

zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów

- Wykład 0: LHC – okno na Mikroświat
- Wykład 1: AA: Motywacja, cele fizyczne, akceleratorzy, eksperymenty
- Wykład 2: Plazma kwarkowo-gluonowa
- Wykład 3: Geometria zderzenia, stan początkowy-gęstość energii, produkcja entropii
- Wykład 4: Ewolucja systemu – efekty kolektywne
- Wykład 5: Procesy z dużym przekazem pędu
- Wykład 6: Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC
- Wykład 7: Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)

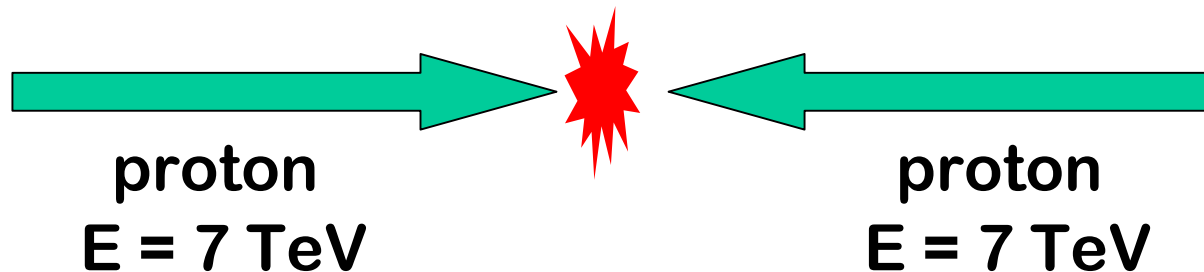
LHC – klucz do Mikroświata

Barbara Wosiek

LHC – Large Hadron Collider

Wielki Zderzacz Hadronów

**Gigantyczny akcelerator cząstek
w Europejskim Ośrodku Fizyki Cząstek – CERN
w pobliżu Genewy**



- ❑ **Wielki Zderzacz Hadronów: *Co to jest?***
 - ❑ **Oczekiwania: *Co możemy odkryć?***
 - ❑ **Eksperymenty: *Jak możemy dokonać odkryć?***
-
- ❑ **Polska w LHC**
 - ❑ **Aktualności**

Wstęp: parę użytecznych wielkości

E – energia cząstki

m – masa cząstki

c – prędkość światła

$$E = mc^2$$



nazwy jednostek

Potęga 10	Liczba	Symbol
10^{-12}	0.000 000 000 001	p (piko)
10^{-9}	0.000 000 001	n (nano)
10^{-6}	0.000 001	μ (mikro)
10^{-3}	0.001	m (mili)
10^0	1	
10^3	1 000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)

Jednostki energii/ masy:

elektronowolt

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Jednostki długości:

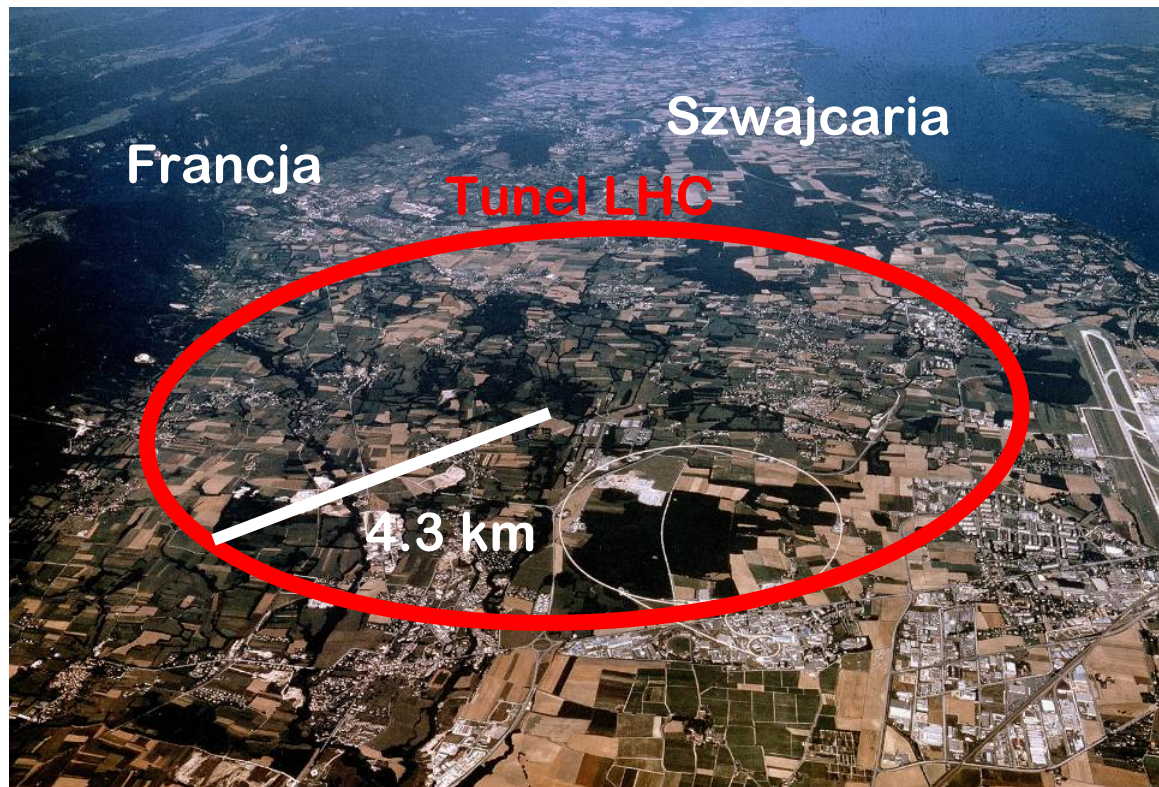
cząstka o energii E ma
cechy fali o długości λ
odwrotnie proporcjonalnej
do energii

Masa protonu $\approx 1 \text{ GeV}/c^2 = 1\,000\,000\,000 \text{ eV}/c^2 \longrightarrow \lambda \approx 10^{-15} \text{ m}$

E protonu w LHC $7 \text{ TeV} = 7\,000\,000\,000\,000 \text{ eV} \longrightarrow \lambda \approx 10^{-18} \text{ m}$

LHC – „mikroskop” o najlepszej zdolności rozdzielczej!

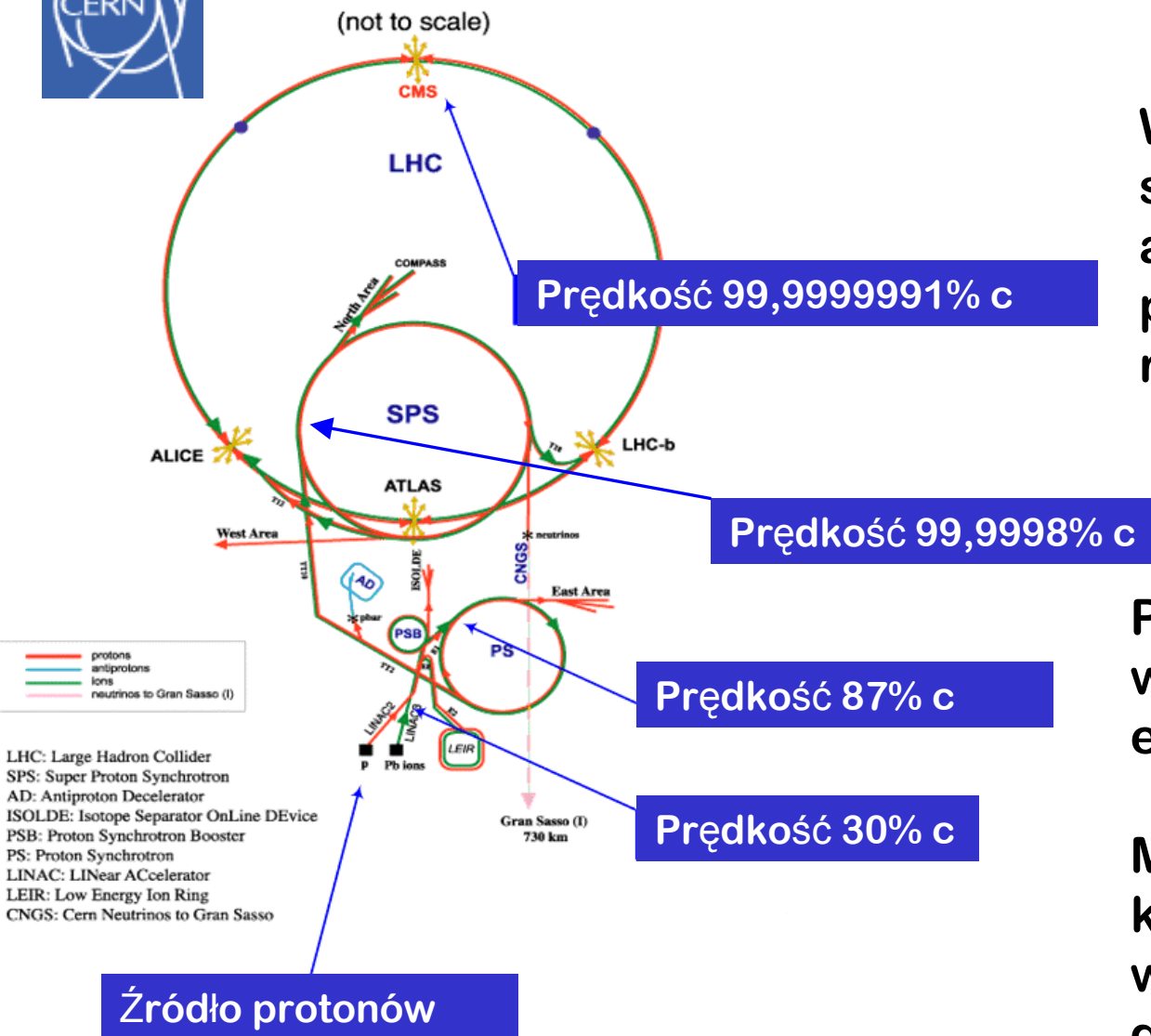
Wielki Zderzacz Hadronów: Usytuowanie geograficzne



Akcelerator umieszczony jest w tunelu o długości 27 km, znajdującym się ~100 m pod ziemią między Genewą i górami Jura.



CERN: Kompleks akceleratorów



Wiązki protonów są stopniowo przyspieszane, aż osiągną w LHC prędkość praktycznie równą prędkości światła.

Protony są przyspieszane w silnych polach elektrycznych.

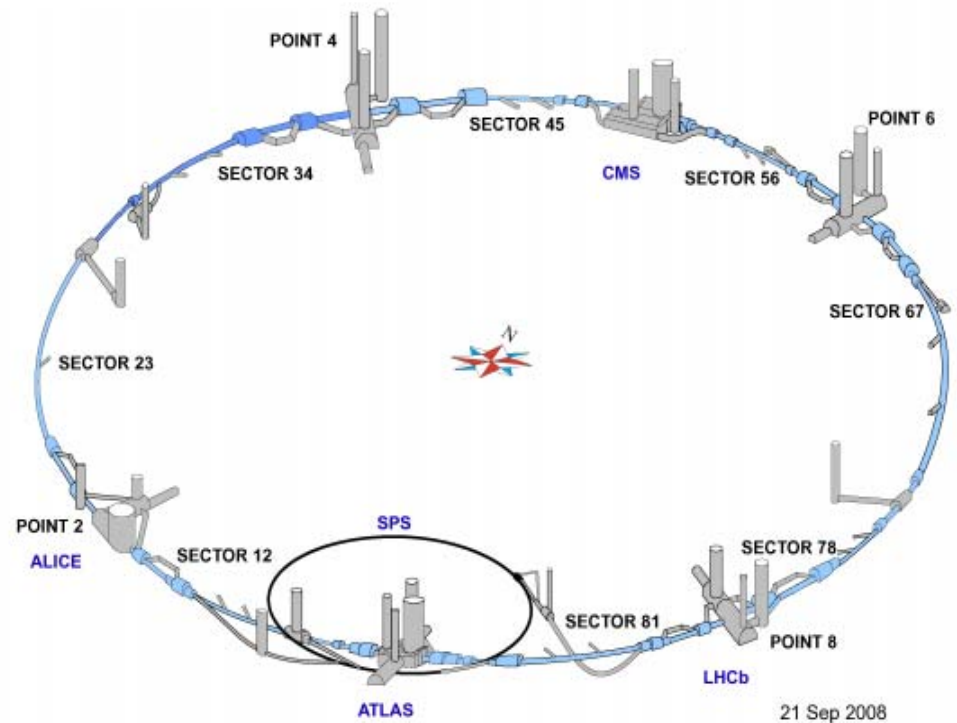
Magnesy ogniskujące i korekcyjne ogniskują wiązki cząstek, a magnesy dipolowe zakrzywiają tor cząstek.

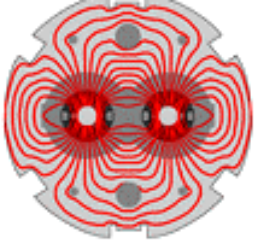
Wielki Zderzacz Hadronów

Widok rzeczywisty tunelu LHC



Widok schematyczny:
podział na 8 części-sektorów



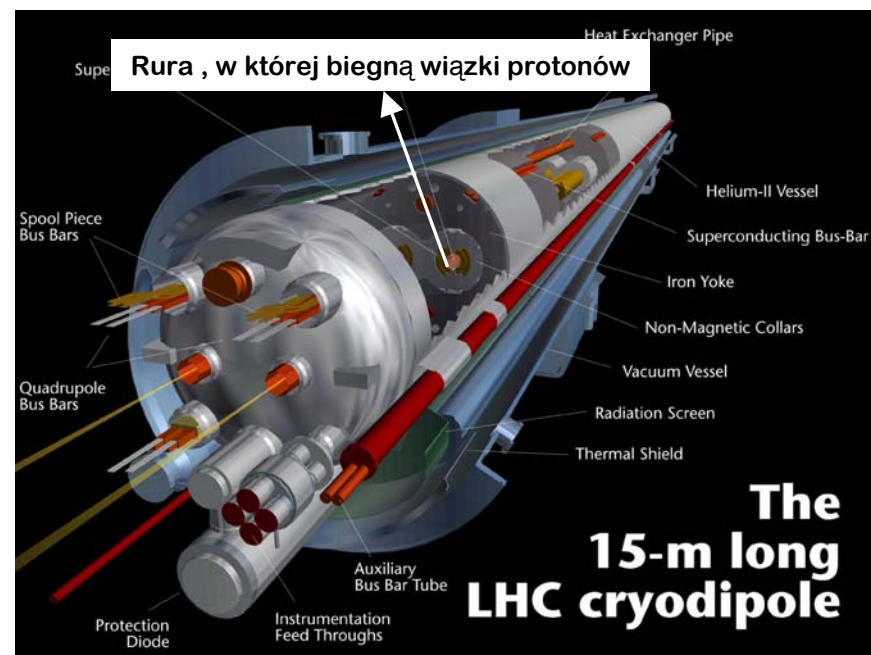


Wielki Zderzacz Hadronów

- Magnesy dipolowe utrzymują wiązki protonów na zamkniętych orbitach kołowych
- Magnesy z tytanku niobu są chłodzone ciekłym helem do temperatury $-271,3^{\circ}\text{C}$ ($1,9^{\circ}\text{K}$)!
- W tej temperaturze cewki magnesów przewodzą prąd (12 kA) bez oporu
- Krytyczna indukcja magnetyczna to 9.5 T, co odpowiada energii protonów 8-9 TeV

Każdy sektor jest wyposażony w 154 nadprzewodzące magnesy dipolowe o długości 15m i wadze 35 t

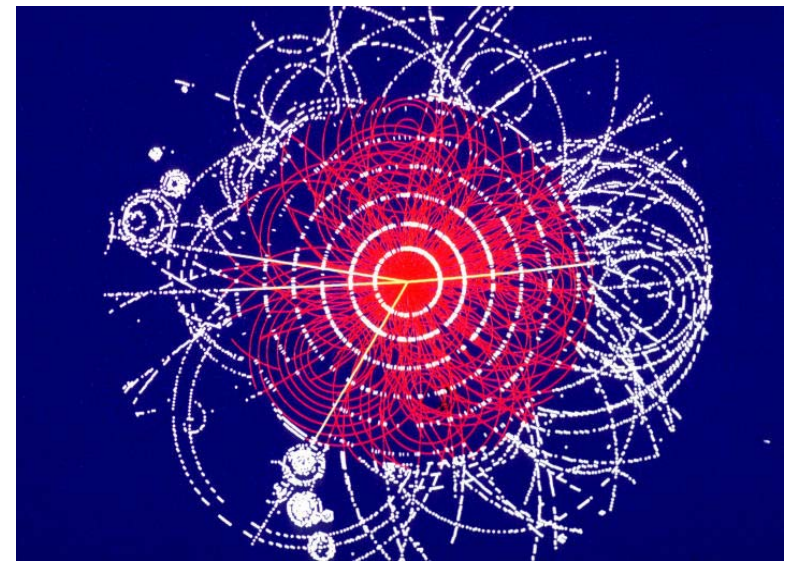
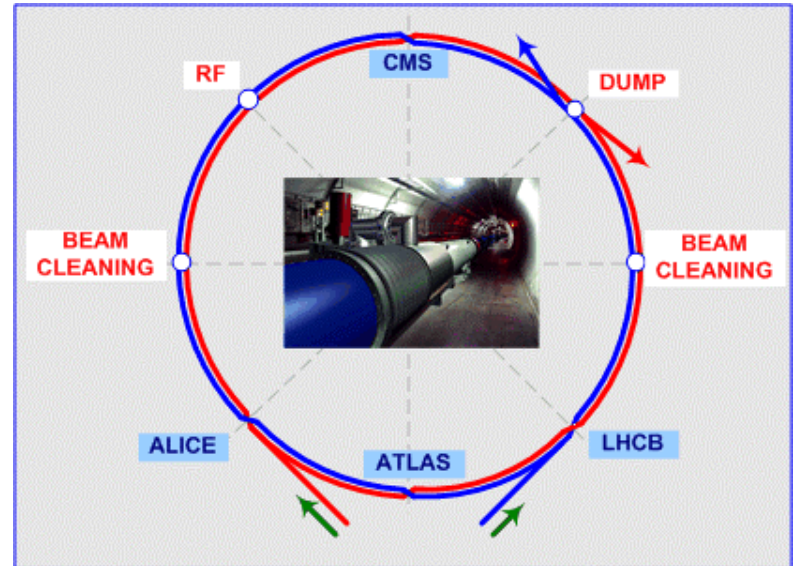
*LHC największa lodówka na świecie!
(700 tys. l ciekłego helu)*



**The
15-m long
LHC cryodipole**

Wielki Zderzacz Hadronów

- Wiązki protonów biegną w rurze próżniowej (ciśnienie ok. 10^{-13} atm, 10x mniejsze niż na Księżycu).
- Wiązki są podzielone na 'paczki' (3000 paczek o dł. kilku cm, w 7m odstępach).
- W każdej paczce ~100mld protonów
- Energia zmagazynowana w paczce odpowiada wybuchowi 80 kg trotylu.
- W czterech punktach paczki są ściśnięte do średnicy ok. $16\ \mu\text{m}$ (mniejszej niż śr. ludzkiego włosa) i skierowane wzdłuż prostej → zderzenie!



Symulacja zderzenia proton-proton w centralnym detektorze eksperymentu ATLAS.

LHC – Machina do odkryć (Świat Nauki, kwiecień 2008)

Zbudowaliśmy najpotężniejszy akcelerator na świecie
(5 miliardów euro), ale po co?

Energia zderzenia proton-proton = 14 TeV

Ok. 15% tej energii można zamienić na produkcję nowych cząstek

$$E \longleftrightarrow m$$

Możemy więc poszukiwać cząstek o masach aż do $\sim 2 \text{ TeV}/c^2$,
2000 razy większych od masy protonu!

Dla porównania pracujący obecnie akcelerator Tevatron w USA dostarcza zderzeń proton-antyproton o energii 2 TeV, czyli stwarza możliwość obserwacji cząstek o masach do ok. $0.3 \text{ TeV}/c^2$.

Czy rzeczywiście spodziewamy się nowych cząstek
o masach $1\text{-}2 \text{ TeV}/c^2$?

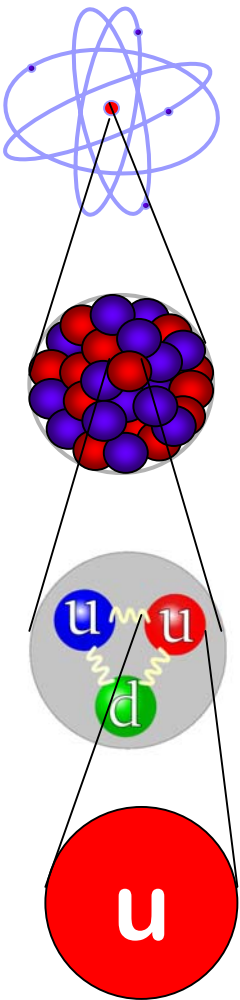
Co już wiemy o budowie materii:

Atom (10^{-10} m) składa się z elektronów krążących wokół jądra.

Jądro (10^{-14} m) składa się z protonów i neutronów.

Proton (10^{-15} m) składa się z kwarków.

Kwark (10^{-18} m) nie ma struktury, nie występuje samodzielnie.



Elementarne składniki materii

Materia zbudowana jest z dwóch grup cząstek:

- **kwarków** (znamy 6 rodzajów kwarków i 6 antykwarków)
 - **leptonów** (6 leptonów i 6 antyleptonów, najbardziej znany to elektron)
- Kwarki i leptony należą do tzw. fermionów, cząstek o spinie $1/2$

Kwarki	u górny up	c powabny charm	t prawdziwy top
	d dolny down	s dziwny strange	b piękny bottom

Leptony	ν_e neutrino elektronowe	ν_μ neutrino mionowe	ν_τ neutrino tau
	e elektron	μ mion	τ tau

Siły (oddziaływania) w przyrodzie

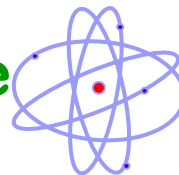
wiążą elementarne składniki w obiekty złożone

Siły w przyrodzie

Względna siła oddziaływania
dla 2 protonów w jądrze

Oddziaływania elektromagnetyczne

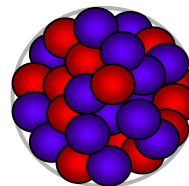
wiążą elektrony i jądra w atomy



1

Oddziaływania silne

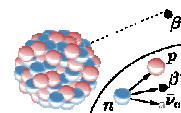
wiążą protony i neutrony w jądrach atomowych,
a także kwarki w cząstki zwane hadronami



20

Oddziaływania słabe

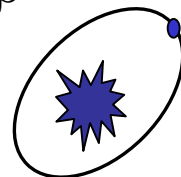
są odpowiedzialne za rozpady ciężkich kwarków
i leptonów w lżejsze, także radioaktywny rozpad β



10^{-7}

Oddziaływania grawitacyjne

łączą masywne obiekty – Układ Słoneczny



10^{-36}

Kwarki oddziałują silnie, leptoni nie

**Model Standardowy wyjaśnia z czego składa się materia
i co scala elementarne składniki materii.**

Model Standardowy

- Matematyczny opis – kwantowa teoria pola
- Rozwinięty w latach '70 ubiegłego wieku
- Opisuje oddziaływania elektroslabe i oddziaływania silne

Jeżeli na obiekt działa siła, to mówimy o oddziaływaniu tego obiektu ze źródłem, albo inaczej z polem.

Siły są przenoszone przez specjalne cząstki zwane bozonami (spin = 1):

- silna przez 8 cząstek zwanych gluonami o masie =0
- elektromagnetyczna przez foton, $m=0$
- słaba przez 3 bozony Z , W^+ , W^- , bardzo masywne, $m \sim 100 \text{ GeV}/c^2$

Kwarki i leptoni różnią własność podobną do ładunku elektrycznego, zwana kolorem: kwarki są kolorowe, a leptoni nie

MS jest bardzo dobrze zgodny z doświadczeniem – szereg sukcesów (odkrycie W , Z w 1983 r, szóstego kwarku w 1995 r.)

Ale...

Problemy Modelu Standardowego

Model opisuje, ale nie tłumaczy:

- Masy cząstek, siły oddziaływań
- Dlaczego kwarki i leptony tworzą 3 rodziny
- Dlaczego ładunek protonu = – ładunek elektronu

Brakujące elementy :

- ✓ Cząstka Higgsa – źródło mas bozonów (także kwarków i leptonów)
- ✓ Ciemna materia
- ✓ Asymetria materia – antymateria
- ✓ Brak jednolitego opisu oddziaływań elektroślabych i silnych
- ✓ Grawitacja – całkowicie pominięta

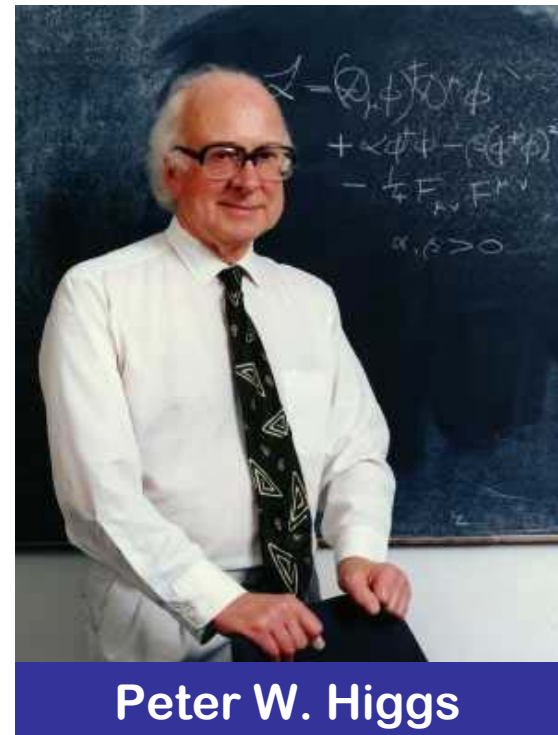
Zadania dla LHC:

Sprawdzenie Modelu Standardowego

Odkrycie postulowanej cząstki – bozonu Higgsa

Cząstka Higgsa oddziałuje z kwarkami i leptonami, nadając im masę.

Model Standardowy nie przewiduje jak ciężka powinna być cząstka Higgsa, $m < \sim 1 \text{ TeV}/c^2$



Peter W. Higgs

Ale, może Model Standardowy to tylko przybliżenie prawdziwej teorii...

Zadania dla LHC:

Fizyka spoza Modelu Standardowego

Supersymetria

teoria z symetrią pomiędzy bozonami (spin całkowity)
i fermionami (spin połówkowy).

Rozwiązuje kilka głównych problemów Modelu Standardowego:

- problem hierarchii mas
bozony W, Z i kwark prawdziwy mają masy rzędu 100x masa protonu (m_p),
podczas gdy elektrony $0.0005 m_p$, a neutrina $<10^{-10}m_p$.
- pozwala na unifikację oddziaływań elektroślabych i silnych

Przewiduje istnienie 'morza' nowych cząstek - superpartnerów:

- bozonów o spinie połówkowym (gluon $\rightarrow$ gluino, W $\rightarrow$ wino,...)
- fermionów o spinie całkowitym (kwarki $\rightarrow$ skwarki, leptony $\rightarrow$ sleptony)

Przewidywane masy nowych cząstek ok. 1 TeV/c²!

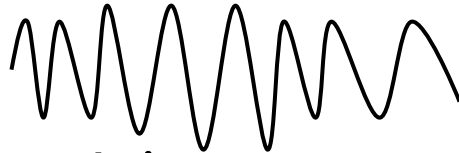
**Poszukiwania od kilkadziesiąt lat bezowocne,
ale to LHC stwarza dogodne warunki do ich szukania.**

Zadania dla LHC:

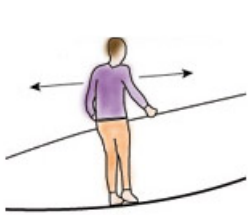
Fizyka spoza Modelu Standardowego

Dlaczego żyjemy akurat w 3 wymiarach przestrzennych + czas?
Są teorie/modele, które twierdzą, że tak nie jest.

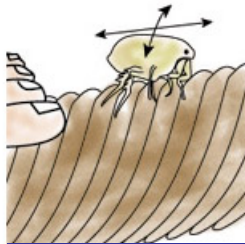
Teorie strun zakładają, że podstawowe składniki materii, kwarki i leptony, nie są punktowe, ale są rozciągłymi, wibrującymi strunami:



Wtedy Świat w którym żyjemy ma co najmniej **10 wymiarów!**
Dlaczego nie widzimy tych dodatkowych wymiarów?



Akrobata na linie porusza się tylko w 1 wymiarze



Ale pchła może się poruszać w 2 wymiarach

Dodatkowe wymiary można ukryć
poprzez zwinięcie je w okręgi
o bardzo małym promieniu
($R \sim 10^{-35}$ m)

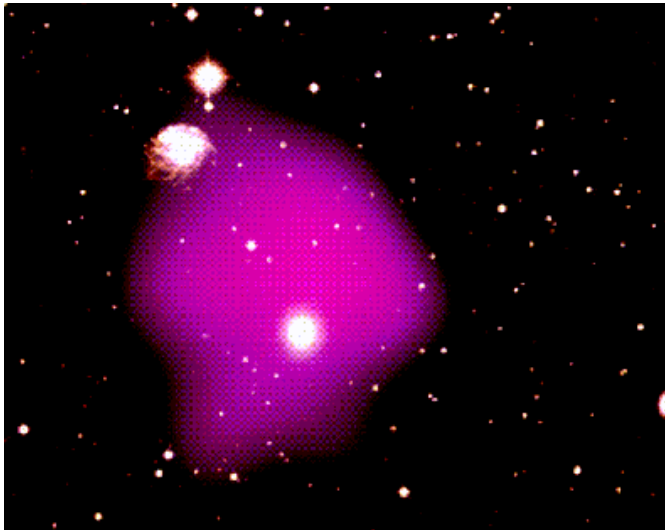
Potrzebujemy bardzo dobrego 'mikroskopu',
aby zobaczyć dodatkowe wymiary → LHC

Zadania dla LHC:

Wyjaśnienie zagadki ciemnej materii

Wszechświat tylko w 5% składa się z widocznych obiektów (gwiazdy, galaktyki, planety, gaz międzygwiazdny).

Ok. 23% stanowi tzw. Ciemna (niewidoczna) Materia, która oddziałuje grawitacyjnie z widocznymi obiektami.



Obraz w promieniach Roentgena: skupiony gorący gaz powinien się rozproszyć gdyby tylko grawitacja związana z widzialnymi obiektami odgrywała rolę. To skupisko jest właśnie 'trzymane' przez oddziaływanie grawitacyjne z ciemną materią.

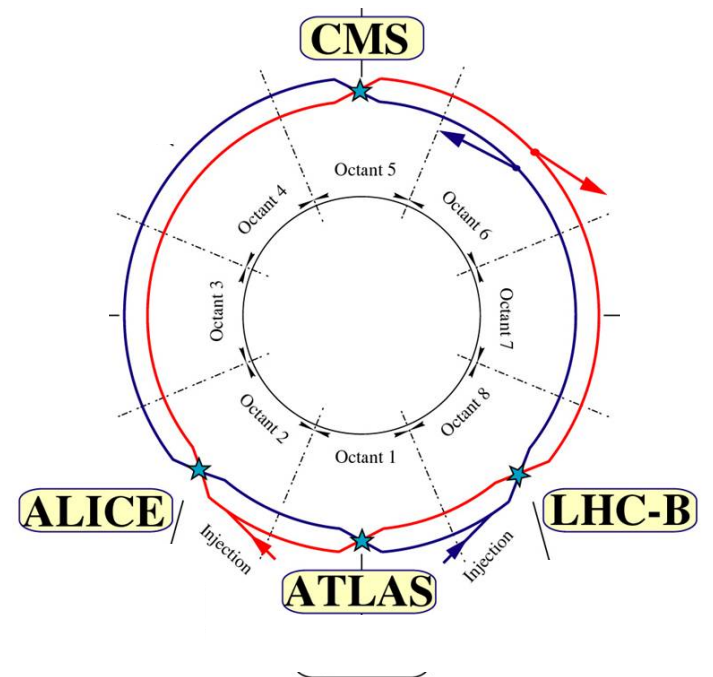
Odkrycie cząstek neutralnych o masach $0.1 - 1 \text{ TeV}/c^2$ rozwiązałoby problem ciemnej materii.

LHC – Machina do odkryć

Rzeczywiście potencjał odkrywczy
Wielkiego Zderzacza Hadronów jest ogromny,
ale samo zderzanie protonów nic jeszcze nie da...
...trzeba zobaczyć i zrozumieć co w tym zderzeniu powstało.

Potrzebny jest detektor!

Cztery duże detektory - eksperymenty
będą rejestrować zderzenia
cząstek przyspieszanych w LHC.



Wyzwania dla eksperymentów LHC

- Jedno przecięcie wiązek to ok. 20 zderzeń proton-proton
- W każdym zderzeniu produkowanych jest dużo cząstek
→ miliony kanałów elektroniki odczytu



- Cząstki należy zidentyfikować – pomiar masy i ładunku
- Zmierzyć ich pędy i zrekonstruować przestrzennie całe zderzenie (lub jego znaczącą część)
→ warstwowa struktura detektorów

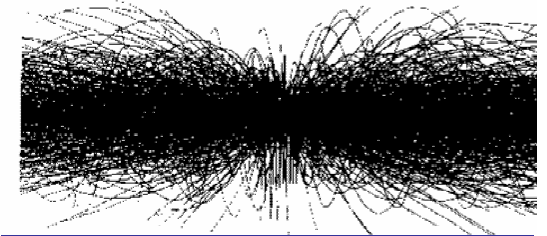
Wyzwania dla eksperymentów LHC

- Protony będą się zderzać 30 mln razy na sek
- Interesujące zderzenia są niezwykle rzadkie, np. oczekujemy 1 cząstki Higgsa co 2,5 sek
→ selekcja przypadków

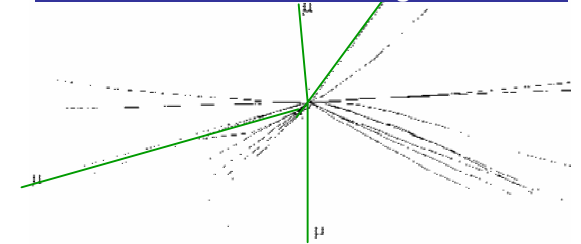
- Ogromne objętości danych, chociaż po wszystkich poziomach selekcji zapisujemy ok. 100 zderzeń na sekundę → 100 MB/sek
- Analiza danych za pomocą sieci kilkudziesięciu tysięcy komputerów o wielkiej mocy i pamięci znajdujących się w instytucjach na całym świecie

→ Stymulowanie rozwoju technologii obliczeń komputerowych

Przed selekcją

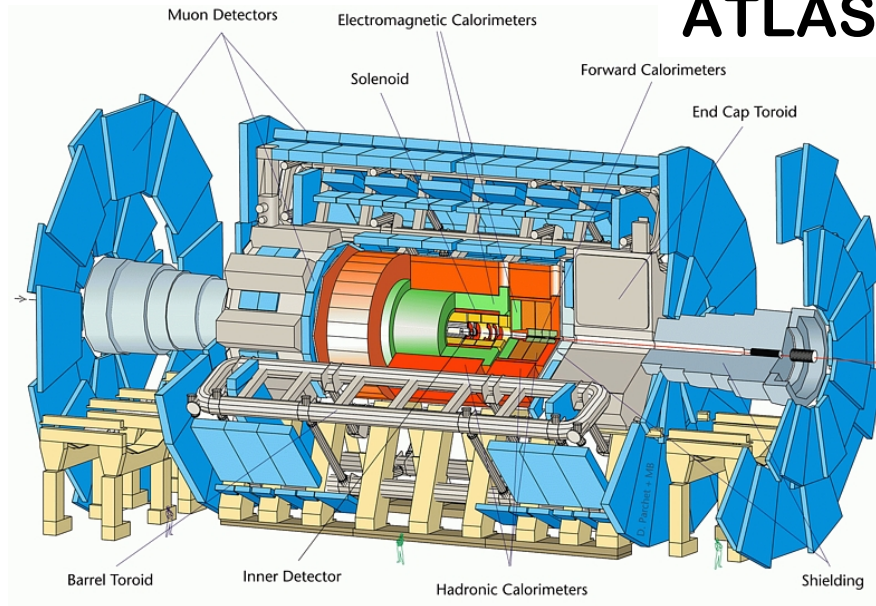


Po selekcji

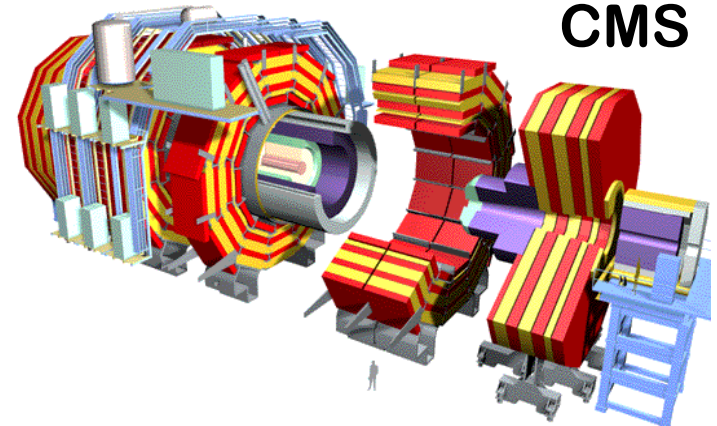


Eksperymenty LHC w CERN

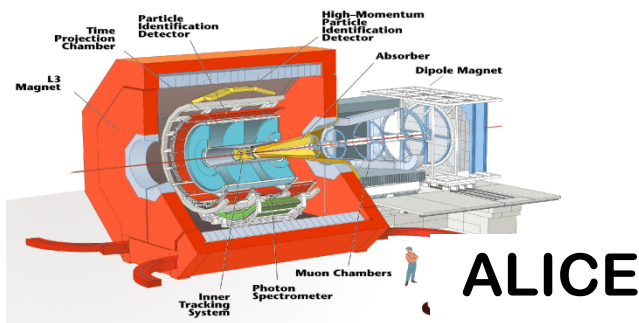
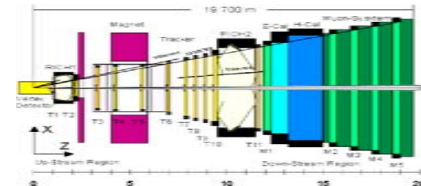
ATLAS



CMS



LHCb



ALICE



ATLAS

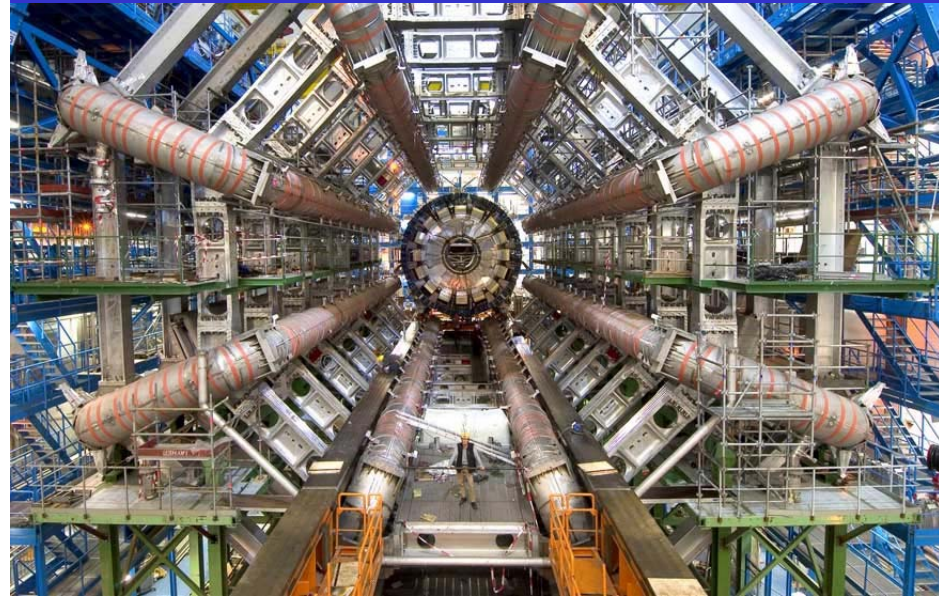
A Thoroidal LHC ApparatuS

Największy eksperyment jaki kiedykolwiek zbudowano dla potrzeb fizyki cząstek
(dł. 44m, wys. 22m, waga 7 tys. ton):
6-cio piętrowa kamienica opleciona
3 tys. km kabli.



ATLAS w porównaniu do
5-cio piętrowego budynku

Instalacja kalorymetru, listopad 2005



Symulacja:
rozpad cząstki Higgsa



Symulacja:
rozpad Czarnej Dziury

Cel:

Poszukiwanie cząstek Higgsa
i innych nowych zjawisk; zderzenia Pb-Pb

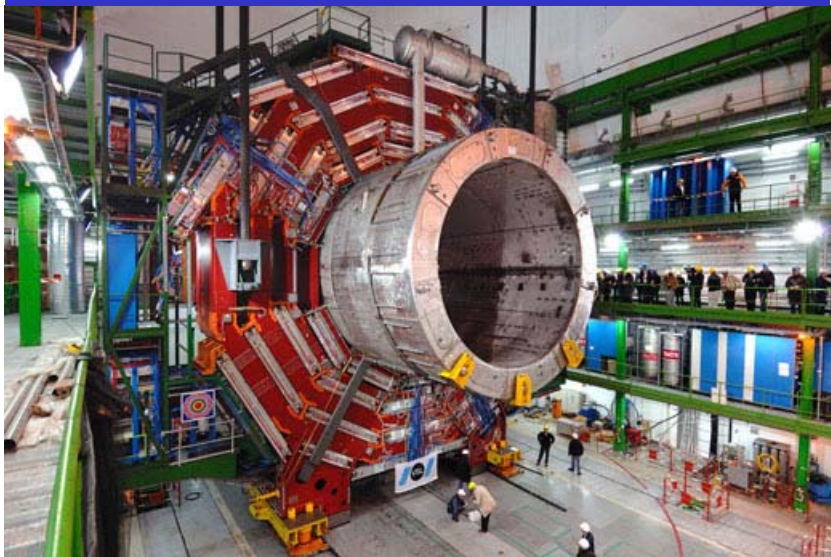


CMS

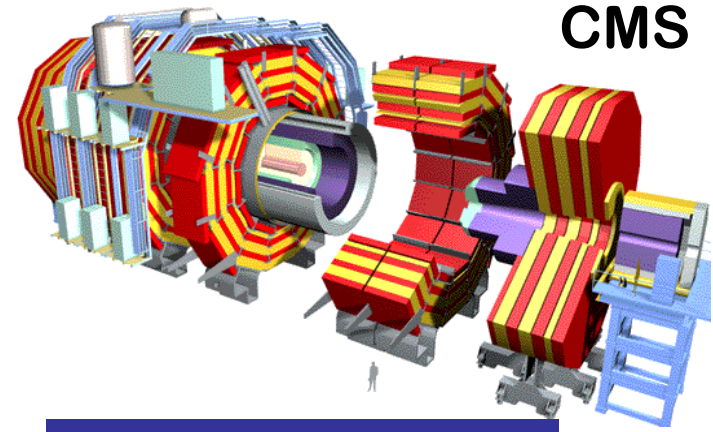
Compact Muon Solenoid

Najcięższy detektor – 12,5 tys. ton
(ma tyle żelaza co wieża Eiffla)
2x mniejszy od ATLASa, ale 2x cięższy.

Instalacja centralnego detektora o wadze
2000 ton, 2007r.



Schemat detektora CMS



CMS

Symulacja zderzenia
z rozpadem cząstki
Higgsa



Cel:

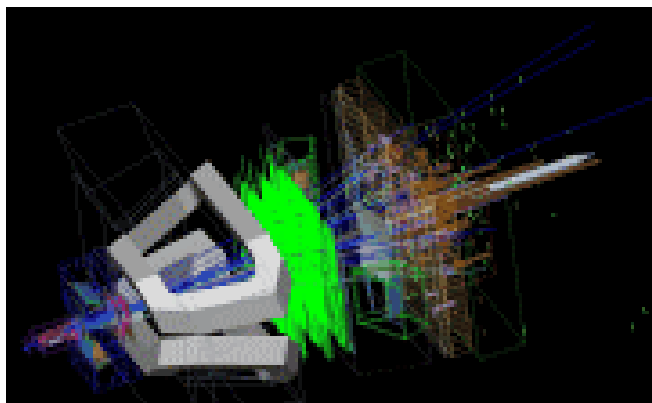
Poszukiwanie cząstek Higgsa
i innych nowych zjawisk; zderzenia Pb-Pb



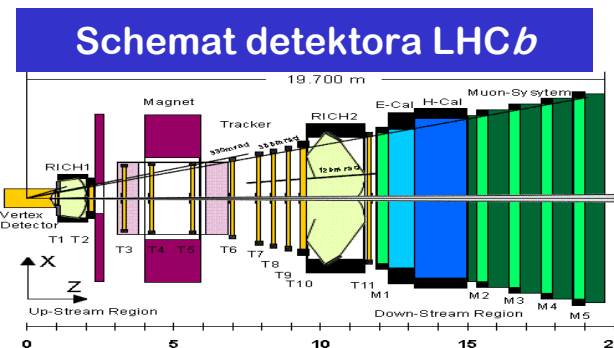
LHCb

Large Hadron Collider beauty experiment

Eksperyment LHCb bada produkcję cząstek z kwarkiem (lub antykwarkiem) pięknym, b . Detektor jest rozbudowany tylko w kierunku jednej z wiązek protonów (ok. 20 m długości).



Symulacja przypadku z rzadkim rozpadem cząstki z kwarkiem b .



Podziemna hala LHCb, luty 2008.

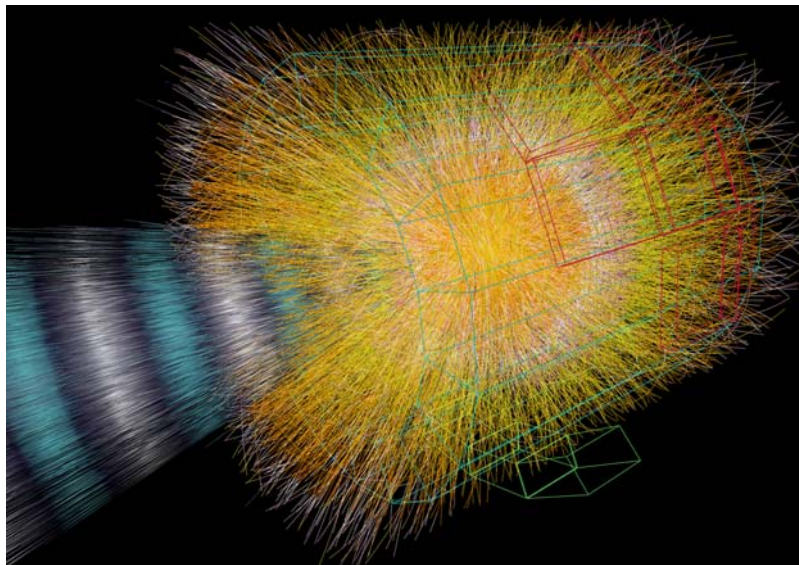
Cel:

Wyjaśnienie dlaczego we Wszechświecie występuje niemal wyłącznie materia, a nie antymateria.

A Large Ion Collider Experiment

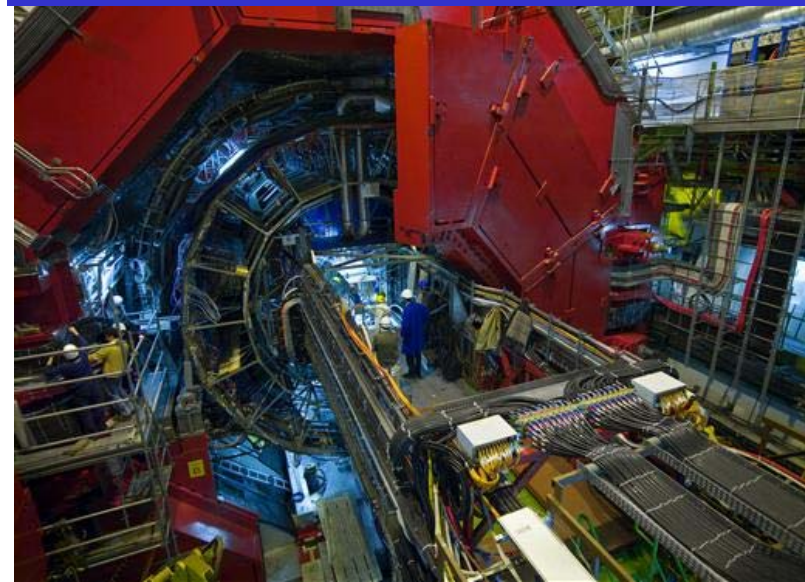
ALICE jest eksperymentem dedykowanym do badania zderzeń ołów-ołów.

Wiązki jonów ołowiu będą także przyspieszane w LHC, w późniejszym etapie działania akceleratora, do energii 2,7 TeV na nukleon.



W wyniku zderzeń jąder ołowiu może powstać nawet 20 tys. cząstek.

Detektor ALICE na początku 2008 r.



Cel:

Badanie materii jądrowej ogrzanej do temperatury 100 000 razy wyższej niż temperatura wnętrza Słońca → odtworzenie warunków panujących we Wszechświecie tuż po (10^{-6} sek) Wielkim Wybuchu.

Poszukiwanie stanu materii złożonego ze swobodnych kwarków i gluonów.

Polska w LHC

Budowa i uruchamianie LHC:

**~100 inżynierów i techników z IFJ PAN, AGH,
Politechniki Krakowskiej i Politechniki Wrocławskiej**

Dwa zespoły pracowały przy:

- Testowaniu połączeń elektrycznych magnesów nadprzewodzących w tunelu zderzacza (sprawdzenie ok. 100 tys. połączeń, wykrycie ponad 130 usterek)**
- Sprawdzaniu połączeń mechanicznych, kriogenicznych i próżniowych (wykrycie ponad 3000 nieprawidłowości)**

Made in Poland w CERNie:

**liczne kontrakty dla polskiego przemysłu
(m.in. dostawa helu z PGNiG w Odolanowie)**

Polska w LHC

Udział w eksperymentach LHC:

Ok. 350 polskich fizyków (eksperymentatorów i teoretyków), inżynierów, techników i studentów pracuje przy eksperymentach LHC.

ATLAS: IFJ PAN, AGH

(detektor wewnętrzny, elektronika zasilania, odczytu i sterowania)

CMS: Uniwersytet Warszawski, Instytut Problemów Jądrowych (W-wa), Politechnika Wrocławska

(m.in. elektroniczny system selekcji)

LHCb: IFJ PAN, AGH, Instytut Problemów Jądrowych(W-wa)

(m.in. prototyp i konstrukcja modułów detektora słomkowego)

ALICE: IFJ PAN, Instytut Problemów Jądrowych(W-wa), Politechnika Warszawska

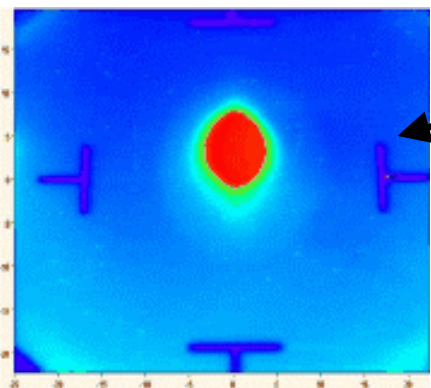
(m.in. projektowanie i testowanie komory projekcji czasowej)

Aktualności

10 września 2008

Wielki Zderzacz Hadronów zaczął pracę!

Etap pierwszy to wpuszczanie pojedynczych wiązek i sprawdzenie czy utrzymają się na orbicie kołowej.



Z napięciem patrzyliśmy
na monitory wiązki
rejestrujące przełot chmury
ładunków.

**Spektakularny sukces:
wiązka 1, a wkrótce i wiązka 2
okrążają pełny pierścień.**



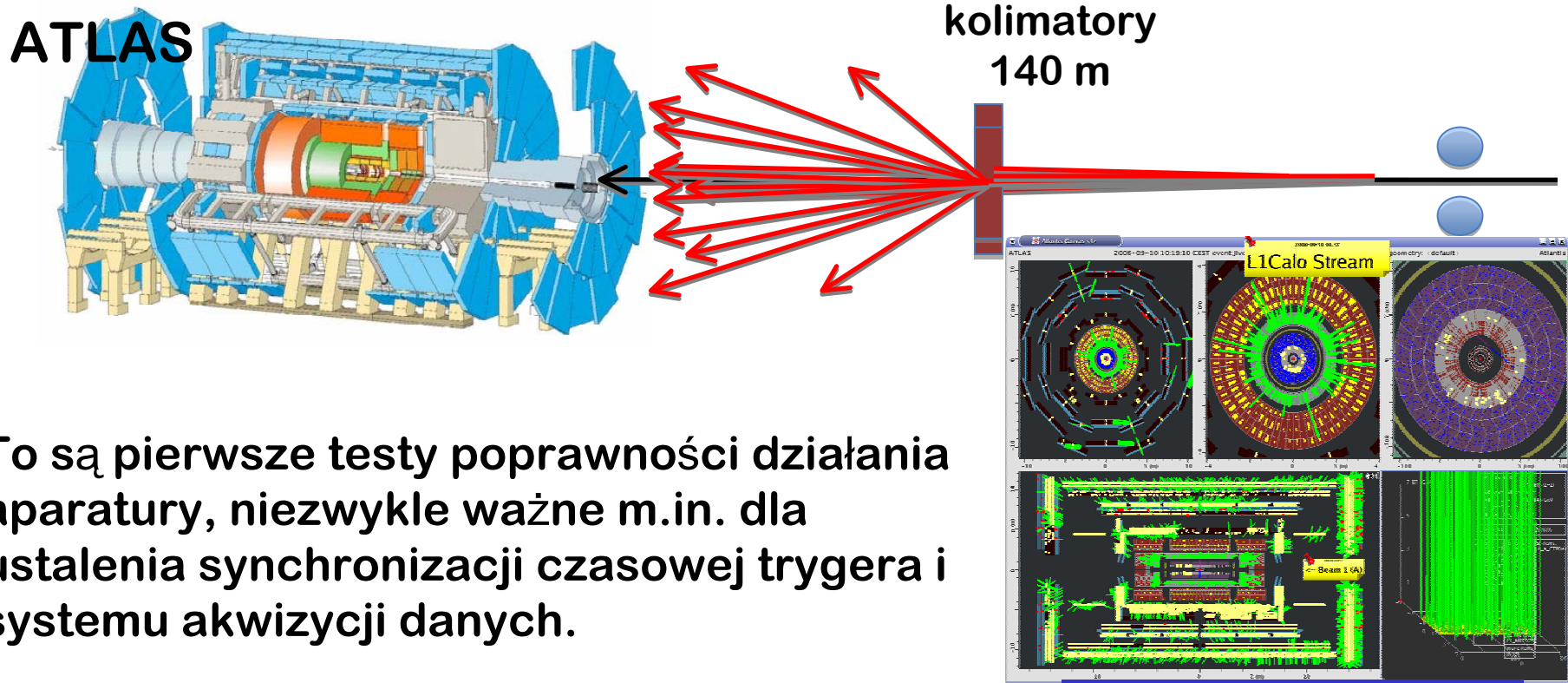
Lynn Evans –kierownik projektu LHC.
Carlo Rubbia –laureat nagrody Nobla.
Robert Aymar-dyrektor generalny CERN.

11 września 2008

Wiązka utrzymana na orbicie przez ponad pół godziny.

Aktualności

W czasie prób z pojedynczymi wiązkami (brak zderzeń) eksperymenty nie próżnowały. Wiązka była zatrzymywana na kolimatorach, umieszczonych przed detektorami. Produkty zderzenia wiązki z materiałem kolimatora były rejestrowane przez detektory.



To są pierwsze testy poprawności działania aparatury, niezwykle ważne m.in. dla ustalenia synchronizacji czasowej trygera i systemu akwizycji danych.

Podobnie w innych eksperymentach...

Przypadek zarejestrowany przez detektor ATLAS.

Aktualności

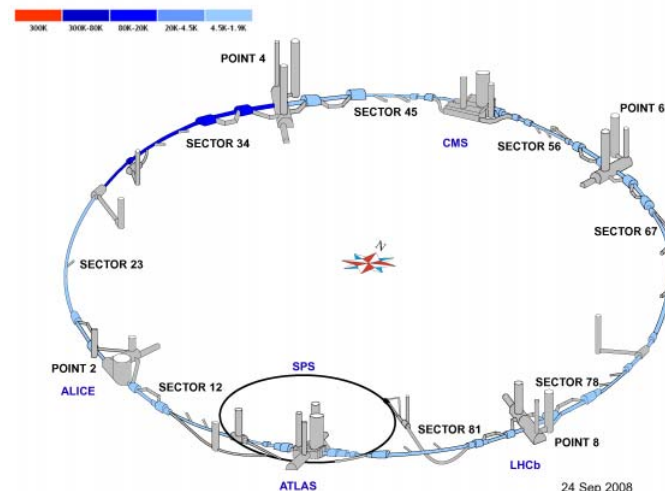
12 września 2008 – awaria transformatora

19 września 2008 – awaria w sektorze 34

W czasie prac kontrolnych (bez wiązki) zarejestrowano duży wyciek helu do tunelu, spowodowany prawdopodobnie uszkodzonym połączeniem elektrycznym pomiędzy dwoma magnesami.

Sektor musi zostać ogrzany w celu postawienia właściwej diagnozy oraz naprawy uszkodzenia, a następnie ponownie oziębiony.

Naprawa awarii potrwa ok. 1- 2 miesięcy.
A potem okres obligatoryjnego zimowego wyłączenia kompleksu akceleratorów w CERN.



**Proces ogrzewania sektora 34
już się rozpoczął.**

Ponowny re-start wczesną wiosną 2009.

Proces uruchamiania tak skomplikowanego urządzenia jak Wielki Zderzacz Hadronów jest długotrwały.

Przeplatają się w nim sukcesy z niepowodzeniami.

**Musimy uzbroić się w cierpliwość,
na ODKRYCIA trzeba jeszcze poczekać.**

Uzupełnienie: Listy elementarnych składników materii

Tabela leptonów

(spin połówkowy)

Lepton	Masa [MeV/c ²]	Czas życia [s]
Elektron e^-	$\sim 0,5$	trwały
Neutrino el. ν_e	$<10^{-5}$ ($\sim 10^{-7}?$)	trwałe
Mion μ^-	~ 100	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$
Neutrino m. ν_μ	$<0,17$ ($\sim 10^{-7}?$)	trwałe
Taon τ^-	~ 1800	$\sim 3 \cdot 10^{-13}$
Neutrino t. ν_τ	<18 ($\sim 10^{-7}?$)	trwałe

Tabela kwarków

(spin połówkowy)

Kwark	Masa [MeV/c ²]	Ładunek [e]
Górny <i>u</i>	~4	+2/3
Dolny <i>d</i>	~6	-1/3
Dziwny <i>s</i>	~130	-1/3
Powabny <i>c</i>	~1300	+2/3
Piękny <i>b</i>	~4300	-1/3
Prawdziwy <i>t</i>	~175000	+2/3

Tabela bozonów

(spin całkowity)

Bozon	Masa [GeV/c ²]	Czas życia [s]
Foton γ	0	∞
Gluon G (8)	0	∞
Bozon W(2)	~82	10^{-26}
Bozon Z	~91	10^{-26}

Bozon Higgsa?

100 – 1000?