

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Ciemna strona wszechświata

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



9 stycznia 2024

Termin

- 23 stycznia 2024 (wtorek), godz. 15:15-16:45 (godziny wykładu)

Informacje szczegółowe

- na platformie Kampus, tak jak testy wykładowe
30 pytań wielokrotnego wyboru (jedna odpowiedź poprawna)
przykładowe pytania są udostępnione na stronie wykładu
- Czas przeznaczony na pisanie 90 minut
- O zaliczeniu wykładu decyduje suma punktów z testu końcowego i połowy punktów z testów wykładowych

Zaliczenie

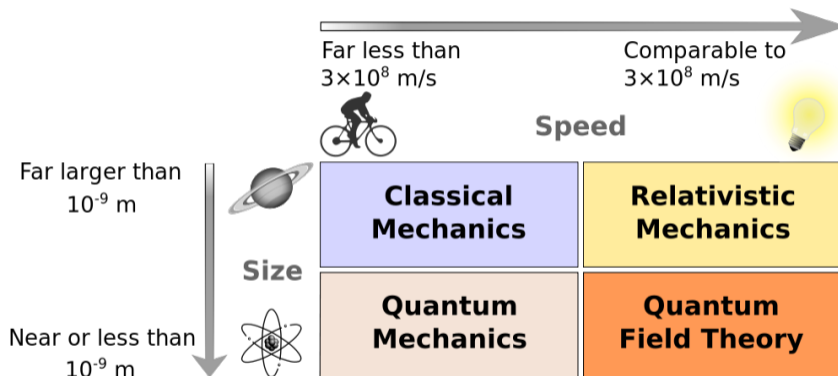
Warunkiem zaliczenia jest

- Uzyskanie minimum 50% punktów z testów
- Systematyczny udział w wykładach (potwierdzony testami wykładowymi) więcej niż 3 nieusprawiedliwione nieobecności ⇒ możliwe obniżenie oceny

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie
- 4 Problemy Modelu Standardowego
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

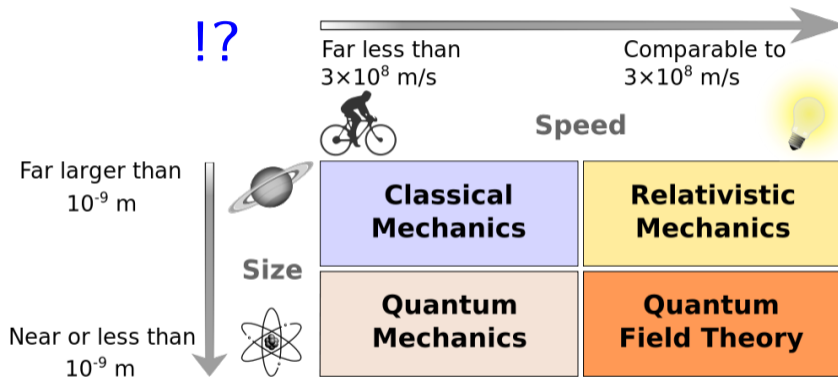
- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie
- 4 Problemy Modelu Standardowego
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

Do tej pory mówiliśmy tylko o efektach **relatywistycznych** i **kwantowych**



Współczesna **fizyka cząstek** posługuje się opisem w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową.

Do tej pory mówiliśmy tylko o efektach **relatywistycznych** i **kwantowych**



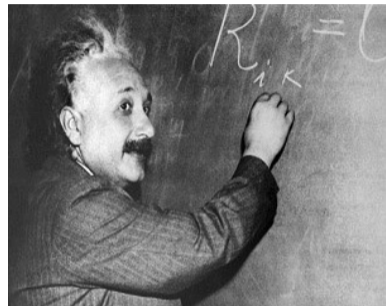
Współczesna **fizyka cząstek** posługuje się opisem w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową.

Ale okazuje się, że odstępstwa od fizyki klasycznej występują też dla dużych obiektów...

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



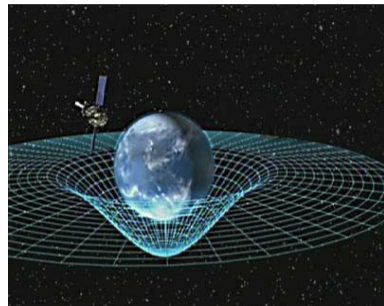
Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**

Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **"swobodnej" materii**



Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

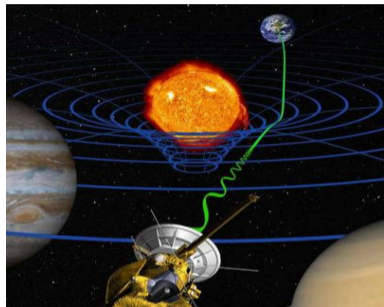
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**

Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu "swobodnej" materii

Najłatwiej to zrozumieć dla **światła**: porusza się ono po trajektoriach odpowiadających **najmniejszej odległości (najszybszej propagacji)** między dwoma zadanymi punktami.

W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!



Ogólna Teoria Względności - model

Ruch pod wpływem siły: (klasyczny opis grawitacji)



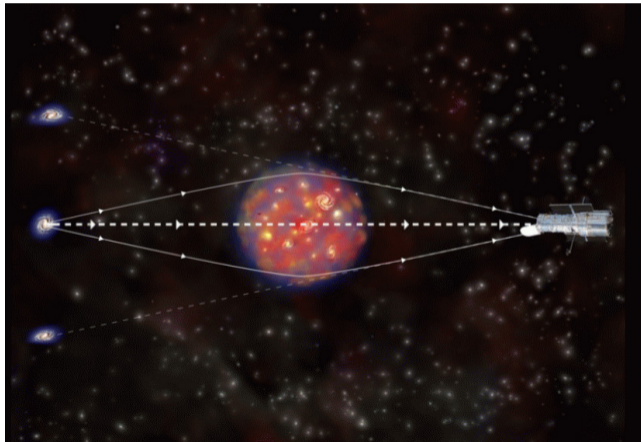
Ogólna Teoria Względności - model

Ruch wynikający z zakrzywienia przestrzeni: (opis Einsteina)



Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o **ruchu materii** i biegu **promieni światła**.



W obecności silnych pól grawitacyjnych może być więcej niż jedna droga...

Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o **ruchu materii** i biegu **promieni światła**.

Kosmiczny Teleskop Hubble'a

Na orbicie okołoziemskiej od
1990 roku!



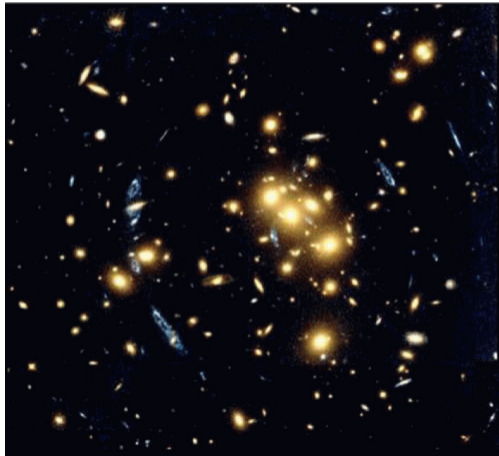
Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o **ruchu materii** i biegu **promieni światła**.

Zdjęcie z Kosmicznego
Teleskopu Hubble'a

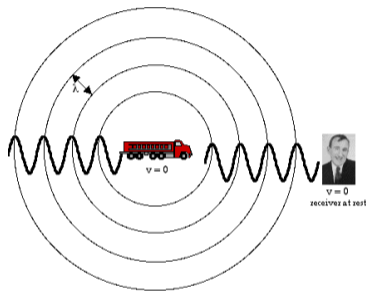
Niebieskie łuki - wielokrotny
obraz odległej galaktyki położonej
za masywną gromadą galaktyk.

⇒ bezpośredni dowód na
zakrzywienie przestrzeni,
poprawność przewidywań OTW



- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie
- 4 Problemy Modelu Standardowego
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

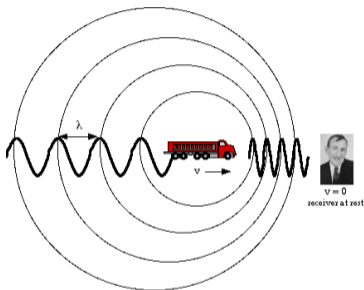
Przypadek klasyczny



W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej** częstotliwości.

Przypadek klasyczny



W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej** częstotliwości.

Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

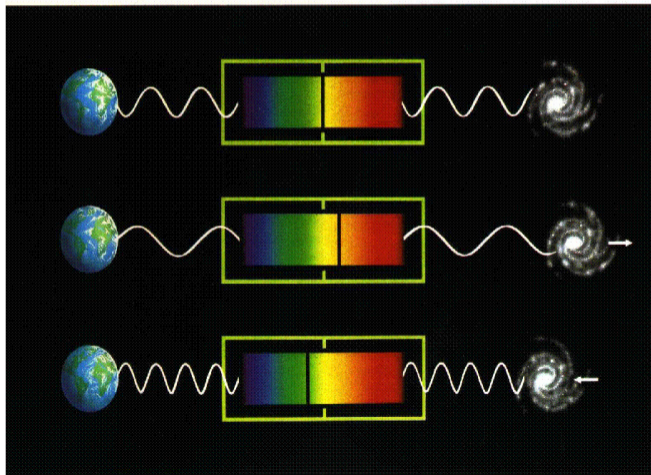
$$f_{obs} = \frac{f}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

Przykłady z życia codziennego

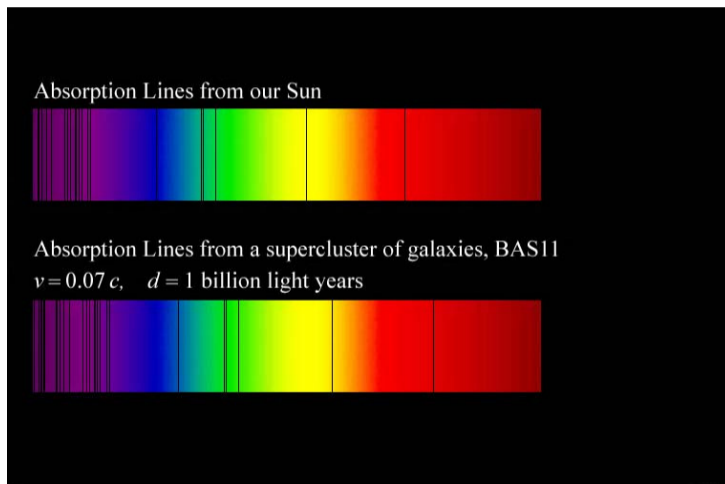


<https://www.youtube.com/watch?v=iOB6-hs-tME>

Mierząc linie charakterystyczne w widmie odległych galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu,

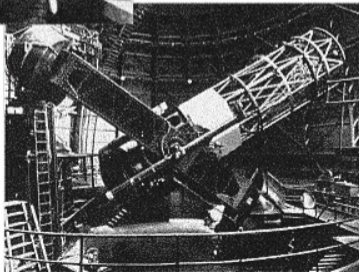
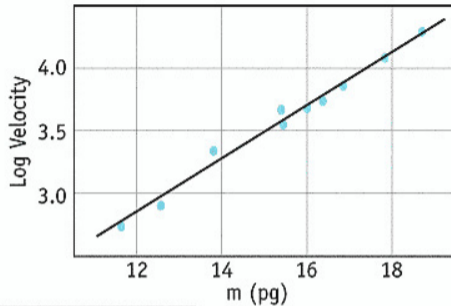


Mierząc linie charakterystyczne w widmie odległych galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu, **wyznaczyć ich prędkość względem nas**





Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

$$v = H \cdot r$$

r - odległość, H - stała Hubble'a

Oryginalne wyniki Hubble'a:

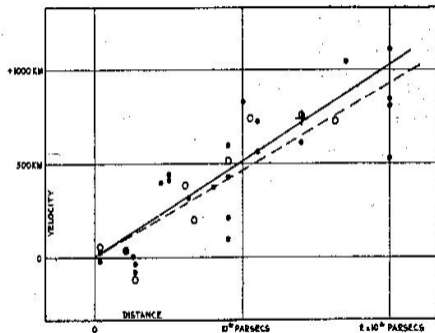


FIGURE 1

Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

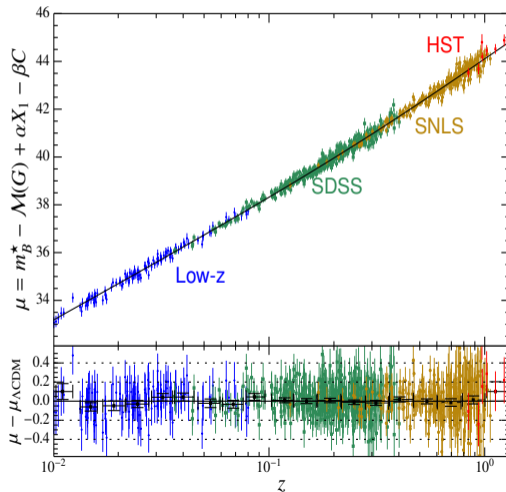
$$v = H \cdot r$$

r - odległość, H - stała Hubble'a

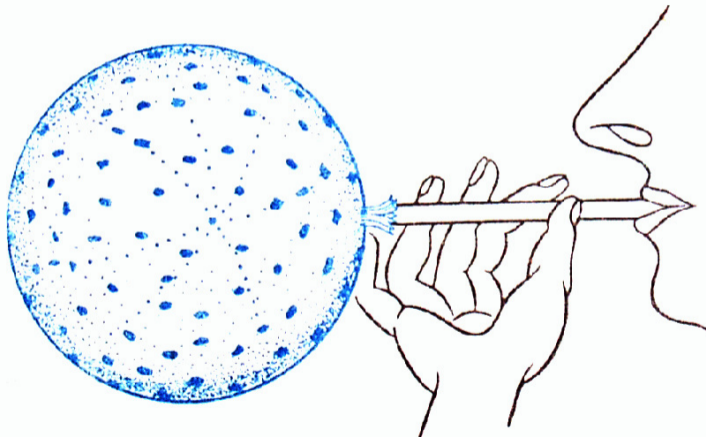
Obecne pomiary: $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

$$1 \text{ Mpc} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Współczesne pomiary:



Obserwacja Hubble'a, że Wszechświat się rozszerza, **wszystkie** obiekty oddalają się od nas, **nie wyróżnia** w żaden sposób **naszego układu** odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow "skala kosmologiczna"

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow "skala kosmologiczna"

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

Big Bang

Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow "skala kosmologiczna"

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

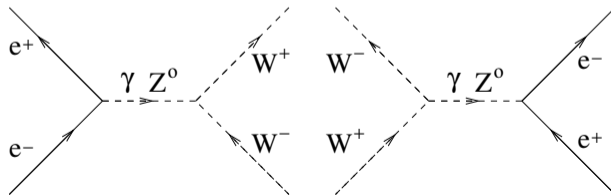
Wielki Wybuch

Na samym początku **gęstość energii** była bardzo duża.

Na poziomie cząstek oznacza to, że cząstki miały bardzo duże **energie kinetyczne**, znacznie większe od ich mas.

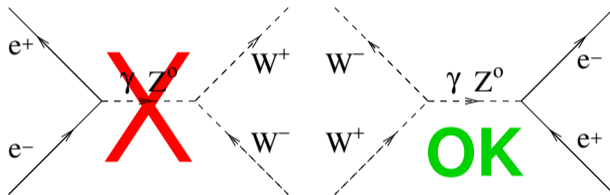
Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

Wszystkie cząstki elementarne znajdowały się w **stanie równowagi**, gdyż nieustannie zachodziły procesy **anihilacji i kreacji**.



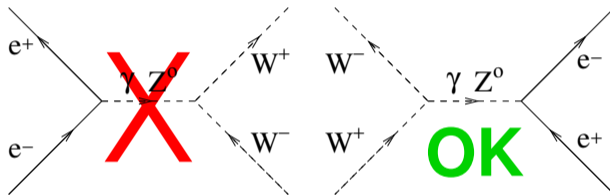
Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,
a zaczynają powstawać **stany związane**:



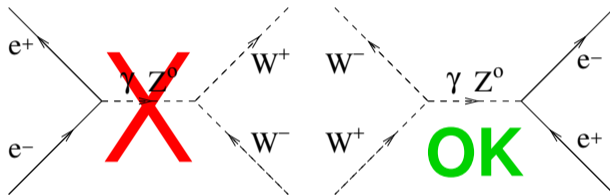
- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,
a zaczynają powstawać **stany związane**:



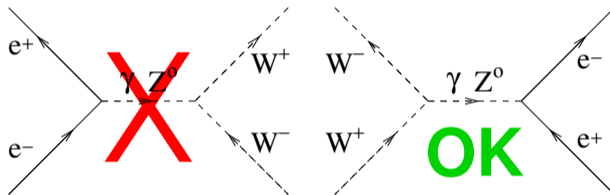
- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,
a zaczynają powstawać **stany związane**:



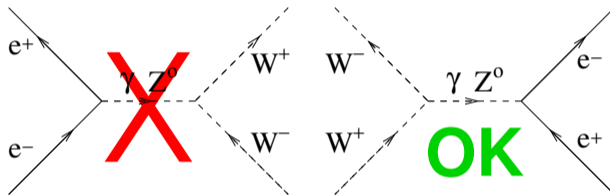
- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,
a zaczynają powstawać **stany związane**:

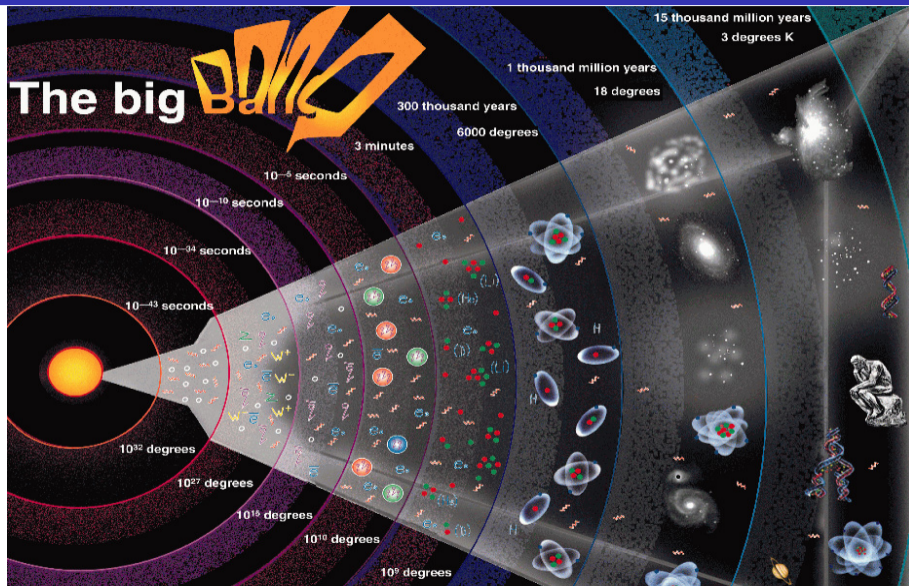


- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,
a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)
- formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach (1 Gy)



Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** czasoprzestrzeni i zależy od **gęstości** materii ρ .

Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \quad \sim 10 \text{ atomów } H \text{ w } m^3$

$$\rho = \rho_c$$

asymptotycznie “zatrzyma” się

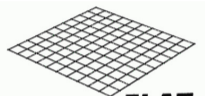
$$\rho < \rho_c$$

będzie zawsze rozszerzał się

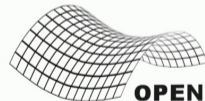
$$\rho > \rho_c$$

kiedyś zacznie się zapadać

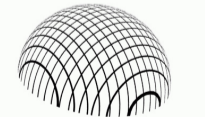
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



FLAT



OPEN



CLOSED

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie**
- 4 Problemy Modelu Standardowego
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia “światlista”

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho/\rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia “światlista”

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
⇒ materia “barionowa”

$$\Omega_b \sim 0.05$$

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia "światlista"

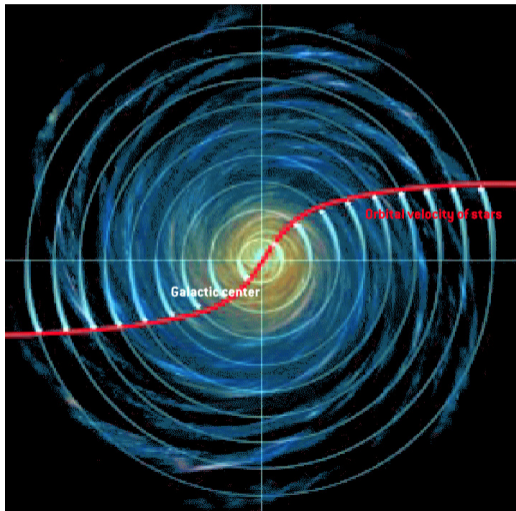
$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
⇒ materia "barionowa"

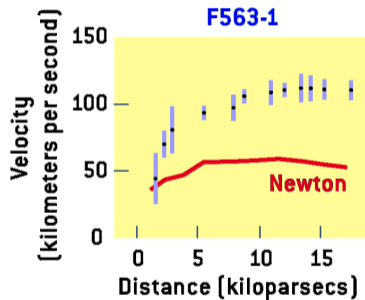
$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk, ewolucja struktur)
⇒ materia "grawitacyjna" (całkowita ?)

Ciemna materia?

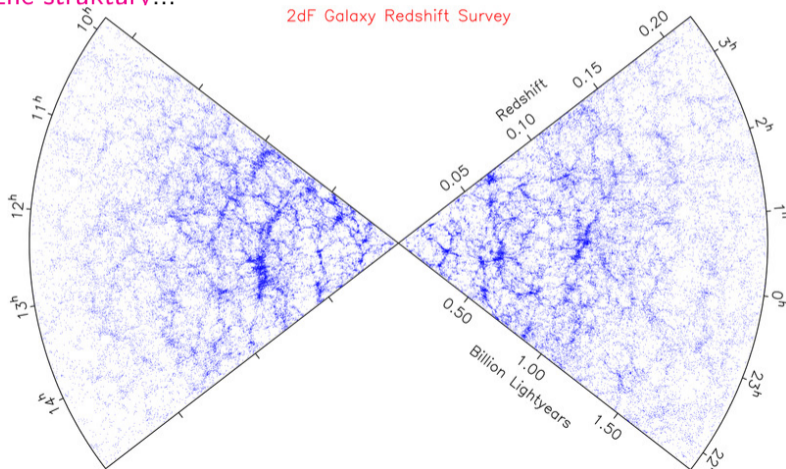


Znane nam rozkład “zwykłej” materii nie tłumaczy krzywych rotacji galaktyk.

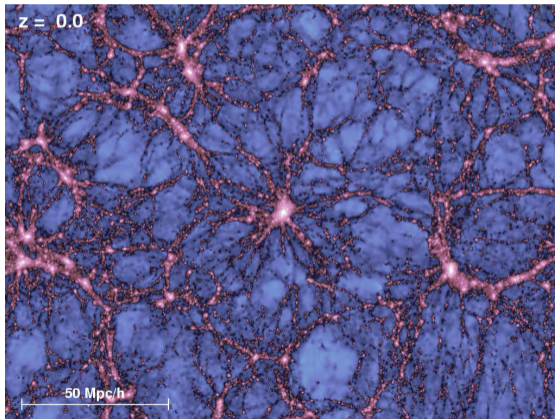


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z przyjętych praw grawitacji i dynamiki

Mierząc przesunięcia ku czerwieni dla około setek tysięcy galaktyk otrzymaliśmy **trójwymiarową mapę** Wszechświata. Rozkład galaktyk, nawet na największych skalach nie jest jednorodny. Widzimy **wyraźne struktury**...



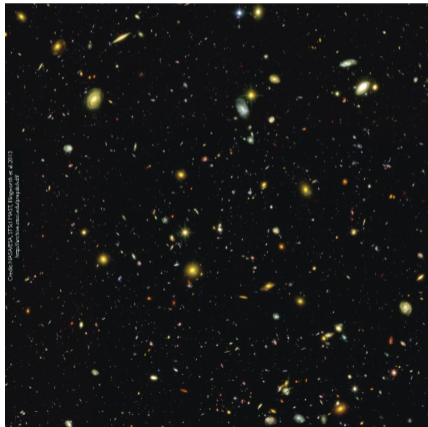
Od momentu powstania atomów to **oddziaływania grawitacyjne** rządzą **ewolucją wszechświata**.
Potrafimy to dokładnie modelować.



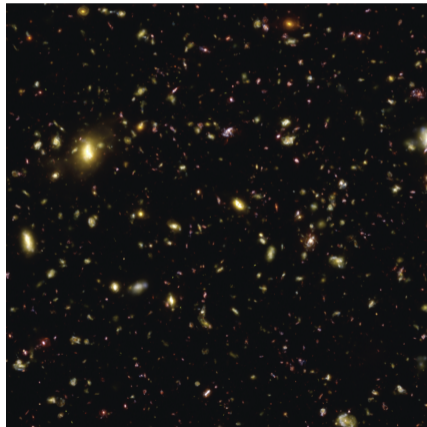
Millennium Simulation: https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/data_vis/index.shtml

Okazuje się, że sama **materia barionowa nie pozwala** opisać **obecnych struktur** Wszechświata, powstawałyby zbyt wolno... Żeby je odtworzyć trzeba dodać wkład **ciemnej materii**:

Obserwacje teleskopu Hubble'a



Wynik symulacji



Illustris project: <https://www.illustris-project.org/media/>

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia "światlista"

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
⇒ materia "barionowa"

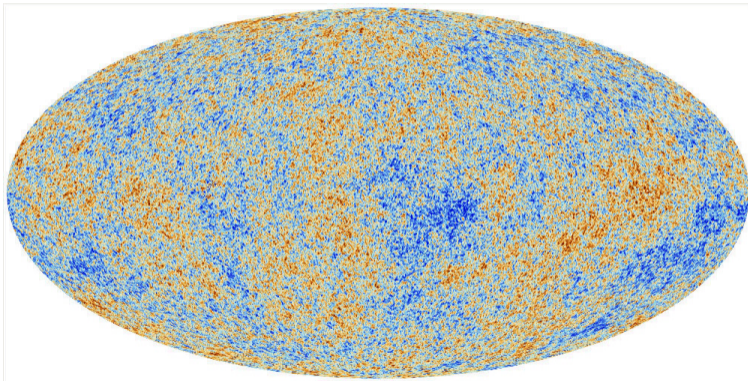
$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk, ewolucja struktur)
⇒ materia "grawitacyjna" (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

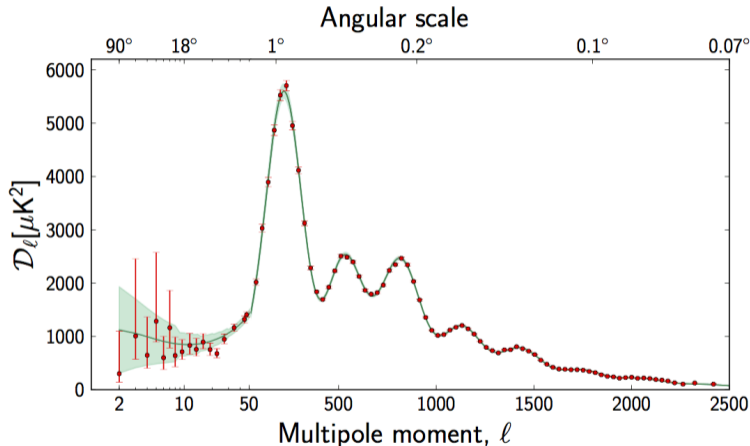
$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow$ ciemna materia !?

Wystrzelony w 2009 roku satelita Planck pozwolił na bardzo dokładny pomiar niejednorodności CMB. Ostateczne wyniki przedstawiono w 2018:



Promieniowanie przemierzało Wszechświat przez ponad 13 mld. lat
Mimo to nie widzimy żadnych “zniekształceń” czasoprzestrzeni \Rightarrow **Wszechświat jest płaski!**

Dopasowanie modelu do rozkładu rozmiarów fluktuacji promieniowania tła:



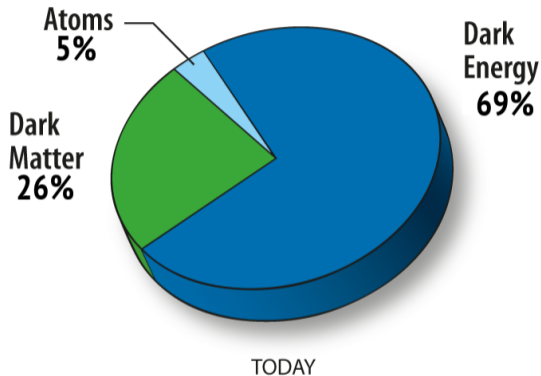
Rozmiar fluktuacji wskazuje na $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda \approx 1 \pm 0.0025$

Poza materią i ciemną materią (Ω_m) musi być jeszcze dodatkowy wkład (Ω_Λ)...

Model Λ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

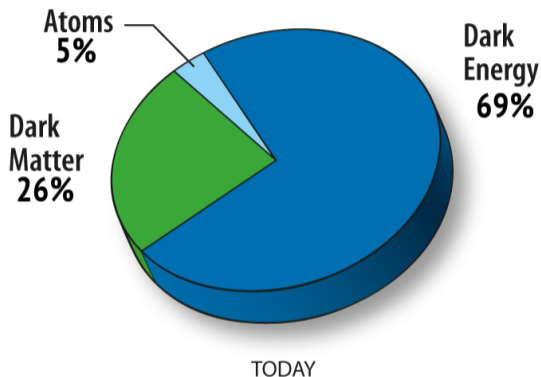
- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia...** (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez tzw. **stałą kosmologiczną (Λ)**



Model Λ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia...** (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez tzw. **stałą kosmologiczną (Λ)**



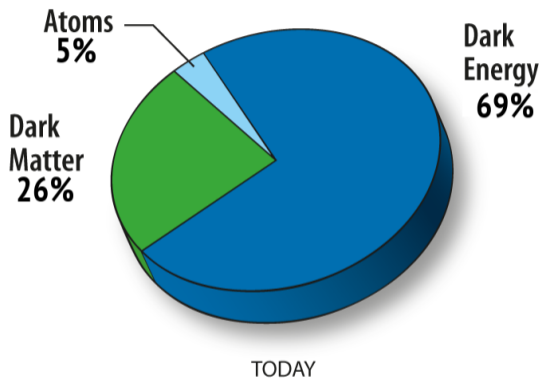
Einstein dodał stałą kosmologiczną do równań OTW, żeby "uratować" **statyczny Wszechświat...**

Potem uważał, że to była jego największa pomyłka...

Model Λ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia...** (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez tzw. **stałą kosmologiczną (Λ)**



Wszechświat zdominowany obecnie przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej** (!)

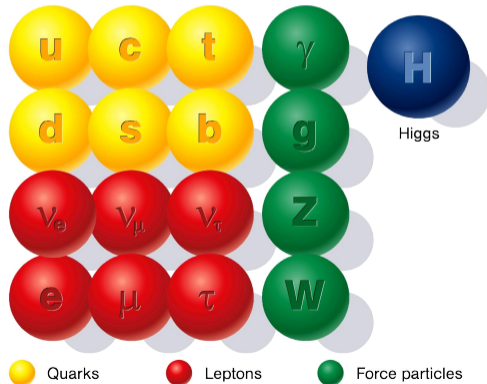
Wiek Wszechświata: $T = 13.787 \pm 0.020$ Gyr

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie
- 4 Problemy Modelu Standardowego**
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgosa
konieczny dla spójności modelu
“Nadaje masy” wszystkim cząstkom



Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowych teorii pola (Quantum Field Theory, QFT).

Podstawą tego opisu jest zawsze dostrzeżenie **lokalnych symetrii cechowania**

- symetria względem obrotu fazy funkcji falowej: $U(1)$
⇒ opis **oddziaływań elektromagnetycznych** (QED), foton
- symetria względem zamiany kolorów cząstek: $SU(3)$
⇒ opis **oddziaływań silnych** (QCD), gluony
- symetria względem zamiany cząstek w dubletach: $SU(2)$
⇒ opis **oddziaływań słabych** (model Weinberg'a-Salam'a), W^\pm , Z^0

$$SM \equiv U(1) \times SU(2) \times SU(3)$$

+ spontaniczne łamanie symetrii konieczne do wytłumaczenia mas...

Wszystkie wyniki **przewodzonych przez nas** doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

Problemy w zrozumieniu wyników pomiarów

- Gdzie się podziała **antymateria** we Wszechświecie?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ? Dlaczego **oscylują** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?

Wszystkie wyniki **przewodzonych przez nas** doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

Problemy w zrozumieniu wyników pomiarów

- Gdzie się podziała **antymateria** we Wszechświecie?
- Jakie są źródła **łamania CP** ?
- Jaka jest natura **neutrin** ? Dlaczego **oscylują** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?

Obserwacje kosmologiczne:

- Co to jest "**ciemna materia**" ?
- Co to jest "**ciemna energia**" !?

Wszystkie wyniki prowadzonych przez nas doświadczeń zgadzają się bardzo dobrze z przewidywaniami Modelu Standardowego.

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

Problemy w konstrukcji samego modelu

- Dlaczego **materia** \equiv **fermiony**, **oddziaływania** \equiv **bozony** ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczba leptonowa** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Rozbieżne poprawki - “**problem hierarchii**” ?
Aby model “działał” trzeba dobrać jego parametry z niezwykłą precyzją...
- Jak uwzględnić opis **grawitacji**?

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Prawo Hubble'a i ewolucja Wszechświata
- 3 Gęstość materii we Wszechświecie
- 4 Problemy Modelu Standardowego
- 5 Rozszerzenia Modelu Standardowego
 - Teorie Wielkiej Unifikacji
 - Supersymetria
 - Dodatkowe wymiary

Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Musi istnieć **bardziej fundamentalna, ogólniejsza teoria**, która opisuje wszystkie znane procesy i odpowiada na wszystkie nasze pytania.

Model Standardowy byłby tylko jej niskoenergetycznym przybliżeniem.

Tak jak Model Fermiego był przybliżeniem Modelu Weingerg’a-Salam’a oddziaływań słabych...

Rozszerzenia Modelu Standardowego

Zarówno wyniki obserwacji (głównie kosmologicznych) jak i rozważania teoretyczne sugerują, że Model Standardowy nie może być “Ostateczną Teorią Wszystkiego”.

Musi istnieć **bardziej fundamentalna, ogólniejsza teoria**, która opisuje wszystkie znane procesy i odpowiada na wszystkie nasze pytania.

Model Standardowy byłby tylko jej niskoenergetycznym przybliżeniem.

Tak jak Model Fermiego był przybliżeniem Modelu Weingerg’a-Salam’a oddziaływań słabych...

Fizycy teoretycy od ponad 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać otaczający nas Wszechświat...

Fizycy doświadczalnicy budują coraz to wymyślniejsze urządzenia, w tym ogromne akceleratory **(ale nie tylko)**, żeby szukać śladów “nowej fizyki”...

Stałe sprzężenia

Przy skali $M_W^2 \sim M_Z^2$ mamy:

$$\alpha_s \approx 0.118$$

$$\alpha_{em} \approx 0.0078$$

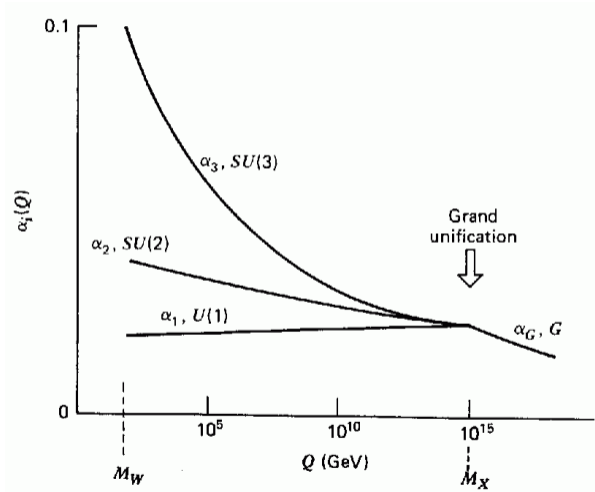
$$\frac{\alpha_s}{\alpha_{em}} \sim 15$$

Jednak ze wzrostem energii

α_{em} rośnie, natomiast α_s maleje

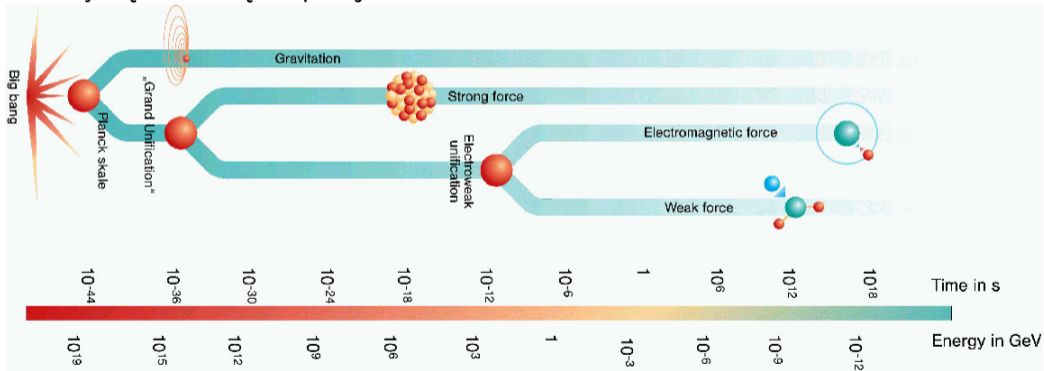
Dla skal energii $\sim 10^{15}$ GeV:

⇒ **unifikacja** oddziaływań **elektromagnetycznych**, **słabych** i **silnych** !



Ewolucja Wszechświata

Sądzymy, że w chwili **wielkiego wybuchu** wszystkie oddziaływania były **zunifikowane** i “rozdzieliły się” w miarę ekspansji Wszechświata



Badając zderzenia cząstek przy bardzo wysokich energiach “cofamy się w czasie”...

Sukces modelu Weinberga-Salama (unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych) oraz “zbieganie” stałych sprzężenia
⇒ duże zainteresowanie hipotezą wielkiej unifikacji.

Model Standardowy – symetria $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

- QED: symetria względem obrotu fazy funkcji falowej $U(1)$
⇒ każda cząstka oddziałuje “samodzielnie”
- Oddziaływania słabe: symetria $SU(2)$
⇒ oddziaływanie sprzęga cząstki w dubletach, np. $(e^- \nu_e)$, $(u d)$
- Oddziaływania silne: symetria $SU(3)$
⇒ oddziaływanie sprzęga stany kolorowe $(R G B)$ - triplety stanów

Sukces modelu Weinberga-Salama (unifikacja oddziaływań elektromagnetycznych i słabych) oraz “zbieganie” stałych sprzężenia
⇒ duże zainteresowanie hipotezą wielkiej unifikacji.

Model Standardowy – symetria $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

- QED: symetria względem obrotu fazy funkcji falowej $U(1)$
⇒ każda cząstka oddziałuje “samodzielnie”
- Oddziaływania słabe: symetria $SU(2)$
⇒ oddziaływanie sprzęga cząstki w dubletach, np. $(e^- \nu_e)$, $(u d)$
- Oddziaływania silne: symetria $SU(3)$
⇒ oddziaływanie sprzęga stany kolorowe $(R G B)$ - triplety stanów

Jeśli przy wysokich energiach wszystkie oddziaływania miałyby zostać zastąpione jednym “uniwersalnym” oddziaływaniem, to i grupy symetrii oddziaływań musiałyby zostać zastąpione jedną ogólniejszą grupą symetrii...

Teoria SU(5)

Jeśli przy **wysokich energiach** wszystkie oddziaływania miałyby zostać zastąpione jednym **“uniwersalnym” oddziaływaniem**, to i ich grupy symetrii musiałyby zostać “połączone”...

Najprostszą grupą cechowania zawierającą jako **podgrupy** symetrie Modelu Standardowego U(1), SU(2) i SU(3) jest SU(5)

Model **wielkiej unifikacji** oparty na grupie symetrii SU(5) zaproponowali **Georgi i Glashow** już w **1974** roku. Przewidywana **skala unifikacji**:

$$M_X \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ GeV}$$

Teoria **GUT** - Grand Unified Theory

W modelu SU(5) **kwarki** i **leptony** występują we **wspólnych multipletach**. Wszystkie oddziaływania działają w ramach tych multipletów (które zastępują **oddzielne dublety i triplety oddziaływań słabych i silnych**)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \\ \bar{d}_{\bar{R}} \\ \bar{d}_{\bar{G}} \\ \bar{d}_{\bar{B}} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{u}_{\bar{R}} \\ \bar{u}_{\bar{G}} \\ \bar{u}_{\bar{B}} \\ u_R \\ u_G \\ u_B \\ d_R \\ d_G \\ d_B \end{pmatrix}$$

Teoria SU(5)

Bozony W^\pm , Z^0 , fotony i gluony są odpowiedzialne tylko za część możliwych przejść przejść między stanami danego multipletu.

Aby opisać pozostałe przejścia musimy wprowadzić nowe bozony X i Y

Masa bozonu X jest skalą unifikacji:

$$M_X \sim 10^{15} \text{ GeV}$$

Dlatego nie zauważyliśmy jeszcze tych dodatkowych oddziaływań...

Kwintet SU(5)

	d_R^{red}	d_R^{green}	d_R^{blue}	e_R^+	$\bar{\nu}_e$
d_R^{red}	g^0, γ, Z^0	$g^{r \cdot g}$	$g^{r \cdot b}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{red}}$	$X_{-\frac{1}{3}}^{\text{red}}$
d_R^{green}	$g^{g \cdot r}$	g^0, γ, Z^0	$g^{g \cdot b}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{green}}$	$X_{-\frac{1}{3}}^{\text{green}}$
d_R^{blue}	$g^{b \cdot r}$	$g^{b \cdot g}$	g, γ, Z^0	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$	$X_{-\frac{1}{3}}^{\text{blue}}$
e_R^+	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{red}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{green}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$	γ, Z^0	W^+
$\bar{\nu}_e$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{red}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{green}}$	$X_{\frac{2}{3}}^{\text{blue}}$	W^-	Z^0

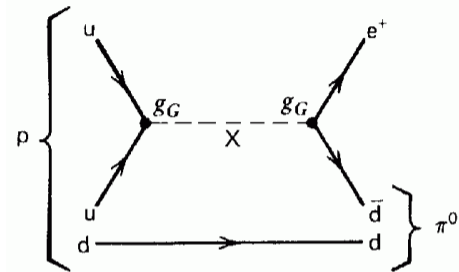
Rozpad protonu

Model $SU(5)$ przewiduje rozpad protonu

$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W $1t$ wody spodziewamy się ok. 1 rozpadu dziennie.
Są też możliwe inne kanały rozpadu...



Rozpad protonu

Model $SU(5)$ przewiduje **rozpad protonu**

$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W **1t** wody spodziewamy się ok. **1 rozpadu dziennie**.

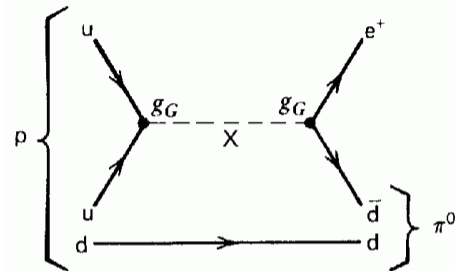
Są też możliwe inne kanały rozpadu...

Dla szukania rozpadu protonu zbudowano **szereg eksperymentów**, m.in. **Super Kamiokande (!)**

Niestety **wyniki** wszystkich dotychczasowych poszukiwań są **negatywne**. Obecne ograniczenie

($p \rightarrow e^+ \pi^0$):

$$\tau_p > 1.6 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$



Rozpad protonu

Model $SU(5)$ przewiduje **rozpad protonu**

$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$

$$\tau_p \sim 10^{27} \text{ lat}$$

W **1t** wody spodziewamy się ok. **1 rozpadu dziennie**.

Są też możliwe inne kanały rozpadu...

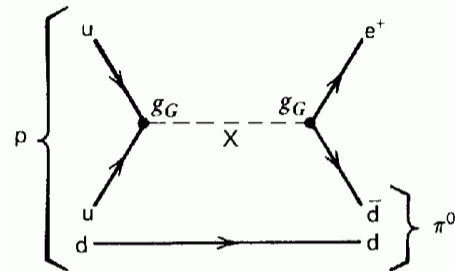
Dla szukania rozpadu protonu zbudowano **szereg eksperymentów**, m.in. **Super Kamiokande (!)**

Niestety **wyniki** wszystkich dotychczasowych poszukiwań są **negatywne**. Obecne ograniczenie

($p \rightarrow e^+ \pi^0$):

$$\tau_p > 1.6 \cdot 10^{34} \text{ lat}$$

⇒ teoria GUT oparta na $SU(5)$ jest już dziś wykluczona...



Skale masowe SM

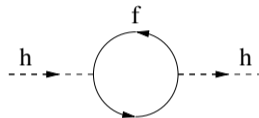
neutrino	$\sim 10^{-11}$ GeV
elektron	$\sim 10^{-3}$ GeV
W^\pm, Z^0, h (?)	$\sim 10^{+2}$ GeV
top	$\sim 2 \cdot 10^{+2}$ GeV
	“pustynia” \updownarrow
GUT M_X	$\sim 10^{+15}$ GeV
M_{Pl}	$\sim 10^{+19}$ GeV

Masa Planka (M_{Pl}):

skala **unifikacji** dla **grawitacji**,

skala przy której grawitacja staje się “silna”

Czy **Model Standardowy** może pozostać słuszny aż do skali M_X ? Problem z **masą Higgosa**:



Poprawki związane z **pętlami** fermionowymi rosną jak M_X^2 ...

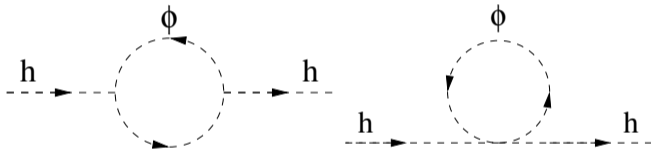
Aby uzyskać $m_h = 125$ GeV musimy niesłychanie precyzyjnie dobrać parametry modelu ($\delta \sim 10^{-15}$)

\Rightarrow “**problem hierarchii**”

Teoretycy nie lubią tzw. “**fine tuning**”...

Problem hierarchii

Problem **rozbieżnych poprawek** do masy Higgsa **nie pojawia się** jeśli **dla każdego fermionu** w teorii dodamy dokładnie mu **odpowiadające bozony**. Poprawki od pętli bozonowych:



mają **przeciwny znak** i kasują rozbieżności fermionowe!

Pozostają jedynie **skończone wkłady**, proporcjonalne do **różnic mas** bozonów i fermionów.

⇒ możemy “uratować” m_h jeśli dodamy do teorii **nowe cząstki** (bozony) przy skalach $\sim 1 \text{ TeV}$...

Podstawy teorii

Zaproponowana ~ 1970 na podstawie **czysto teoretycznych** spekulacji...

Supersymetria: symetria łącząca cząstki o **różnych spinach**.

Podstawowe założenia:

- Zachowujemy grupę cechowania $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$
- Każdej znanej **cząstce** dodajemy jej **“super-partnera”** o spinie różnym o $\frac{1}{2}$:

fermion ($s=\frac{1}{2}$) \rightarrow sfermion ($s=0$)

kwark \rightarrow skwark

lepton \rightarrow slepton

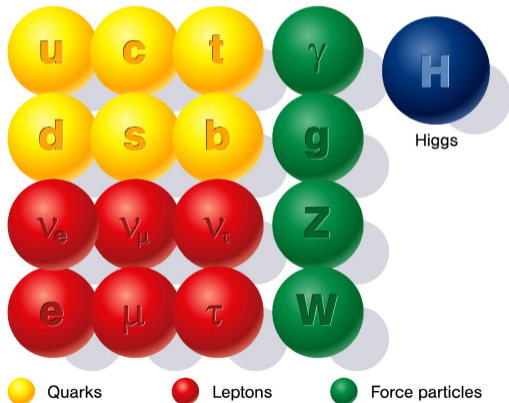
bozon
cechowania ($s=1$) \rightarrow gaugino ($s=\frac{1}{2}$)

Higgs ($s=0$) \rightarrow higgsino ($s=\frac{1}{2}$)

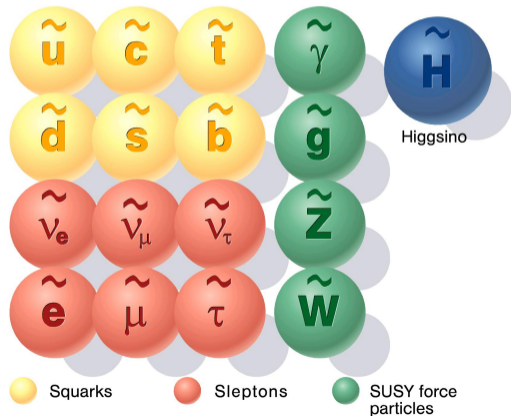
Widmo cząstek

W pierwszym przybliżeniu podwajamy liczbę cząstek w modelu

Standard particles



SUSY particles



Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów

Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie $1/2$) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo \tilde{e}_L i \tilde{e}_R), które są partnerami dwóch stanów spinowych e_L i e_R
 - ⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tą samą masę)

Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie 1/2) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo \tilde{e}_L i \tilde{e}_R), które są partnerami dwóch stanów spinowych e_L i e_R
⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tą samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa
⇒ potrzebne dwa dublety pól Higgsa ⇒ $8 - 3 = 5$ cząstek:
 - h^0 lekki Higgs skalarny
 - H^0 ciężki Higgs skalarny
 - A^0 Higgs pseudoskalarny
 - H^\pm 2 naładowane Higgisy

Widmo cząstek

- Tak jak w SM mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- Skwarki i leptoni mają zerowy spin więc musi ich być więcej!
- ⇒ Dla każdego kwarku i leptonu (o spinie 1/2) musimy więc mieć dwie nowe cząstki (przykładowo \tilde{e}_L i \tilde{e}_R), które są partnerami dwóch stanów spinowych e_L i e_R
⇒ różne cząstki !!! (choć mogą mieć tą samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa
⇒ potrzebne dwa dublety pól Higgsa ⇒ $8 - 3 = 5$ cząstek:
 - h^0 lekki Higgs skalarny
 - H^0 ciężki Higgs skalarny
 - A^0 Higgs pseudoskalarny
 - H^\pm 2 naładowane Higgisy

dodatkowo 4 higgsina: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$

Przewidywania

Supersymetria (SUSY) wydawała się być **idealną** teorią **rozszerzającą Model Standardowy** i rozwiązującą szereg problemów (**problem hierarchii, ciemna materia, łamanie CP...**).

Rozwijana od **około 50 lat** została dopracowana w najdrobniejszych szczegółach (**praktycznie na równi z Modelem Standardowym**)

Od początku była jednym z **główny argumentów** (obok poszukiwania bozonu Higgsa) **za budową LHC**. Obiecywano nam “kaskady” cząstek supersymetrycznych, które w wysokich energiach powinny się produkować równie chętnie co “zwykłe” cząstki...

Przewidywania

Supersymetria (SUSY) wydawała się być **idealną** teorią **rozszerzającą Model Standardowy** i rozwiązującą szereg problemów (**problem hierarchii, ciemna materia, łamanie CP...**).

Rozwijana od **około 50 lat** została dopracowana w najdrobniejszych szczegółach (**praktycznie na równi z Modelem Standardowym**)

Od początku była jednym z **główny argumentów** (obok poszukiwania bozonu Higgsa) **za budowę LHC**. Obiecywano nam “kaskady” cząstek supersymetrycznych, które w wysokich energiach powinny się produkować równie chętnie co “zwykłe” cząstki...

Niestety, **piętnaście lat** po uruchomieniu LHC wciąż nie widać najmniejszego śladu supersymetrii, **żadnych odstępstw** od Modelu Standardowego...

Eksperymenty przy LHC “produkują” co roku setki publikacji, ale są to głównie tzw. ograniczenia/wykluczenia - piszemy czego nie widzimy...

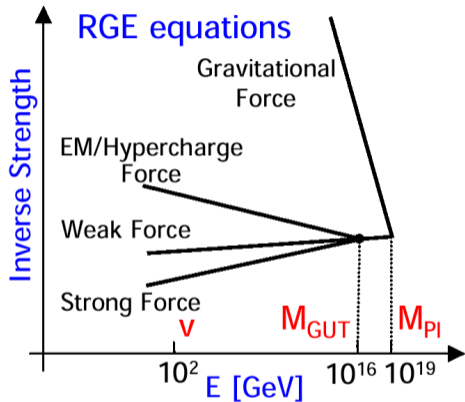
Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

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

co odpowiada skali odległości

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



Problem hierarchii w Modelu Standardowym: skale unifikacji znacznie większe od skal mas

$$M_{Pl} > M_{GUT} \gg M_h \sim M_W$$

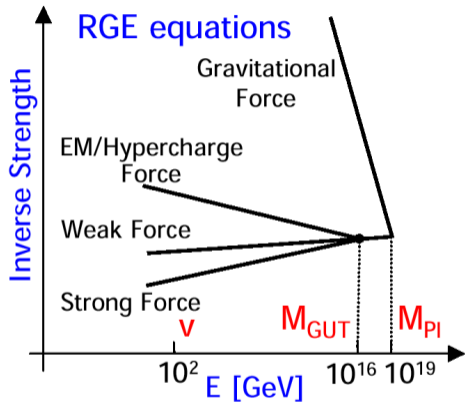
Skala Plancka

Pełna unifikacja oddziaływań, z uwzględnieniem grawitacji, dopiero przy skali

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

co odpowiada skali odległości

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



Problem hierarchii w Modelu Standardowym: skale unifikacji znacznie większe od skal mas

$$M_{Pl} > M_{GUT} \gg M_h \sim M_W$$

Ale "biegnięcie" stałych sprzężenia jest takie "powolne" tylko przy 3 wymiarach przestrzennych...

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

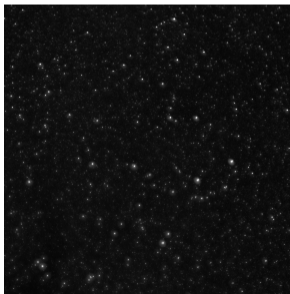
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

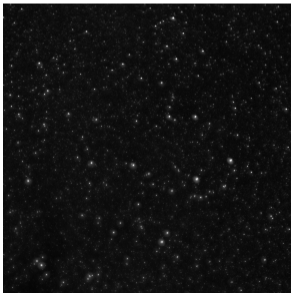
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

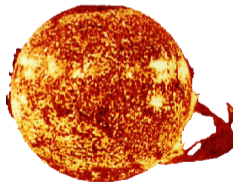
TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Ale wiemy, że w istocie są to ogromne obiekty, jak nasze Słońce:



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

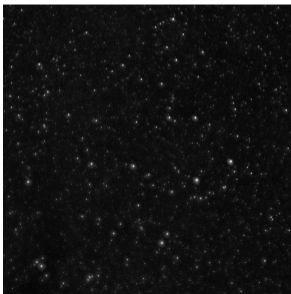
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

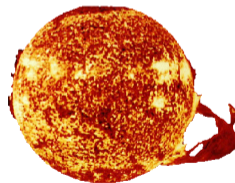
TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład I

Gdy patrzymy na nocne niebo gwiazdy wydają nam się być punktowe (bezwymiarowe)



Ale wiemy, że w istocie są to ogromne obiekty, jak nasze Słońce:



Rozmiar gwiazdy zauważamy dopiero gdy przyglądamy się z rozdzielczością $\Delta < R$

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

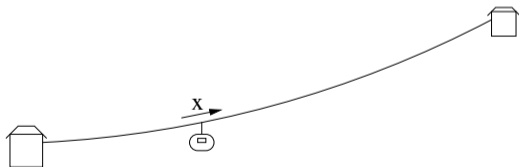
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład II

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



Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

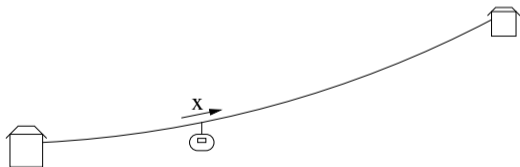
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

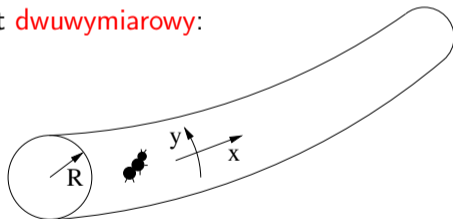
TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład II

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.

Jak dobrze znamy “wymiar” świata w którym żyjemy ?

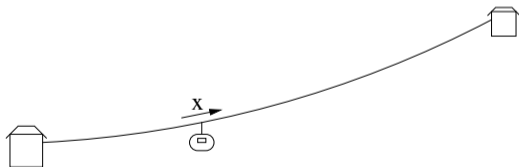
Czy mogą być więcej niż 3 wymiary przestrzenne ?!

NIE - jeśli tylko nieskończone,

TAK - jeśli dopuścimy wymiary skończone!

Przykład II

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:

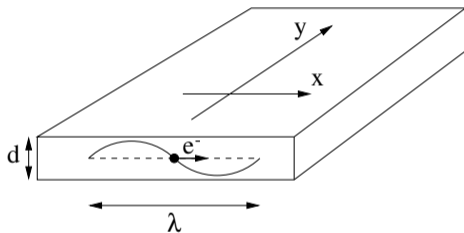


y jest współrzędną **cykliczną**.

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

Przykład III

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:



Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

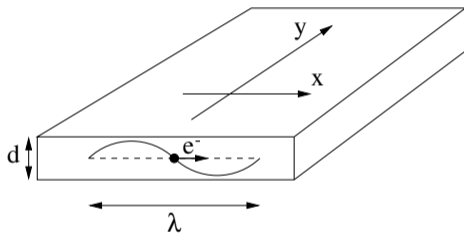
⇒ ruch dwuwymiarowy.

Nie ma ruchu w kierunku prostopadłym!

(kwantowy efekt Halla).

Przykład III

Nisko-energetyczny elektron w bardzo cienkiej warstwie metalu:

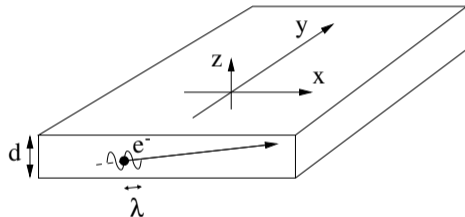


Jeśli długość fali elektronu $\lambda \gg d$

⇒ ruch dwuwymiarowy.

Nie ma ruchu w kierunku prostopadłym!
(kwantowy efekt Halla).

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



jego ruch musimy opisywać w trzech wymiarach...

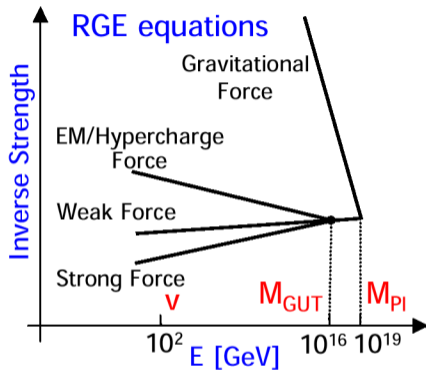
⇒ “odczuwalna” liczba wymiarów zależy od energii...

Skala unifikacji

Przyjmijmy, że nasz świat jest $1 + 3 + n$ wymiarowy (dodajemy n skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze R).

Gdy badamy oddziaływania na “dużych” odległościach $r \gg R$, siła grawitacyjna będzie zależeć jak:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Skala unifikacji

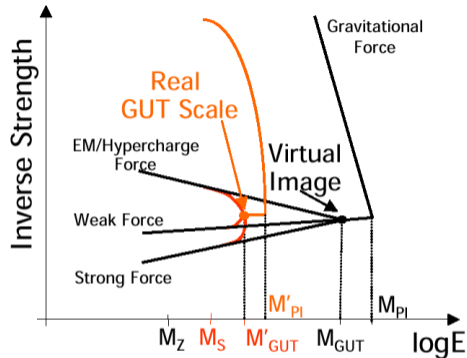
Przyjmijmy, że nasz świat jest $1 + 3 + n$ wymiarowy (dodajemy n skończonych wymiarów przestrzennych o rozmiarze R).

Gdy badamy oddziaływania na “dużych” odległościach $r \gg R$, siła grawitacyjna będzie zależeć jak:

$$F_G \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ale gdy badamy na małych odległościach (wysokie energie)

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



W wysokich energiach stałe sprzężenia biegną dużo szybciej

⇒ prawdziwa skala unifikacji może być dużo niższa niż nam się wydaje...

Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

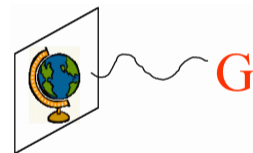
Musimy wprowadzić pewne modyfikacje. Dwa “popularne” scenariusze:

Model ADD Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

Cząstki **Modelu Standardowego** “żyją” w **1+3** wymiarach

Dodatkowe wymiary dostępne są tylko dla **grawitonów**

⇒ grawitacja **słaba** bo “ucieka” w dodatkowe wymiary...

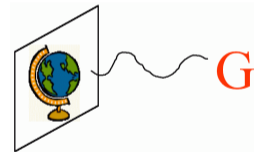


Precyzyjne pomiary fizyki cząstek **wykluczyły** praktycznie istnienie “zwykłych” dodatkowych wymiarów (**otwartych dla wszystkich cząstek**).

Musimy wprowadzić pewne modyfikacje. Dwa “popularne” scenariusze:

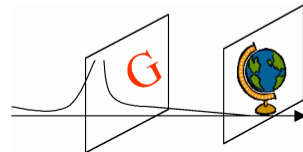
Model ADD Arkhani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)

Cząstki **Modelu Standardowego** “żyją” w **1+3** wymiarach
Dodatkowe wymiary dostępne są tylko dla **grawitonów**
⇒ grawitacja **słaba** bo “ucieka” w dodatkowe wymiary...

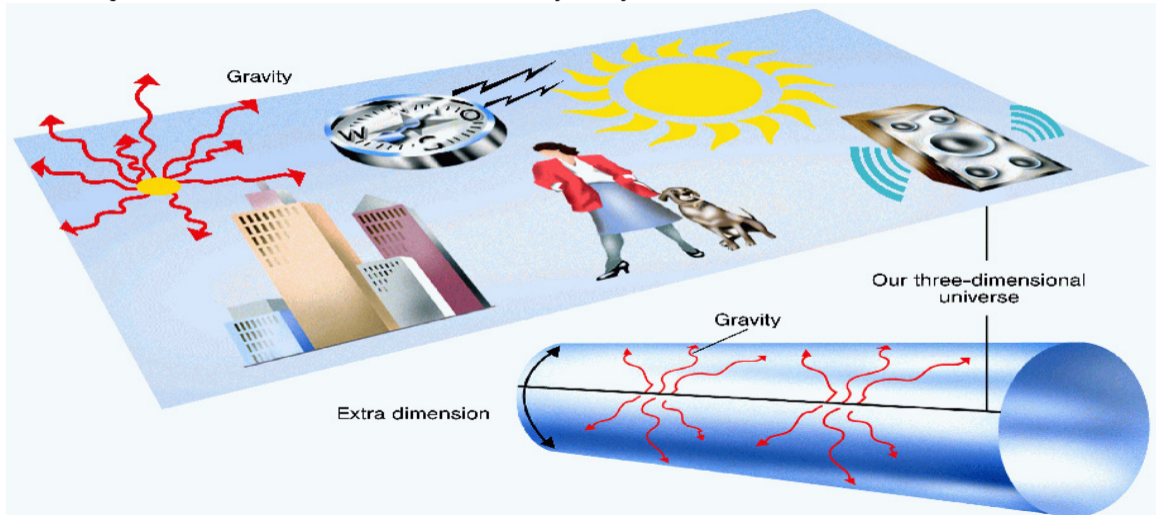


Model R-S Randal, Sundrum (1999)

Tylko **jeden** dodatkowy **wymiar**, ale bardziej skomplikowany.
Grawitacja silna na równoległej “ścianie”, jest **tłumiona** w “naszym” świecie.



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



Przewidywania

Modele z dodatkowymi wymiarami **rozwiązują problem hierarchii** przez drastyczne **obniżenie skali unifikacji**. Dodatkowo pojawiają się nowe cząstki:

- stany wzbudzone cząstek Modelu Standardowego (ruch w dodatkowych wymiarach)
- grawiton i jego stany wzbudzone
- możemy też wyprodukować... mikroskopijne **czarne dziury**

Przewidywania

Modele z dodatkowymi wymiarami **rozwiązują problem hierarchii** przez drastyczne **obniżenie skali unifikacji**. Dodatkowo pojawiają się nowe cząstki:

- stany wzbudzone cząstek Modelu Standardowego (ruch w dodatkowych wymiarach)
- grawiton i jego stany wzbudzone
- możemy też wyprodukować... mikroskopijne **czarne dziury**

Czarne dziury produkowane w zderzeniach cząstek byłyby bardzo małe i niestabilne, rozpadałyby się (“parowały”) natychmiast po powstaniu.

⇒ ich produkcja nie niesłaby żadnych zagrożeń...

Byłyby też licznie produkowane przez promieniowanie kosmiczne zderzające się z jądrami tlenu i azotu w atmosferze Ziemi od miliardów lat...

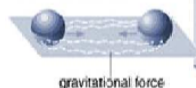
W USA protestowano przeciwko uruchomieniu akceleratora RHIC, bo przeciwnicy obawiali się produkcji **czarnej dziury**, która **pochłonie Ziemię**...

Black Holes on Demand

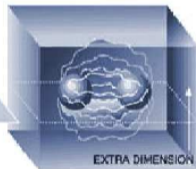
NYT, September 11, 2001 The New York Times

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:

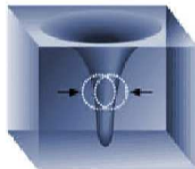
Particles collide in three dimensional space, shown below as a flat plane.



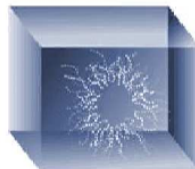
As the particles approach in a particle accelerator, their gravitational attraction increases steadily.



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.

Podobne protesty miały miejsce w Europie przed uruchomieniem LHC...

Podsumowanie

Wiele obserwacji wskazuje na to, że Model Standardowy nie jest jeszcze “Ostateczną Teorią Wszystkiego”. Nie potrafimy odpowiedzieć na wszystkie pytania...

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i rozwiąże wszystkie problemy teoretyczne...

Podsumowanie

Wiele obserwacji wskazuje na to, że Model Standardowy nie jest jeszcze “Ostateczną Teorią Wszystkiego”. Nie potrafimy odpowiedzieć na wszystkie pytania...

Szukamy **bardziej fundamentalnej, ogólniejszej teorii**, która opíše wszystkie znane procesy i rozwiąże wszystkie problemy teoretyczne...

Istnieją dziesiątki modeli teoretycznych, które **rozszerzają lub zastępują Model Standardowy** fizyki cząstek, proponują nowy opis Wszechświata...

Niestety, mimo wielu wysiłków **nie ma do tej pory** żadnych **obserwacji** bezpośrednio potwierdzających ich przewidywania ...

Nie licząc pośrednich obserwacji ciemnej materii we Wszechświecie, itp.