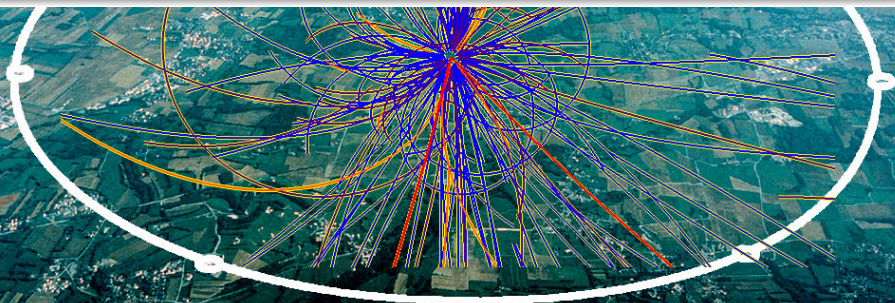


Świat okiem fizyka cząstek (1)

Cząstki i ich oddziaływania

Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

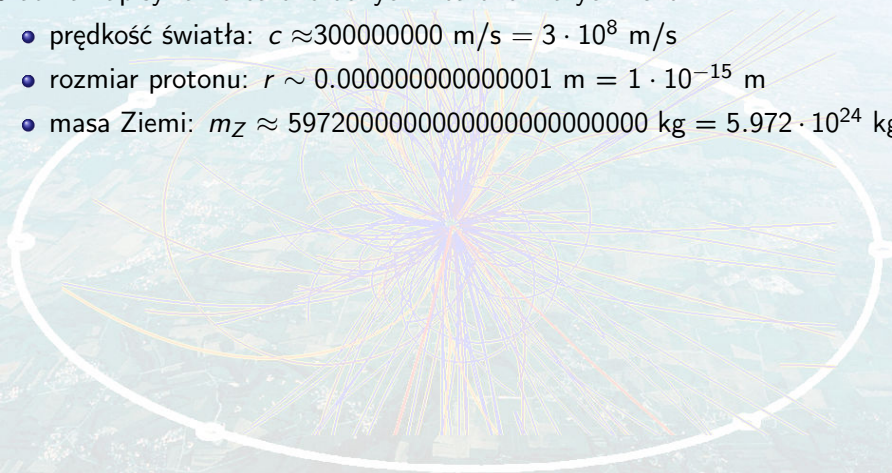


- 1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 2 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 3 Budowa materii
- 4 Model Standardowy
- 5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC
- 6 Oscylacje neutrin
- 7 Ciemna materia
- 8 Perspektywy

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$



Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam "rzęd wielkości"
Różnica o rząd wielkości to dużo!



← ×10 ⇒



Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

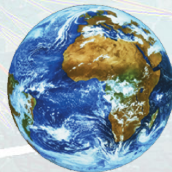
Wykładnik potęgi 10 określa nam "rzęd wielkości"

Różnica o rząd wielkości to dużo!

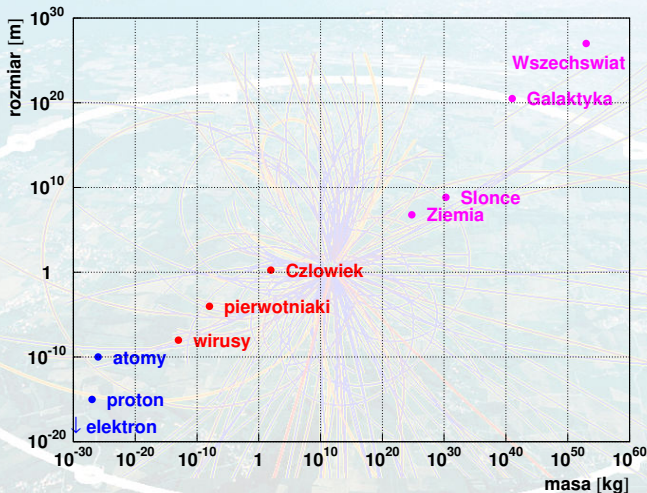
2-3 rzędy to bardzo dużo, 10 rzędów to "przepaść"



← $\times 10^{10}$ ⇒



Fizyka stara się opisać procesy zachodzące na bardzo różnych skalach!



Chcielibyśmy, żeby obowiązywały te same fundamentalne prawa...

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

7 Ciemna materia

8 Perspektywy

Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę **fundamentalnych praw**

- Zasadę względności Galileusza (1632)
- Prawa dynamiki Newtona (1687)
- Prawo powszechnego ciążenia (1687)
- Równania Maxwella (1865)
- Wzór na siłę Lorentza (1895)

które bardzo dobrze opisują otaczający nas świat !

Budowa materii

W chemii, dzięki pracom Daltona i Avogadro, ugruntowało się pojęcie atomu jako najmniejszej, niepodzielnej drobin pierwiastka chemicznego. Było to jedyne sensowne wytłumaczenie odkrytego w XVIII wieku tzw. prawa stosunków stałych.

Doświadczalnym potwierdzeniem atomowej budowy materii były ruchy Browna (1827), choć wtedy nie potrafiono ich jeszcze opisać ilościowo.

Atomy były głównie domeną zainteresowania chemików

Fizycy mało się nimi interesowali, nie były im potrzebne (!)

Światło

W XIX wieku przyjęta była powszechnie teoria Younga (1801), zgodnie z którą światło jest falą.

Dowodem była obserwacja zjawisk dyfrakcji i interferencji światła.

Istnienie fal elektromagnetycznych wynikało z równań Maxwella.

Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

Przełom XIX i XX wieku

Przyniósł szereg przełomowych, nieoczekiwanych odkryć

- odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena w 1895,
- odkrycie promieniotwórczości przez Henri Becquerel'a w 1896,
- odkrycie elektronu przez Josepha Thomsona w 1897,
- badania efektu fotoelektrycznego (Lenard, 1902) ⇒ foton (Einstein)

⇒ wszystko to wymagało zupełnie nowego spojrzenia na fizykę

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałoby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

nie zależy od układu odniesienia!

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałoby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

W roku 1905 Einstein opublikował pracę "O elektrodynamice ciał w ruchu".

Zawarł w niej dwa postulaty:

- prawa fizyki są identyczne we wszystkich układach odniesienia (zasada względności - obowiązuje też w fizyce klasycznej!)
- prędkość światła w próżni, c , jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia (uniwersalność prędkości światła)

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**

Zdarzenia równoczesne dla jednego obserwatora mogą nie być równoczesne dla innego! (względność równoczesności)

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!



Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)

Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu, która uwzględnia **energie spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,
która uwzględnia **energię spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

Masa nie jest zachowana!

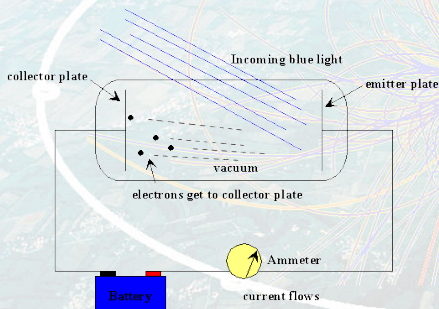
Cząstki (masa) **mogą być produkowane** (kosztem np. energii kinetycznej),
mogą też się rozpadać, anihilować...

Powoduje to, że na poziomie subatomowym możliwe jest wiele procesów,
które nie mają klasycznych odpowiedników...

Efekt fotoelektryczny

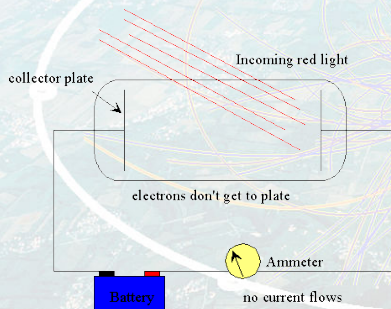
Odkryty przez Hertza w 1887

W 1902 **Philipp Lenard** pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887
W 1902 **Philipp Lenard** pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w oparciu o falową teorię światła!

Efekt fotoelektryczny

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu energia padającego fotonu, musi być większa od tzw. **pracy wyjścia**
⇒ zależność od długości fali światła

$$E_{\gamma}^{blue} > E_{\gamma}^{green} > E_{\gamma}^{red}$$

W 1923 Arthur Compton wykazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** ⇒ zachowują się jak "zwykłe" **cząstki**



Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- rozchodzenie się fali (propagację fotonów) opisują **równania Maxwella** to nie są "klasyczne" kulki opisane dynamiką Newtona !!!
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu (obserwowane natężenie światła) jest proporcjonalne do **kwadratu amplitudy fali** elektromagnetycznej

$$p(\vec{r}, t) \sim I(\vec{r}, t) \sim \mathcal{E}^2(\vec{r}, t)$$

⇒ foton jest cząstką, ale jego ruch opisany jest równaniem falowym...

Opis cząstkowy Einstein

Foton fali o częstotliwości ν i długości fali λ : $\lambda \cdot \nu = c$

$$p c = E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

Opis cząstkowy EinsteinFoton fali o częstotliwości ν i długości fali λ : $\lambda \cdot \nu = c$

$$p c = E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

Opis falowy

Harmoniczna fala płaska: Maxwell

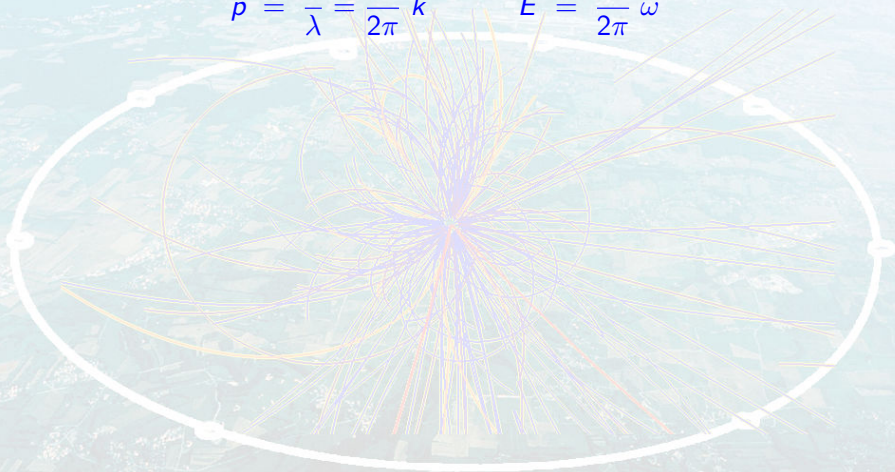
$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}_0 \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$$

gdzie:

$$\omega = 2\pi\nu, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Dla fotonu możemy więc zapisać:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k \quad E = \frac{h}{2\pi} \omega$$



Dla fotonu możemy więc zapisać:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k \quad E = \frac{h}{2\pi} \omega$$

Louis de Broigle 1923/1924

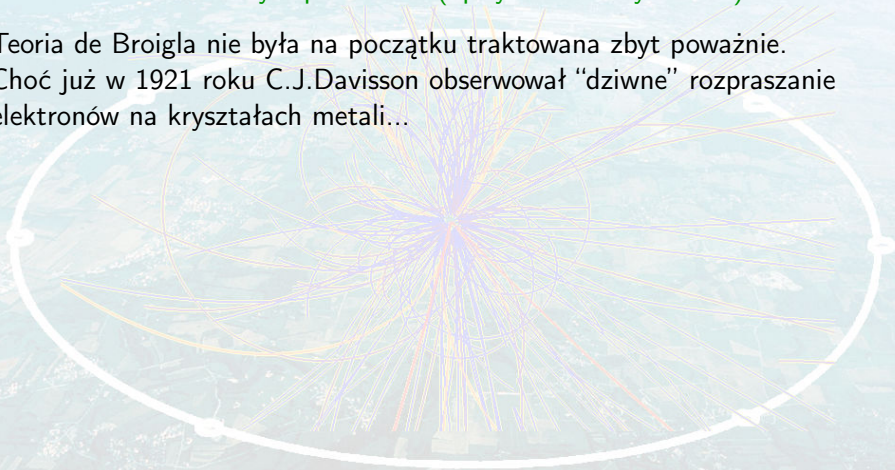
doszedł do wniosku, że falowe własności przynależą **wszystkim cząstkom**.
Zależność parametrów fali \vec{k} i ω od energii E i pędu \vec{p} powinna być taka sama jak dla fotonu (!)

$$\vec{p} = \hbar \vec{k} \quad E = \hbar \omega$$

gdzie: $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...



Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem U : $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem U : $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

$$\lambda \approx \frac{12.3 \text{ \AA} \sqrt{V}}{\sqrt{U}}$$

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował "dziwne" rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem U : $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

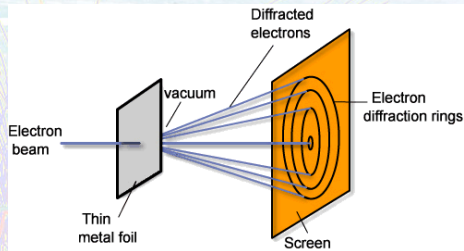
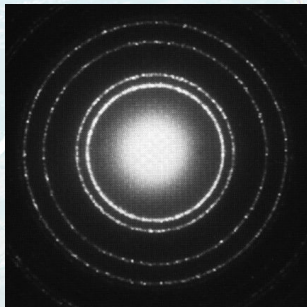
$$\lambda \approx \frac{12.3 \text{ \AA} \sqrt{V}}{\sqrt{U}}$$

Elektron przyspieszony napięciem 100 V: $\lambda_e \approx 1.2 \text{ \AA}$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

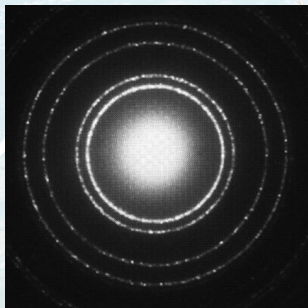
długość fali rzędu rozmiarów atomu...

W 1927 roku G.P.Thomson (syn J.J.Thomsona) zaobserwował dyfrakcję “energetycznych” elektronów przy przejściu przez cienką metalową folię

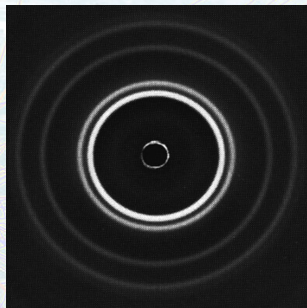


Elektrony o $E_e = 600 \text{ eV}$
 $\lambda_e \approx 0.5 \text{ \AA}$
przechodzące przez folię aluminiową

W 1927 roku G.P.Thomson (syn J.J.Thomsona) zaobserwował dyfrakcję “energetycznych” elektronów przy przejściu przez cienką metalową folię



Elektrony o $E_e = 600 \text{ eV}$
 $\lambda_e \approx 0.5 \text{ \AA}$
przechodzące przez folię aluminiową



Obraz uzyskany dla promieni
rentgenowskich
 $\lambda_\gamma \approx 0.7 \text{ \AA}$

Zgodny rozkład maksimum dyfrakcyjnych \Rightarrow potwierdzenie opisu falowego

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

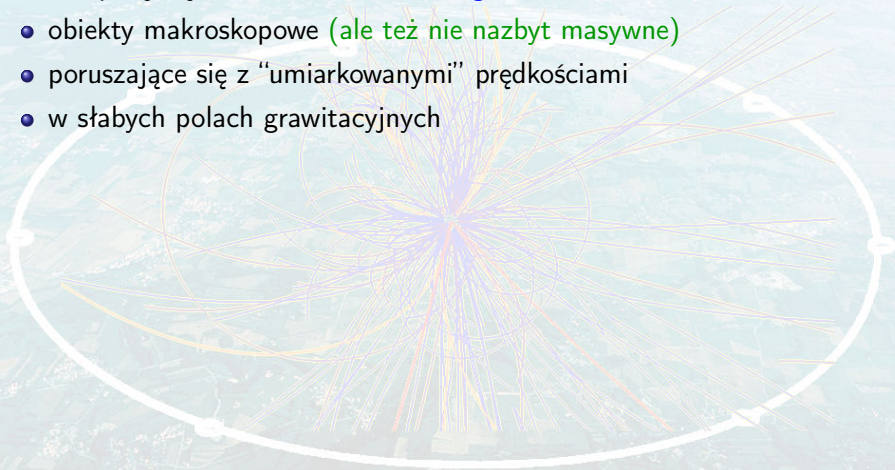
7 Ciemna materia

8 Perspektywy

Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe (ale też nie nazbyt masywne)
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych



Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe (ale też nie nazbyt masywne)
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych

Szczególna Teoria Względności

Wkracza wtedy, gdy prędkości względne stają się porównywalne z prędkością światła $c \equiv 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$.

Fizyka współczesna bardzo często wymaga stosowania podejścia relatywistycznego. Nie tylko w przypadku dużych prędkości...

Bez uwzględnienia efektów relatywistycznych nie jest także możliwe pełne zrozumienie wielu “codziennych” zjawisk, np. oddziaływań magnetycznych!

Odejście od zasad fizyki klasycznej także w przypadku obiektów mikroskopowych. **Ale nie rozmiar jest najistotniejszy!**

Mechanika kwantowa

Wkracza gdy badane zjawiska zachodzą na skalach porównywalnych ze stałą Plancka:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Skala zjawiska może dotyczyć energii i czasu, pędu i długości, momentu pędu

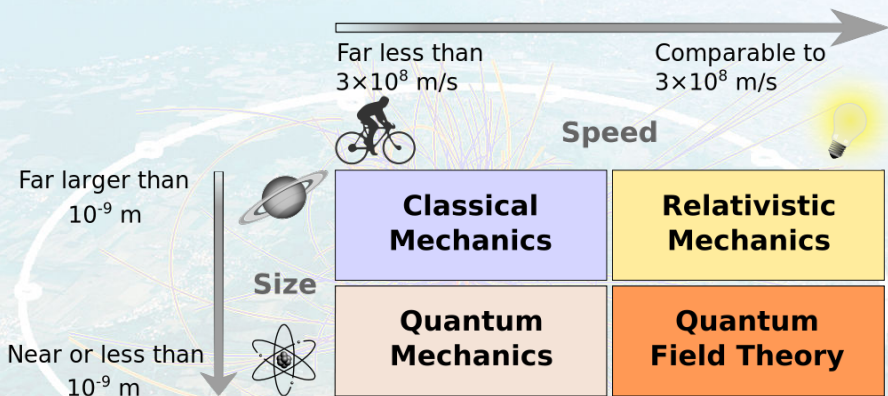
Stała Plancka jest niesłychanie mała.

Fizyka kwantowa istotna dopiero na poziomie subatomowym.

$$h \sim m_p \cdot r_p \cdot c \quad m_p, r_p - \text{masa i promień protonu}$$

Dla wszelkich obiektów makroskopowych stosujemy fizykę klasyczną
W fizyce cząstek nieodzowna staje się **mechanika kwantowa!**

Relatywistyczne i kwantowe rozszerzenia mechaniki klasycznej



Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową. Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

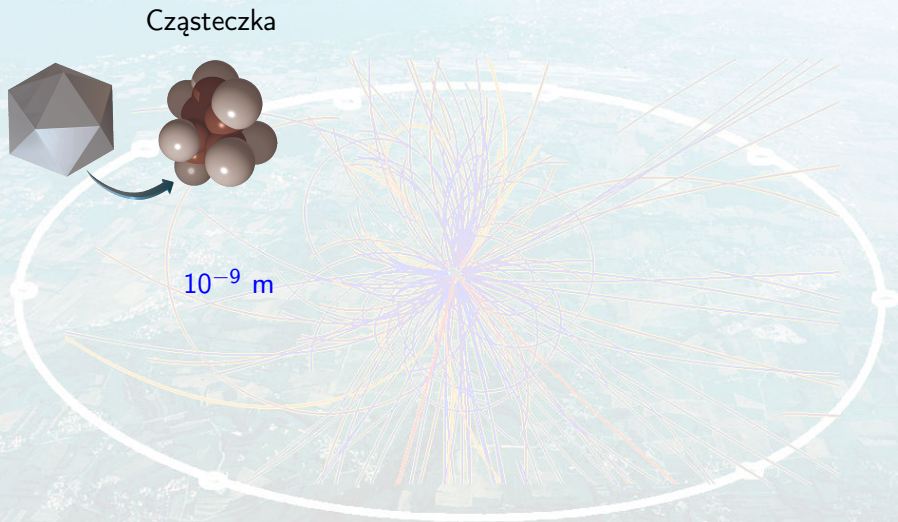
4 Model Standardowy

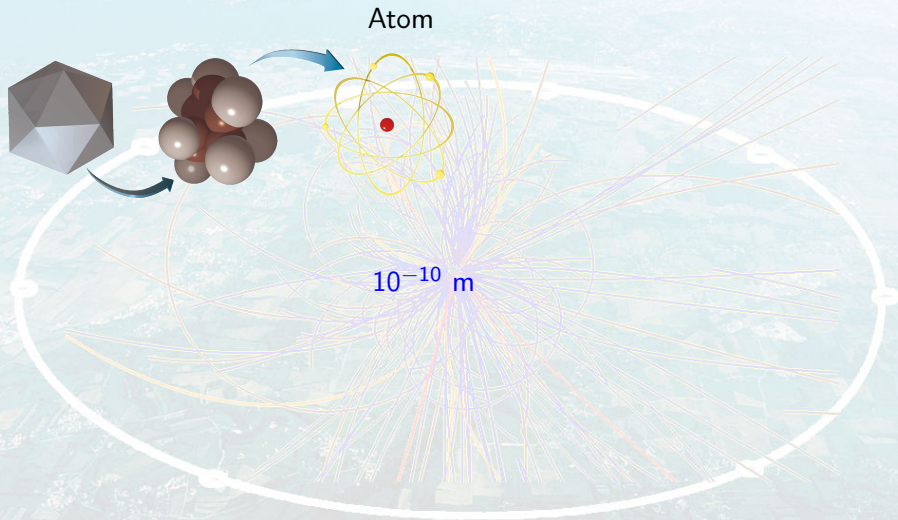
5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

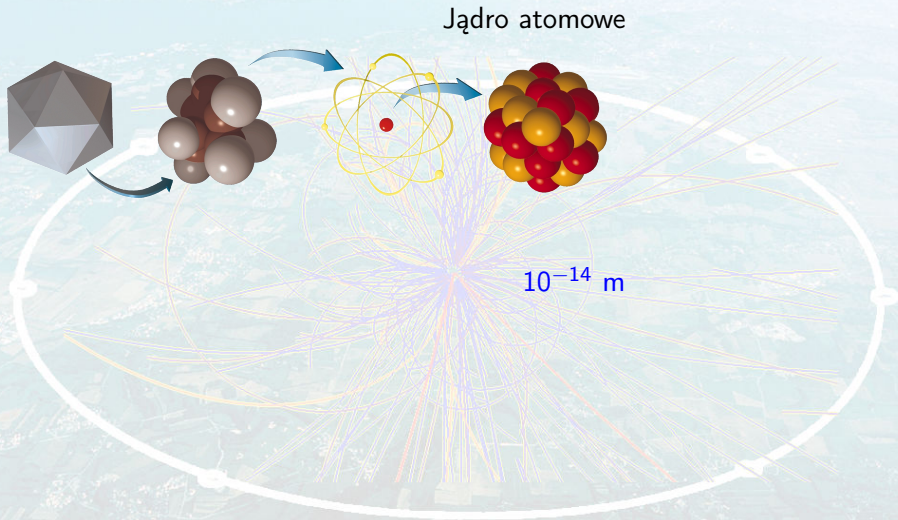
6 Oscylacje neutrin

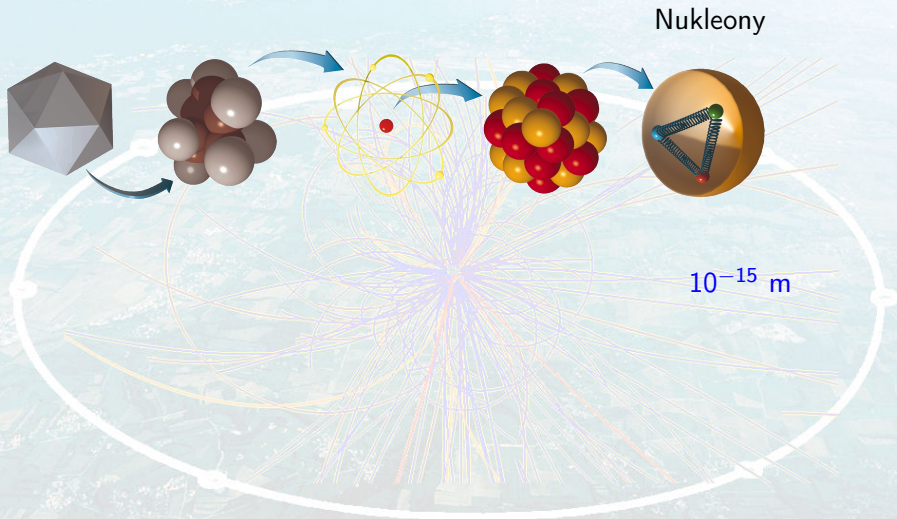
7 Ciemna materia

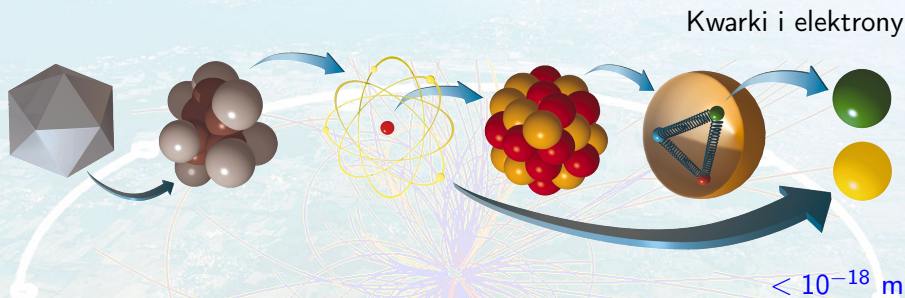
8 Perspektywy











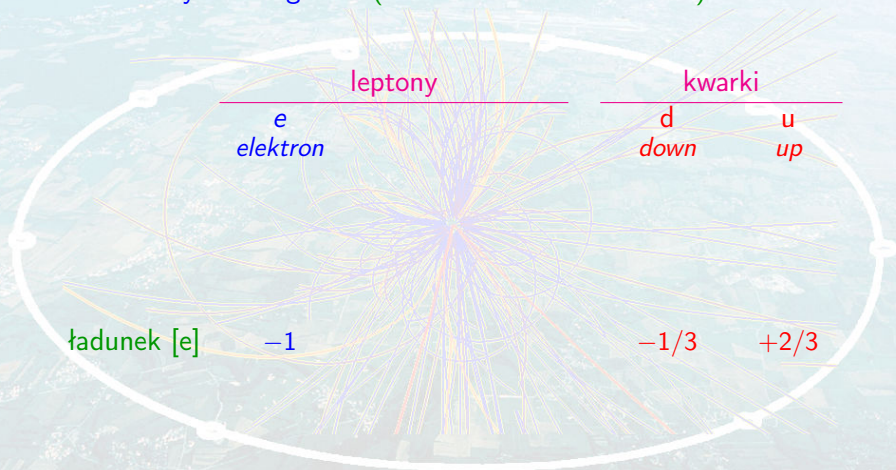
Obecnie za najbardziej fundamentalne, niepodzielne składniki materii uważamy **kwarki** i **leptony**.

Proton i neutron składają się z kwarków *u* i *d*:

$$p = (uud) \quad n = (udd)$$

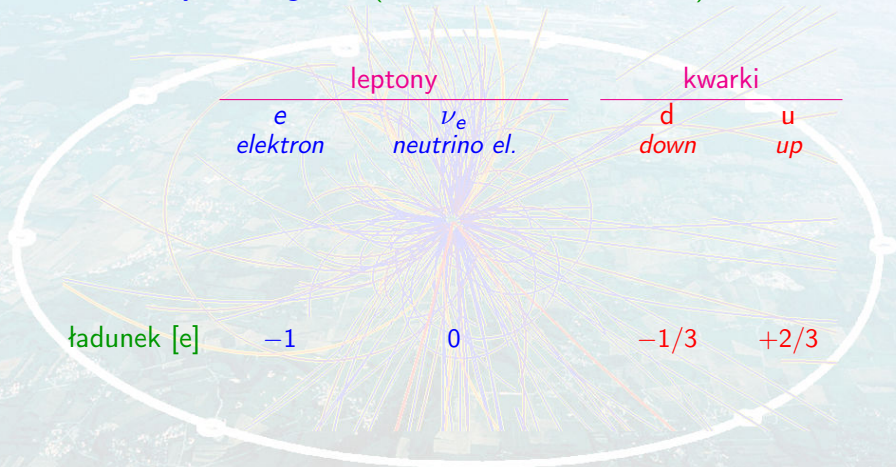
Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d)



Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*



Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*

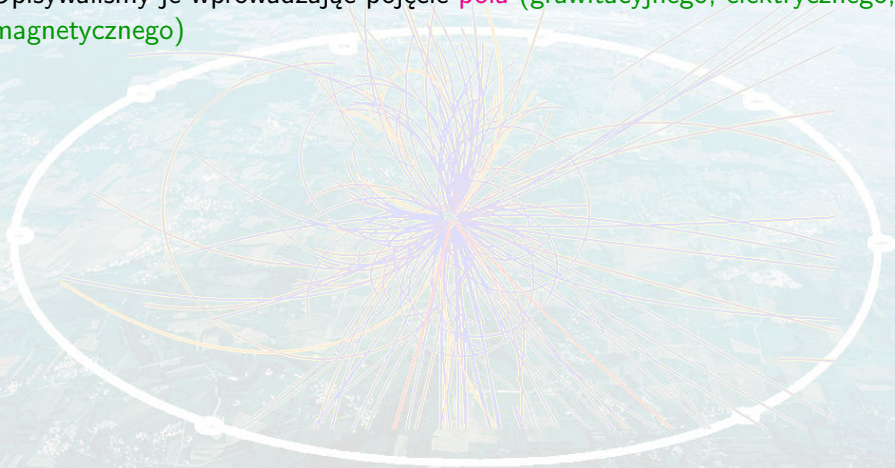
Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)



Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.
Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

Jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły! Zamiast tego wprowadzamy (równoważny, jak się okazuje) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...

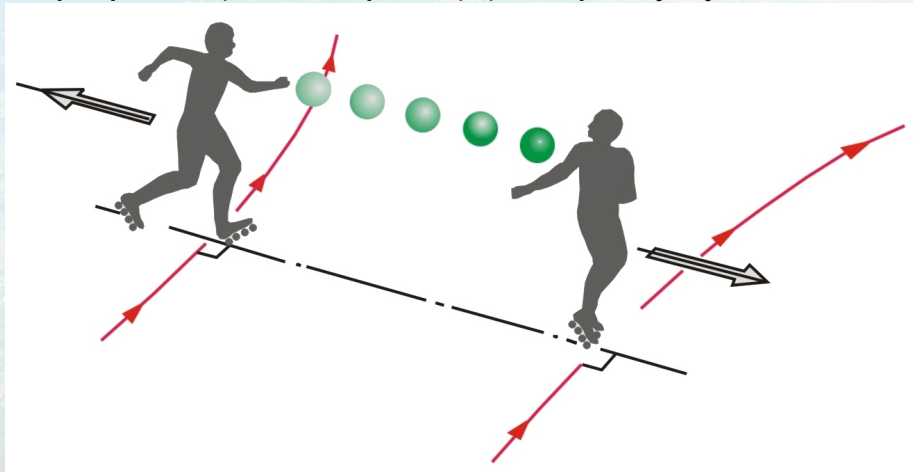
W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły! Zamiast tego wprowadzamy (równoważny, jak się okazuje) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

Dwa rodzaje cząstek:

- cząstki materii - fermiony (cząstki o spinie $\frac{1}{2}$)
- nośniki oddziaływań - bosony (cząstki o spinie całkowitym)

Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



Bozony

“Cegielki” oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**
 Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>	<i>moc</i>
<i>grawitacyjne</i>	<i>masa</i>	<i>grawiton (?)</i>	G 10^{-39}
<i>elektromagnetyczne</i>	<i>ładunek</i>	<i>foton</i>	γ 10^{-2}
<i>silne</i>	<i>“kolor”</i>	<i>gluony</i>	g 1
<i>słabe</i>	<i>“ładunek słaby”</i>	<i>“bozony pośredniczące”</i>	W^{\pm}, Z^0 10^{-7}

“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów

Grawiton, foton i gluony są bezmasowe \Rightarrow zasięg formalnie nieskończony
 Natomiast bozony W^{\pm} i Z^0 są bardzo ciężkie...

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

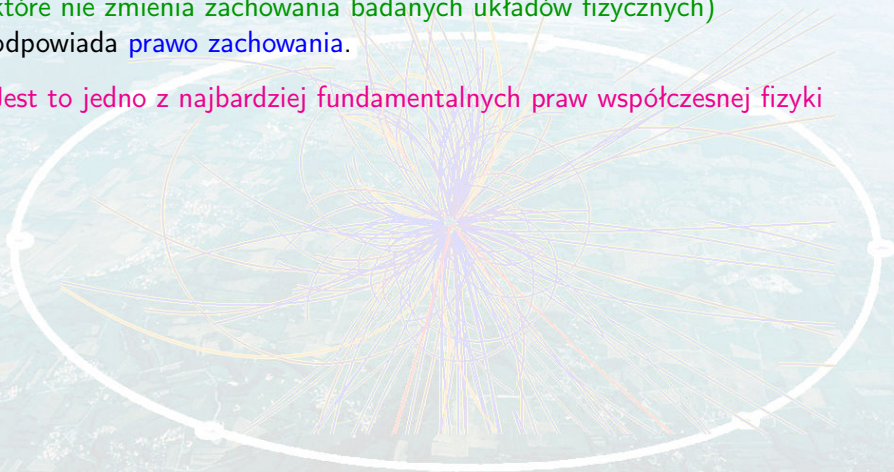
7 Ciemna materia

8 Perspektywy

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki



Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 1

Jeśli zmienimy czas z letniego na zimowy to nie zmienia to praw fizyki.

Pomiar czasu można rozpocząć w dowolnym momencie, nie istnieje "czas absolutny" (wyróżniona chwila $t = 0$)

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 1

Jeśli zmienimy czas z letniego na zimowy to nie zmienia to praw fizyki.

Pomiar czasu można rozpocząć w dowolnym momencie, nie istnieje "czas absolutny" (wyróżniona chwila $t = 0$)

Prawa przyrody są **niezmiennicze względem przesunięcia w czasie**

⇒ Zasada Zachowania Energii

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 2

Jeśli odległość będziemy mierzyć w jardach to nie zmienia to praw fizyki.

Wybór jednostki długości i punktu zerowego jest zawsze umowny, nie istnieje wyróżniony układ odniesienia

Twierdzenie Noether (1918)

Każdej ciągłej **symetrii** praw fizyki (czyli takiemu przekształceniu, które nie zmienia zachowania badanych układów fizycznych) odpowiada **prawo zachowania**.

Jest to jedno z najbardziej fundamentalnych praw współczesnej fizyki

Przykład 2

Jeśli odległość będziemy mierzyć w jardach to nie zmienia to praw fizyki.

Wybór jednostki długości i punktu zerowego jest zawsze umowny, nie istnieje wyróżniony układ odniesienia

Prawa przyrody są **niezmiennicze względem przesunięcia w przestrzeni**

⇒ Zasada Zachowania Pędu

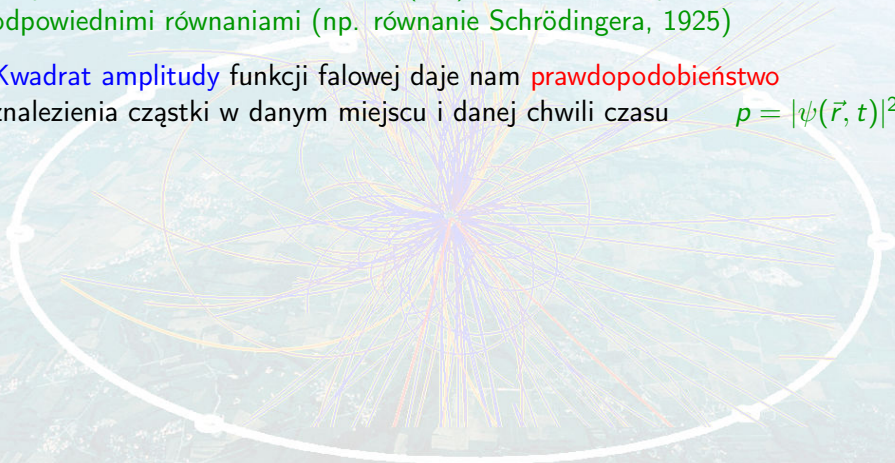
Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu

$$p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$



Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się “fali prawdopodobieństwa”

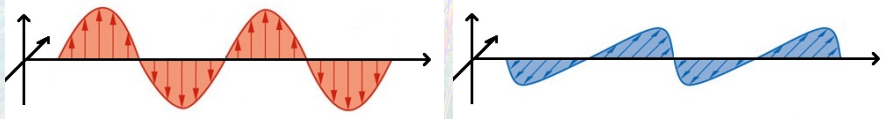
Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Funkcje falowe są zespolone, ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza (“polaryzacja fali”) jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania**



Mechanika kwantowa

Ruch cząstki to rozchodzenie się "fali prawdopodobieństwa"

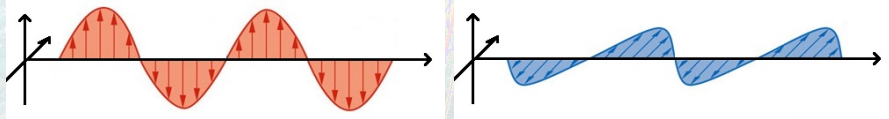
Falę opisuje tzw. funkcja falowa $\psi(\vec{r}, t)$, której ewolucję potrafimy opisać odpowiednimi równaniami (np. równanie Schrödingera, 1925)

Kwadrat amplitudy funkcji falowej daje nam **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu $p = |\psi(\vec{r}, t)|^2$

Funkcje falowe są **zespolone**, ale wynik pomiaru **nie zależy od fazy**

Faza ("polaryzacja fali") jest **nieistotna!**

⇒ dodatkowa **symetria cechowania**



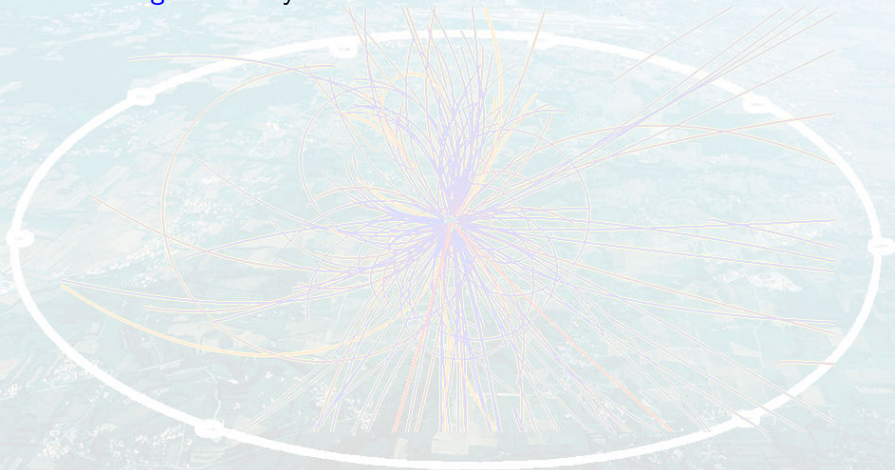
Niezmienniczość względem transformacji cechowania

⇒ Zasada Zachowania Ładunku

Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$

\Rightarrow "globalna" symetria cechowania



Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$
 \Rightarrow "globalna" symetria cechowania

Jeśli faza funkcji falowej nie jest mierzalna to czy nasza teoria jest też niezmiennicza względem "lokalnej" symetrii cechowania U(1):

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \cdot \psi(x)$$

gdzie kąt obrotu fazy $\alpha(x)$ zależy od położenia (i czasu) ?

Funkcja falowa

Transformacja **obrotu fazy** o **ustalony** kąt α : $\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$
 \Rightarrow "globalna" symetria cechowania

Jeśli faza funkcji falowej nie jest mierzalna to czy nasza teoria jest też niezmiennicza względem "lokalnej" symetrii cechowania U(1):

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \cdot \psi(x)$$

gdzie kąt obrotu fazy $\alpha(x)$ zależy od położenia (i czasu) ?

Nie jest to możliwe dla swobodnej cząstki.

Musimy dodać do teorii opis oddziaływań elektromagnetycznych (!)

Z niezmienniczości względem lokalnej symetrii cechowania otrzymujemy

Elektrodynamikę Kwantową (QED)

pełną teorię oddziałujących ładunków elektrycznych i fotonów

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowej 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

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowej 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

Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowej 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

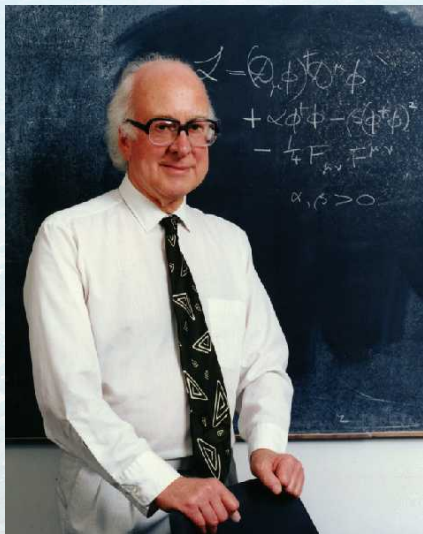
Oddziaływania fundamentalne

Opis oddziaływań w Modelu Standardowym oparty jest na formalizmie kwantowej 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

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

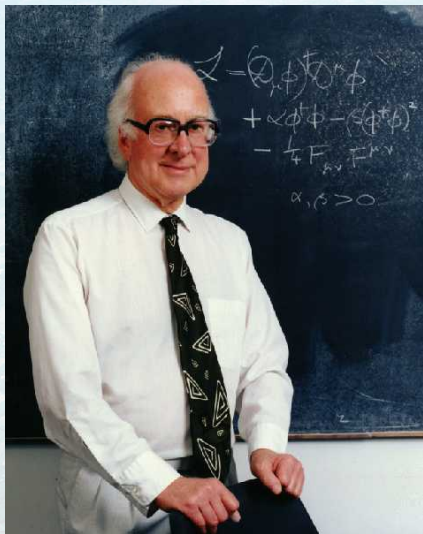


Aby móc nadać masy nośnikom oddziaływań konieczne jest jeszcze dodanie do teorii **spontanicznego łamania symetrii**. Wskazał na to 55 lat temu (1964) m.in.[†] **Peter W. Higgs**.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Cząstki fundamentalne uzyskują **masę** poprzez **oddziaływanie z polem Higgsa!**

[†] wymieniani są także Anderson, **Brout**, **Englert**, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft



Aby móc nadać masy nośnikom oddziaływań konieczne jest jeszcze dodanie do teorii **spontanicznego łamania symetrii**. Wskazał na to 55 lat temu (1964) m.in.[†] **Peter W. Higgs**.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Cząstki fundamentalne uzyskują **masę** poprzez **oddziaływanie z polem Higgsa!**

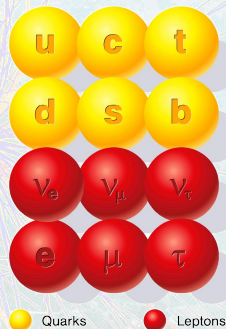
Oczekujemy także istnienia **dotychczasowej cząstki: bozonu Higgsa**

[†] wymieniani są także Anderson, **Brout**, **Englert**, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft

Cząstki fundamentalne

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

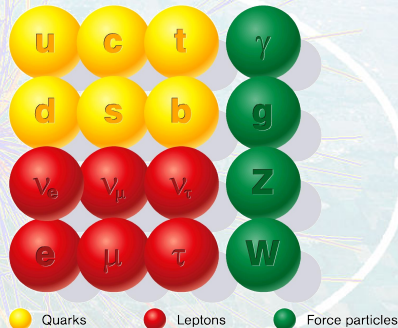
- cząstki materii
kwarki i leptony



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

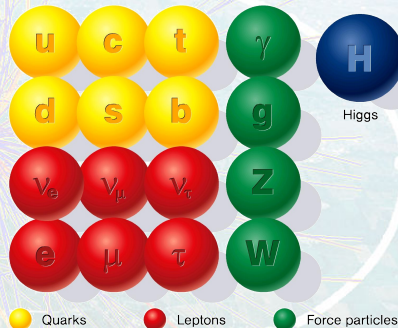


Cząstki fundamentalne

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 Higgsa
konieczny dla
spójności modelu

“Nadaje masy”
wszystkim cząstkom



1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

7 Ciemna materia

8 Perspektywy



Rzeczywiście rozwój fizyki cząstek wiązał się z budową kolejnych akceleratorów.

LEP

Największym zbudowanym akceleratorem był LEP w CERN pod Genewą. Miał obwód ok. 27 km i zderzał przeciwbieżne wiązki e^+e^- .

LHC

Został zbudowany w tym samym tunelu (!)
Przeciwbieżne wiązki protonów o energii do 7 TeV
W każdej do 2800 "paczek" po 10^{11} protonów.

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)

Dużo więcej o akceleratorach powiemy za tydzień...



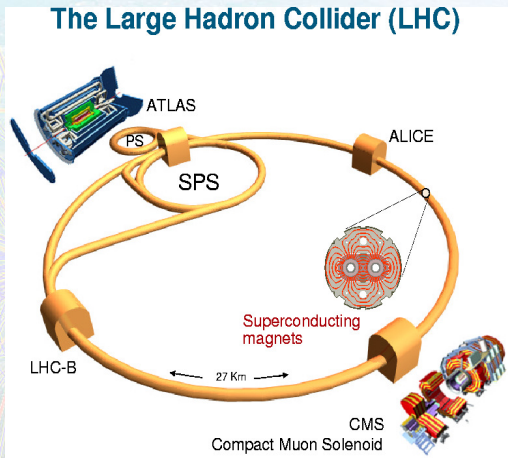


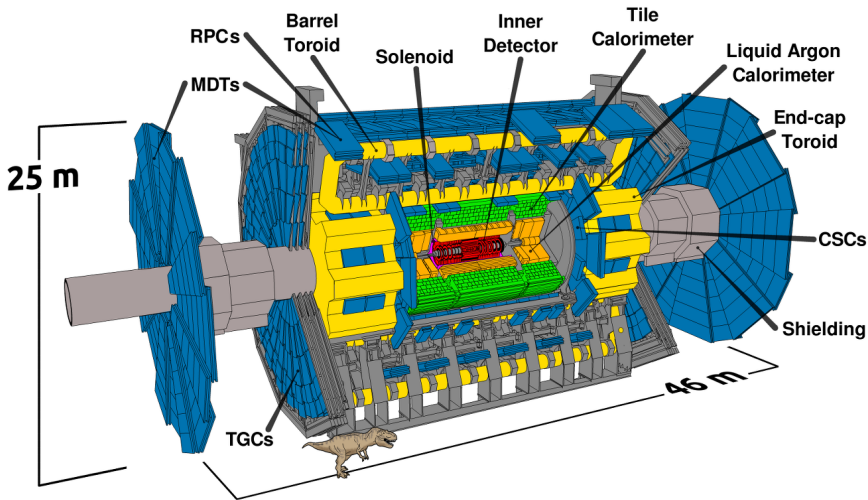
LHC został ostatecznie uruchomiony na jesieni 2009, choć początkowo z niższą niż planowano energią wiązek.

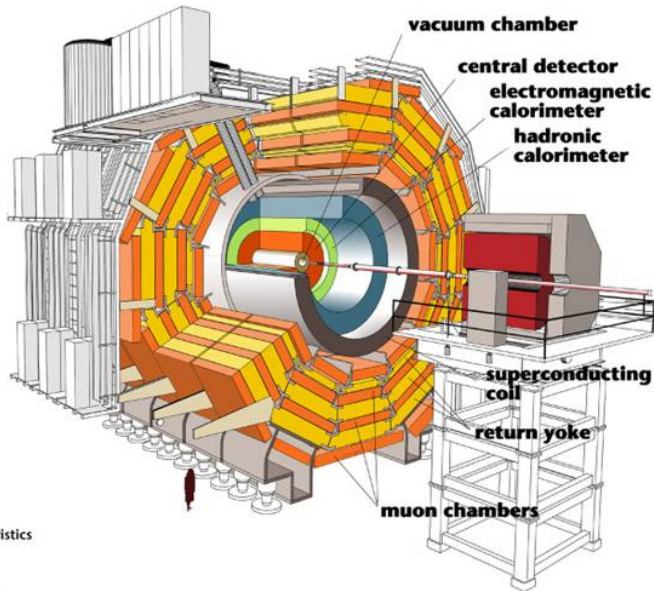
W latach 2015-2018 pracował z energią bliską nominalnej.

Obecnie trwa modernizacja akceleratora i eksperymentów zmierzająca do podniesienia intensywność wiązek...

Poszukiwanie przypadków produkcji cząstki Higgsa było jednym z głównych celów budowy eksperymentów **ATLAS** i **CMS**



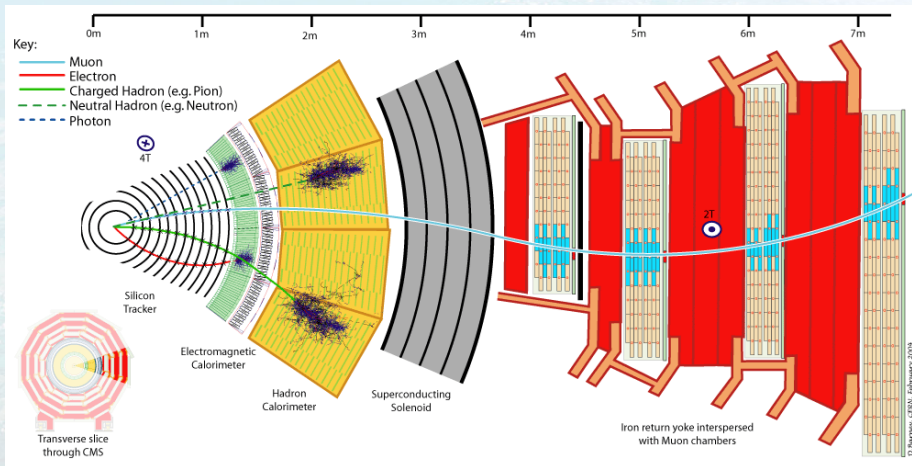




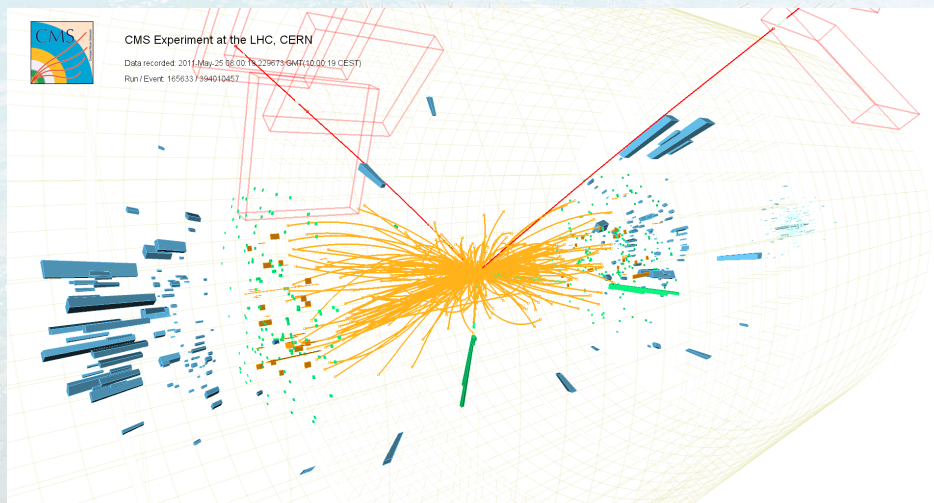
Detector characteristics

Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

Schemat budowy widok wycinka detektora



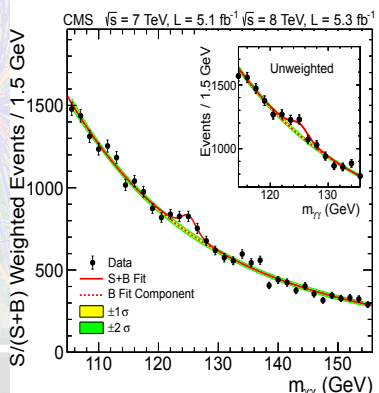
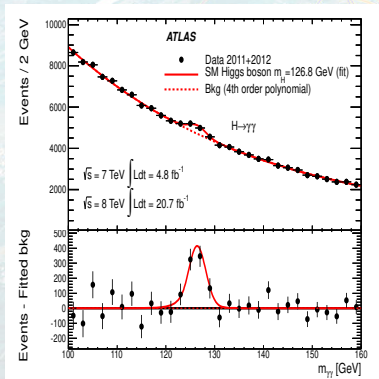
Porównując odpowiedzi różnych pod detektorów możemy rozróżniać cząstki

Rejestrowane zderzenie pp Przypadek z czterema leptonami (kandydat na $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$)

Run I 2009-2012

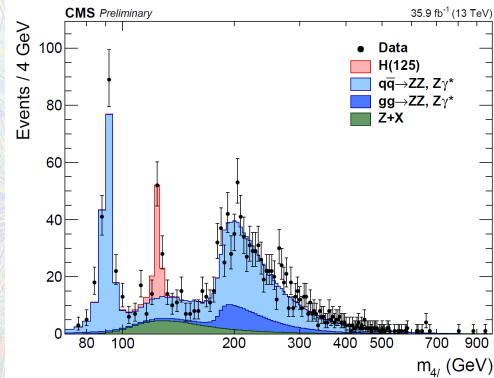
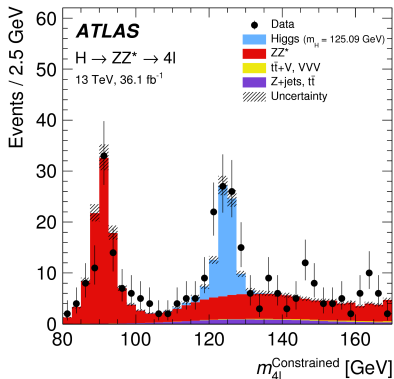
Wyniki przedstawione przez ATLAS i CMS, po uwzględnieniu danych zebranych do roku 2012.

Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość



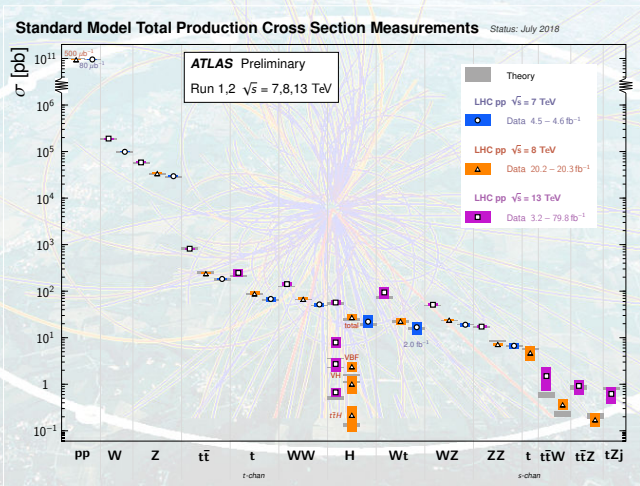
Run II 2015-2016

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$



Wyniki zgodne ze wcześniejszymi pomiarami w Run I.

Eksperymenty przy LHC bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów W^\pm , Z^0 i H , oraz kwarku t . Wszystkie dotychczasowe pomiary w **znakomitej zgodności z przewidywaniami (Modelem Standardowym)**.



1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 **Oscylacje neutrin**

7 Ciemna materia

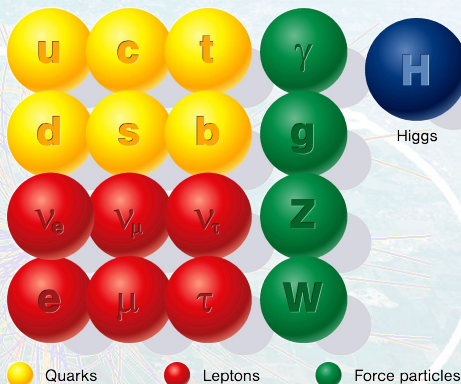
8 Perspektywy

Model Standardowy

Wyniki doświadczeń pokazały, że każdy naładowany lepton sprzęga się do innego neutrino
 ⇒ trzy “zapachy” neutrino

Do końca XX wieku wierzyliśmy że

- neutrino są **bezmasowe**
- **zapach** neutrino jest ściśle zachowany



Ale postulat zachowania zapachu neutrino nie wynikał z teorii, był oparty wyłącznie na wynikach doświadczeń...

Neutrino są niesłychanie przenikliwe, praktycznie nie oddziałują z materią. Nie zdajemy sobie sprawy jak wiele ich jest wokół nas...

Słońce

Jest niezwykle intensywnym źródłem **neutrin elektronowych** produkowanych w reakcjach termojądrowych (**większość z $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$**).

Całkowity strumień neutrin docierających do Ziemi (150 mln km):

$$\Phi_S \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ 1/s} \cdot \text{cm}^2 \text{ (!)} \quad \text{jednak dominują niskie energie...}$$

Reaktory jądrowe

W każdym akcie rozszczepienia jądra uranu ^{238}U wyzwala się ok. 200 MeV energii i powstaje średnio 6 **antyneutrin elektronowych**.

Blok o mocy 1GW produkuje około $\sim 6 \cdot 10^{20}$ neutrin na sekundę.

W odległości **1 km od reaktora**: $\Phi_R \sim 5 \cdot 10^9 \text{ 1/s} \cdot \text{cm}^2$

Promieniowanie kosmiczne tzw. neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne oddziałuje w atmosferze Ziemi produkując liczne **cząstki wtórne**, w większości piony π^\pm .

W wyniku ich rozpadów powstają neutrina i antyneutrino. Przykładowo:



⇒ (anty)neutrino elektronowe i mionowe o wysokich energiach (!)

Akseleratory cząstek

Procesy zachodzące w atmosferze możemy też inicjować w laboratorium, wykorzystując dużej intensywności wiązki protonów

⇒ produkujemy wiązki wysokoenergetycznych (anty)neutrino mionowych

Intensywności tych wiązek są ograniczone, ale mamy pełną kontrolę...

Neutrino oddziałują niesłychanie słabo. Aby zaobserwować choćby pojedyncze oddziaływania musimy budować ogromne detektory.

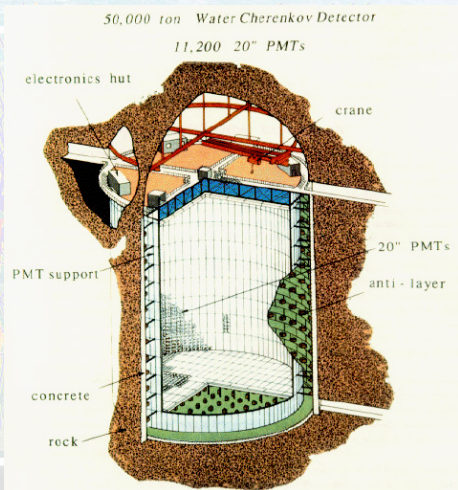
Super Kamiokande

Detektor zbudowany w starej kopalni, pod górą Mt Kamioka w Japoni

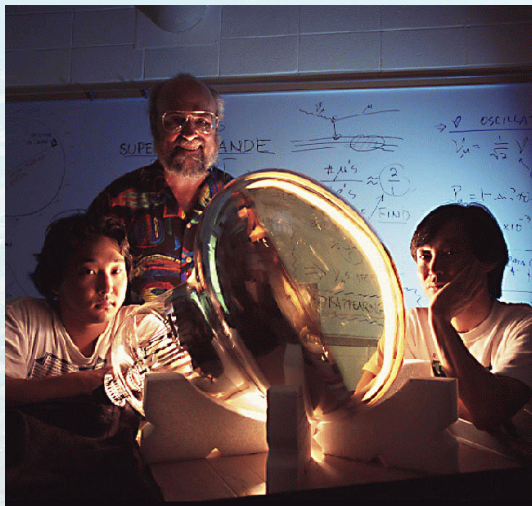
Stalowy zbiornik wypełniony 50,000 tonami czystej wody.

Szukamy "błysków światła" (tzw. promieniowania Czerenkowa) wywołanych oddziaływaniami neutrin.

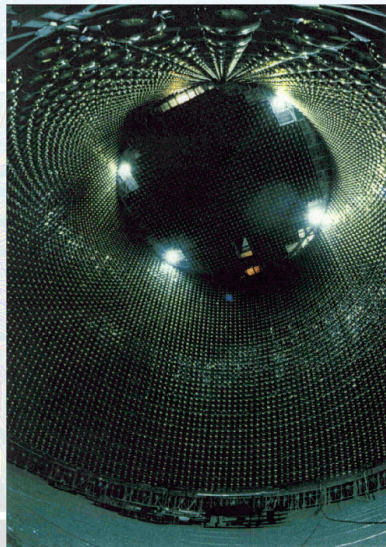
~11'000 fotopowielaczy czułych na pojedyncze fotony...

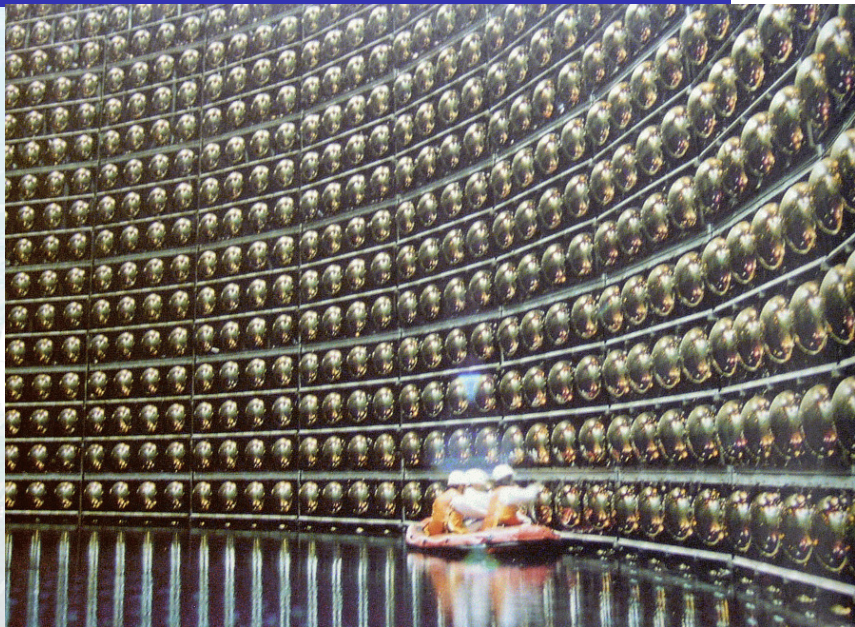


Fotopowielacz

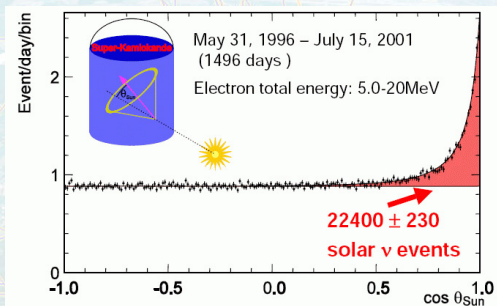


Detektor





Oddziaływania **neutrín słonecznych** możemy identyfikować na podstawie kierunku ich lotu względem **kierunku od Słońca**



Wyniki pomiarów nie zgadzały się jednak z naszymi rachunkami!
Wyglądało to tak, jakby ponad połowa neutrín elektronowych “znikała” na drodze od Słońca do Ziemi... **To niemożliwe !?!**

Model jak to sobie wyobrazić

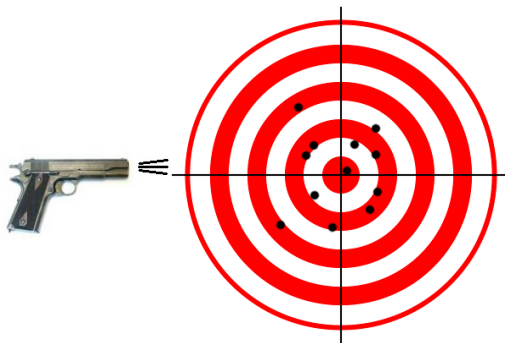
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Każdy pocisk zostawia w tarczy inny ślad...

Model jak to sobie wyobrazić

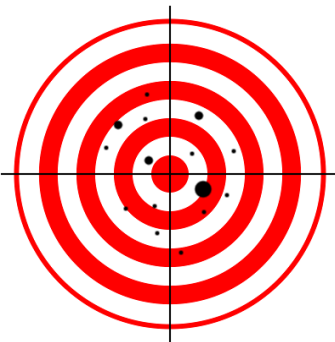
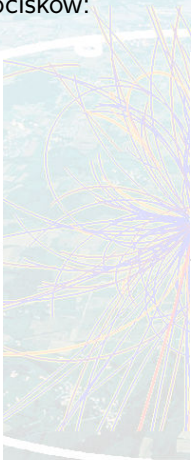
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Gdy strzelamy na małą odległość, ślady odpowiadają kalibrowi broni...

Model jak to sobie wyobrazić

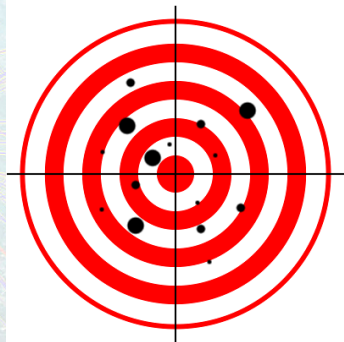
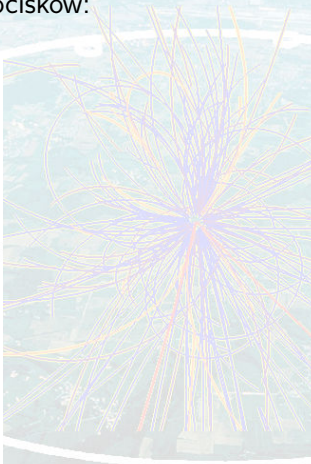
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Ale przy większej odległości, kaliber kuli może zmienić się w locie...

Model jak to sobie wyobrazić

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Na dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się mieszają...

Pomiary

“Deficyt” neutrin słonecznych był pierwszym zauważonym efektem, który dziś tłumaczymy jako przejaw **oscylacji neutrin**

Mierzmy tylko 1/3 neutrin elektronowych ze Słońca bo pozostałe zamieniają się (oscylują) na inny zapach (mionowe, taonowe), **niewidoczny w doświadczeniu.**

Obecnie zjawisko oscylacji neutrin zostało już potwierdzone w wielu różnych eksperymentach, dla neutrin z różnych źródeł, różnych zapachów i energii.

Mechanika kwantowa pozwala nam zrozumieć i opisać zjawisko oscylacji. Jest jednak jeden warunek:

Neutrino muszą mieć masę !!!

może ona być bardzo mała, ale jednak niezerowa...

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

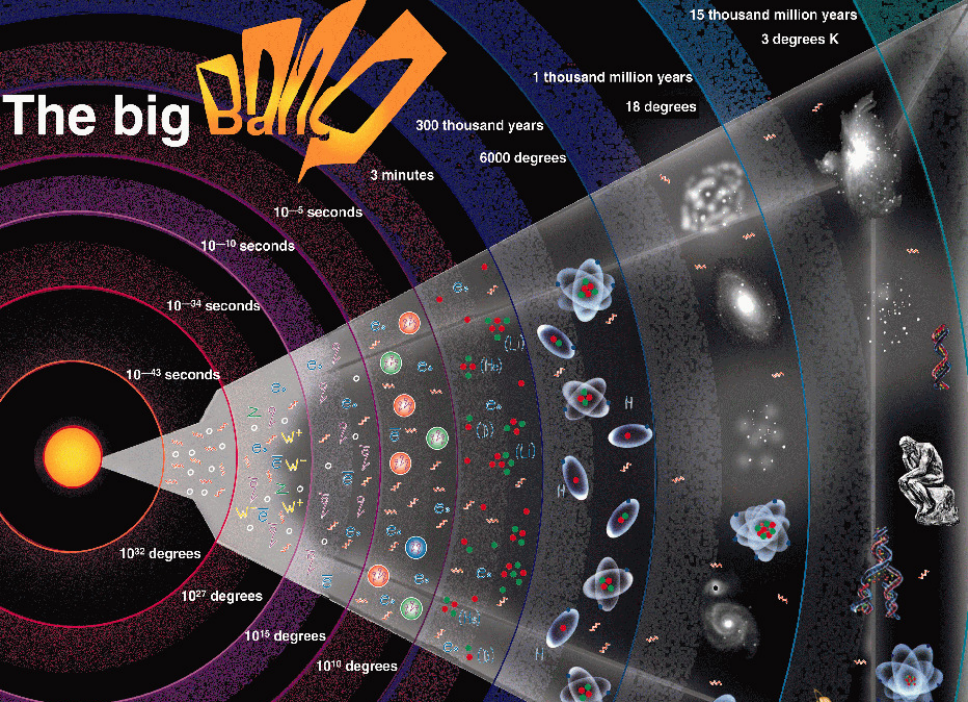
5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

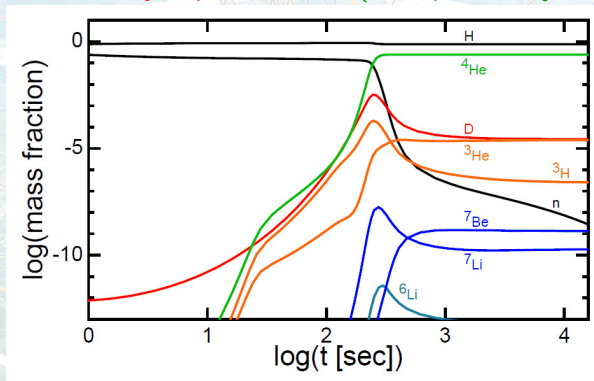
7 Ciemna materia

8 Perspektywy

The big Bang



Wszystkie dostępne obserwacje kosmologiczne zgodne są z modelem **Wielkiego Wybuchu** - ekspansji punktowego skupiska nieskończonej energii. Znajomość fizyki cząstek i fizyki jądrowej pozwala nam w tym modelu opisać **powstawanie różnych pierwiastków** (tzw. **pierwontą nukleosyntezę**).

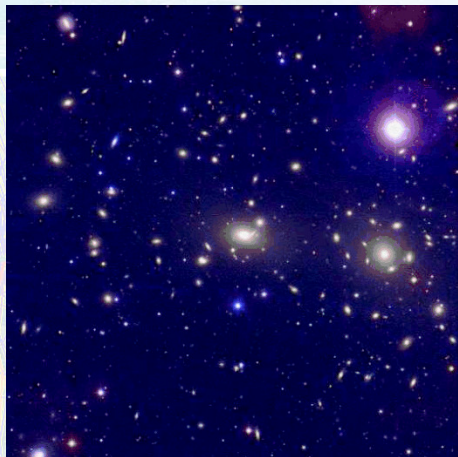


Z dopasowania obserwacji do teorii możemy wyznaczyć jaka jest średnia **gęstość atomów we wszechświecie** \Rightarrow ok. 0.5 protonu na m^3 ...

Przesłanki

W roku 1933 Fritz Zwicky zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (Coma Cluster), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

Gromada powinna się rozlecieć...



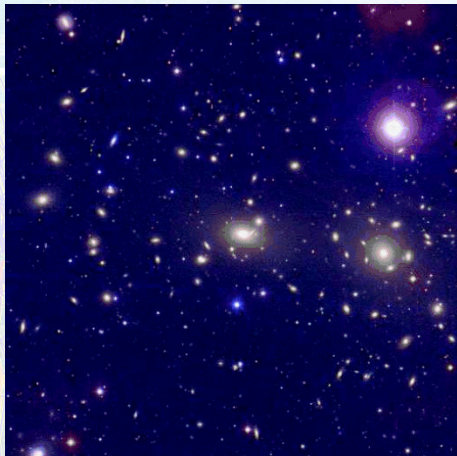
Przesłanki

W roku 1933 Fritz Zwicky zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (Coma Cluster), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

Gromada powinna się rozlecieć...

Wyznaczona na podstawie rozkładu prędkości masa “grawitacyjna” gromady była około 400 razy większa niż oczekiwano z obserwacji!

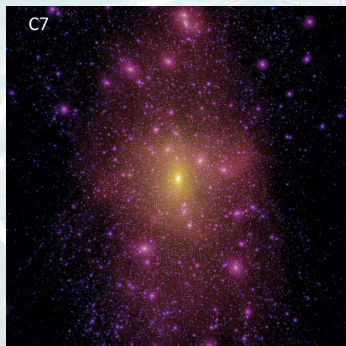
⇒ część tej materii musi być “ciemna”... ⇒ Ciemna Materia



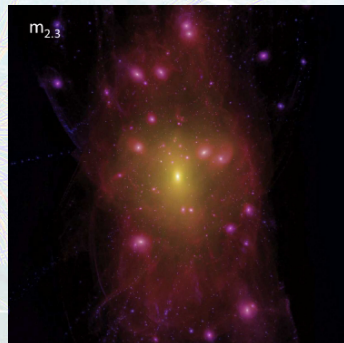
Przesłanki

Dodanie “zimnej” (złożonej z masywnych cząstek) ciemnej materii jest też konieczne, żeby wymodelować **tworzenie się struktur we Wszechświecie**.

Zimna ciemna materia



Ciepła ciemna materia (np. neutrino)

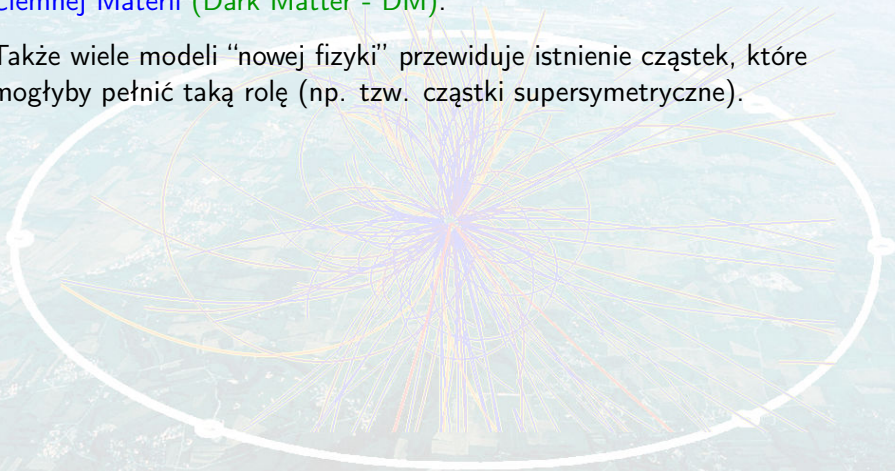


Bez zimnej ciemnej materii galaktyki nie zdążyłyby się uformować...

Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).



Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).

Poszukujemy ich na różne sposoby:

- szukając oddziaływania przelatujących cząstek DM w detektorach
- szukając sygnałów ich anihilacji z miejsc, gdzie mogłyby się gromadzić (Słońce, centrum Galaktyki, sąsiednie galaktyki karłowate)
- próbują je wyprodukować w zderzaczach cząstek (np. LHC)

Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).

Poszukujemy ich na różne sposoby:

- szukając oddziaływania przelatujących cząstek DM w detektorach
- szukając sygnałów ich anihilacji z miejsc, gdzie mogłyby się gromadzić (Słońce, centrum Galaktyki, sąsiednie galaktyki karłowate)
- próbują je wyprodukować w zderzaczach cząstek (np. LHC)

Niestety wszystkie dotychczasowe eksperymenty zakończyły się niepowodzeniem...

Jedno z największych wyzwań współczesnej fizyki cząstek!

1 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku

2 Granice stosowalności fizyki klasycznej

3 Budowa materii

4 Model Standardowy

5 Odkrycie bozonu Higgsa w LHC

6 Oscylacje neutrin

7 Ciemna materia

8 **Perspektywy**

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

Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

Problemy wynikające z obserwacji

- Gdzie się podziała **antymateria** ?
- Jakie są źródła **łamania** tzw. symetrii **CP** ?
- Skąd się bierze **prom. kosmiczne** b. wysokich energii ?
- Co to jest "**ciemna materia**" ?
- Co to jest "**ciemna energia**" !?
- Jaka jest natura **neutrin** ?

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

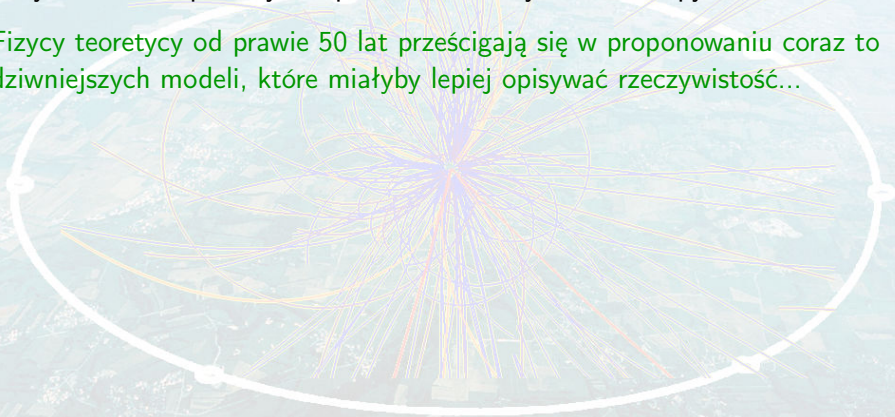
Jednak na wiele pytań nie udziela on odpowiedzi...

Problemy w konstrukcji samego modelu

- Dlaczego **materia** \equiv **fermiony**, **oddziaływania** \equiv **bozony** ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego proton się nie rozpada?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Rozbieżne poprawki - “**problem hierarchii**” ?
- Jak uwzględnić opis **grawitacji**?

Wyniki obserwacji 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.

Fizycy teoretycy od prawie 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać rzeczywistość...



Wyniki obserwacji 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.

Fizycy teoretycy od prawie 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać rzeczywistość...

Potrzebne są kolejne eksperymenty, które pozwoliłyby nam odnaleźć ślady “nowej fizyki”. Obecnie rozważane są projekty

- ILC - kolajder liniowy w Japonii e^+e^-
- CLIC - kolajder liniowy w CERN e^+e^-
- FCC - kolajder kołowy w CERN $e^+e^-/pp/ep$
- CEPC - kolajder kołowy w Chinach e^+e^-/pp

Wyniki obserwacji 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.

Fizycy teoretycy od prawie 50 lat prześcigają się w proponowaniu coraz to dziwniejszych modeli, które miałyby lepiej opisywać rzeczywistość...

Potrzebne są kolejne eksperymenty, które pozwoliłyby nam odnaleźć ślady “nowej fizyki”. Obecnie rozważane są projekty

- ILC - kolajder liniowy w Japonii e^+e^-
- CLIC - kolajder liniowy w CERN e^+e^-
- FCC - kolajder kołowy w CERN $e^+e^-/pp/ep$
- CEPC - kolajder kołowy w Chinach e^+e^-/pp

Kluczowe decyzje o kierunkach rozwoju fizyki cząstek powinny zostać podjęte wiosną 2020 roku...