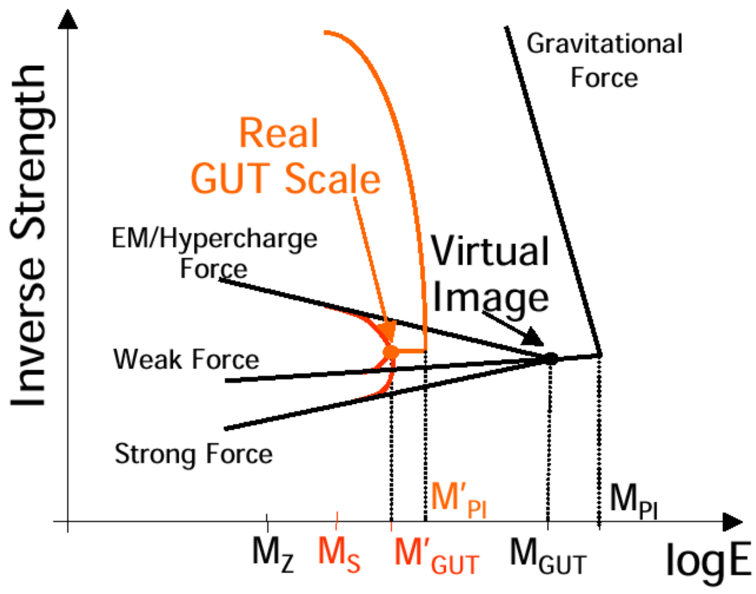
M_S może być nawet rzędu 1 TeV, wszystko zależy od n i R

⇒ rozwiązanie problemu hierarchii

Dodatkowe wymiary

Unifikacja

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



⇒ 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

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

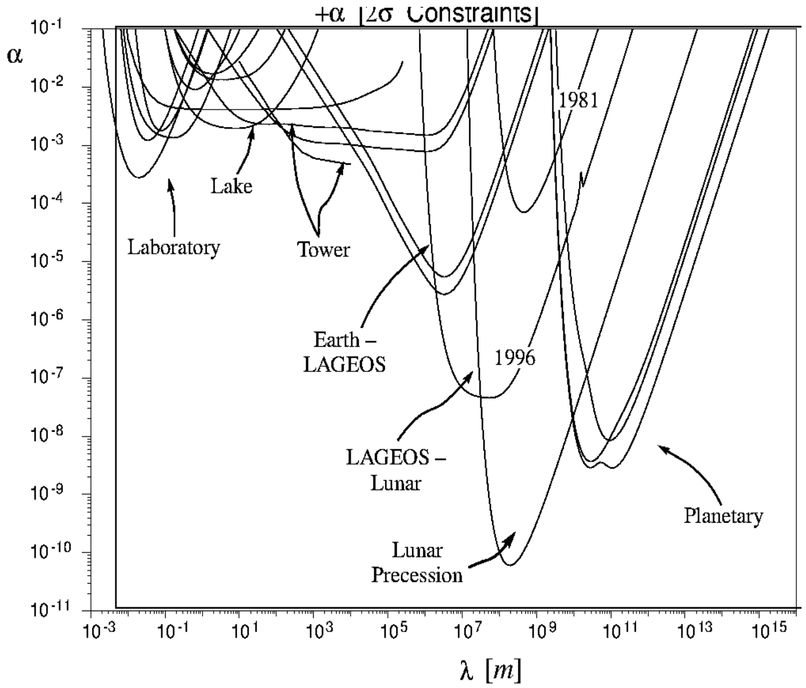
α - względne odchylenie ("łamanie")

Najdokładniej przetestowany układ:

Ziemia-Księżyc

Pomiary laboratoryjne: $\lambda > 2$ mm

Wyniki dostępne w 1996 roku (górne ograniczenia na α)



Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash (University of Washington)

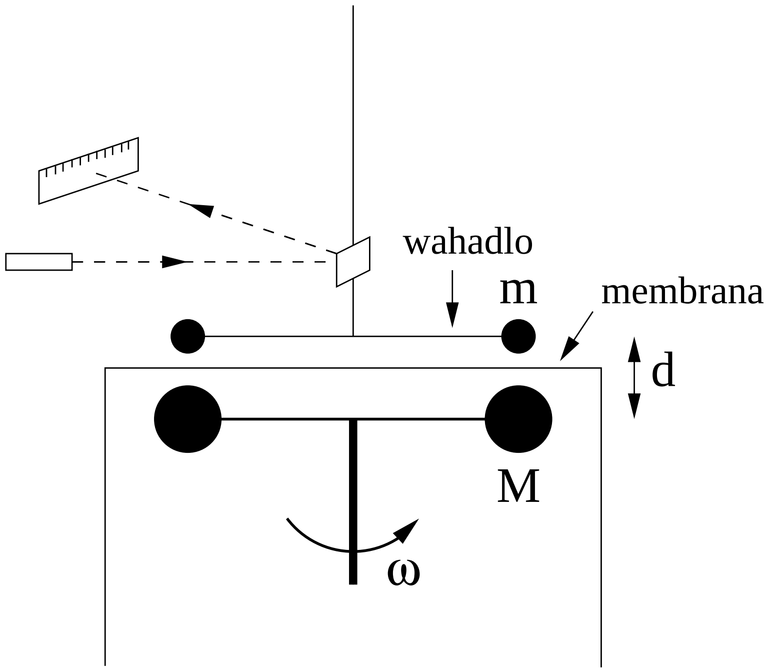
Nowy, bardzo precyzyjny pomiar grawitacji na małych odległościach, $\lambda \leq 1$ mm

Idea podobna do klasycznego 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"

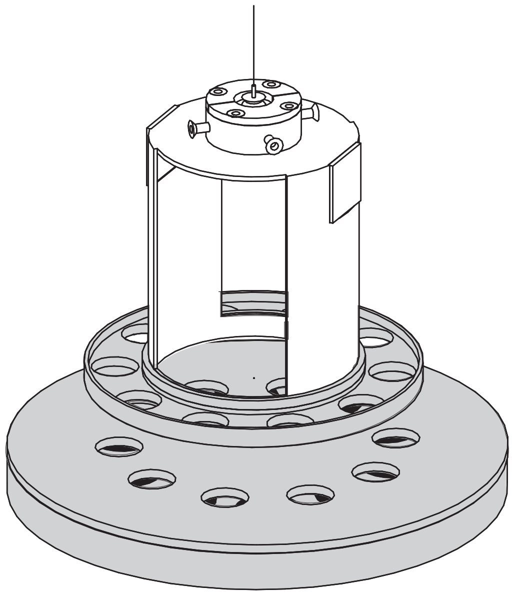
Membrana: dodatkowa izolacja obu części układu



Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Rzeczywisty układ doświadczalny
(z pominięciem membrany):

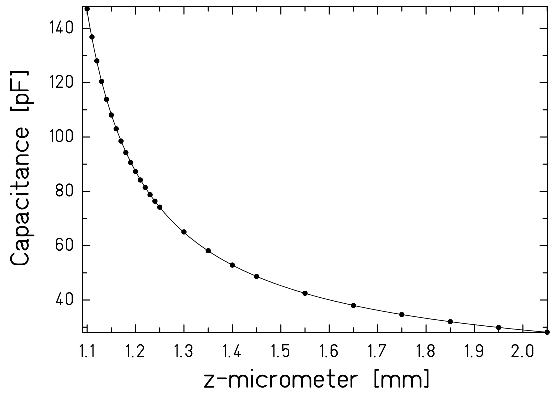


Zamiast kul - 10 otworów w wahadle
i dysku "napędzającym"

Średnica wahadła $\sim$ 60 mm,
precyzja wykonania $\pm 2.5\ \mu m$!

Grubość membrany oddzielającej: 20 μm

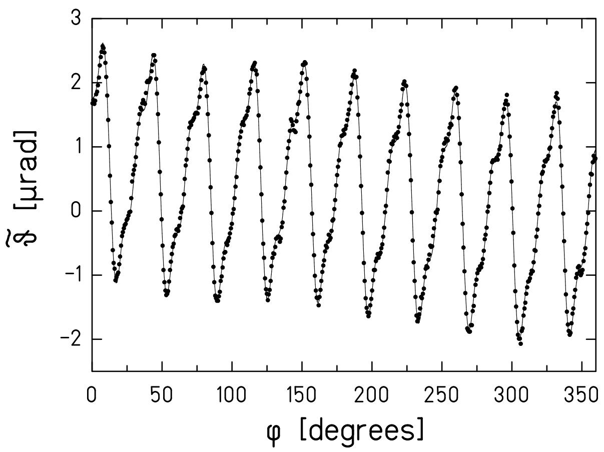
Pojemnościowy pomiar odległości
(kondensator płaski):



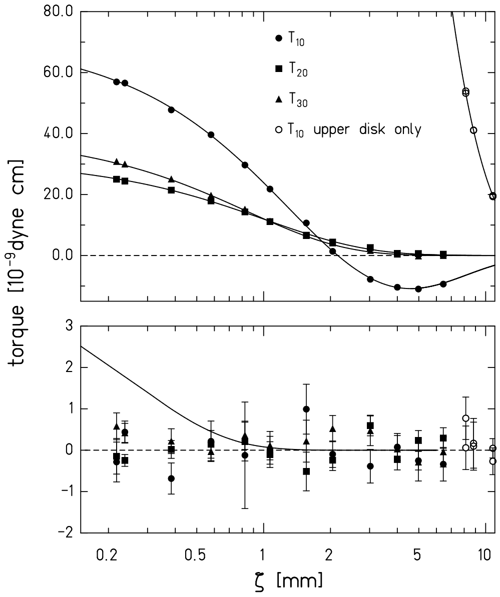
Grawitacja

Eksperyment Eöt-Wash

Wyniki pomiarów: jeden cykl obrotu
dysku "napędzającego"



Momenty sił z analizy harmonicznej:



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

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

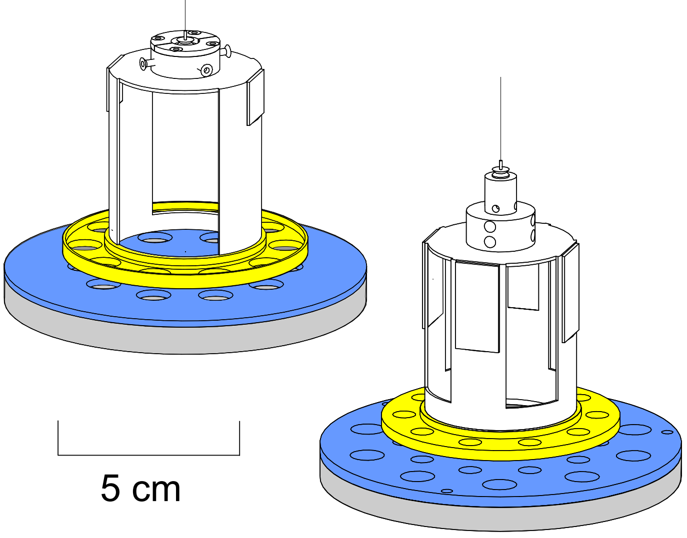
Grawitacja

Nowe pomiary

Eksperyment Eöt-Wash

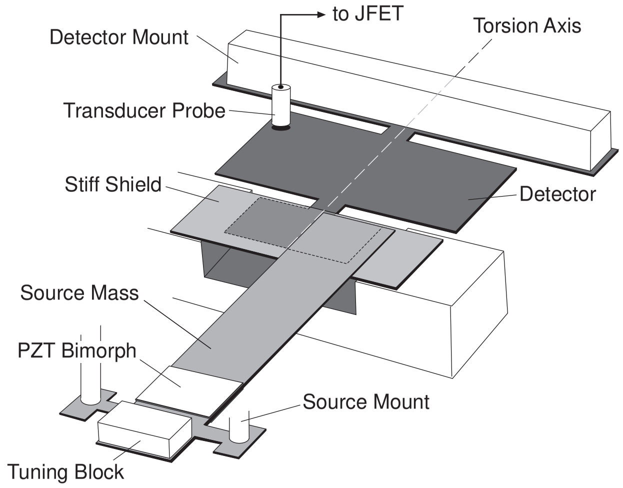
optymalizacja rozkładu masy w wahadle

2002



2004

University of Colorado (2003)



Poszukiwanie rezonansu wywołanego oddziaływaniami grawitacyjnymi

Drgająca płytka wolframowa (305 μm) pobudza do drgań drugą płytkę (195 μm)

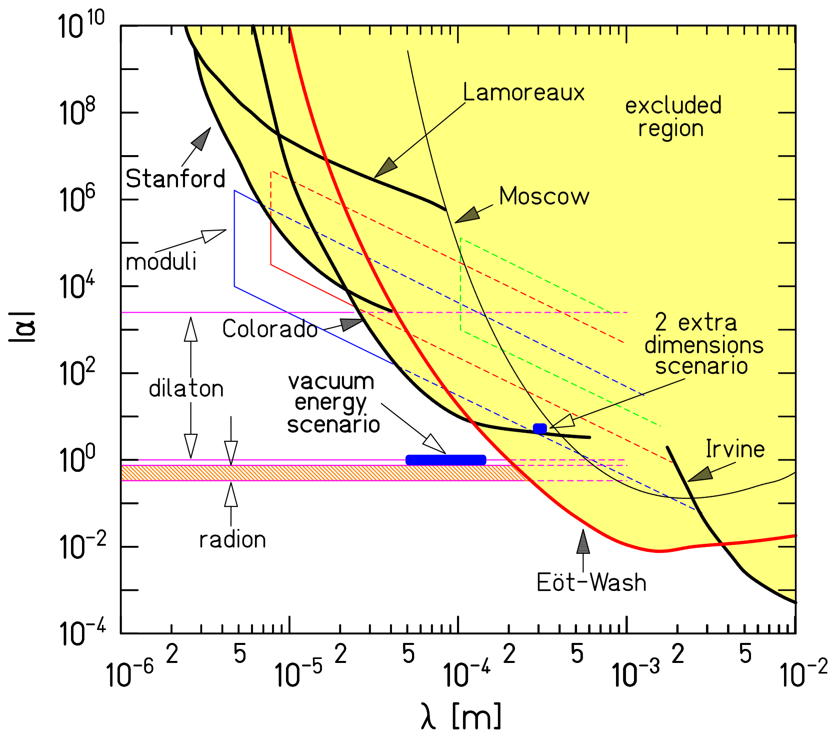
Grawitacja

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 ($M_S \sim 1$ TeV wymaga $R \sim 10^{12}$ m)

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

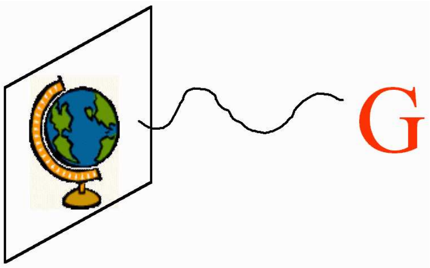
- emisja grawitonów przy zapadaniu się supernowych
  neutrin z SN1987A $\Rightarrow M_S > 30$ TeV, $R < 0.7\ \mu$m
- promieniowanie γ z rozpadu grawitonów $M_S > 450$ TeV, $R < 3$ nm
- temperatura powierzchni gwiazd neutronowych $M_S > 1700$ TeV, $R < 0.2$ nm
  $\Rightarrow$ też praktycznie wykluczona

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

Model

Precyzyjne pomiary fizyki cząstek wykluczają istnienie "zwykłych" (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 ($\sim \frac{1}{M_{Pl}^2}$)

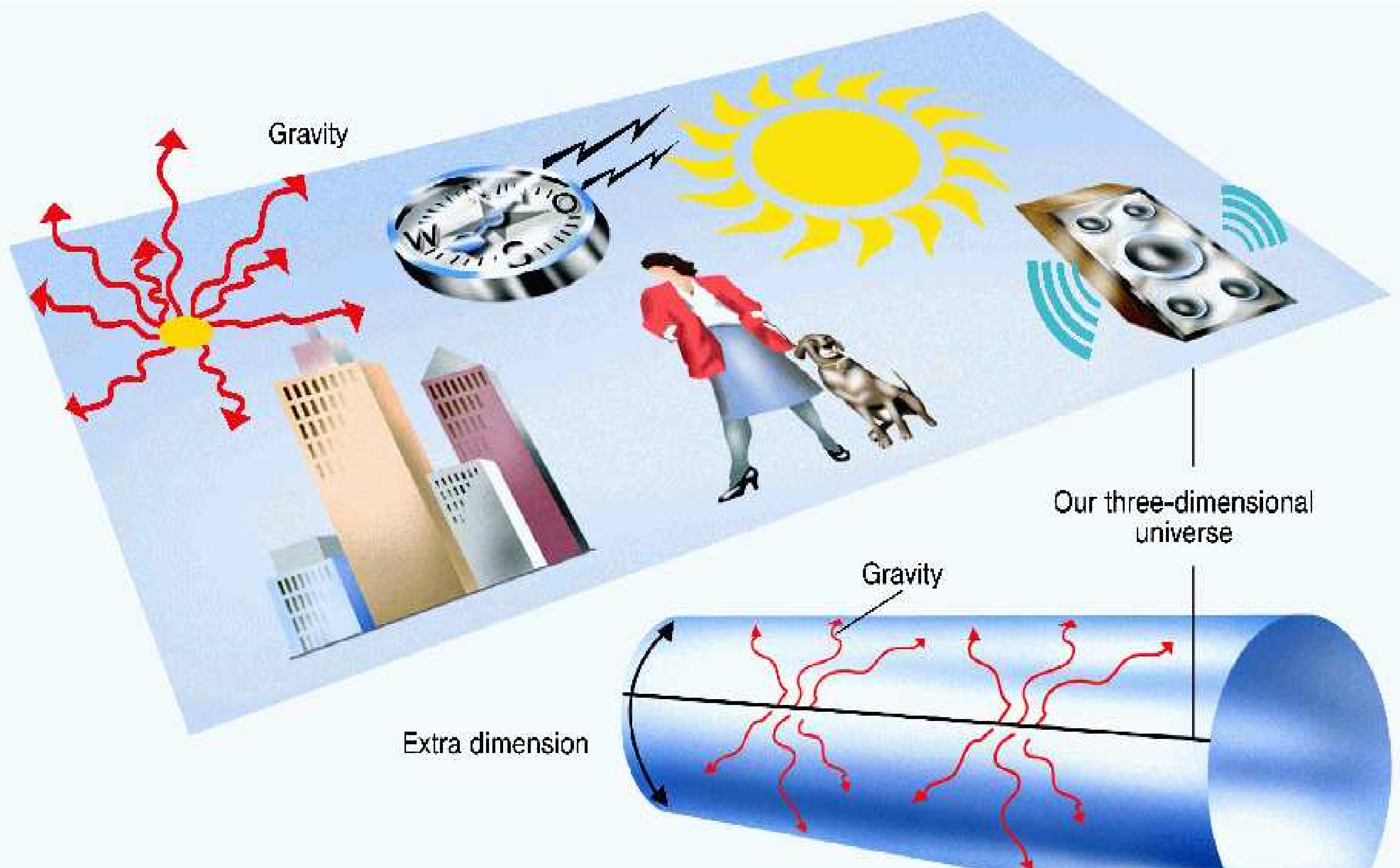
Ale w 1+3 wymiarach grawiton widoczny jest jako szereg stanów o masach:

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

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...

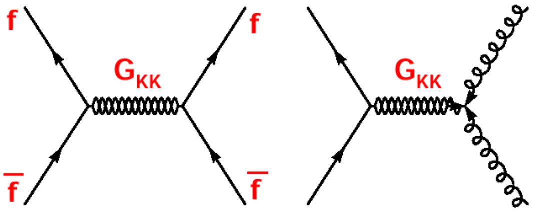
Poszukiwania

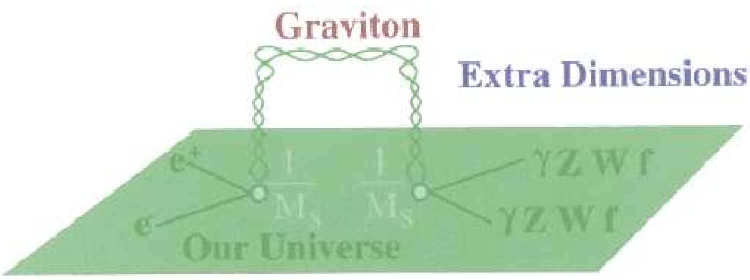
Wymiana grawitonów

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

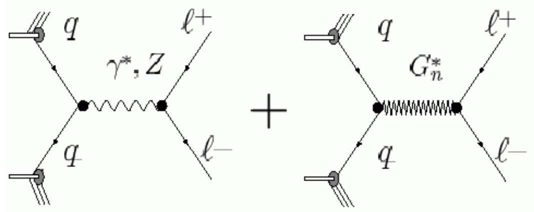
LEP: wkład do produkcji par cząstek

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

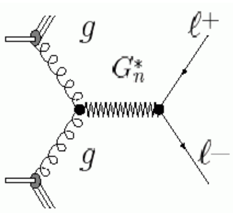




$p\bar{p}$: wkład do produkcji par leptonów (proces Drell'a-Yan'a)



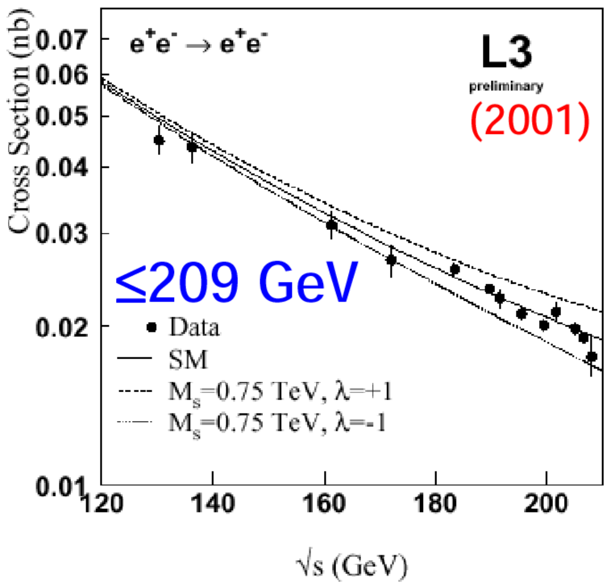
Dodatkowy wkład od gluonów !!! (nieobecny w SM)



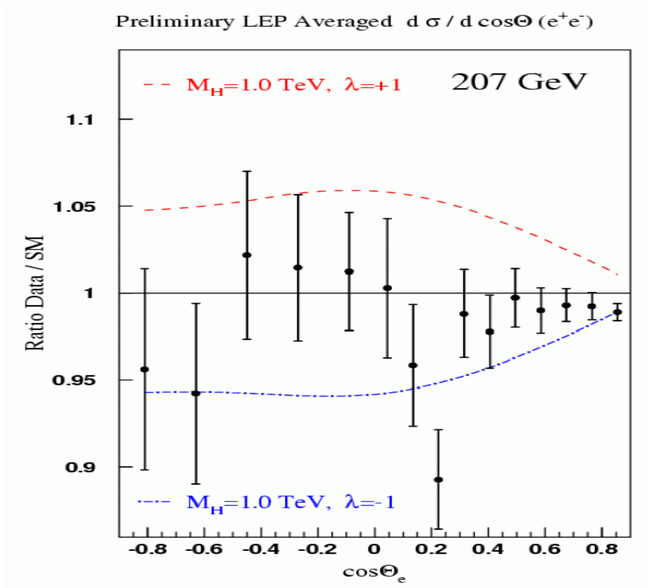
Poszukiwania

Wymiana grawitonów

Przykładowe wyniki współpracy L3:



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

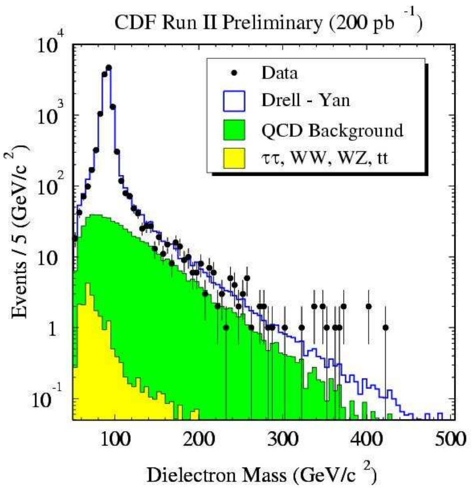


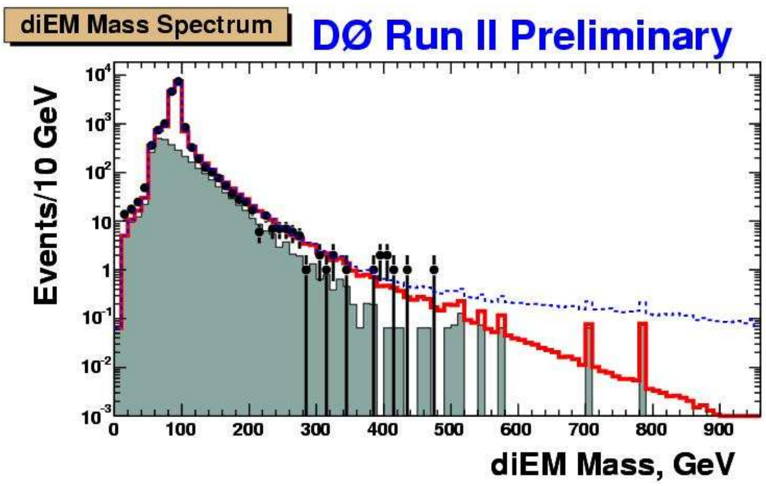
brak odchyleń ⇒ M_S >1.1 – 1.2 TeV

Poszukiwania

Wymiana grawitonów

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





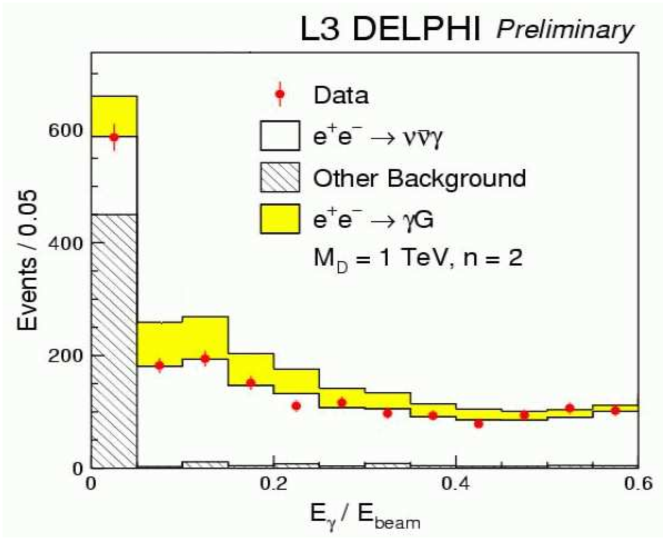
Dobra zgodność z SM ⇒ M_S > 1.2–1.3 TeV

Poszukiwania

Produkcja grawitonów

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

Rozkład energii mierzonych fotonów:



Poszukiwanie w LEP:

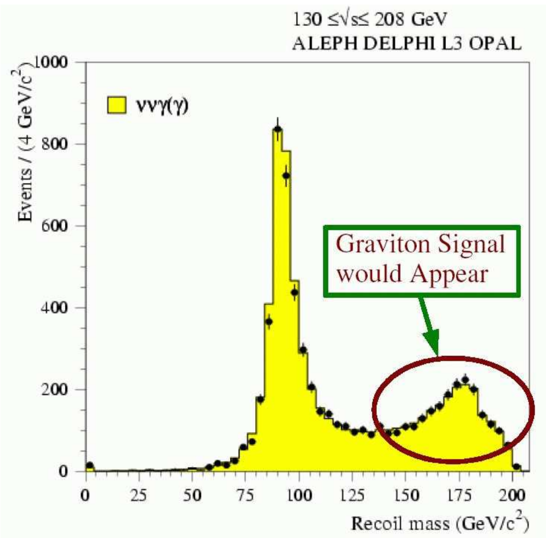
$$e^+e^- \rightarrow \gamma\, G$$

główne tło: $e^+e^- \rightarrow \gamma\, Z^\circ$, $Z^\circ \rightarrow \nu\bar{\nu}$

Poszukiwania

Produkcja grawitonów

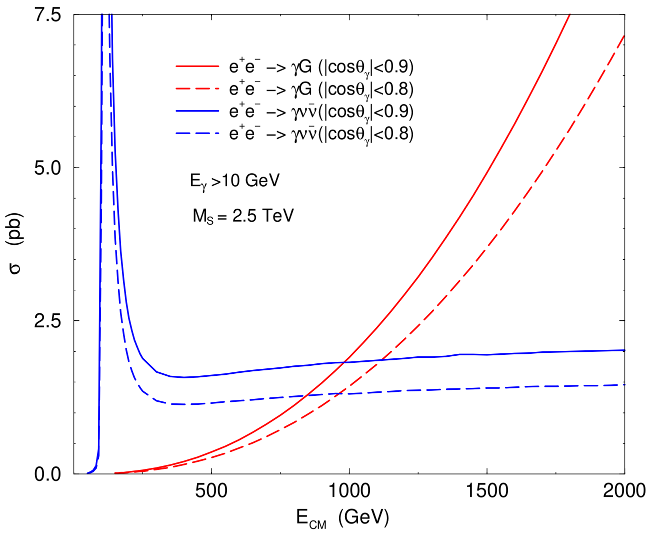
Przypadki jednofotonowe: brakująca masa (z zasad zachowania)



Brak odchyleń

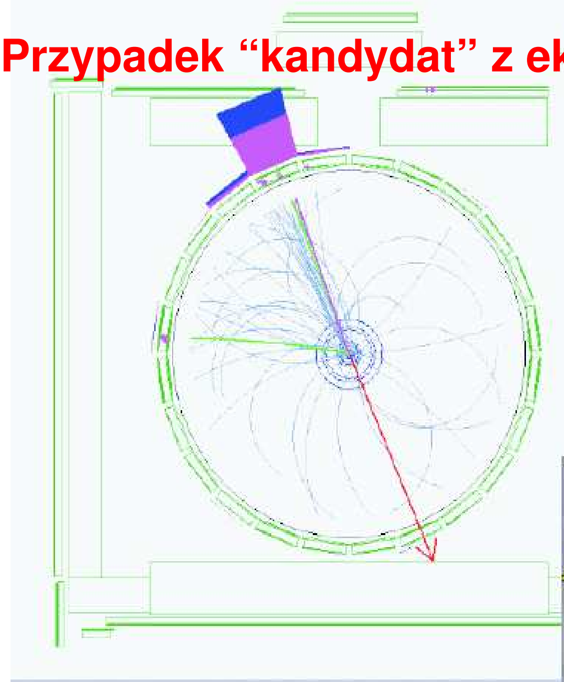
⇒ $M_S >\sim 1.6\ TeV \quad n = 2$

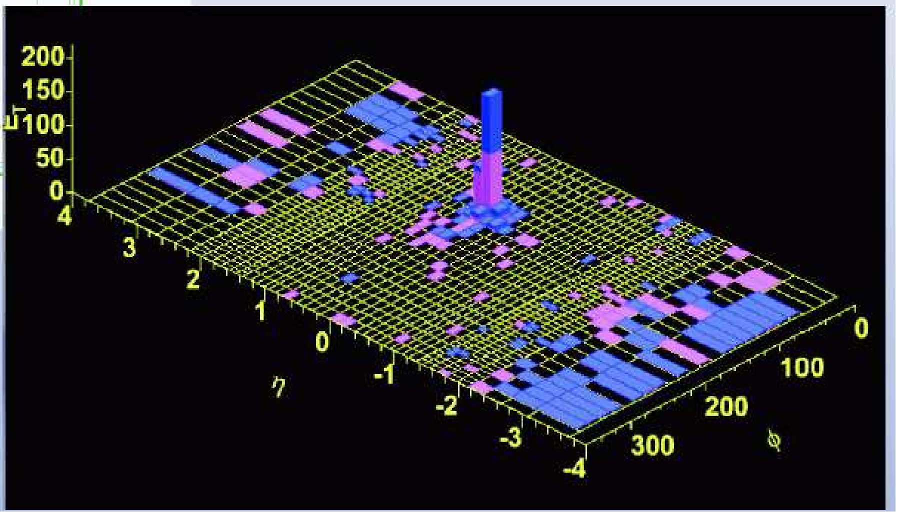
Porównanie przekrojów czynnych dla sygnału i tła:



Aby podnieść limity potrzebne wyższe energie !...

Przypadek “kandydat” z eksperymentu D0





$$p\bar{p} \rightarrow jet + \not{p}_T$$
$$gg \rightarrow g\ \ G \quad ?$$

Model

Model R-S

Randal, Sundrum (1999)

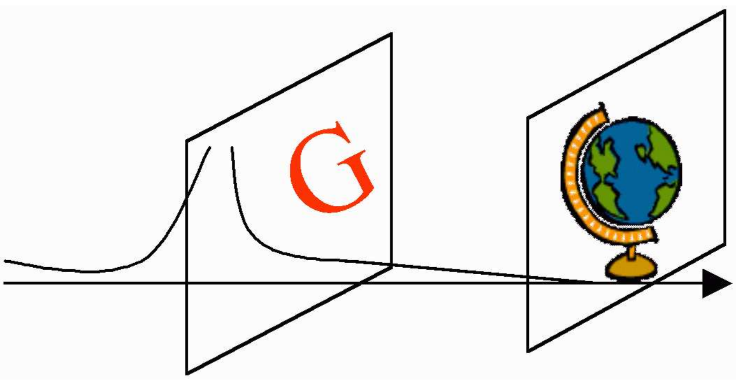
Tylko jeden dodatkowy wymiar, ale bardziej skomplikowana metryka.

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

Model przewiduje dyskretne widmo (stanów wzbudzonych) grawitonów. Kolejne stany odległe są o:

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

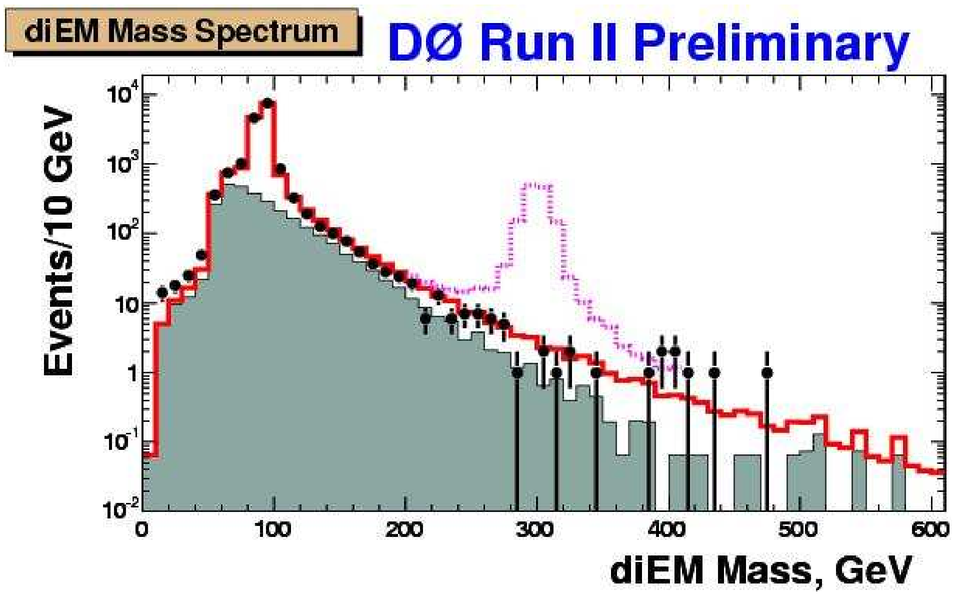
⇒ poszukiwanie produkcji stanów rezonansowych



Poszukiwania

Produkcja stanów rezonansowych (R-S model)

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



masa niezmiennicza l^+l^-

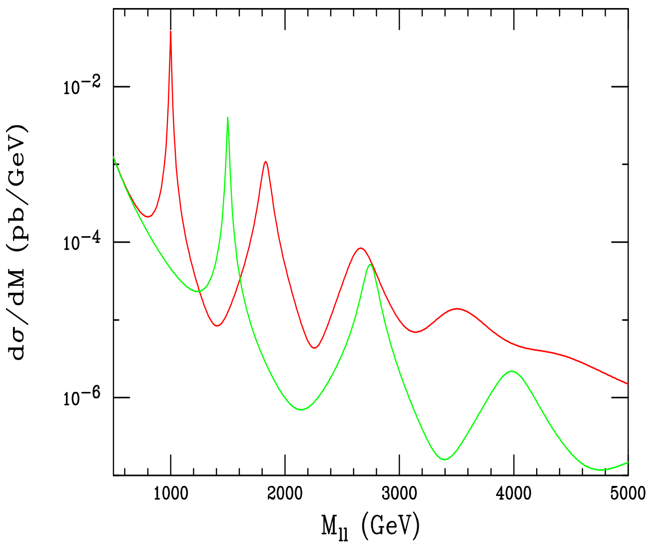
$M_S > 0.8$ TeV   Obecnie wciąż zbyt małe energie $\Rightarrow$ musimy poczekać na LHC...

Perspektywy

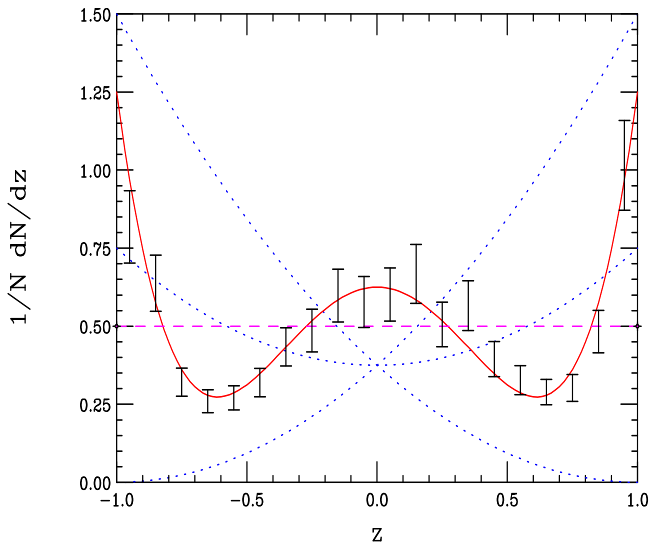
Poszukiwanie rezonansów (R-S model)

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

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



masa niezmiennicza l^+l^-

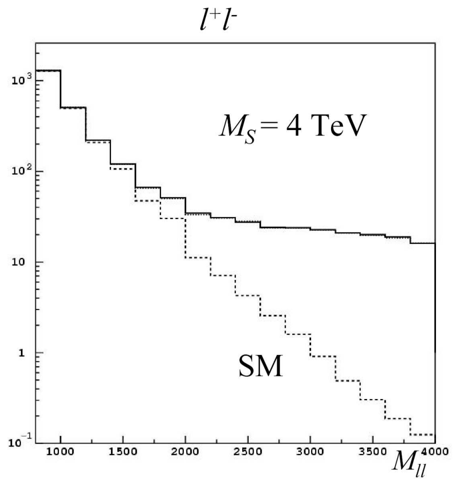


z=cos θ

Perspektywy

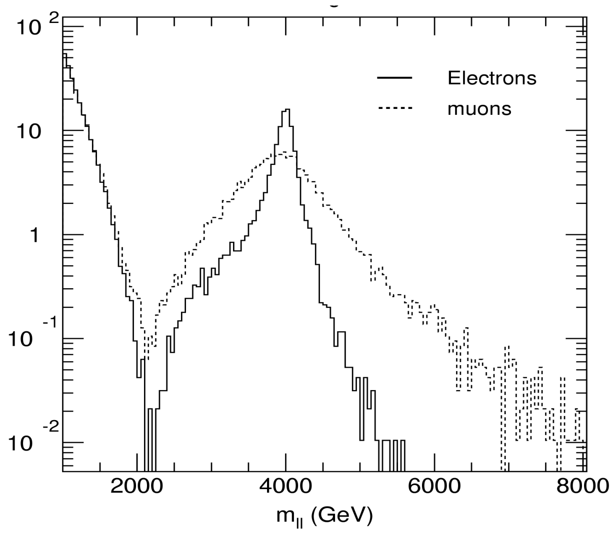
Oczekiwane sygnały w LHC

Wirtualna wymiana grawitonów



masa niezmiennicza l^+l^-

Produkcja stanów rezonansowych



Zakres poszukiwań: 9 TeV

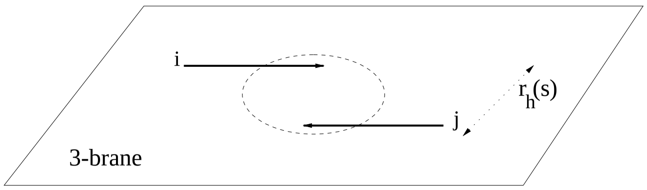
6 TeV

Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

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

czarna dziura $\equiv$ obiekt związany grawitacyjnie



Promień 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:

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

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

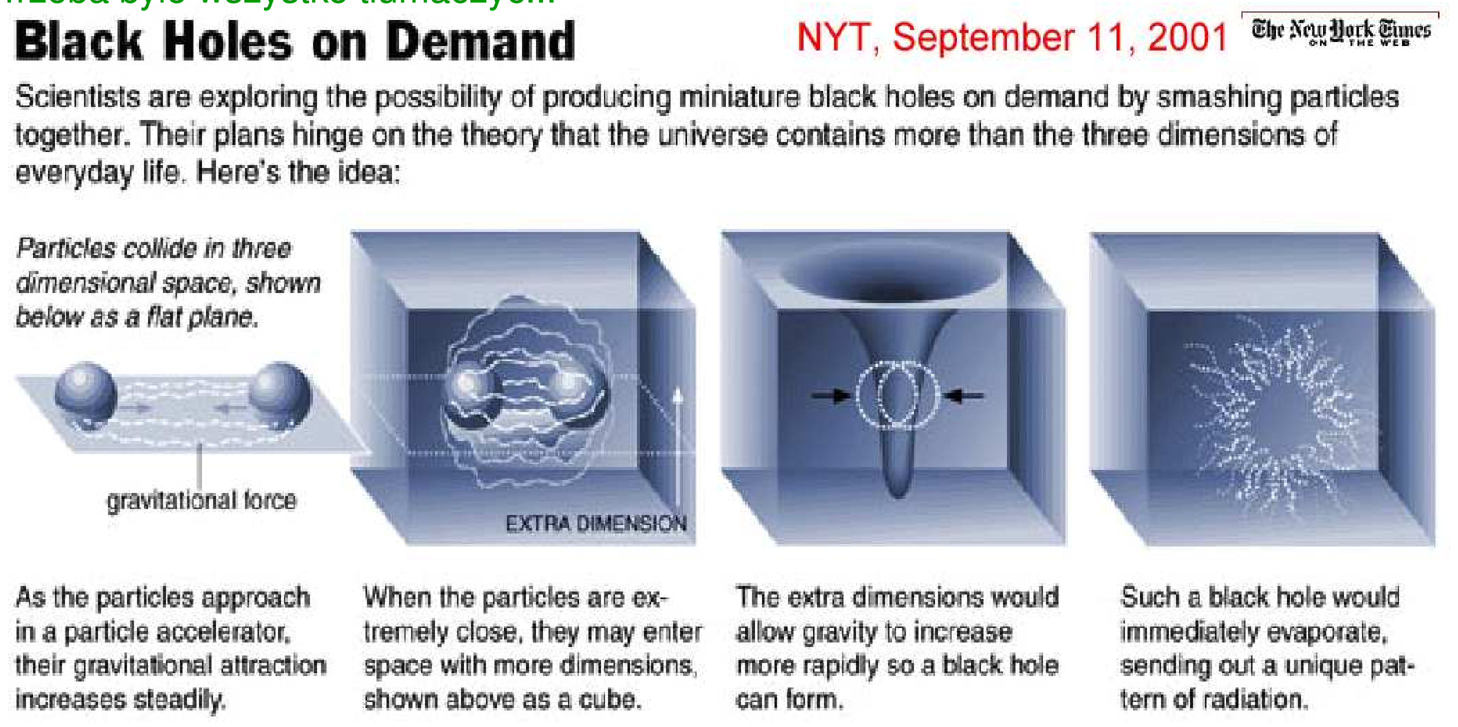
W LHC ($\sqrt{s} = 14$ TeV; $n = 6$):

$m_{BH} \geq 5\ TeV \Rightarrow$ 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!

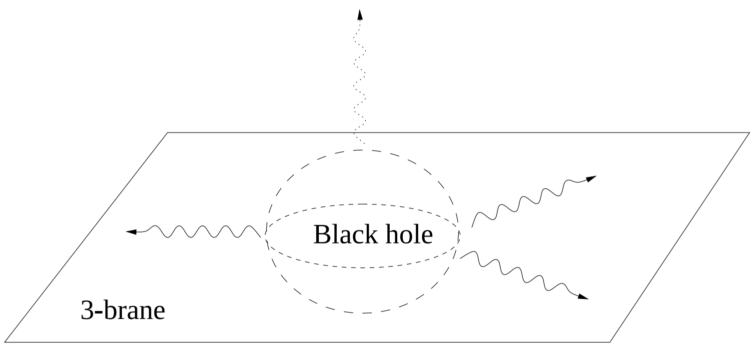
Trzeba było wszystko tłumaczyć...



Perspektywy

Produkcja czarnych dziur

Czarna dziura "paruje" emitując izotropowo wysokoenergetyczne cząstki:



Część energii ucieka w dodatkowe wymiary (grawitony), 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 GeV)

Średni czas życia czarnej dziury

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

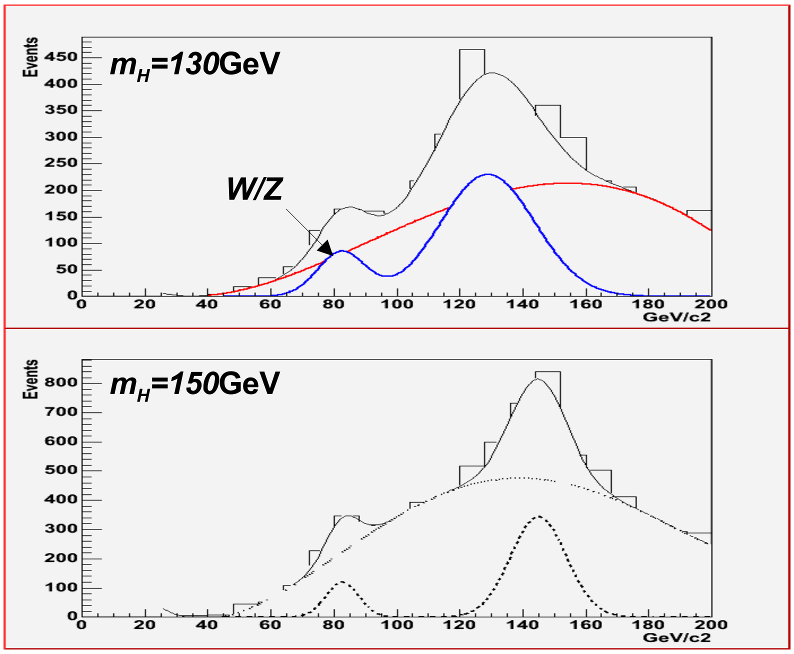
ale w szczególnych przypadkach możliwe też stany metastabilne...

Perspektywy

Rozpady czarnych dziur

Wśród produktów rozpadu ciężkiej czarnej dziury chętnie pojawiałby się... bozon Higgsa

Przewidywane rozkłady rekonstruowanej masy par jetów z rozpadów czarnych dziur ⇒

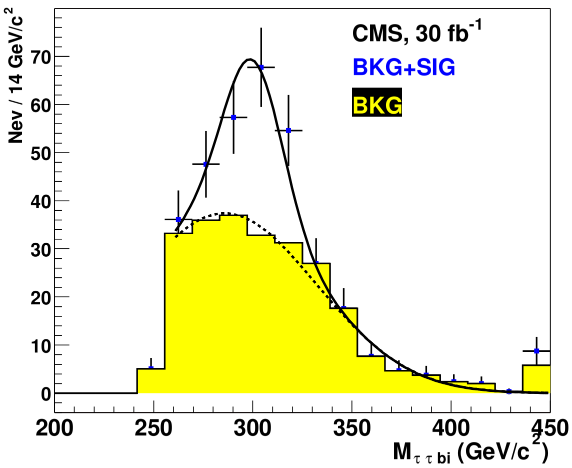


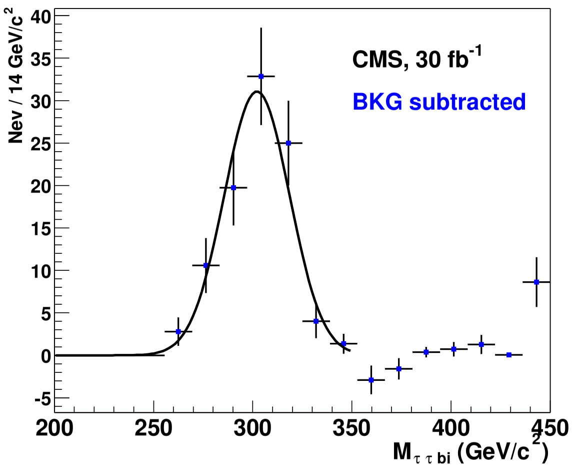
Perspektywy

Radion

W modelu Randal-Sundrum pojawia się dodatkowa cząstka: Radion

Możliwości rekonstrukcji w LHC przypadków $pp \to \Phi \to hh \to b\bar{b}\,\tau^+\tau^-$





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

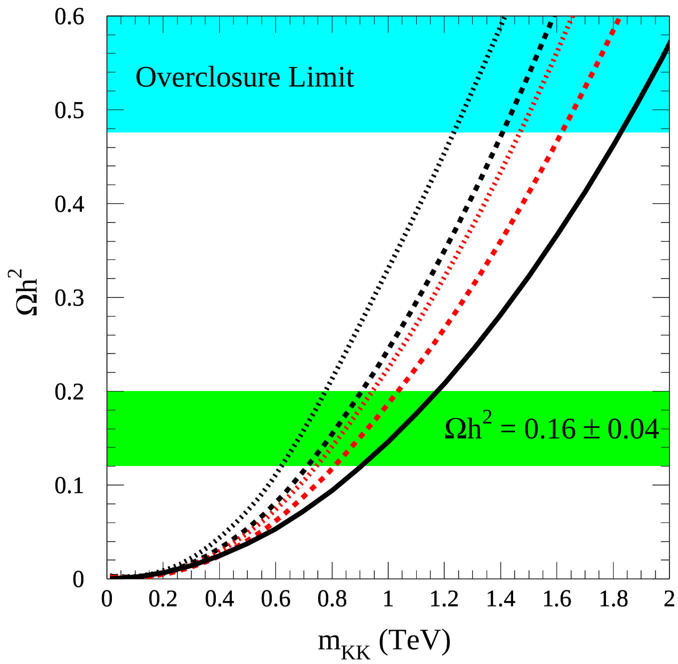
Perspektywy

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 ⇒



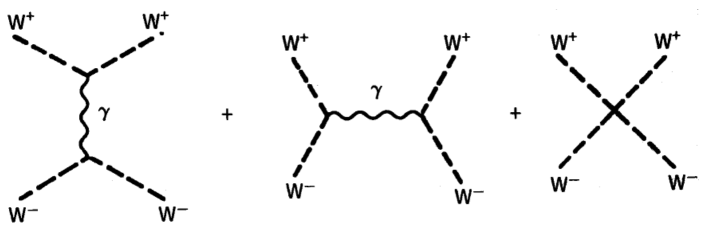
Porównując z obserwacjami:

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

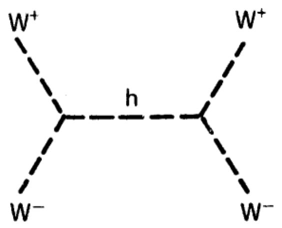
Nowe oddziaływania WW

Wszystkie dotychczas omawiane modele zakładały istnienie cząstki Higgsa.

W Modelu Standardowym przekrój czynny na rozpraszanie $WW \to WW$ rośnie jak s^2 !



Wkład od lekkiej cząstki Higgsa konieczny do skasowania rozbieżności:



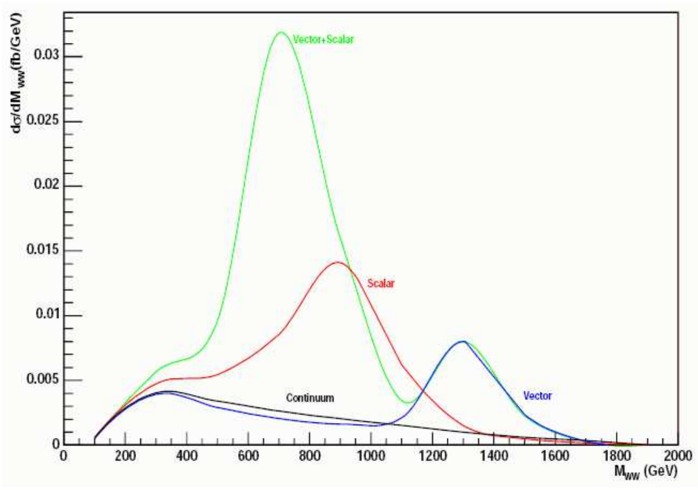
Możemy rozważać modele bez cząstki Higgsa, ale wtedy muszą pojawić się nowe efekty w rozpraszaniu WW, np. rezonanse...

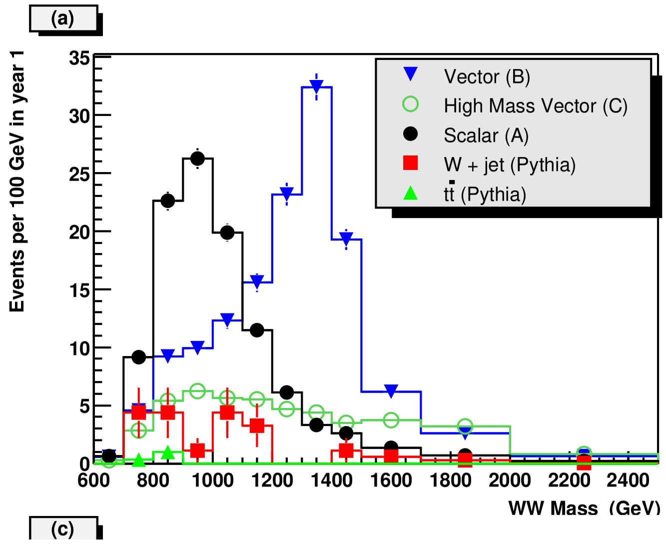
Nowe oddziaływania WW

Perspektywy dla LHC

Możliwe scenariusze rozpraszania rezonansowego $WW \rightarrow WW$

Przykładowe rozkłady masy niezmienniczej   Przewidywane wyniki pomiaru





Podsumowanie

Modele z dodatkowymi wymiarami, "mały Higgs" (Little Higgs) czy też modele bez cząstki Higgsa (Higgsless models) wywołują duże zainteresowanie.

Przewidują wiele nowych, ciekawych reakcji (innych niż w SUSY)

$\Rightarrow$ należy ich poszukiwać nawet jeśli nie jesteśmy przekonani co do słuszności modeli

Nawet jeśli nie wydają się tak "naturalne" i "eleganckie" to przełamały "monopol" SUSY na rozwiązanie problemów Modelu Standardowego...

Wciąż pojawiają się nowe modele...

Ale przede wszystkim czekamy na dane z LHC !