

Dodatkowe wymiary

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład XII

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

 - Przyszłość fizyki cząstek
- ⇒ Liniowy kolajder fotonowy

Dodatkowe wymiary

Skala Plancka

Problem hierarchii w Modelu Standardowym:

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

(skala łamania symetrii EW)

Grawitacja:

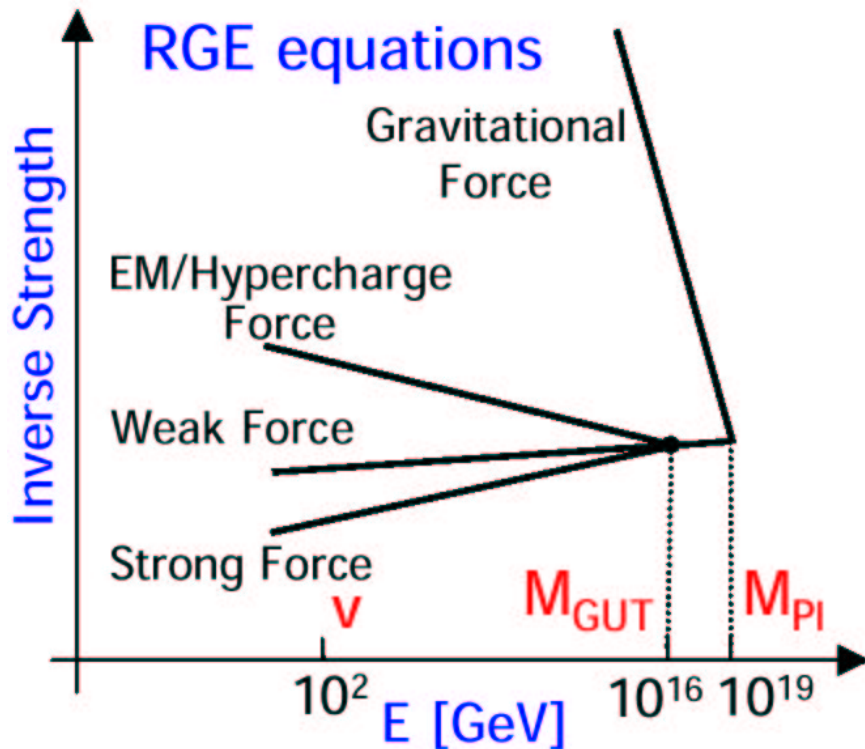
unifikacja dopiero przy skali

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

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

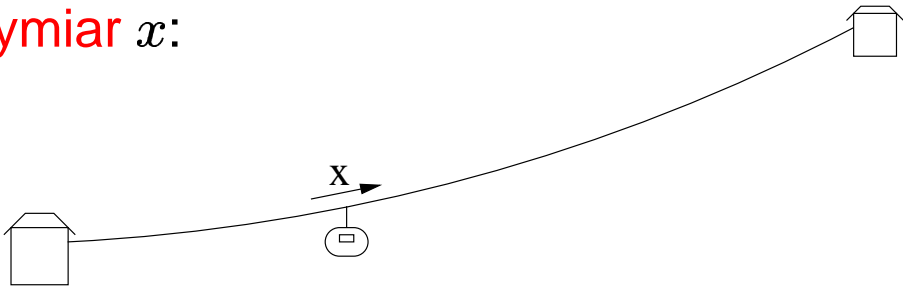
Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

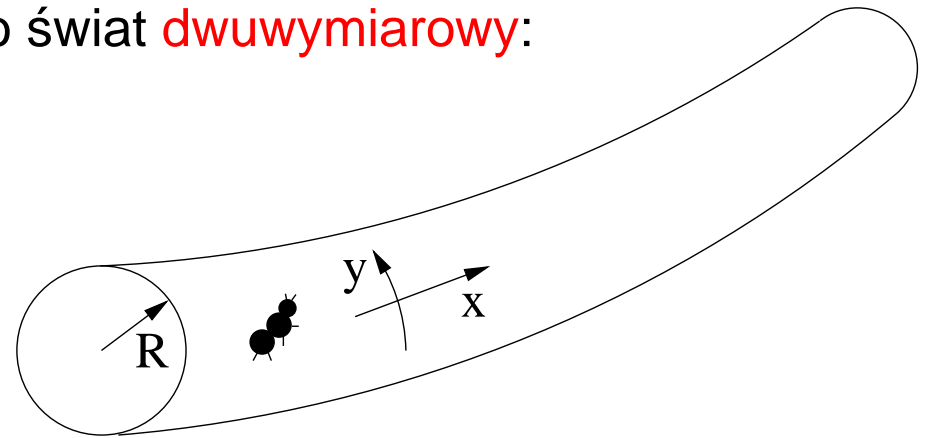
NIE - jeśli tylko nieskończone wymiary... **TAK** - jeśli dopuścimy wymiary skończone !

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:



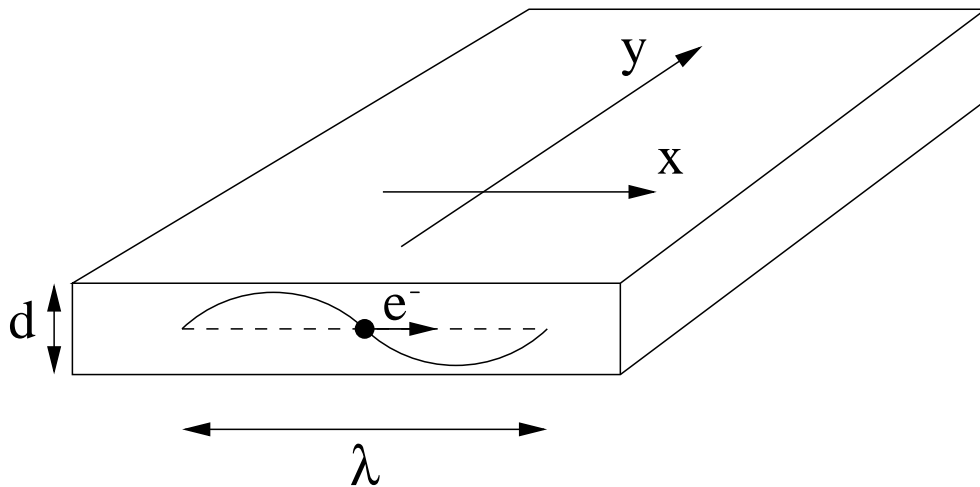
y jest współrzędną cykliczną.

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

Dodatkowe wymiary

Przykład II

Elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



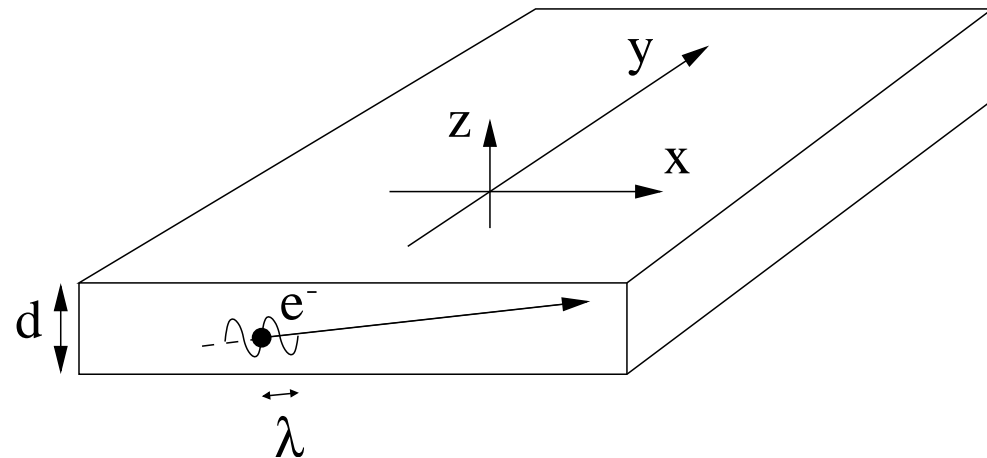
Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

\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 ($\lambda < d$)



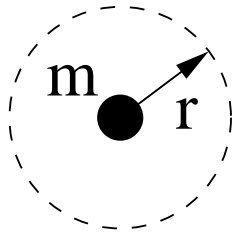
jego ruch musimy opisywać w trzech
wymiarach...

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:

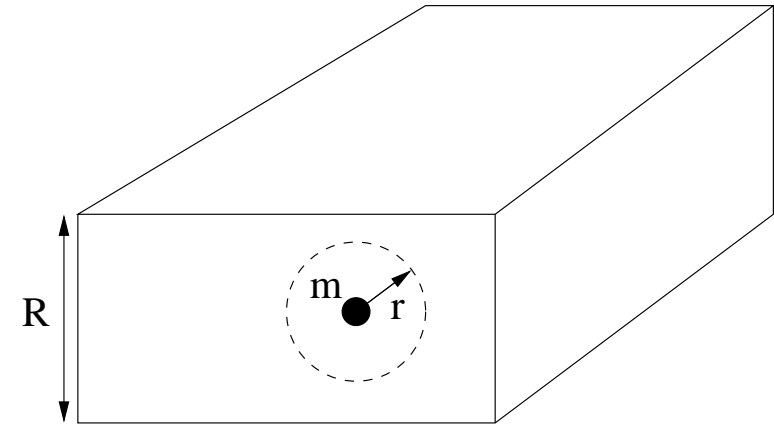
$$S(3+n) \sim r^{n+2}$$

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

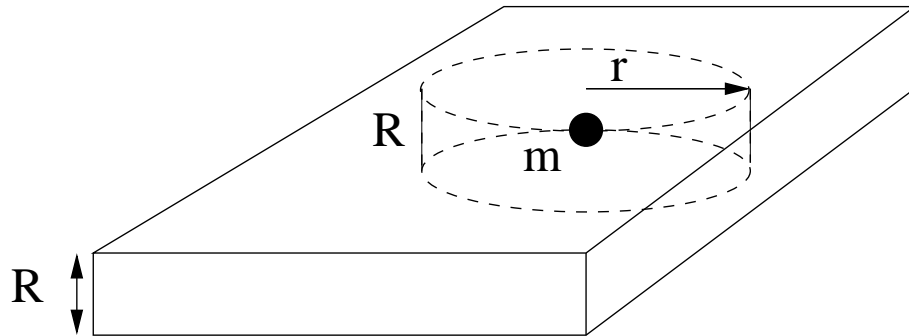
Takie podejście jest słuszne tylko dla $r \ll R$, gdy testujemy grawitację na bardzo małych odległościach:



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

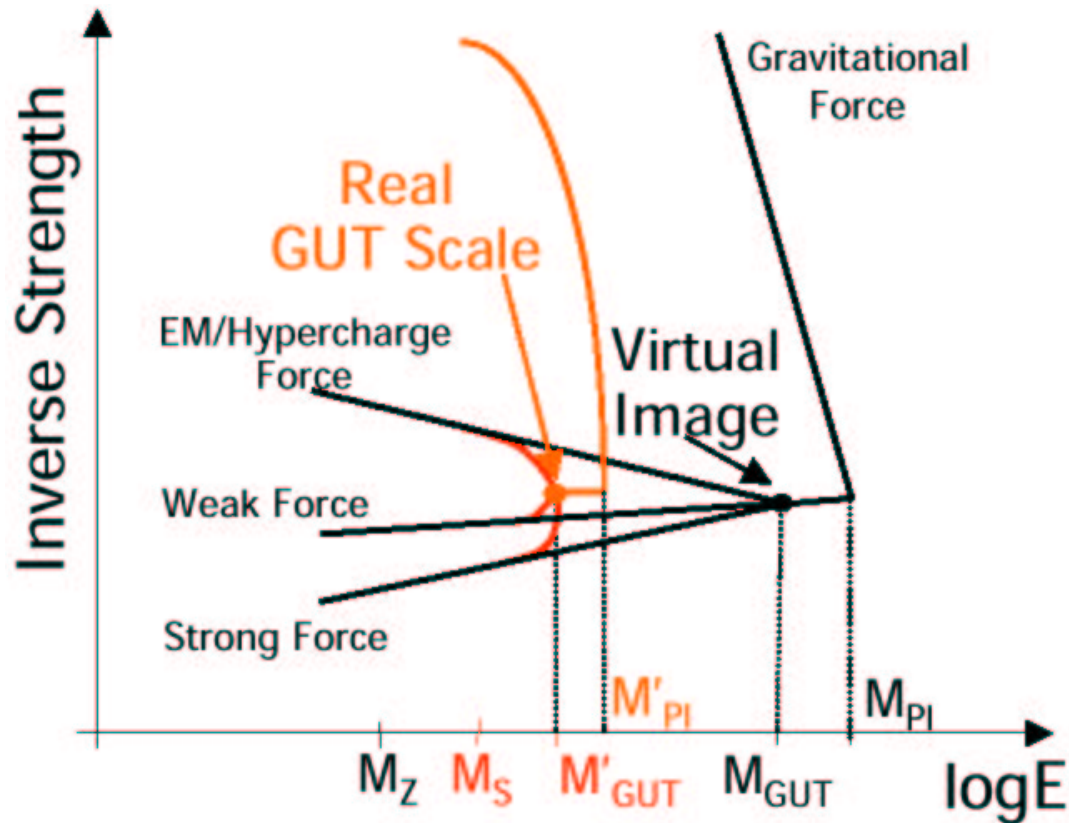
Gdy skala energii przekracza $1/R$ ewolucja stałych sprzężenia “przyspiesza”:

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

Przyjmując M_S 1 TeV:

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

Jakie są ograniczenia doświadczalne ?



Grawitacja

Prawo Newtona

Przez 20 lat zastanawiał się nad spadającym jabłkiem...

W 1687 roku przedstawił prawo powszechnego ciążenia:

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

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

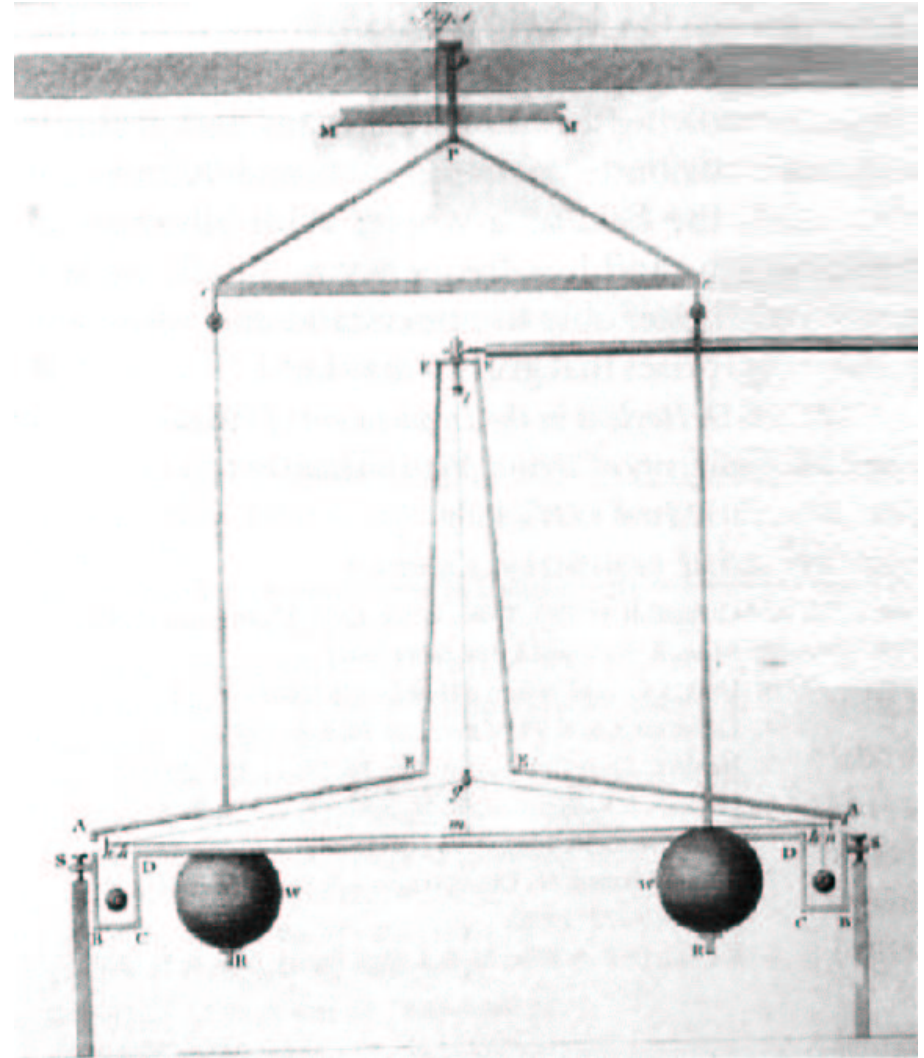
z zależności typu $\frac{1}{r^2}$ wynikają prawa Keppler'a...

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)

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

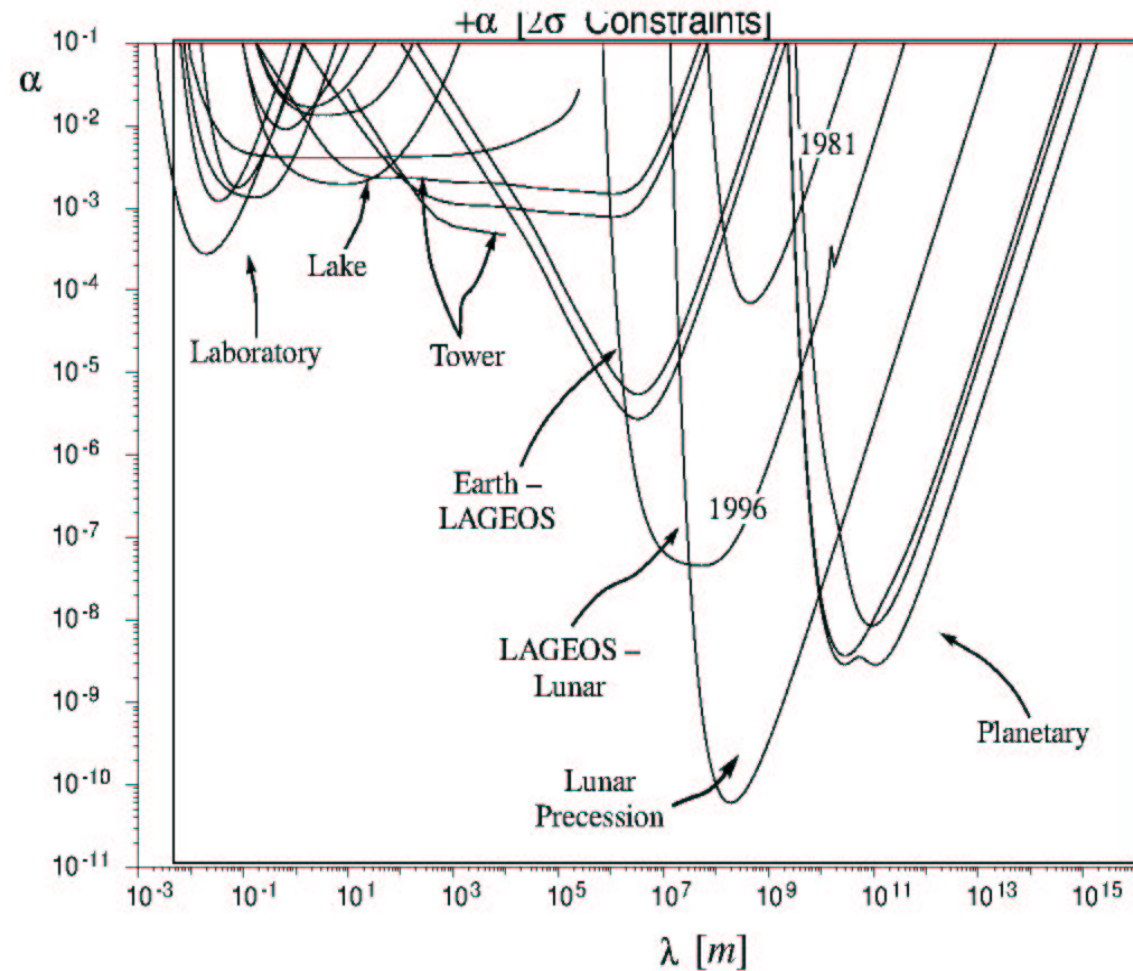
λ - skala odległości

α - względne odchylenie ("łamanie")

Najdokładniej przetestowany układ:

Ziemia-Księżyc

Wyniki dostępne w 1996 roku
(górne ograniczenia na α)



Grawitacja

Pomiary laboratoryjne

W ostatnich latach przeprowadzono szereg bardzo precyzyjnych pomiarów oddziaływań grawitacyjnych na odległościach $\sim 0.1 - 1 \text{ mm}$.

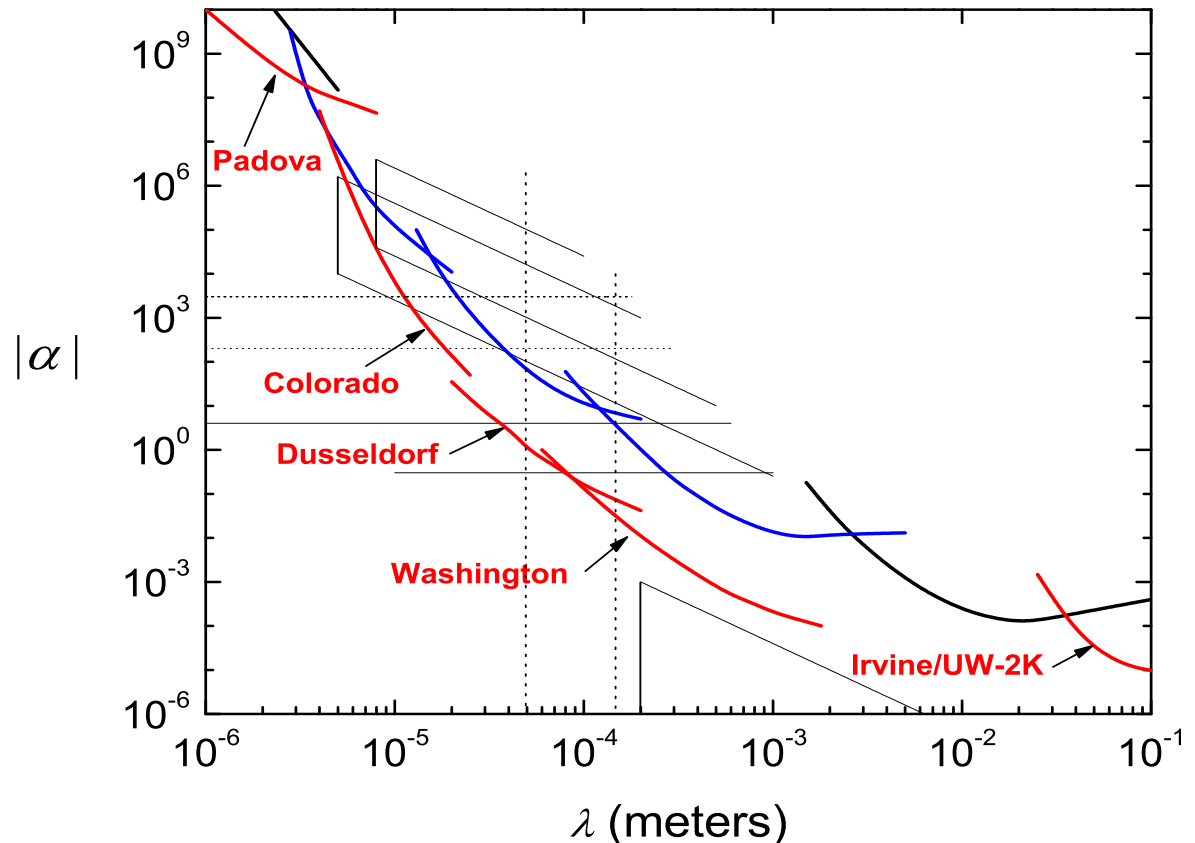
Planowane są kolejne eksperymenty.

“Zwykłe” dodatkowe wymiary

$$\Rightarrow |\alpha| \sim 4$$

$$\Rightarrow \lambda < 150 \mu\text{m}$$

Istniejące i oczekiwane (z kolejnych pomiarów) ograniczenia na parametr α :



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** ($\sim \frac{1}{M_{Pl}^2}$)

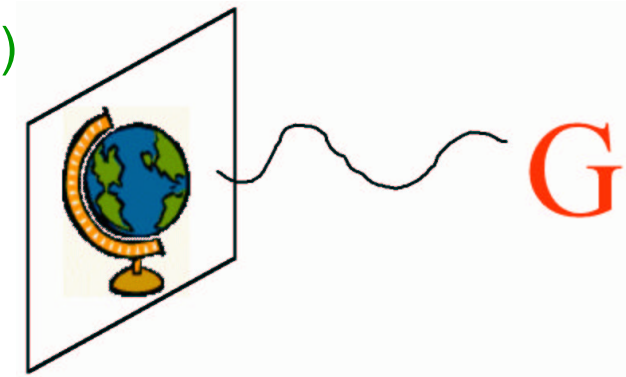
Ale w 1+3 wymiarach grawiton widoczny jest jako szereg stanów o masach:

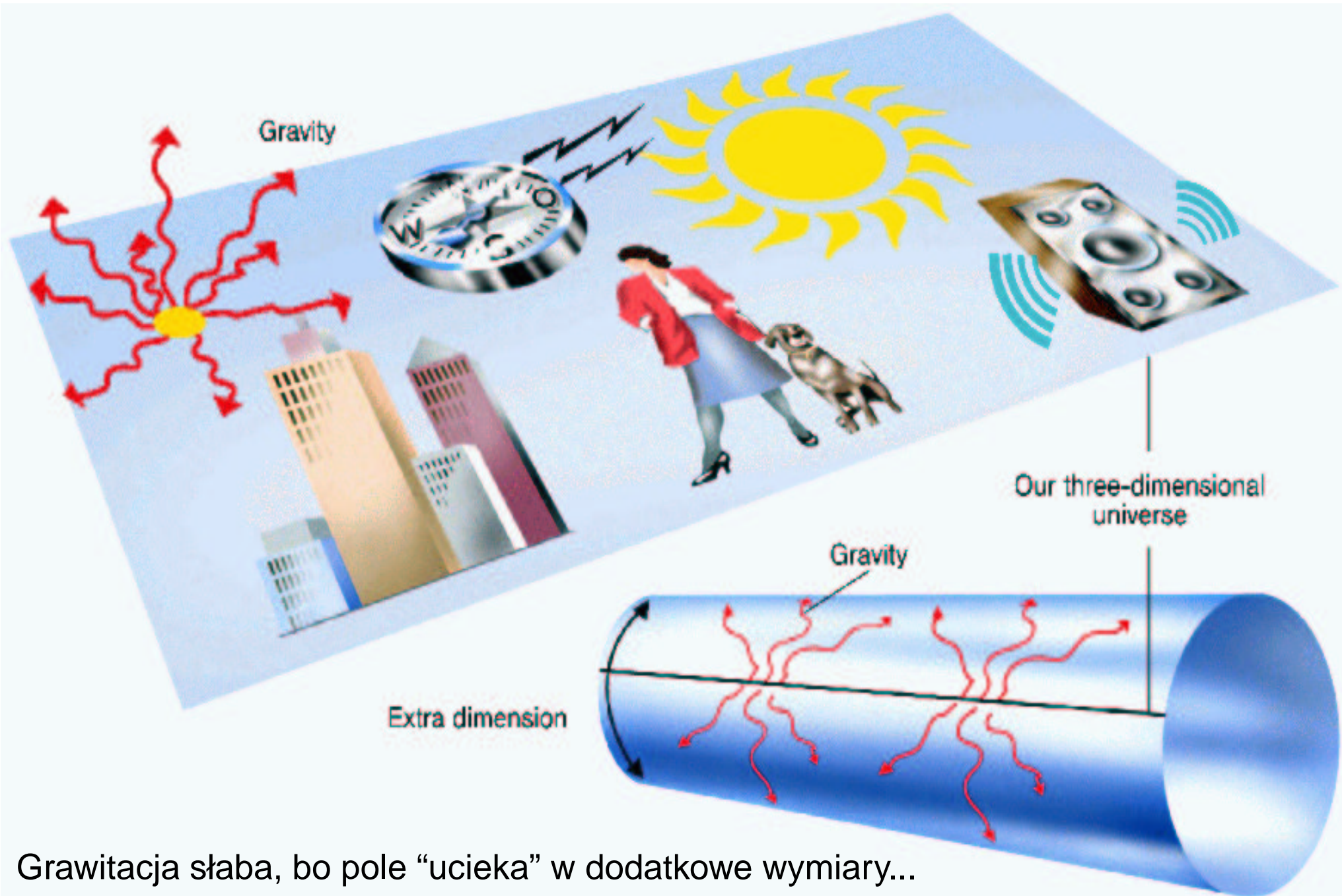
$$m_i = i \cdot \Delta m \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

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...

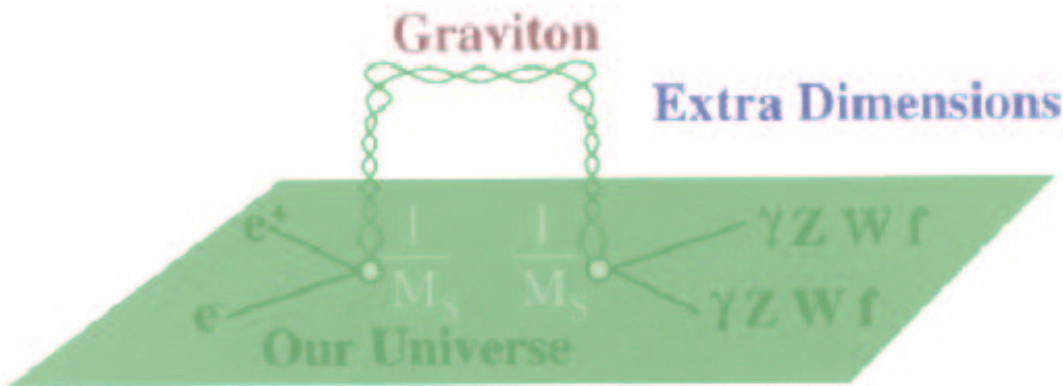
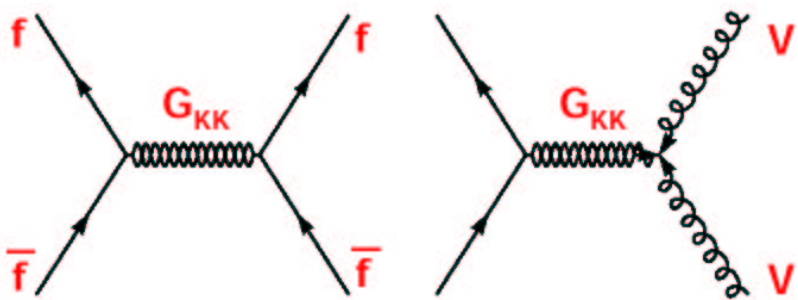
Poszukiwania

Wymiana grawitonów

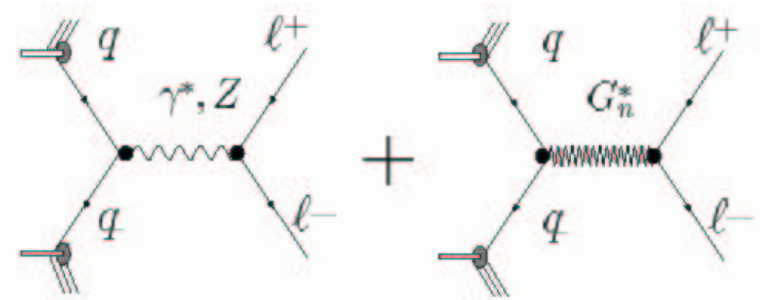
Przy skalach $\sqrt{s} \sim M_S$ wymiana grawitonów może być porównywalna z wymianą γ i Z^0 .

LEP: wkład do produkcji par cząstek

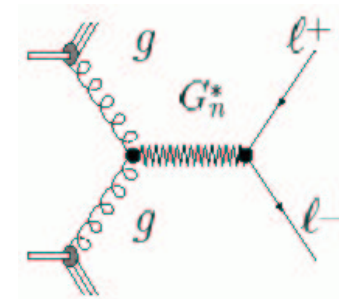
$$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}, W^+W^-, ZZ, \gamma\gamma$$



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



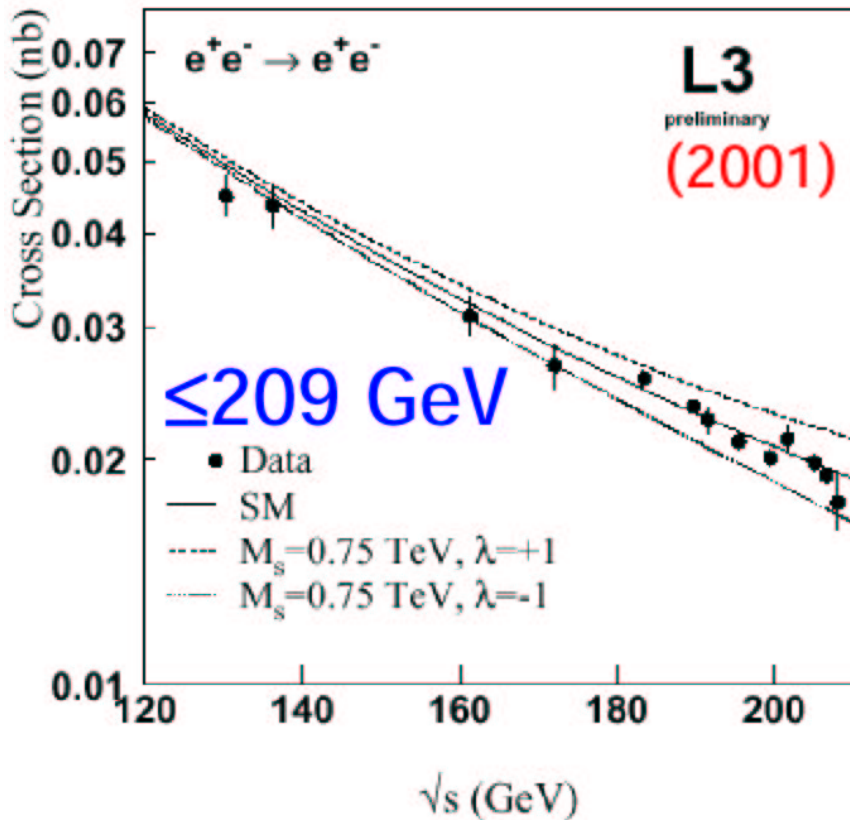
Dodatkowy wkład od gluonów !!! (nieobecny w SM)



Poszukiwania

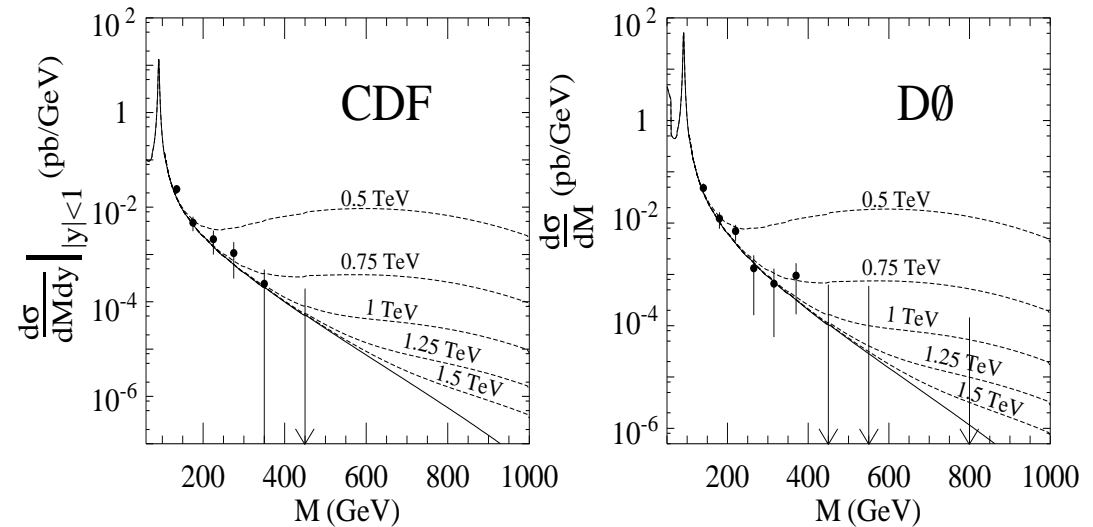
Wymiana grawitonów

Przykładowe wyniki współpracy L3:



Wyniki eksperymentów przy Tevatronie:

$$p\bar{p} \rightarrow e^+e^-, \gamma\gamma$$



Dobra zgodność z SM $\Rightarrow M_S > 1.0-1.0 \text{ TeV}$

NC DIS w HERA $\Rightarrow M_S > \sim 0.8 \text{ TeV}$

brak odchyień $\Rightarrow M_S > \sim 1.0 \text{ TeV}$

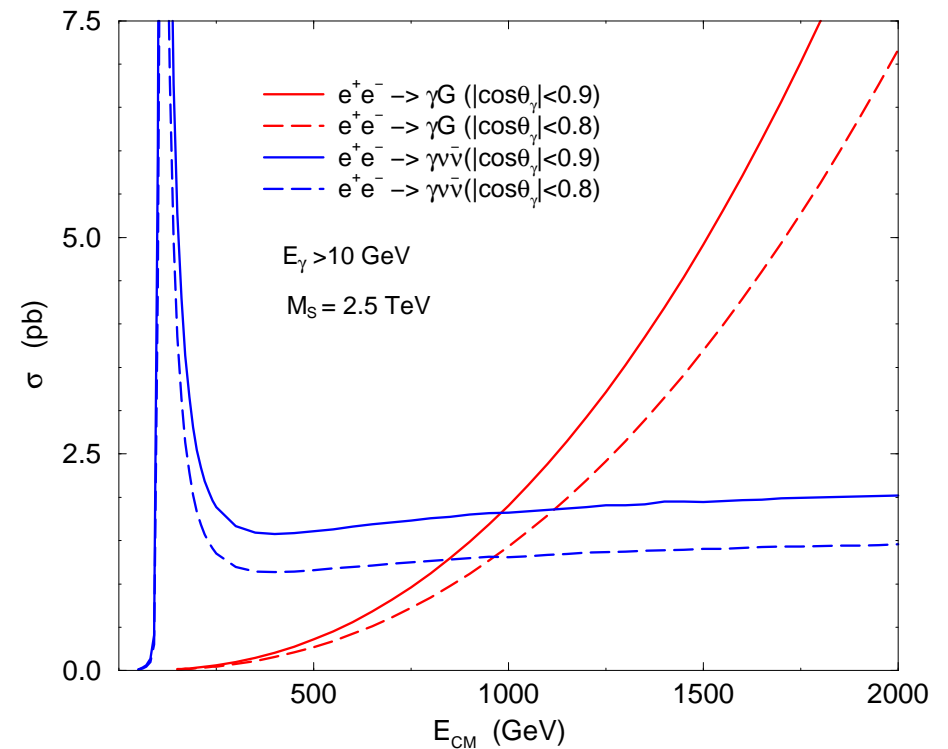
Poszukiwania

Produkcja grawitonów

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



Porównanie przekrojów czynnych dla sygnału i tła:



Poszukiwanie w LEP:

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

główne tło: $e^+e^- \rightarrow \gamma Z^0$
 $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$

Brak odchyień \Rightarrow

$$M_S > \sim 1.0 \text{ TeV} \quad n = 2$$

\Rightarrow Potrzebne wyższe energie !...

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**”)

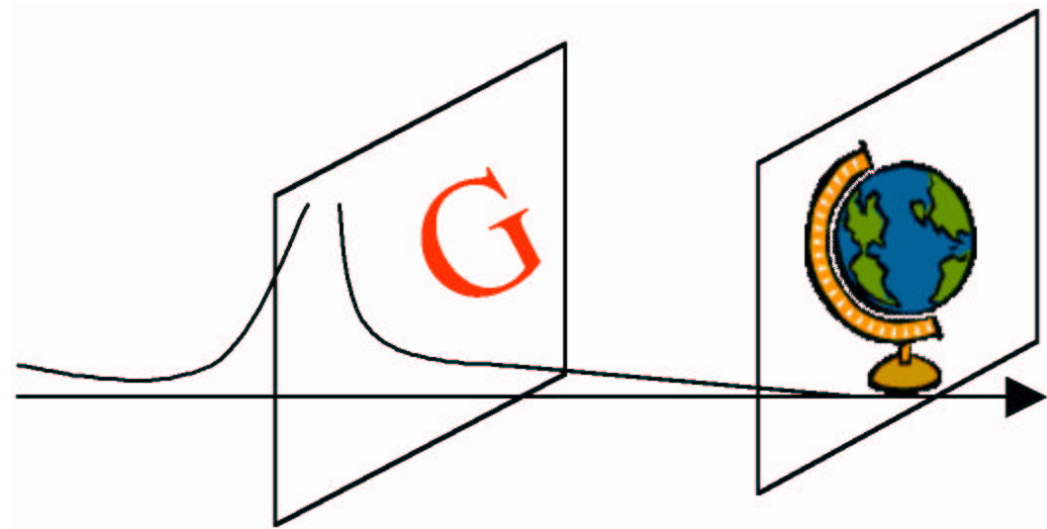
Model przewiduje **dyskretne** widmo
(**stanów wzbudzonych**) **grawitonów**.

Kolejne stany odległe są o:

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

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

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

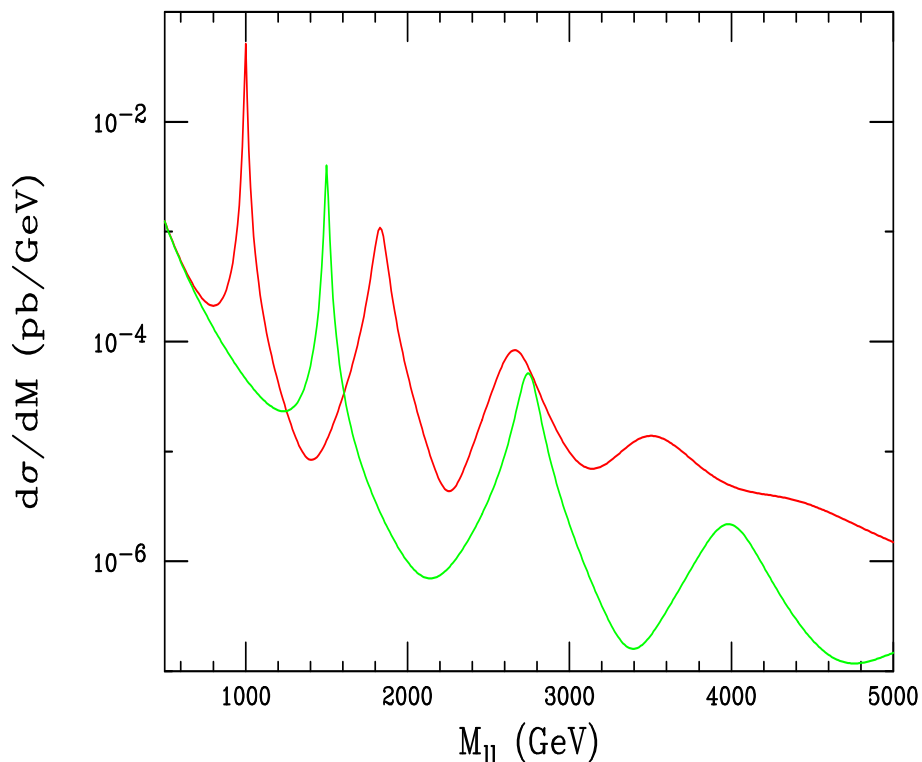


Perspektywy

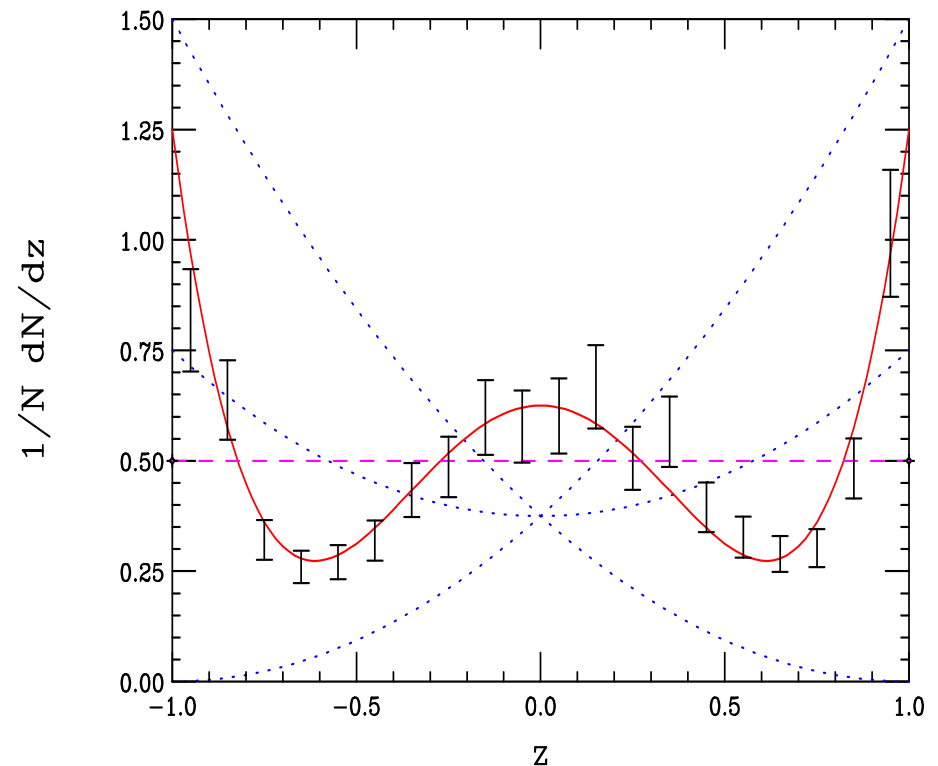
Poszukiwanie rezonansów (R-S model)

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^-



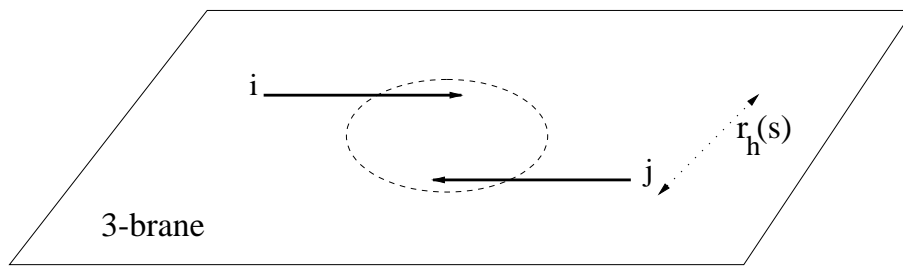
$z = \cos \theta$

Perspektywy

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; $n = 6$):

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

\Rightarrow **fabryka czarnych dziur**

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

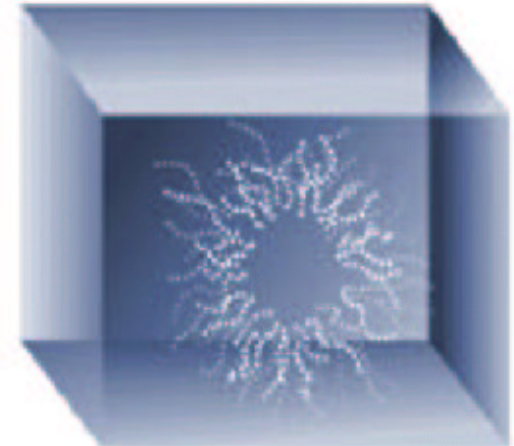
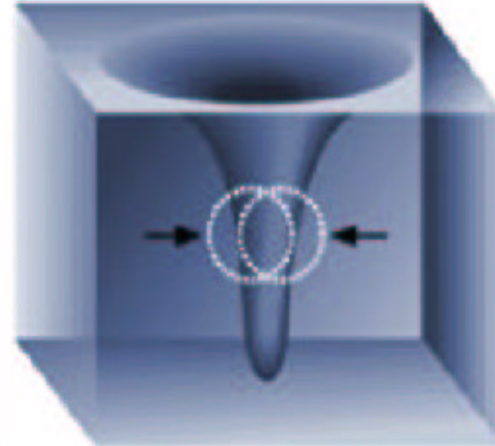
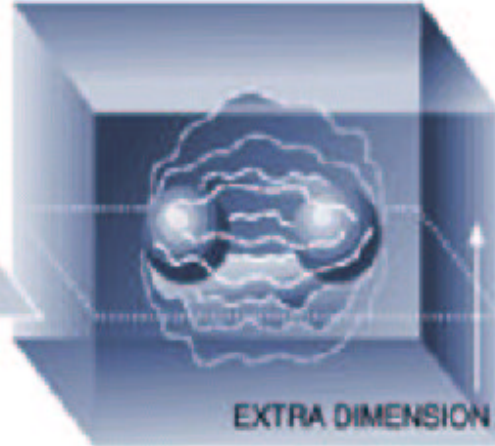
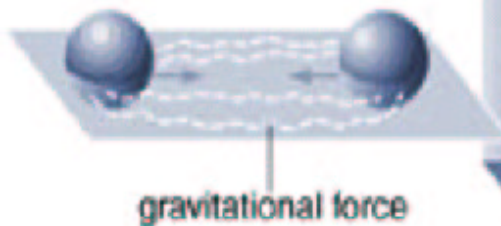
Trzeba było wszystko tłumaczyć...

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.

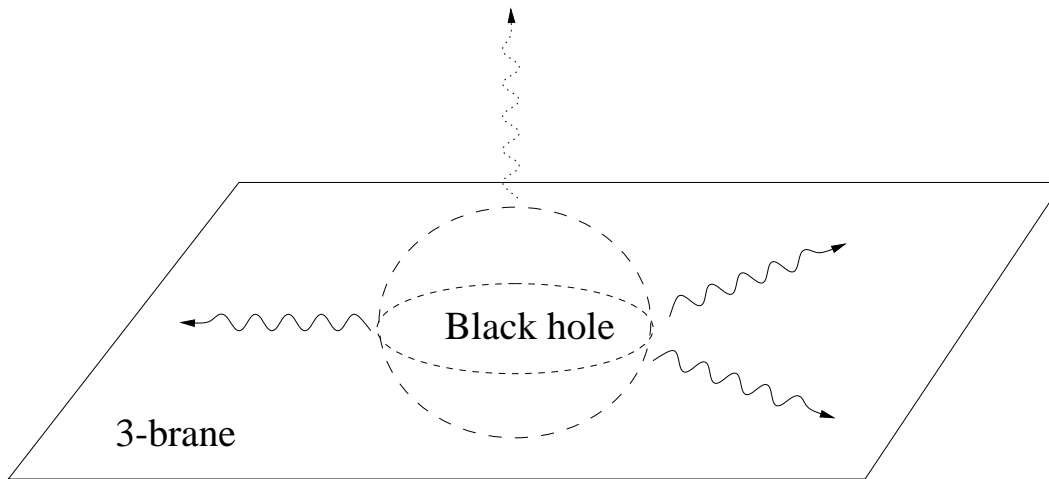
The extra dimensions would allow gravity to increase more rapidly so a black hole can form.

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 (≥ 100 GeV)

Średni **czas życia** czarnej dziury

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

ale w szczególnych przypadkach możliwe też stany metastabilne...

Perspektywy

Kosmologia

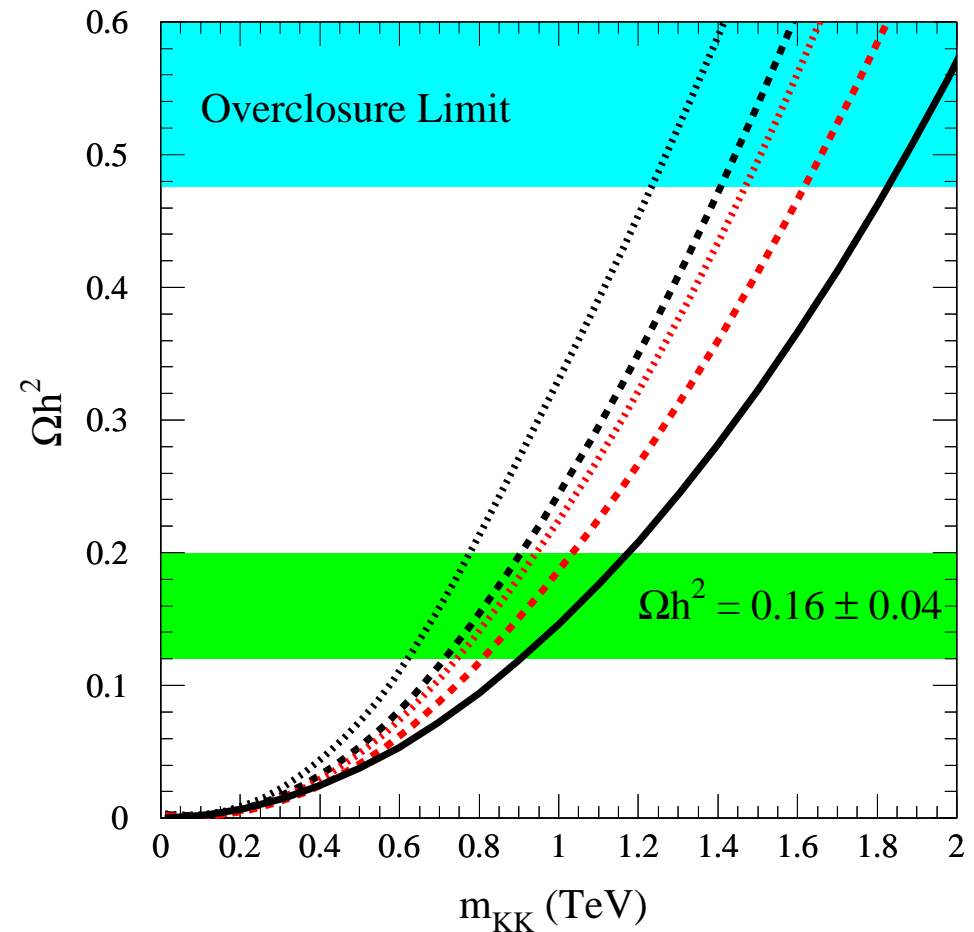
Dodatkowe wymiary mogłyby także wytłumaczyć obecność “ciemnej materii” we Wszechświecie.

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:

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

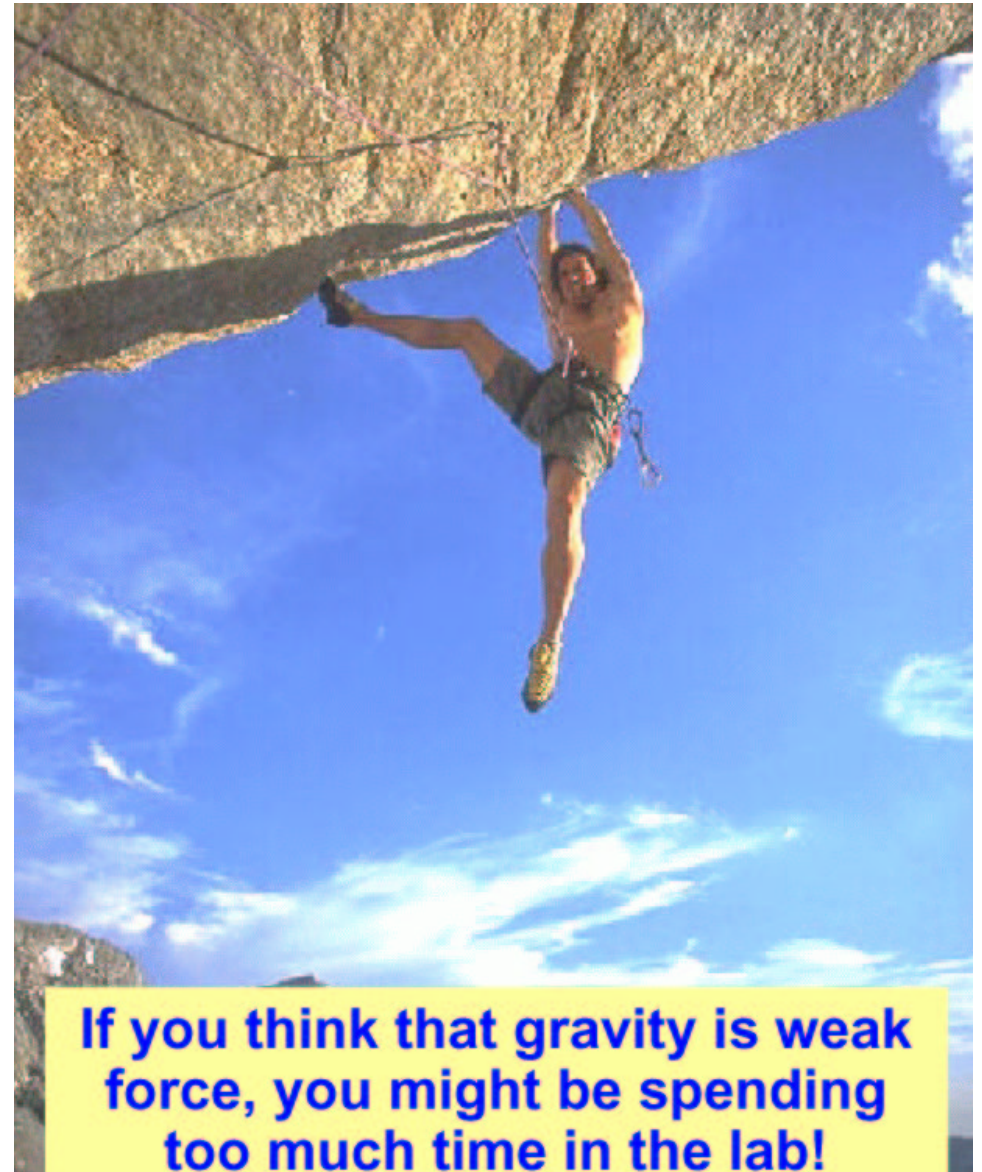


Podsumowanie

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!

Przyszłość fizyki cząstek

LHC to już w zasadzie **rzeczywistość** - pierwsze dane za 3 lata...

Kolejnym krokiem będzie **kolajder liniowy** (LC) e^+e^-

- **międzynarodowy konsensus** środowiska fizyki wysokich energii wyrażony w stanowisku wielu instytucji i ciał doradczych (ACFA, ECFA, ICFA, HEPAP...)

“the highest priority for a new machine for particle physics is a linear electron-positron collider with an initial energy of 500 GeV, extendible up to about 1 TeV, with a significant period of concurrent running with LHC”

- budowa uwzględniona (jako przedsięwzięcie o **najwyższym priorytecie** w średniej skali czasowej) w planach US DOE Office of Science
- koszt ~ 4 G\$!!! \Rightarrow musi to być ogólnoświatowa inwestycja
- nie wiemy jeszcze gdzie będzie budowany (DESY, USA, Japonia)
- nie wiemy jeszcze w jakiej technologii (“ciepłe” lub nadprzewodzące wnęki)
decyzja do końca **2004** !!! początek budowy **2009**

\Rightarrow w 2005 powinny zacząć się formować zespoły badawcze !!!

Your Linear Collider Needs You

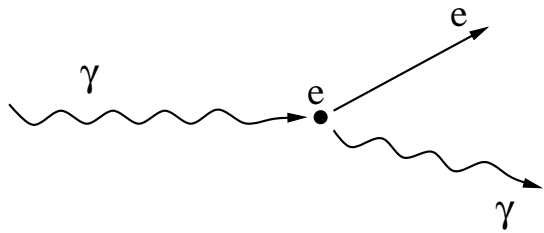
P.Burrows LCWS'2004



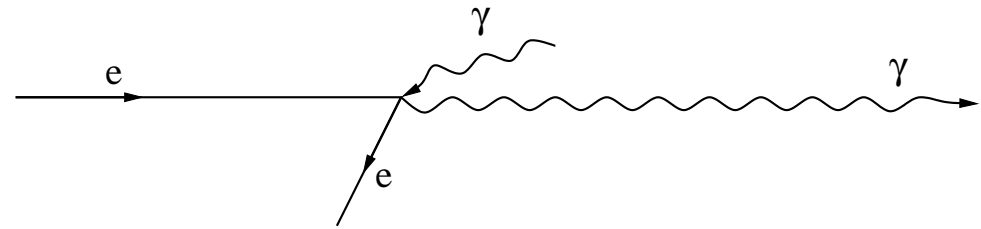
Photon Collider

Rozpraszanie Comptona

“Klasycznie”: foton rozpraszając się na elektronie przekazuje mu część swojej energii:



Możemy jednak przejść do układu odniesienia, w którym $E_e \gg E_\gamma$:



⇒ elektron może przekazać fotonowi **większość swojej energii!**

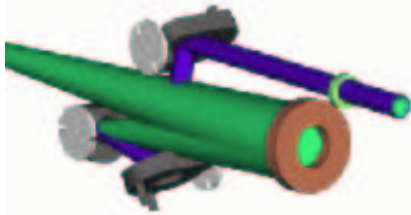
Photon Collider (PC)

Możliwość **zderzania fotonów** jest opcją we wszystkich projektach e^+e^- .

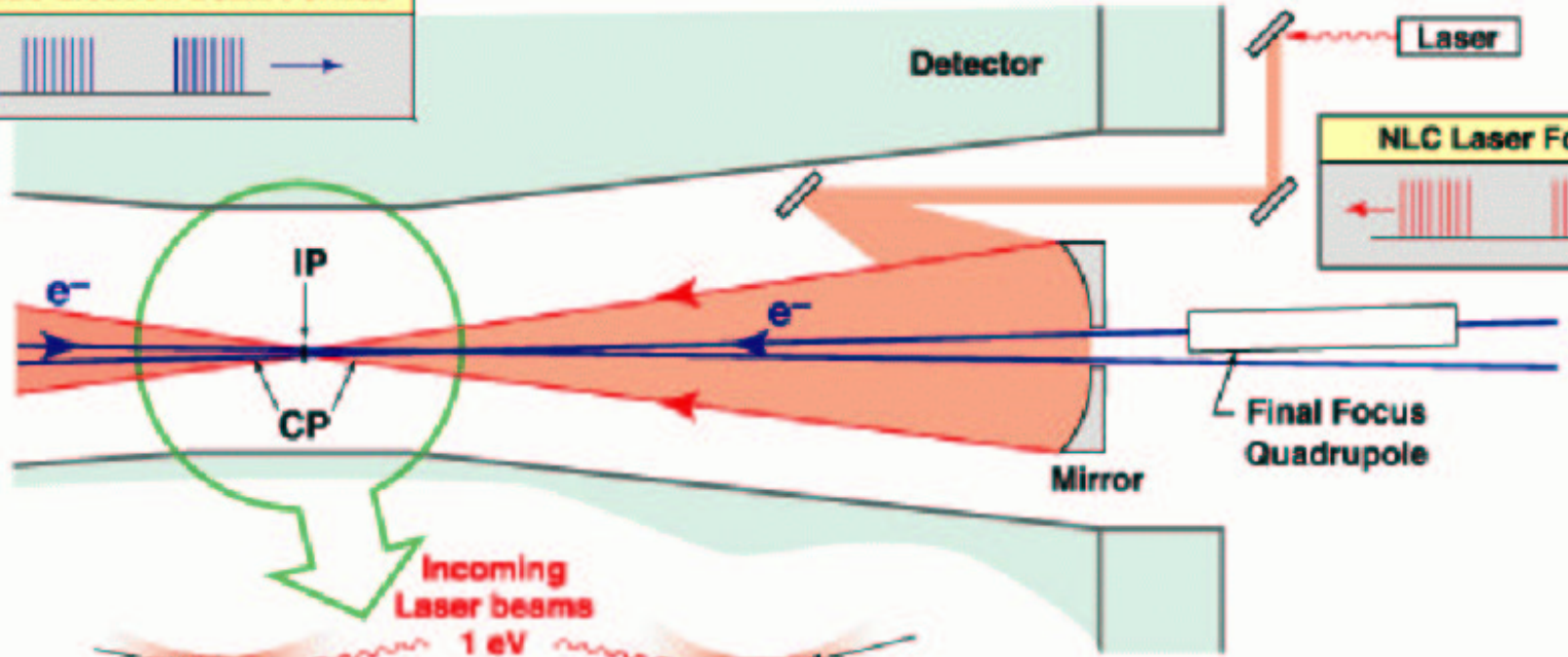
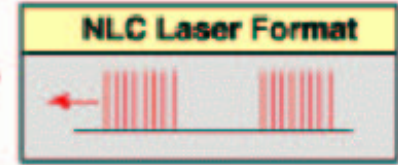
Wykorzystując **niezwykle silny laser** możemy uzyskać prawie pełną “zamianę” wiązki elektronowej w fotonową...

Fotony “przejmują” nie tylko **energię** (maksimum przy ok. 80% energii wiązki), ale i **kierunek** wiązki elektronów (rozmycie kątowe $\sim m_e/E_e$)

⇒ możemy doprowadzić do zderzeń $\gamma\gamma$ ze świetnością $\mathcal{L}_{\gamma\gamma} \sim \mathcal{L}_{ee}$

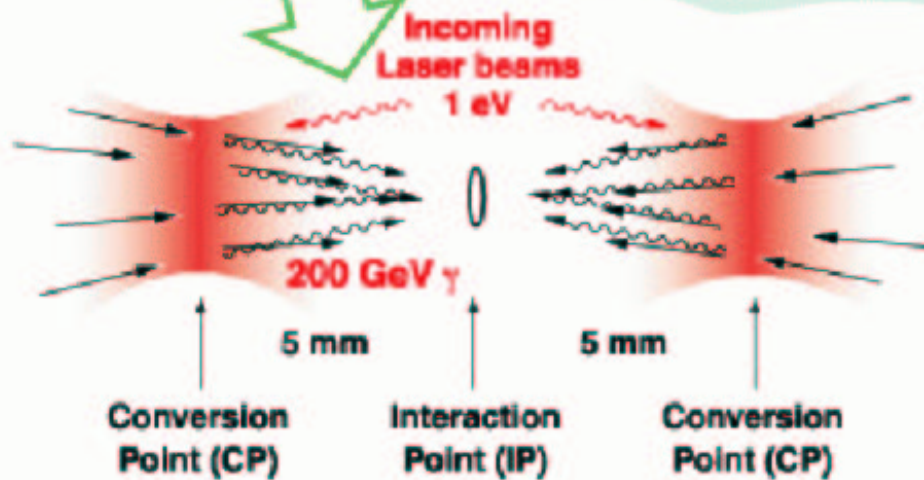


Photon Colliders – The marriage of lasers and electron linear colliders



Projekt NLC
 e^- : 250 GeV

$\gamma \sim 200$ GeV

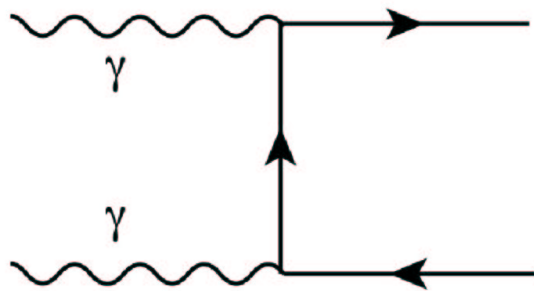


NLC Laser
~ 1 Joule/bunch
95 1-ps bunches/pulse
2.8 nsec spacing

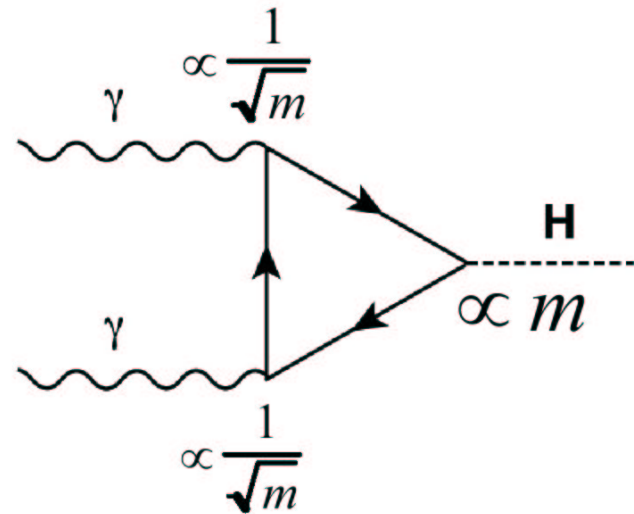
Photon Collider

Fizyka

W zderzeniach $\gamma\gamma$ możemy produkować **wszystkie** cząstki **naładowane** (“czyste” oddziaływanie elektromagnetyczne), ale nie tylko...



Wyjątkowa w zderzeniach $\gamma\gamma$ jest możliwość **rezonansowej** produkcji bozonu **Higgsa**:



Ponieważ foton nie sprzęga się bezpośrednio do Higgsa, tylko przez “pętle”, proces jest czuły na **WSZYSTKIE** cząstki naładowane \Rightarrow **niezwykle czuły** na “nową fizykę”

W innych procesach **wkłady pętlowe** szybko **maleją** ze wzrostem **masy** cząstek...

Ale **sprężenie Higgsa** jest proporcjonalne do **masy** !

\Rightarrow **wkłady skończone** nawet w granicy $M \rightarrow \infty$

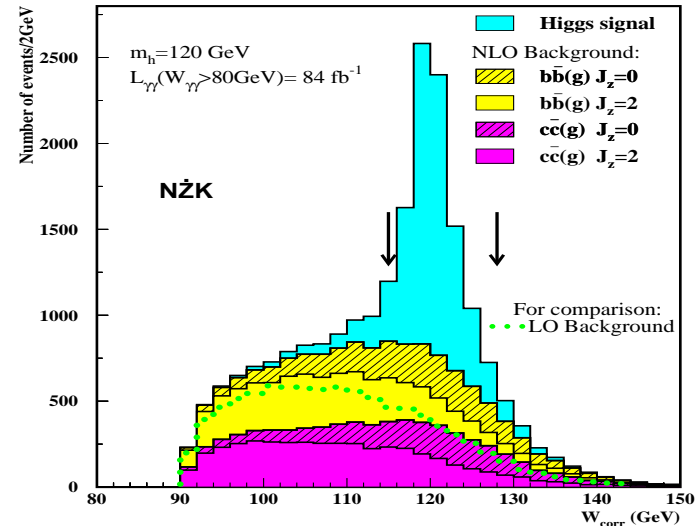
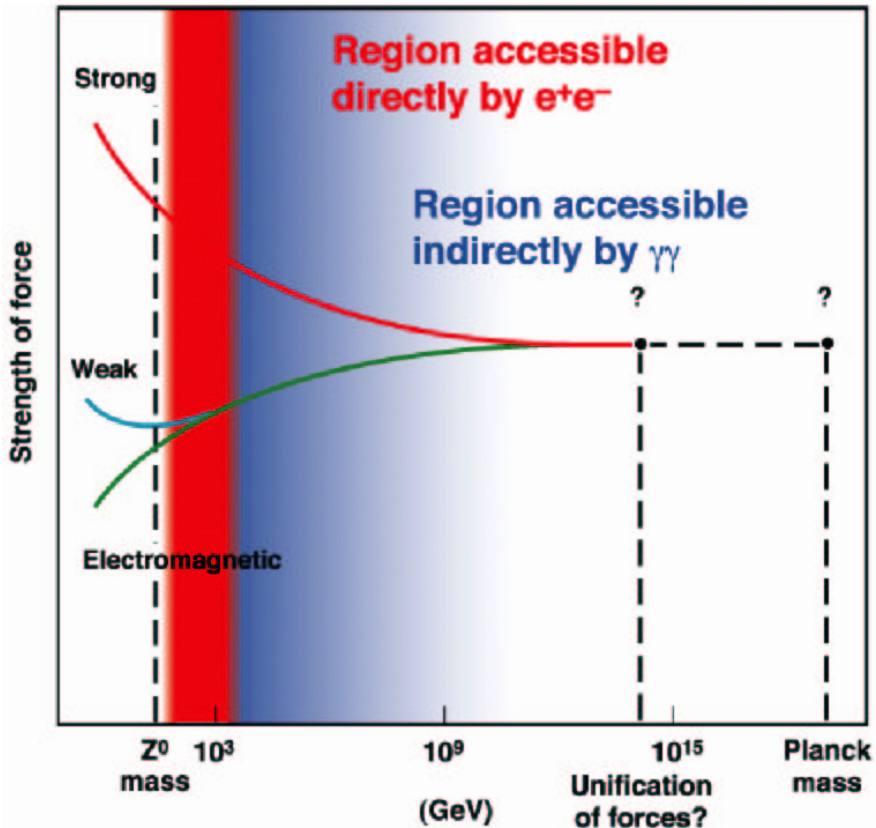
Photon Collider

Fizyka

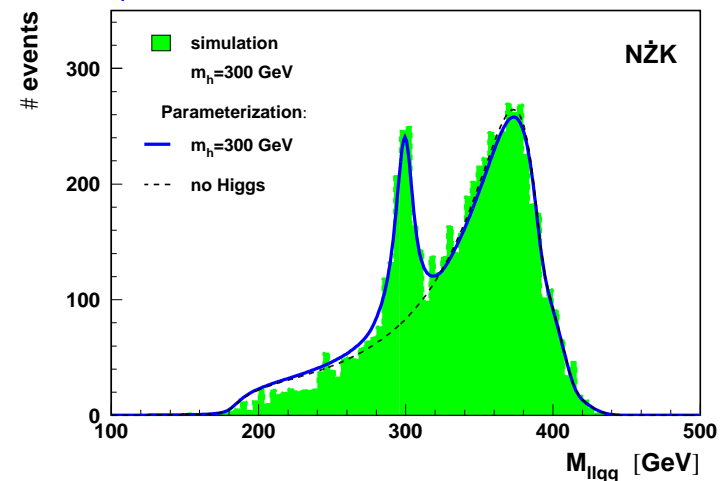
Jedyny kolajder, który może “sięgnąć”
skali unifikacji

Wyniki symulacji prowadzonych w Warszawie:

$$\gamma\gamma \rightarrow h \rightarrow b\bar{b} \quad e^+e^- \text{ beams with } \sqrt{s_{ee}} = 210 \text{ GeV}$$



$$\gamma\gamma \rightarrow h \rightarrow ZZ$$



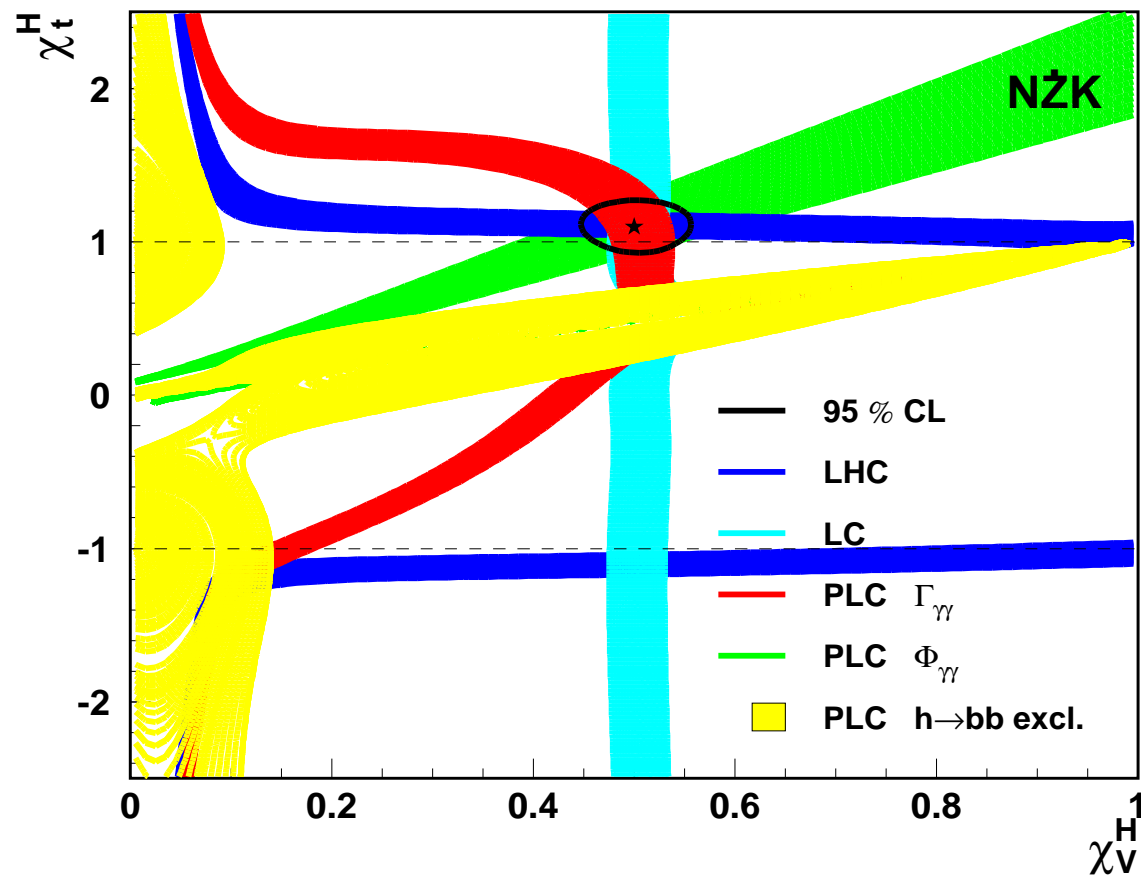
Photon Collider

Komplementarność do LHC i LC

Pomiar sprzężeń bozonu Higgsa do W i t w LHC, LC i kolajderze fotonowym (PLC) \Rightarrow

LHC i LC nie mogą jednoznacznie wyznaczyć sprzężeń (względnego znaku χ_W i χ_t)

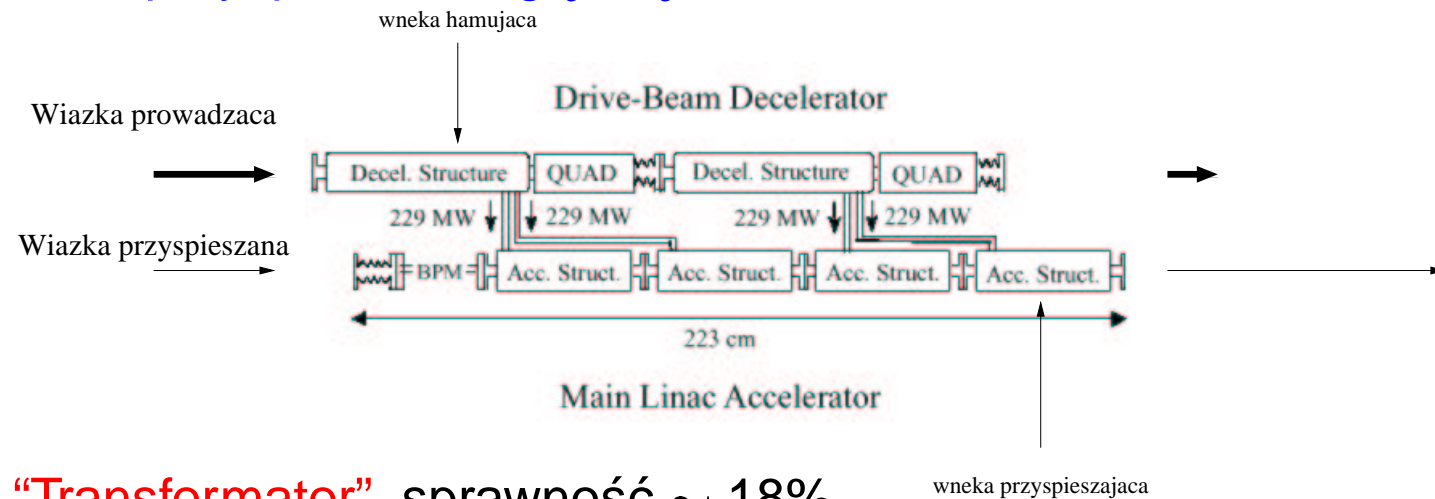
Kolajder fotonowy może okazać się niezbędny do weryfikacji przyjętego modelu teoretycznego.



CLIC

Kolajder e^+e^- następnej generacji

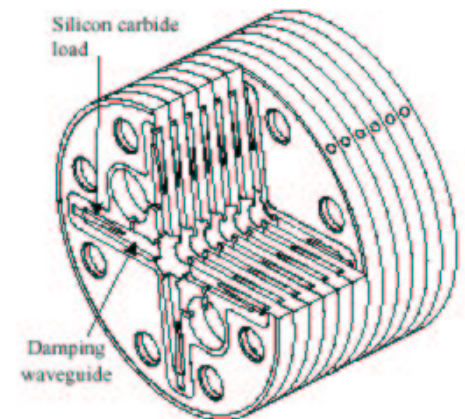
Wiązka prowadząca wytwarza pole elektryczne (falę EM),
które przyspiesza drugą wiązkę:



Wnęka hamująca



Wnęka przyspieszająca



“**Transformer**”, sprawność $\sim 18\%$

- wiązka prowadząca - duży prąd, mała energia
- wiązka przyspieszana - mały prąd \Rightarrow duża energia

Obecnie przygotowywane są testy kolejnego (3) prototypu

Ostateczny projekt ~ 2008 , uruchomienie ~ 2020 (???)

VLHC

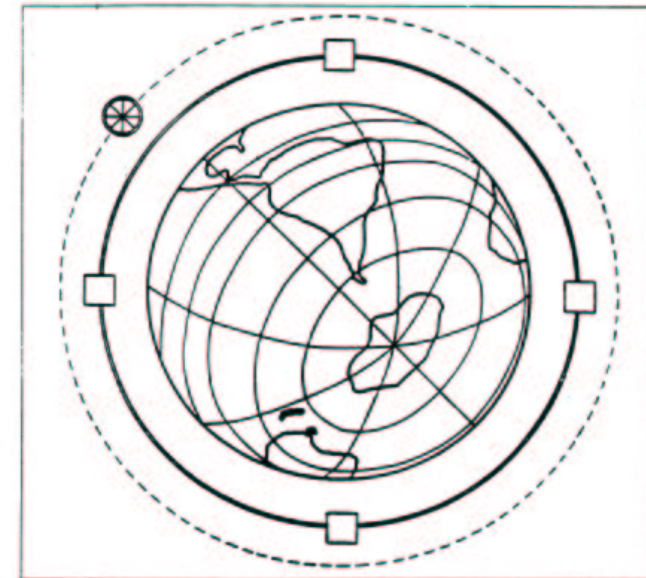
Pomysł

- zbudować jak największy tunel (w granicach rozsądku)
 - wstawić “tani” akcelerator
 - modernizować akcelerator do wyższych energii w miarę rozwoju nowych technologii
- ⇒ kosztą rozłożone na wiele lat
- ⇒ cały czas w czołówce energii

Obecnie rozważana budowa tunelu o obwodzie 233 km w ośrodku FNAL pod Chicago

- Etap I : pole $B \sim 2 \text{ T} \Rightarrow \sqrt{s} \sim 40 \text{ TeV}$
- Docelowo : pole $B \sim 10 \text{ T} \Rightarrow \sqrt{s} \sim 200 \text{ TeV}$

E.Fermi, 1954:

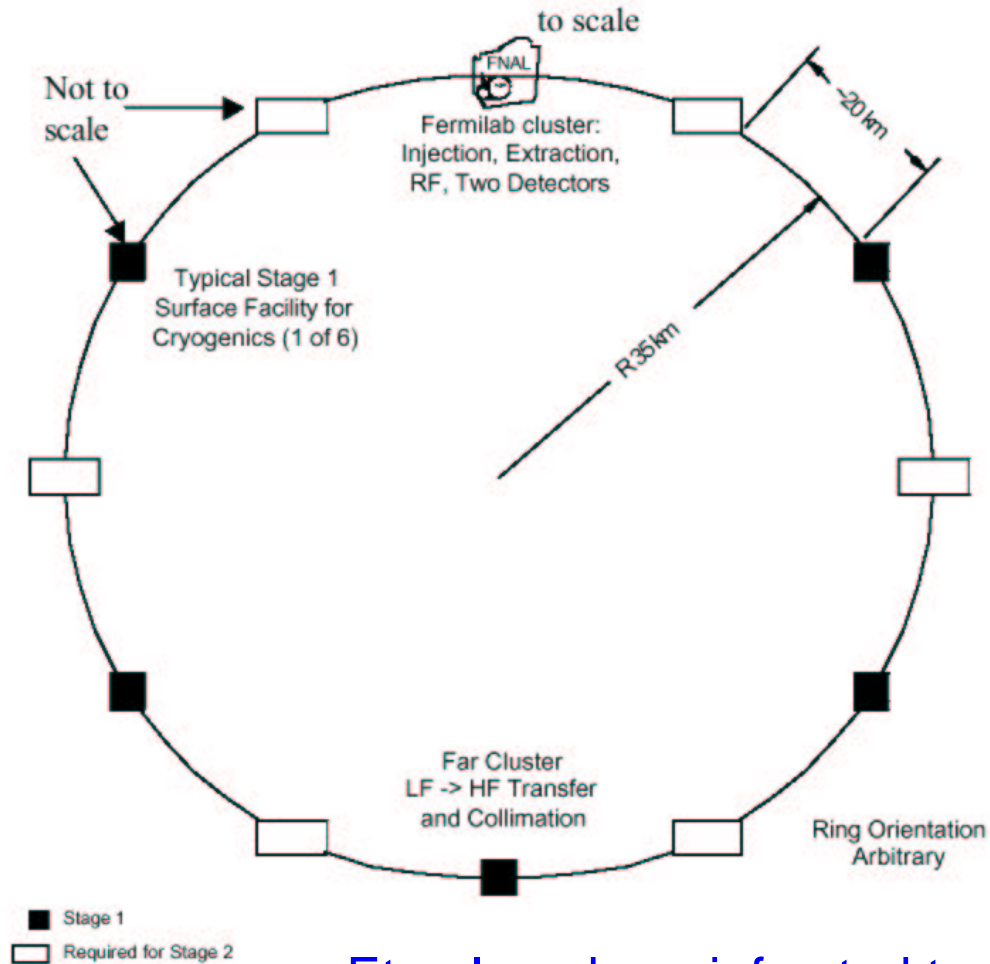


From a 1954 Slide by Enrico Fermi, University of Chicago Special Collections.

VLHC

Propozycja

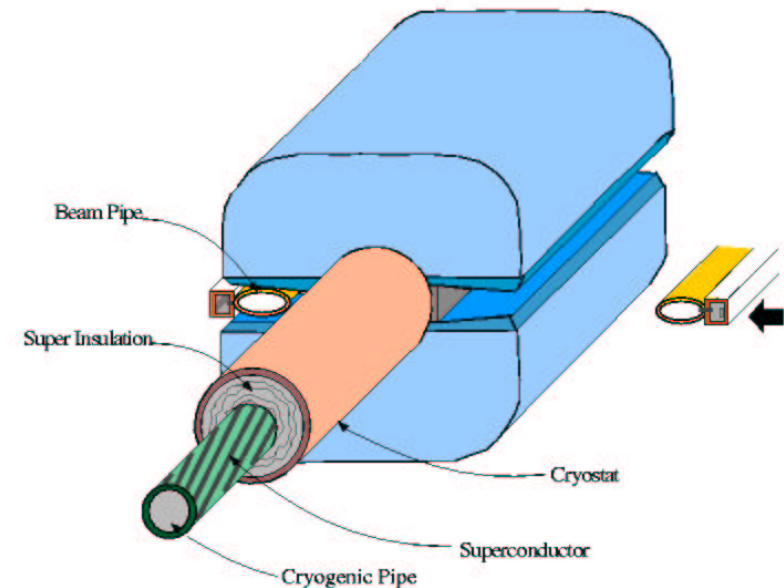
Oba detektory koło siebie ↓ (w Fermilabie)



Etap I : połowa infrastruktury

Magnes dipolowy

Najprostsza (najtańsza) możliwa konstrukcja dla etapu I:



Pojedynczy prosty przewódnik
 $I = 75\text{--}100 \text{ kA} \Rightarrow B \sim 2 \text{ T}$

Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Pierwsze pomysły: ~ 1960

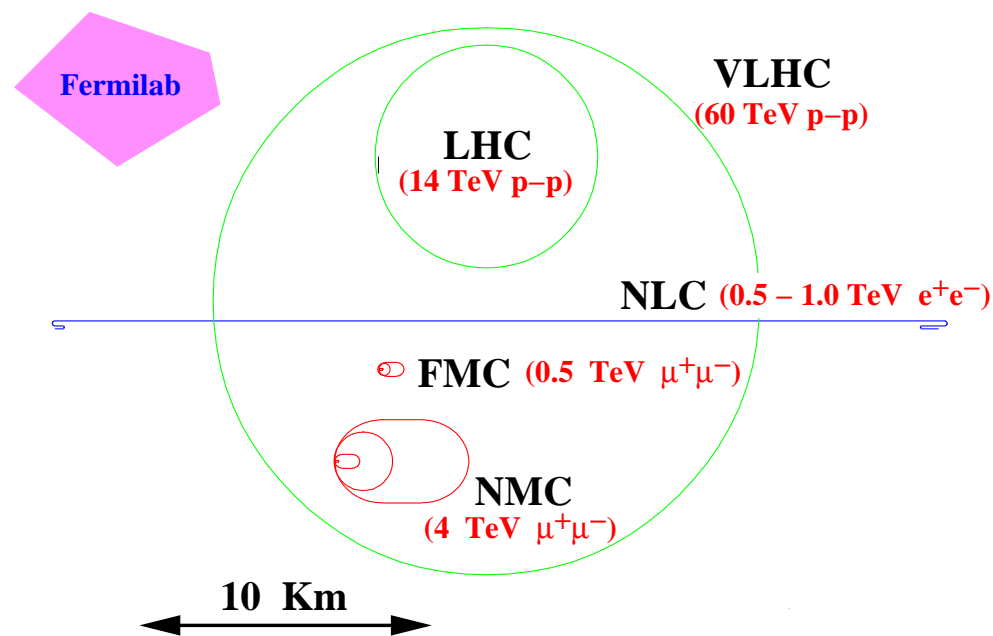
Zalety

$$m_\mu/m_e \approx 207$$

- mniejsze promieniowanie hamowania
- \Rightarrow dużo mniejszy pierścień (koszt !!!)
- \Rightarrow wyższe energie (!)
- \Rightarrow mniejsze rozmycie energii wiązki
- rezonansowa produkcja Higgsa
- fabryka neutrin

Czy to możliwe ?

Czy potrafimy zbudować akcelerator przeciwbieżnych wiązek $\mu^+ \mu^-$?



Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Problem

Teoretycznie potrafilibyśmy zbudować akcelerator $\mu^+ \mu^-$ już dziś.

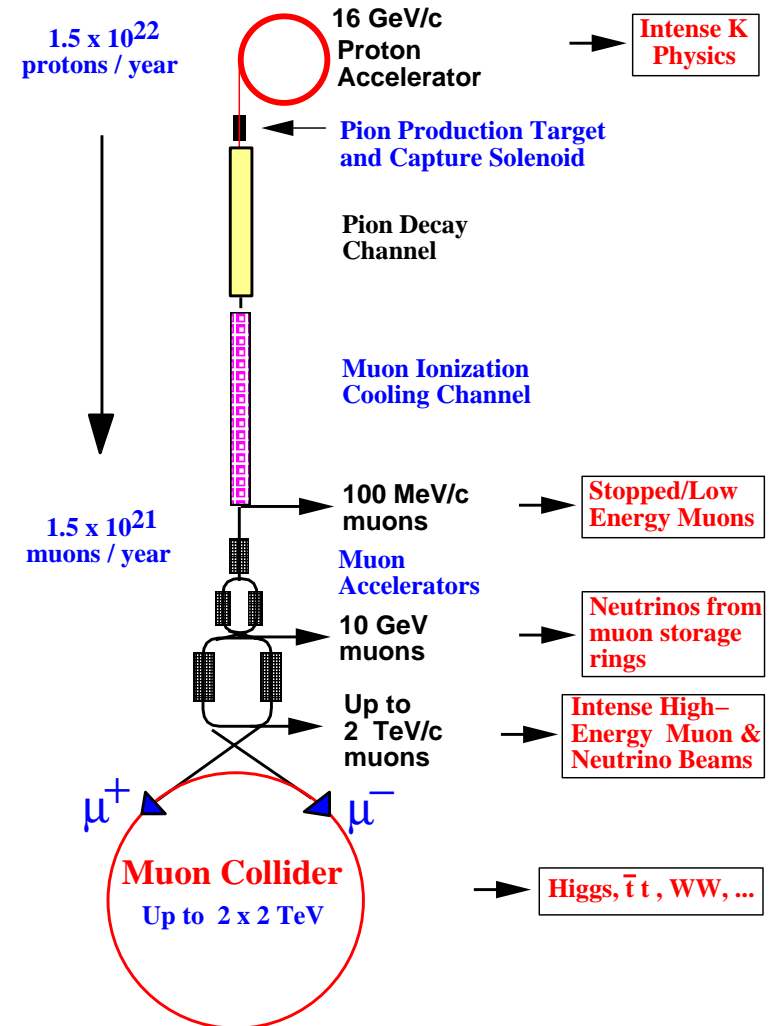
Problem: **światłość**

- produkowane w rozpadach miony mają różne pędy \Rightarrow rozmycie wiązki $\Rightarrow \mathcal{L} \downarrow$
- $\tau_\mu \sim 2 \cdot 10^{-6}$ s - szybko rozpadają się

Wymagania

- intensywne źródło mionów
rozpady π^\pm produkowanych w zderzeniach p -tarcza
- szybkie “chłodzenie” do $p \sim m_\mu$
konieczne dla uzyskania dobrze skolimowanej wiązki
- szybkie przyspieszanie
aby zminimalizować liczbę rozpadów

Muon Collider Schematic



5

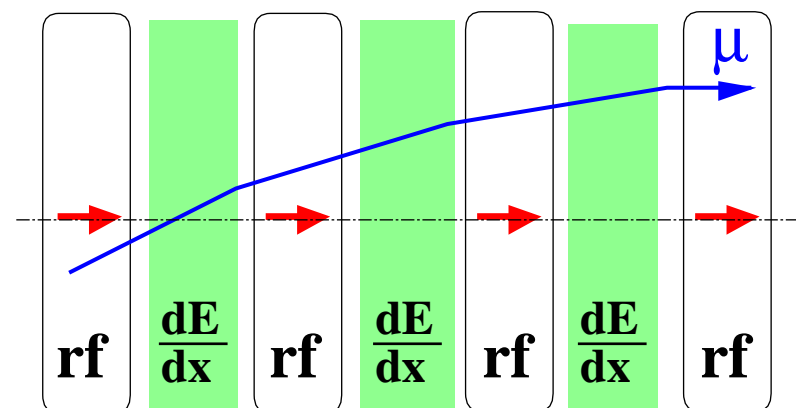
Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Chłodzenie jonizacyjne

Pomysł: Skrinsky i Parkhomchuk, 1981.

- przechodząc przez warstwy absorbera mion traci energię na jonizację
⇒ zmniejszenie wszystkich składowych pędu
- we wnękach przyspieszających mion odzyskuje straconą energię
⇒ tylko podłużną składową pędu

Ionization Cooling



Efekt sumaryczny: **zmniejszenie pędów poprzecznych** wiązki
⇒ lepsze ogniskowanie ⇒ wyższa świetlność

Nie musimy spowalniać mionów do $p \sim 0$
⇒ mniej rozpadów

Zderzenia $\mu^+ \mu^-$

Fabryki neutrin

Rozpady mionów krążących w pierścieniu akumulacyjnym

⇒ intensywne źródło neutrin

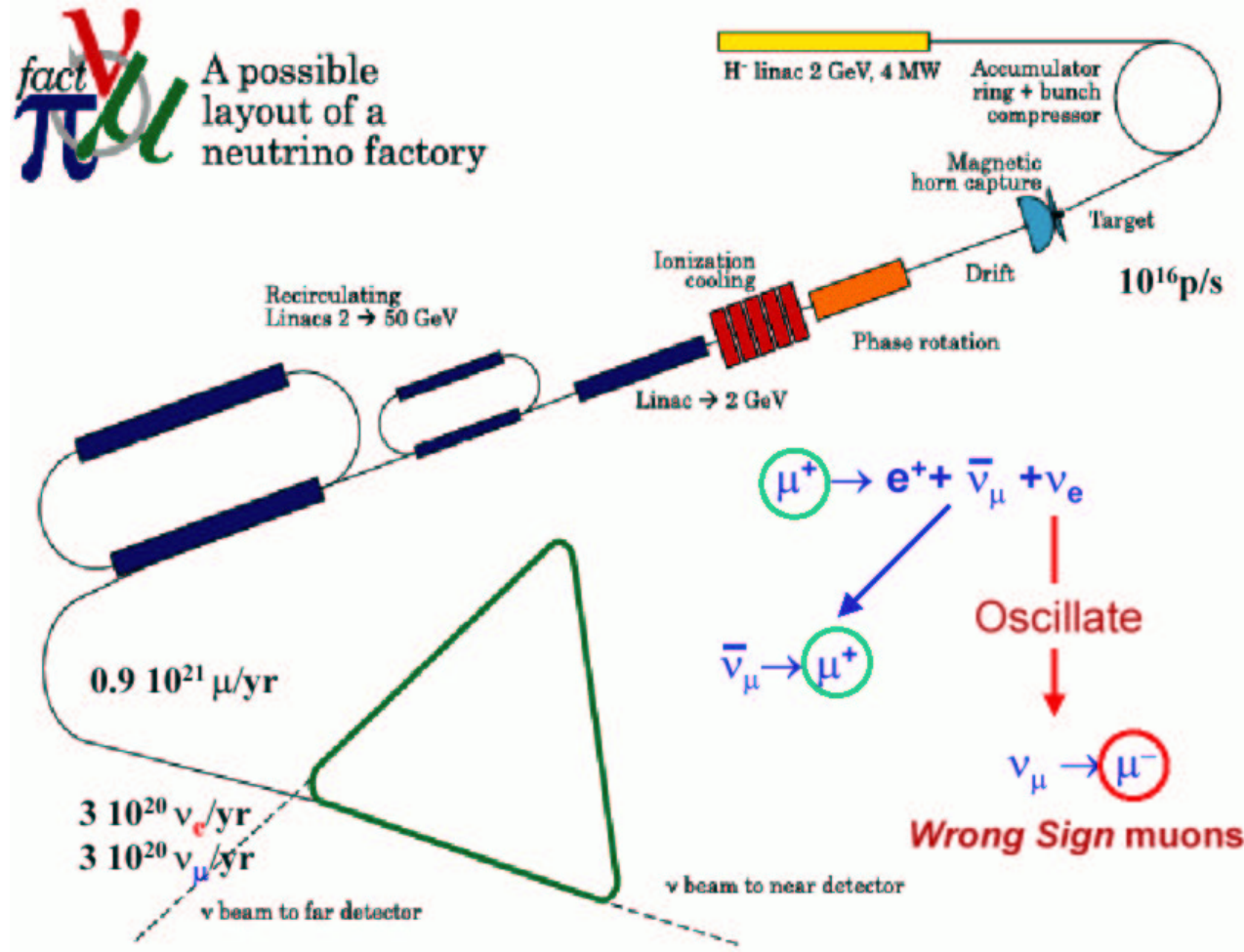
Proste odcinki pierścienia

⇒ "laser" neutrinowy

- b. dobra kolimacja
- wysoka intensywność
- wysoka energia $E_\nu \sim E_\mu$

⇒ nowe era w badaniach neutrin

Dużo łatwiejsze do zbudowania niż akcelerator (collider) $\mu^+ \mu^-$





Where do you prefer to take shifts?



Ostateczny projekt: 2007 (?)

Budowa: ?????

