

Fizyka zderzeń relatywistycznych ciężkich jonów

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: Model saturacji. Kolorowy Kondensat Szklany

Wykład 7: Korelacje HBT (doc. M. Kowalski)

Wykład 8: Eksperyment PHOBOS przy akceleratorze RHIC

Wykład 9: Eksperyment ALICE przy akceleratorze LHC (doc.M. Kowalski)

Wykład 10: Fizyka ciężkich jonów w eksperymencie ATLAS (LHC)

Wykład 11: LHC – okno na Mikroświat

Badanie silnie oddziaływującej materii w ekstremalnych warunkach

Gorąca i/lub gęsta materia

Między-dyscyplinarny charakter badań:

- Fizyka cząstek elementarnych
- Fizyka jądrowa
- Astrofizyka
- Kosmologia

Chromodynamika Kwantowa

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	
for two protons in nucleus					20

Czy resztkowe oddziaływanie silne jest pewnym przybliżeniem kwarkowo-gluonowej teorii QCD?

Dwa oblicza silnych oddziaływań

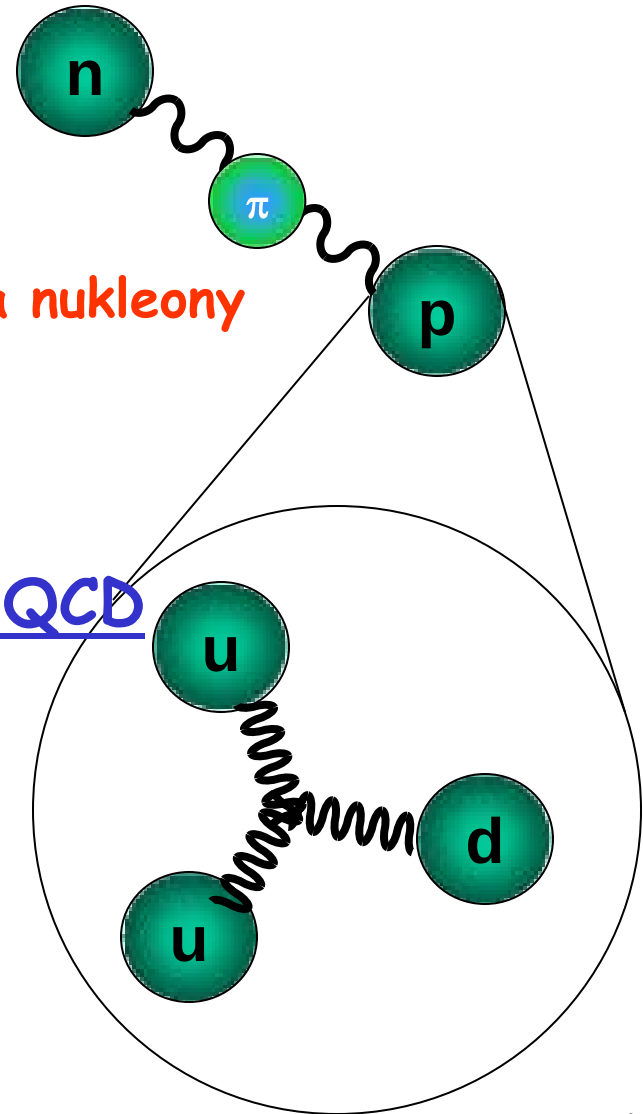
Reszkowe oddziaływanie silne - Konwencjonalna fizyka jądrowa

⇒deuteron może być łatwo rozbity na dwa nukleony

Fundamentalne oddziaływanie silne-QCD

⇒swobodne kwarki nie występują

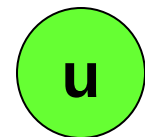
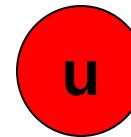
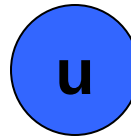
Nukleony i kwarki są bardzo różne!!



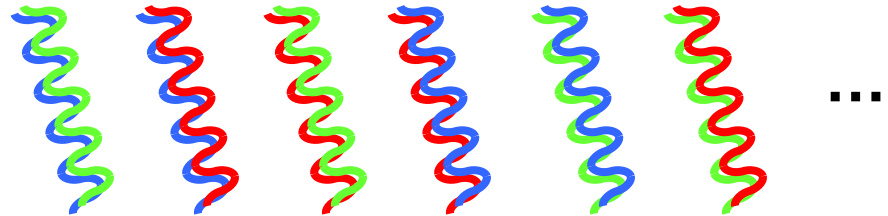
Dlaczego kwarki i gluony są takie 'inne'?

Kwarki i gluony są 'kolorowymi' obiektami!
Kolor jest trochę bardziej skomplikowanym ładunkiem

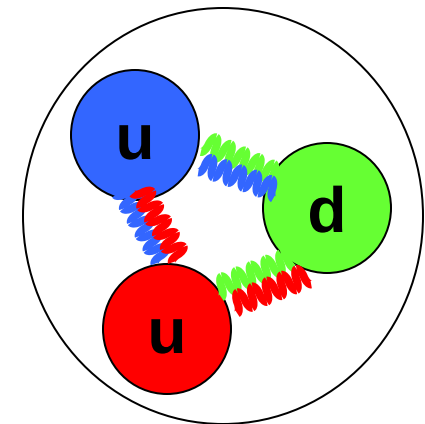
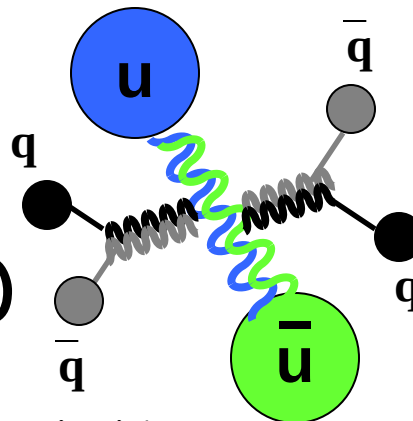
Kwarki mają pojedynczy kolor



Gluony mają kolor i anty-kolor



Mezony & bariony są 'białe'
(RGB lub $R + (\text{anty}-R)$, etc.)

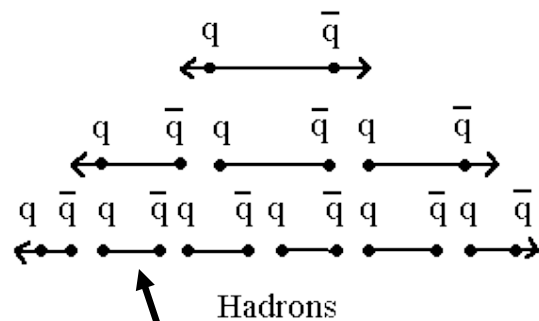


QCD: dwie szczególne własności

➡ Uwięzienie (tylko jakościowe zrozumienie)

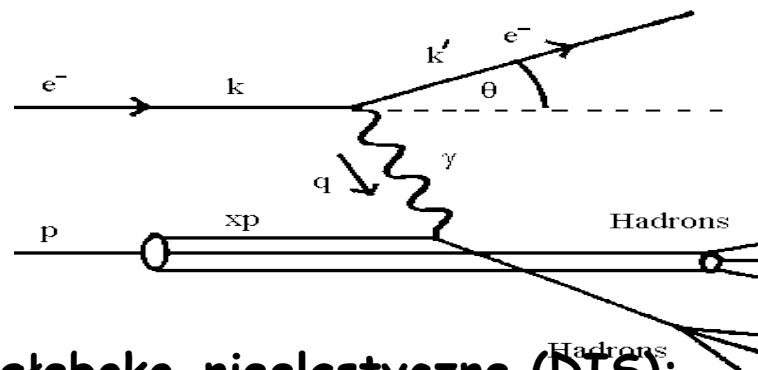
Gluony oddziałują zarówno z kwarkami, jak i z innymi gluonami.

Tym silniejsze jest oddziaływanie między kwarkami im bardziej chcemy je odseparować, tak jak by były związane gumową liną.



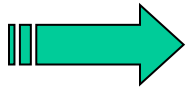
Z próżni powstają pary kwark-antykwarek.

Sila $\rightarrow$ stałej,
nawet dla $r \rightarrow \infty$!
 $V_{QCD} \sim -a/r + \sigma r$



Rozpraszanie głęboko-nieelastyczne (DIS): pojedynczy kwark zostaje 'kopnięty' przez wirtualny foton o dużej energii (aby penetrować małe odległości) $\rightarrow$ hadrony

QCD: dwie szczególne własności (c.d.)



Symetria chiralna

$$m_q = 0$$

QCD i próżnia QCD są symetryczne

Lagranżjan jest niezmienniczy względem transformacji lewa-prawa
(Równanie Dirac'a ma dwa niezależne składniki - $SU_L(2)$ i $SU_R(2)$)

ALE

$$m_q \neq 0$$

Próżnia QCD nie jest chiralnie symetryczna!

Wartość oczekiwana kondensatu kwark-antykwar jest różna od zera.

$$\langle q\bar{q} \rangle_{\text{vac}} \neq 0, \quad \alpha(\Lambda_{\text{QCD}})$$

Symetria chiralna jest spontanicznie złamana!!!

Symetria chiralna

Symetria chiralna (c.d.)

ODDZIAŁYWANIA (wzbudzone stany QCD)

Małe gęstości energii:

Kwarki dostają duże masy ('constituent masses')
w wyniku oddziaływań między sobą
i z otaczającą próżnią.
($m_u \sim m_d \sim 300 \text{ MeV}$, $m_s \sim 500 \text{ MeV}$)

Złamana symetria chiralna!

Duże gęstości energii:

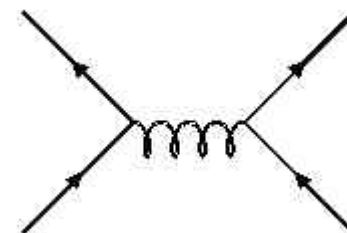
Kwarki (partony) stają się swobodne,
ich masy ('current masses') maleją.
($m_u \sim m_d \sim 5 \text{ MeV}$, $m_s \sim 150 \text{ MeV}$)
 $\langle q\bar{q} \rangle_{\text{vac}} = 0$

**Symetria chiralna zostaje
częściowo przywrócona!**

Dwa obszary stosowalności QCD

"Perturbacyjna QCD" (pQCD)

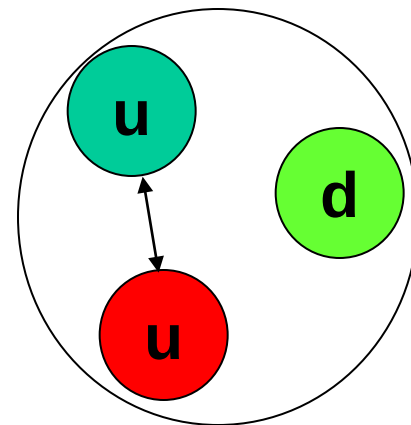
- Małe odległości, mała stała sprzężenia α_s
- Dokładne rachunki mogą być robione
- Dobrze zdefiniowana dla kwarków i gluonów (nazywanych "partonami")
- Asymptotyczna swoboda



$$Q^2 > 1 \text{ GeV}$$

"Nieperturbacyjna QCD" (npQCD)

- Duże odległości, duża stała sprzężenia α_s
- Ekstremalnie trudne obliczenia
- Stosuje się do cząstek występujących w naturze ("hadrony")
- Uwięzienie



$$Q^2 \ll 1 \text{ GeV}$$

Próżnia QCD

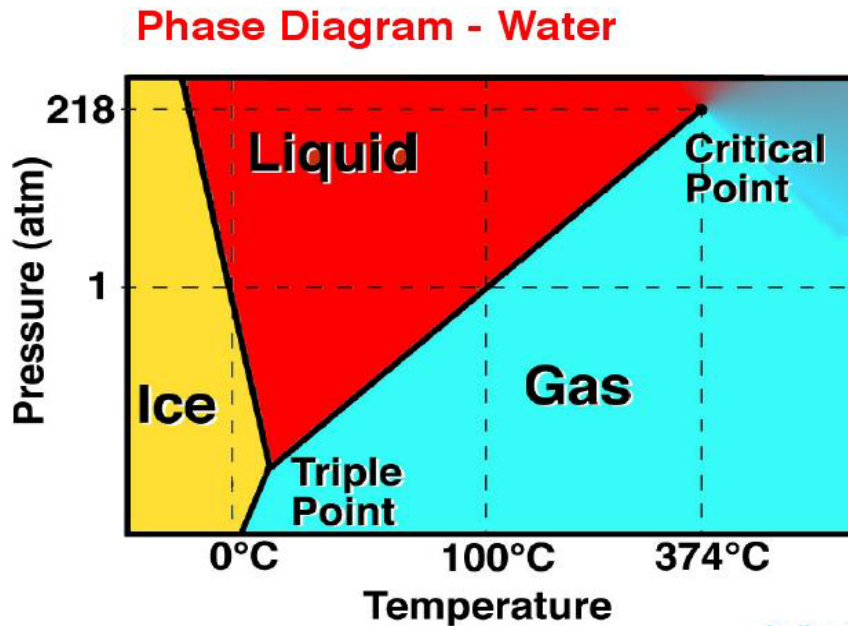
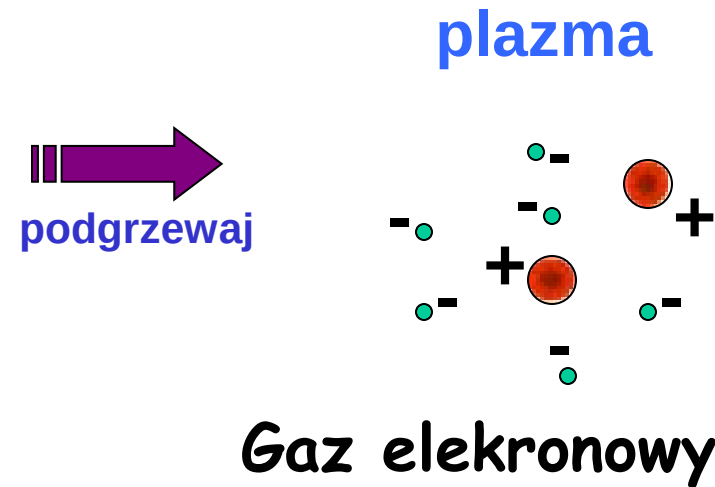
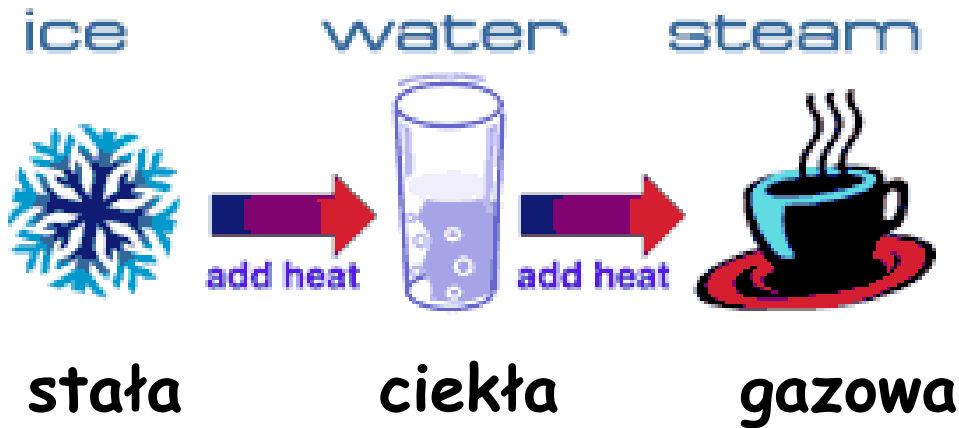
- Ma skomplikowaną strukturę wewnętrzną - nie jest pusta
- Składa się z morza kondensatów $q\bar{q}$
- Ma energię i masę
- Fluktuuje wokół punktu zerowego

Niska gęstość energii: próżnia zachowuje się jak kolorowy dielektryk

Wysoka gęstość energii: kondensaty próżniowe rozpuszczają się, próżnia staje się kolorowym przewodnikiem.

To jest plazma kwarkowo-gluonowa, QGP!

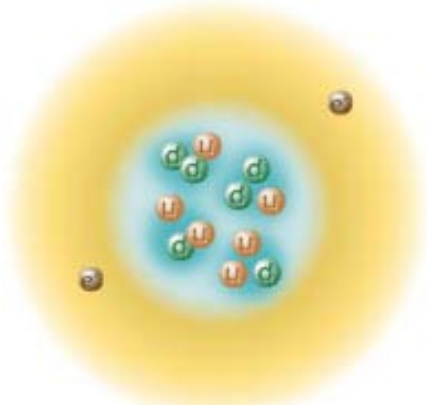
Fazy zwykłej materii



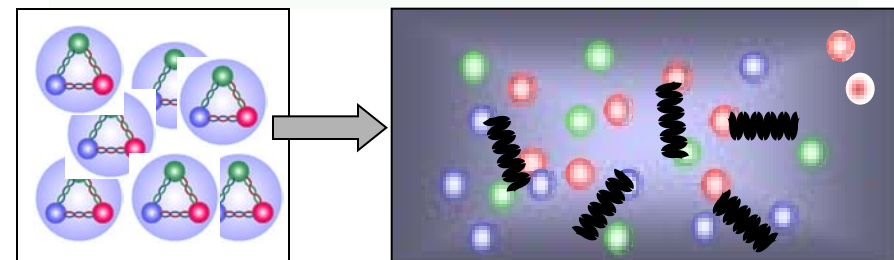
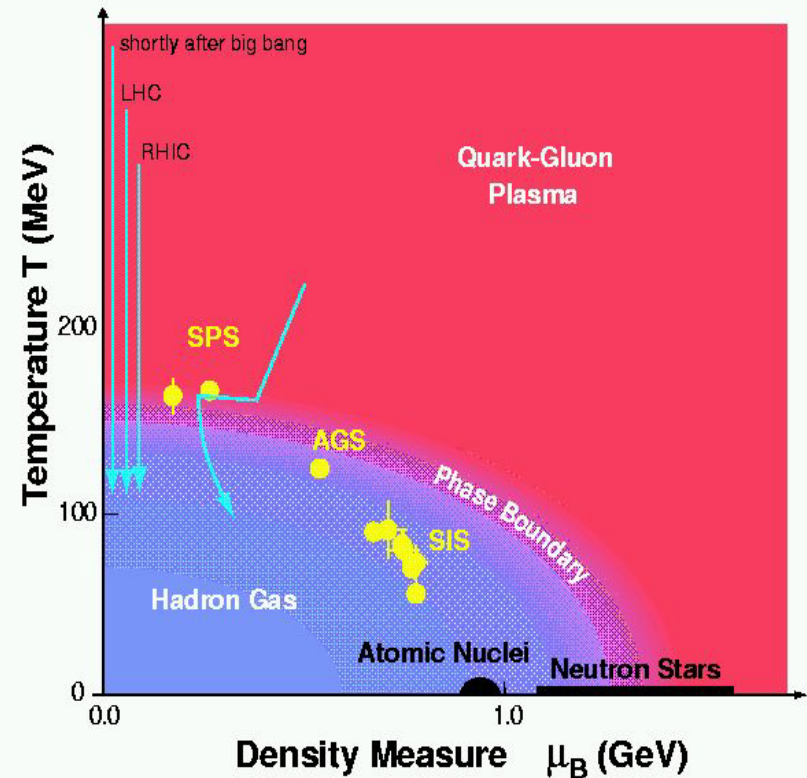
Oddziaływania elektromagnetyczne są odpowiedzialne za stany fazowe zwykłej materii.

Fazy materii silnie oddziaływującej

Analogiczne stany do stanów zwykłej materii!



- Jądra zachowują się jak ciecz
- Nukleony zachowują się jak gaz
- **Plazma kwarkowo-gluonowa**
 - "Jonizacja" nukleonów przez podgrzewanie
 - "Kompresja" nukleonów , zwiększanie gęstości



Czego się nauczyliśmy?

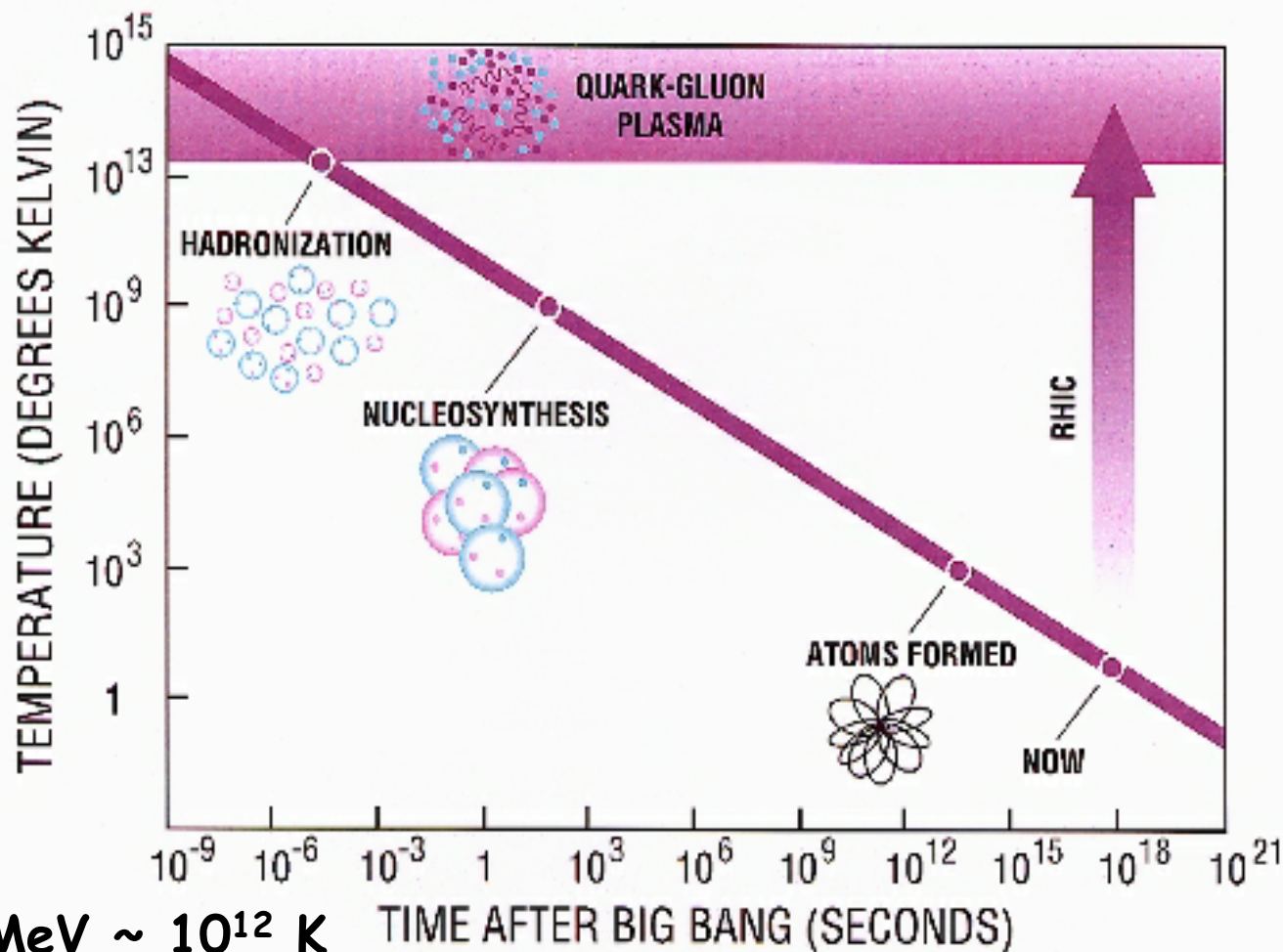
- QCD jest bardzo bogatą teorią
- Oddziaływania jakościowo zależą od skali
 - Duże długości fal - hadrony, npQCD
 - Małe długości fal - partony, pQCD
- Uwięzienie - brak swobodnych partonów
 - Próba uwolnienia partonu prowadzi do jego hadronizacji
 - Teoretycznie niezrozumiała - tylko modelowo
- Jak możemy badać i rozumieć QCD?

Jak i gdzie badać gorącą i gęstą materię?



Relatywistyczne zderzacz ciężkich jonów

Temperatura w czasie ewolucji Wszechświata



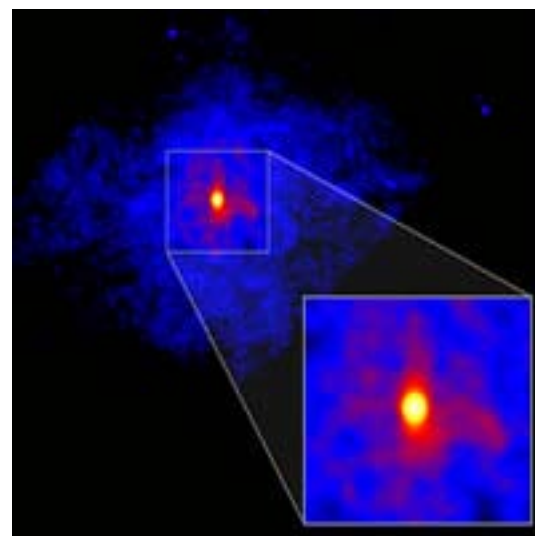
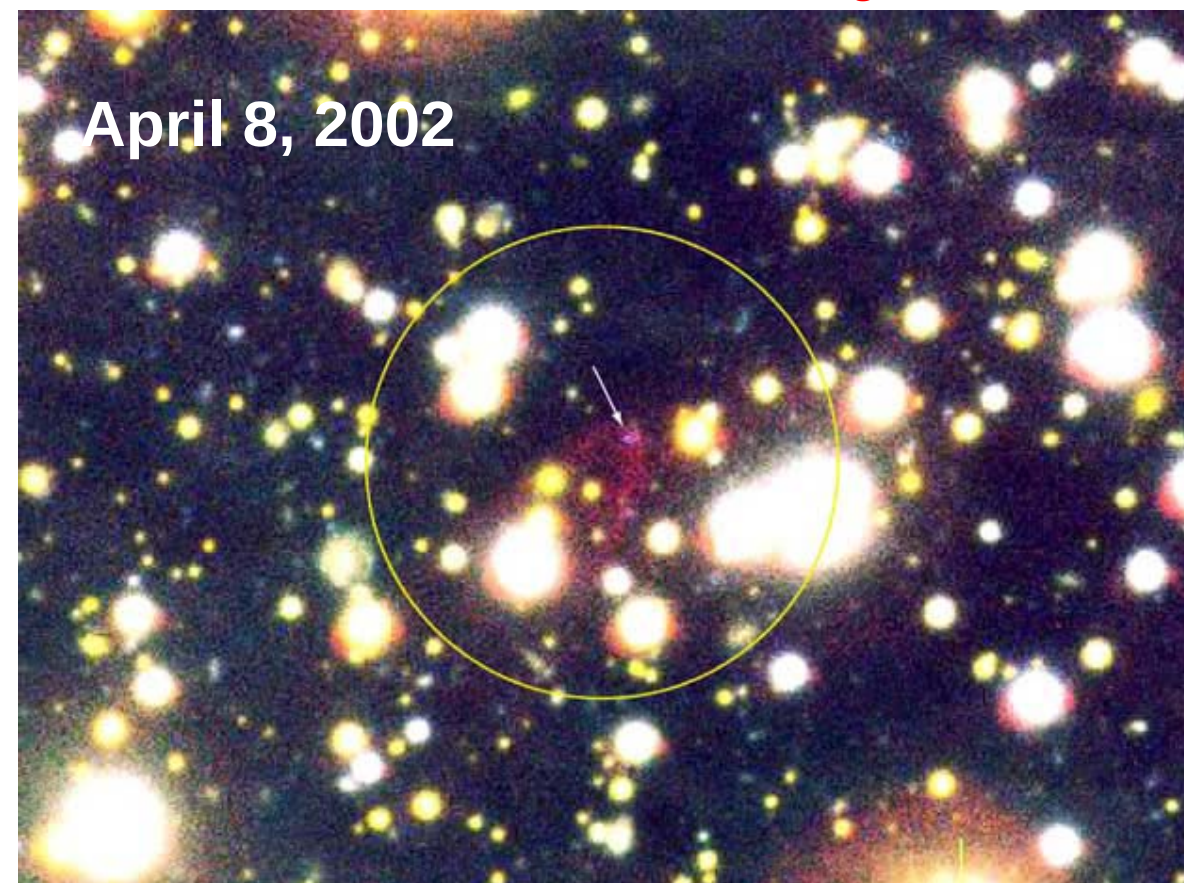
$$T \sim 150 \text{ MeV} \sim 10^{12} \text{ K}$$

$$1 \text{ eV} = 11,600 \text{ K}$$

Odkrycie gwiazdy kwarkowej?

In 2002, NASA announced the discovery of such a star, based on results from their space telescope the Chandra X-ray Observatory. The star, called RX J185635-375, is about 360 light years from Earth.

Central densities are estimated to be higher than in neutron stars.



Niestety, nowe (poprawne) pomiary promienia dały wartość 15 km, a nie jak początkowo twierdzono 4 km...!!!

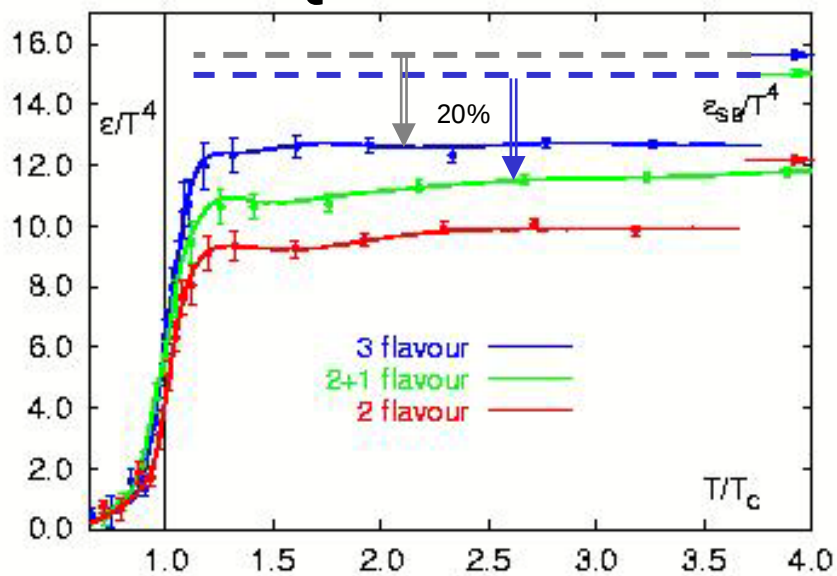
Rachunki QCD na sieciach

- Przy pomocy potężnych komputerów (Teraflop)- można sztucznie symulować gorącą i gęstą materię i badać jej własności.
- Rachunki na sieciach przewidują przejście fazowe do stanu złożonego ze swobodnych kwarków i gluonów.



QCD: przewidywania dla zderzeń A+A

Rachunki QCD na sieciach:



- Gwałtowny wzrost gęstości energii, ϵ (T) przy temperaturze

$$T_{\text{crit}} = 191 \pm 8 \text{ MeV}$$

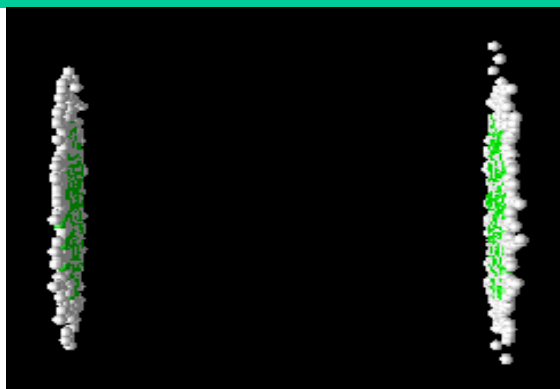
$$\epsilon_{\text{crit}} = 0.7 \pm 0.2 \text{ GeV/fm}^3$$

- Wzrost gęstości energii jest związany ze wzrostem liczby stopni swobody
- Materia istnieje w dwóch różnych fazach powyżej i poniżej T_{crit} , ϵ_{crit} .

- Zmienne termodynamiczne osiągają 80% wartości charakterystycznej dla idealnego gazu nie oddziałujących cząstek (granica Stefan-Boltzmann'a).

***Kreacja nowego stanu materii,
tzw. Plazmy Kwarkowo-Gluonowej (QGP),
złożonego ze swobodnych kwarków i gluonów***

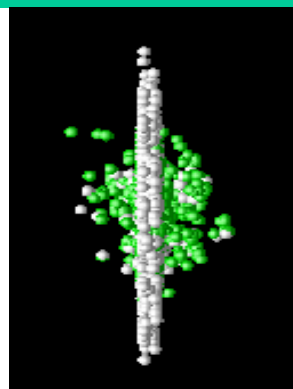
Zderzenia ciężkich jonów



Lorentz'owsko
skrócone jądra

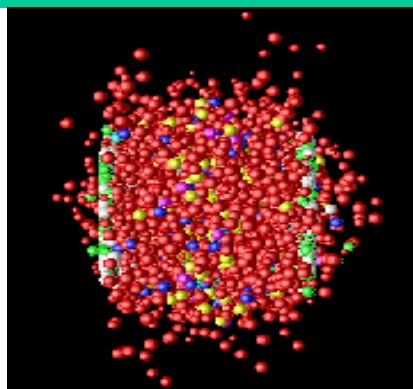
Ciężkie jądra zderzają
się z prędkością
99.99% prędkości
światła

~400 szybkich p i n



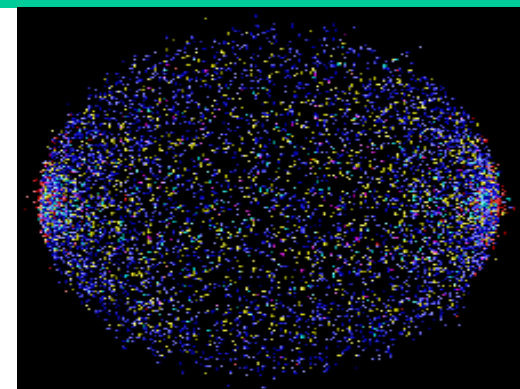
Twarde
Zderzenia

pQCD!



Dynamika
Partonów

Materia QCD ?
Kwarki i gluony
są odpowiednimi
stopniami swobody.



Dynamika
Hadronów

Mezony i bariony
to zawsze końcowe
stopnie swobody.

~6000
naładowanych hadronów

$T \sim 2 \times 10^{12} \text{ K}, \quad p \sim 5 \times 10^{21} \text{ atm.}$

ALE: Czy te niezwykle gwałtowne zderzenia nauczą nas czegoś?

$t \sim 10^{-23} \text{ sek.}, \quad V \sim 10^{-38} \text{ ltr.}$

Główne cele

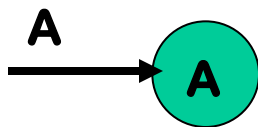
- QGP:
 - Czy QCD jest mniej skomplikowana przy wysokich temperaturach i gęstościach?
 - Jak wygląda diagram fazowy QCD?
 - Czy rachunki na sieciach zgadzają się z obserwacjami?
- Silnie oddziaływujące układy
 - Czy rozumiemy ewolucję systemu tworzonego w wyniku zderzenia ciężkich jonów?
 - Czy na podstawie obserwacji stanu końcowego zrozumiemy co działo się we wczesnym etapie zderzenia?

Akceleratory ciężkich jonów

Akcelerator	Kiedy	Wiązka	$E_{\text{lab}}/A(\text{maks.})$ [GeV]	$\sqrt{s_{\text{NN}}}$ [GeV]
<u><i>Eksperymenty ze stałą tarczą</i></u>				
AGS(BNL)	1992	^{197}Au	11.5	4.8
SPS(CERN)	1994	^{208}Pb	160.0	17.4
<u><i>Eksperymenty z przeciwbieżnymi wiązkami</i></u>				
RHIC(BNL)	2000	$^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$	20,000	200.0
LHC(CERN)	2010	$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$	15×10^6	5500.0

Zderzenia ciężkich jonów przy najwyższych energiach akceleratorowych

Energie osiągnane w akceleratorach ciężkich jonów
(w układzie środka masy nukleon-nukleon):



$$\sqrt{s_{NN}}$$

Au+Au at BNL-AGS

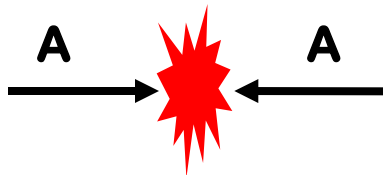
2.6 - 4.8 GeV

1992-1999

Pb+Pb at CERN-SPS

6.3 - 17.3 GeV

1994-2004



Au+Au at BNL-RHIC

19.6 - 200.0 GeV

2000 →

Pb+Pb at CERN-LHC

5500.0 GeV

2009

Relativistic Heavy Ion Collider - BNL, USA RHIC



RHIC - Podstawowe parametry

Układ: Dwa nadprzewodzące pierścienie
+istniejący kompleks (AGS) do wstępnej akceleracji.

Wiązki	Au	→	p
Energia/wiązkę	10 -100 GeV/A	max.	250 GeV
Natężenie wiązki	10^9		10^{11}
Liczba pęczków	57		114
Świetlność[cm ⁻² s ⁻¹]	2×10^{26}		10^{32}
Czas przecięcia pęczków		106 ns	
Magnesy nadprzewodzące (D-4T, Q-72T/m)		1740	
Obwód		3.8 km	
Ilość zużytego Au	10^{-6} g w ciągu	20 lat	
Koszt		10^3 M\$	

Eksperymenty: RHIC @ BNL



Ludzie

>1000 osób z całego świata uczestniczy w eksperymentach RHIC

RHIC-Eksperyment Uczestnicy

STAR	~400
PHENIX(3kT)	~450
BRAHMS + pp2pp	~60
PHOBOS	~70

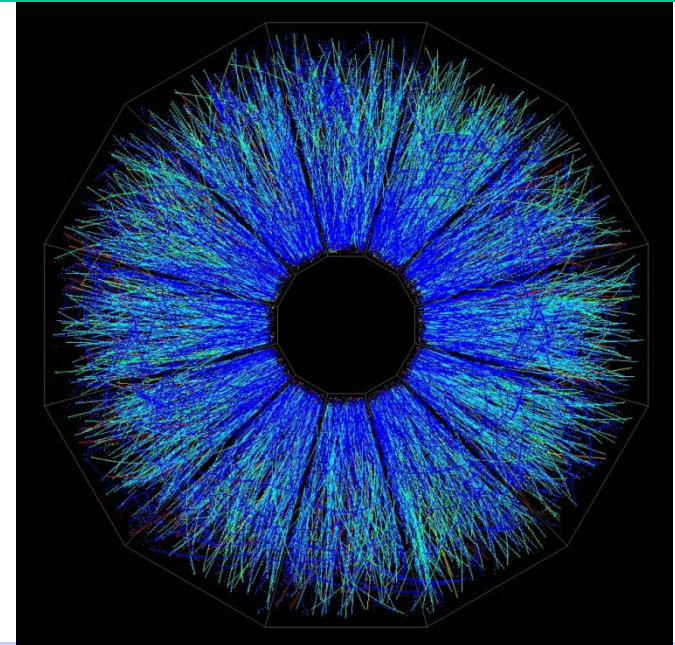
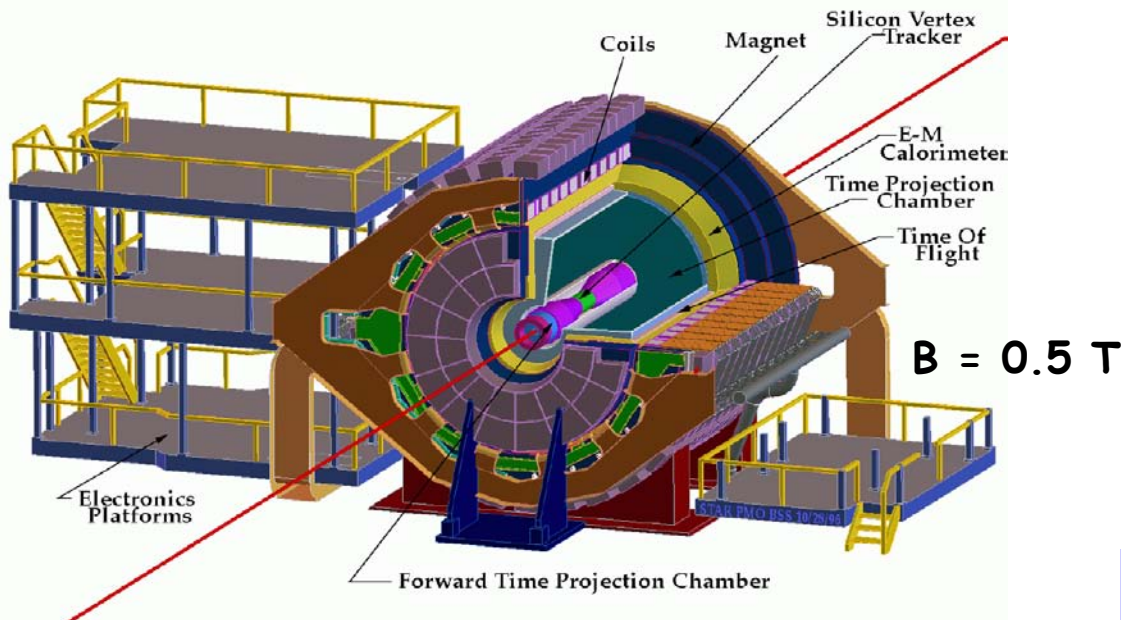


http://www.*****.bnl.gov

RHIC Eksperyment: STAR

Solenoidal Tracker At RHIC

STAR Detector

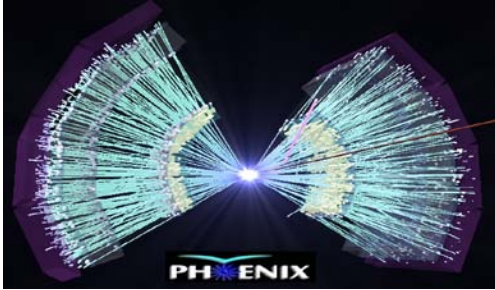


SVT-Silicon Vertex Tracker, $|\eta| < 1$
Cylindryczna TPC ($L=4\text{m}$, $D=2\text{m}$), $|\eta| < 1.7$
Przednia TPC $2.5 < |\eta| < 4$
E-M Kalorymetr (w budowie)
TOF

- Duża akceptancja dla hadronów (2000 cząstek/przypadek)
- Pomiar pędu, ładunku, masy
- Precyzyjny opis stanu końcowego (inkluzywny i przypadek po przypadku)

RHIC Eksperyment: PHENIX

Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment



3 magnesy:

centralny (e,h)
przedni & tylny (μ)

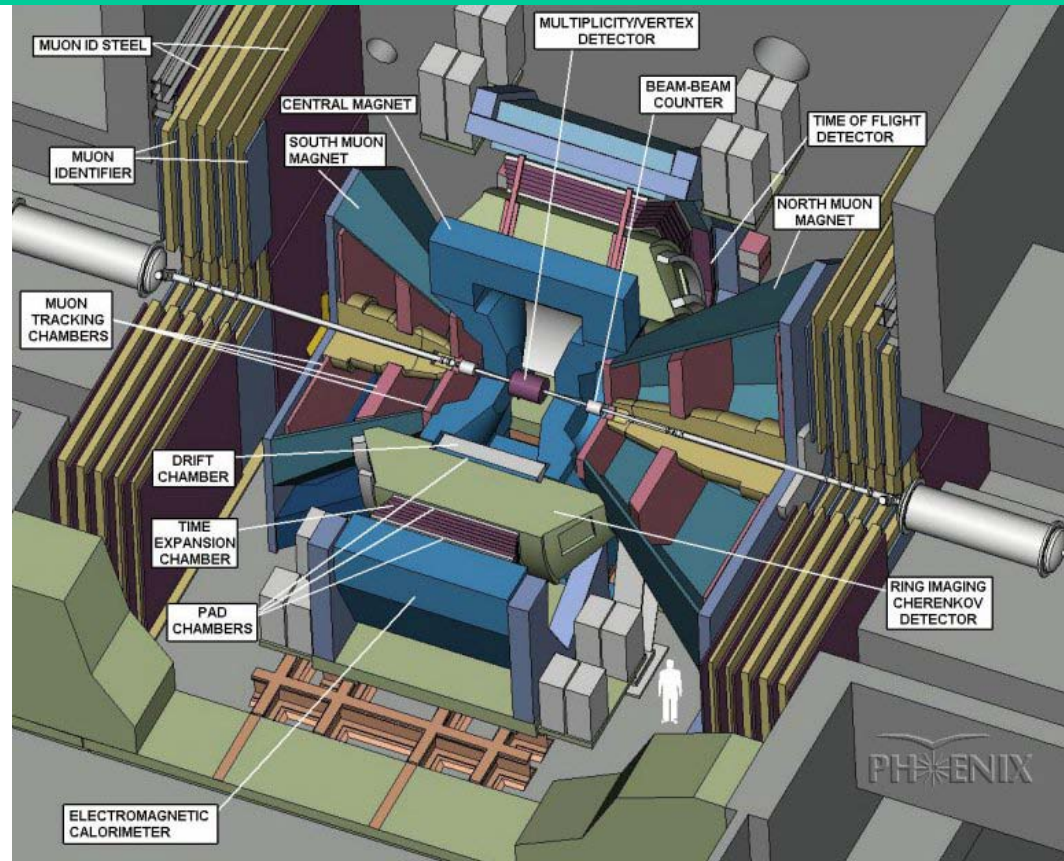
2 centralne spektrometry

$|\eta| < 0.35$

Si MVD, DC, PC,
TEC, ToF, RICH, EMC

2 spectrometry mionowe

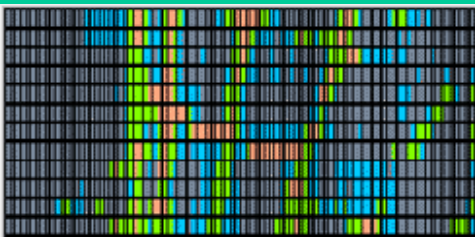
$1.1 < |\eta| < 2.4$



- Pomiar fotonów, leptonów i hadronów
- 'Twarde' sygnały: hadrony o dużych p_T i π^0 , e & μ (charm), bezpośrednie γ
- Największy i najbardziej skomplikowany eksperyment w RHIC

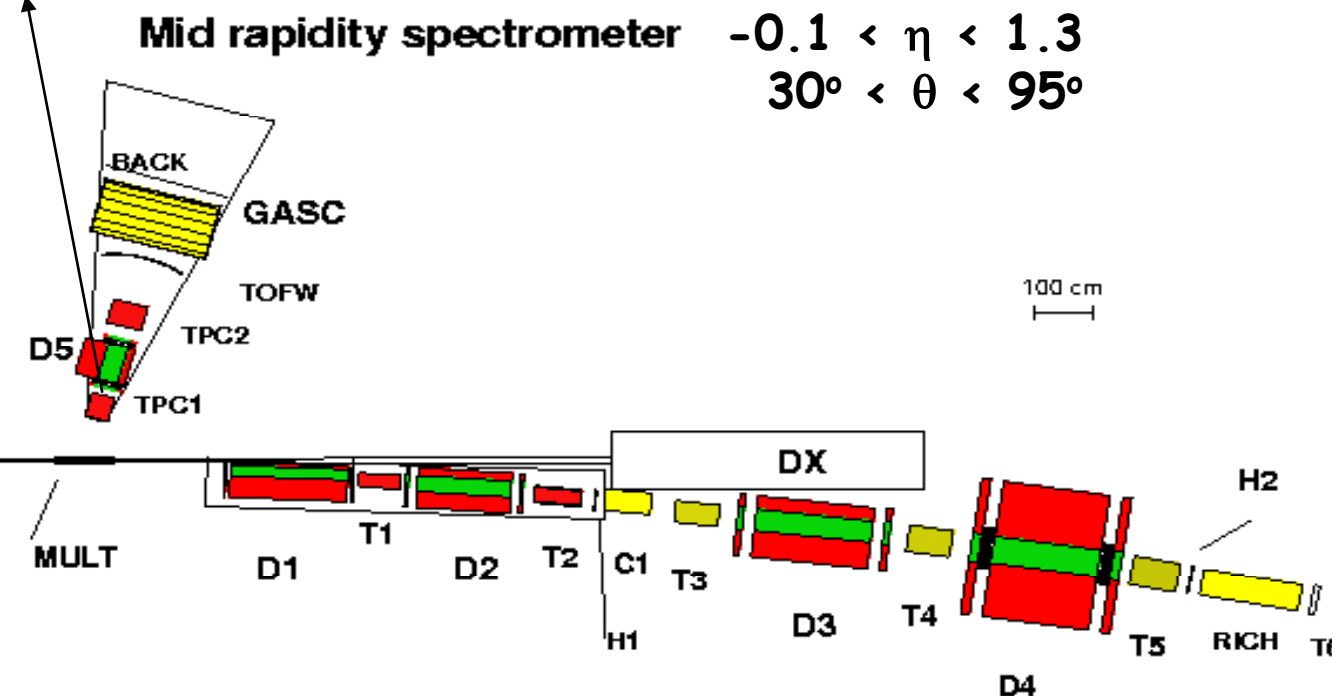
RHIC Eksperyment: BRAHMS

Broad RAnge Hadron Magnetic Spectrometers



TPC display

BRAHMS



Forward spectrometer

POLSKA-UJ

$1.3 < \eta < 4.0$
 $2.3^\circ < \theta < 30^\circ$

- Jedyny eksperyment, który bada produkcję cząstek o małych kątach emisji
- Spektrometry mają dużą zdolność rozdzielczą i dobrą identyfikację cząstek
- Badanie hamowania protonów

RHIC Eksperyment: PHOBOS

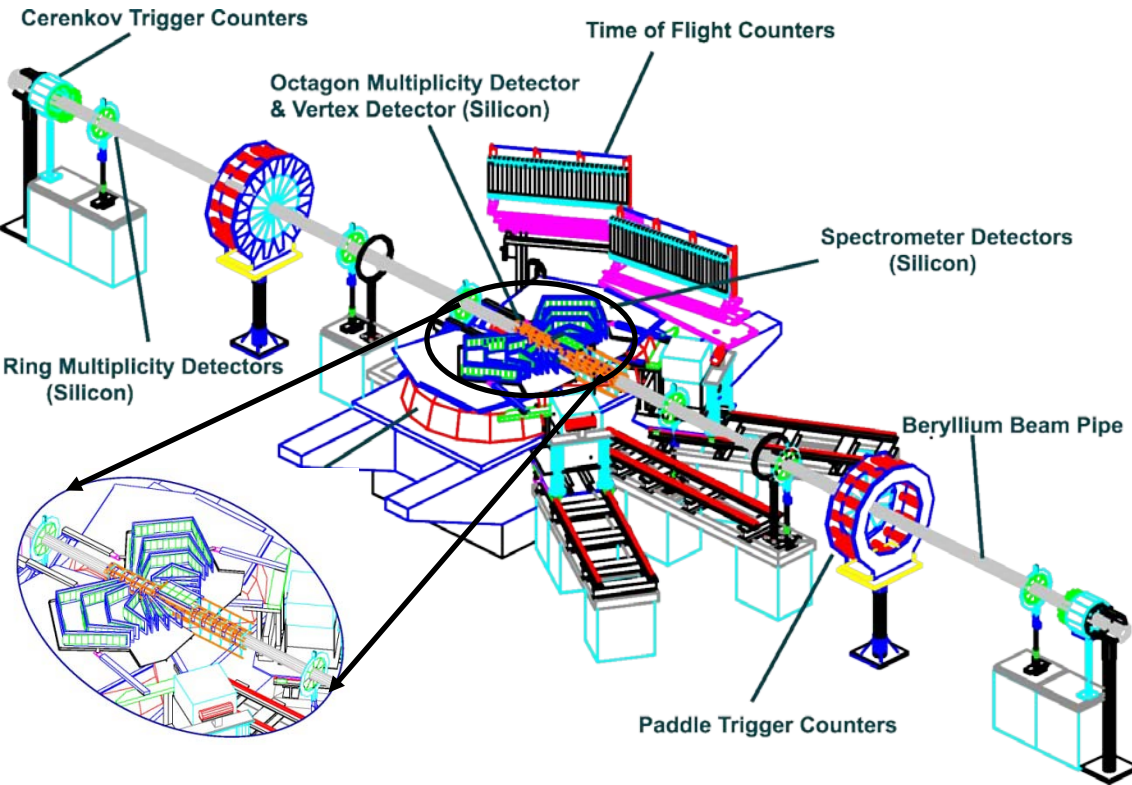
A moon of MARS (a Modular Array for Rhic Spectra)



POLSKA-IFJ PAN

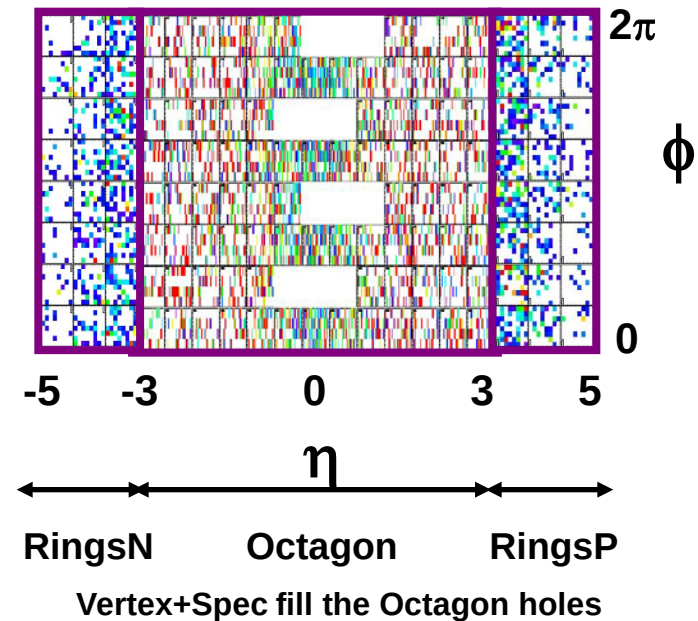
- Pozwala rejestrować rzadkie przypadki
- Daje najlepszą ogólną charakterystykę przypadku
- Pomiar hadronów o bardzo małych pędach poprzecznych
- Dostarcza szybko wyniki

RHIC Experiment: PHOBOS



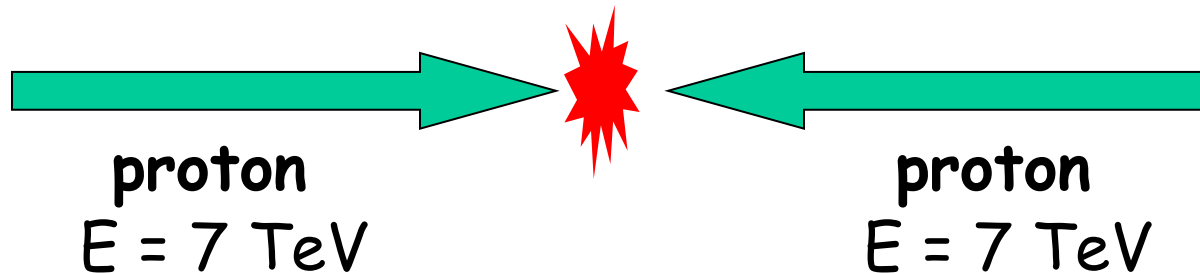
Unique low- p_T measurements

Large acceptance for N_{ch}
 $-5.4 < \eta < 5.4$ ($0.5^\circ < \theta < 179.5^\circ$)
 $0 < \phi < 2\pi$

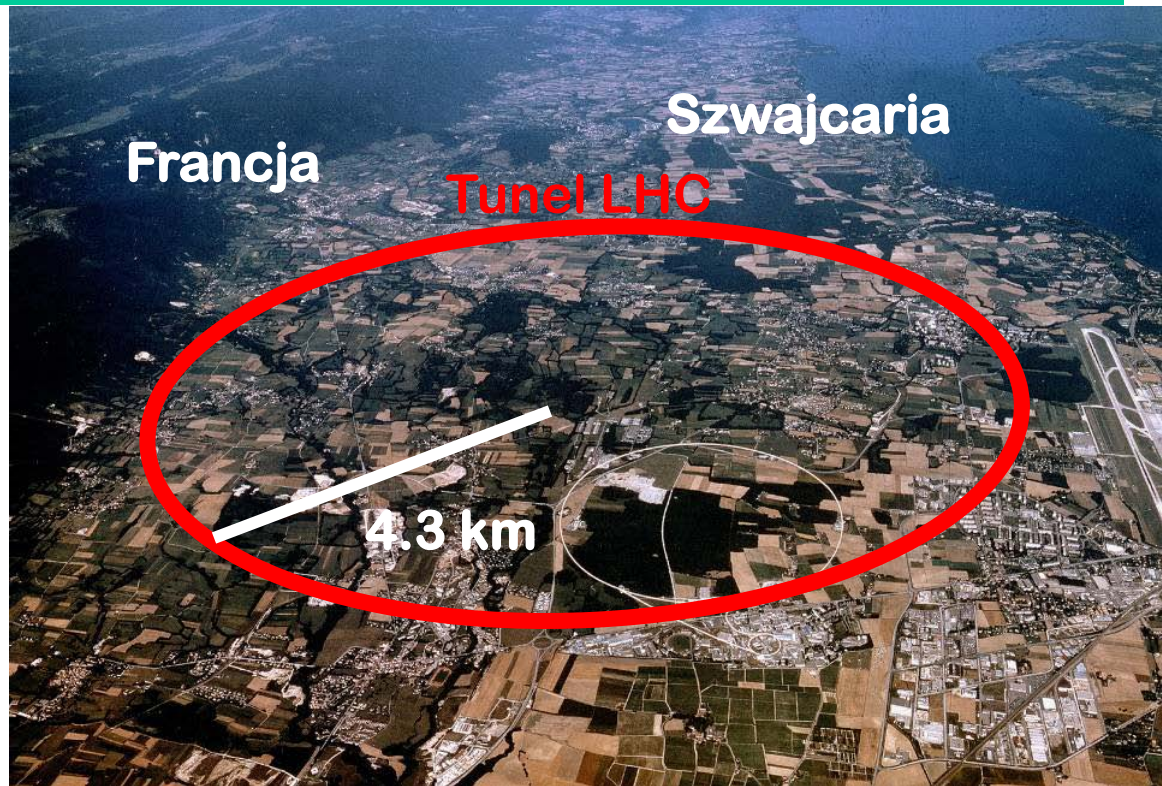


LHC - Large Hadron Collider Wielki Zderzacz Hadronów

Gigantyczny akcelerator cząstek
w Europejskim Ośrodku Fizyki Cząstek - CERN
w pobliżu Genewy



Wielki Zderzacz Hadronów: Usytuowanie geograficzne



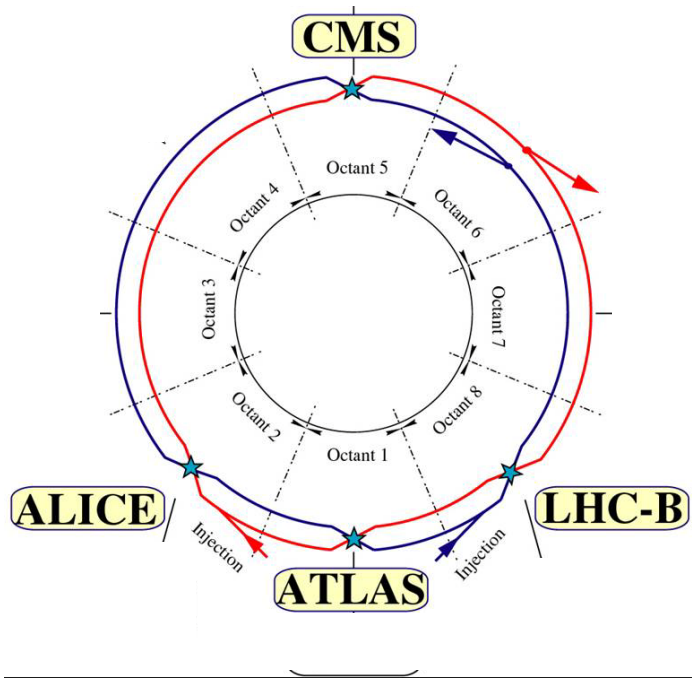
Akcelerator umieszczony jest w tunelu o długości 27 km, znajdującym się ~100 m pod ziemią między Genewą i górami Jura.

LHC - Podstawowe parametry Large Hadron Collider, CERN

Układ: Dwa nadprzewodzące pierścienie
+istniejący kompleks (PS/SPS) do wstępnej akceleracji.

Wiązki	Pb	→	p
Energia/wiązkę	2.76 TeV/A		7 TeV
Natężenie pęczków	7×10^7		10^{11}
Liczba pęczków	592		2808
Świetlność [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	1×10^{27}		10^{34}
Czas przecięcia pęczków	100 ns		25 ns
Magnesy nadprzewodzące (D-8.3T, Q-223T/m)		2338	
Obwód		26.7 km	
Koszt		3×10^3 M CHF	

Eksperymenty LHC



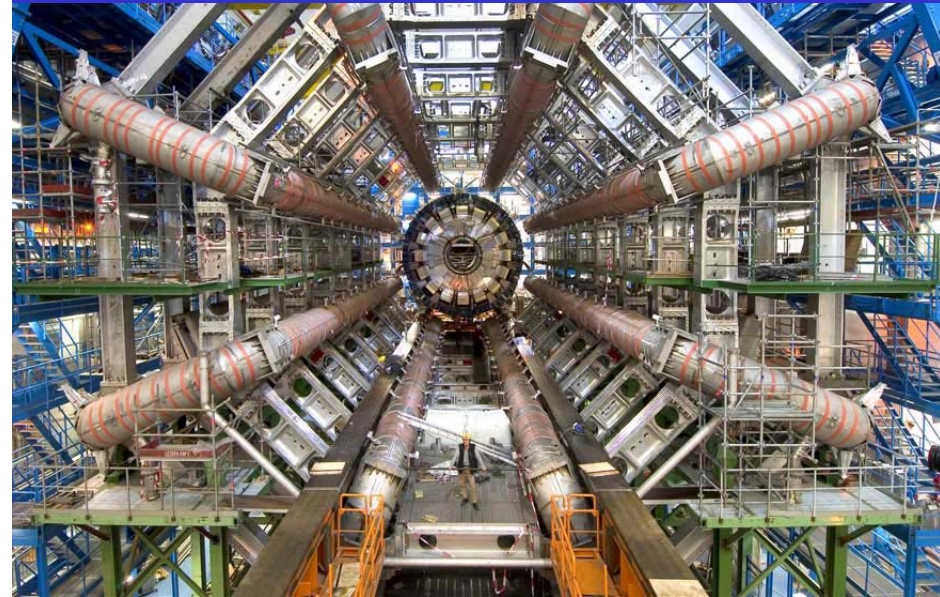
LHC-Eksperyment	Uczestnicy
ALICE	~1300
ATLAS	~2500
CMS(13kT) + TOTEM	~2500
LHC-B	~ 600

Ok. 7000 uczestników



ATLAS

Instalacja kalorymetru, listopad 2005



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



Symulacja:
rozpad cząstki Higgsa



Symulacja:
rozpad Czarnej Dziury

Cel:

Poszukiwanie cząstek Higgsa i innych nowych zjawisk, Pb+Pb



CMS

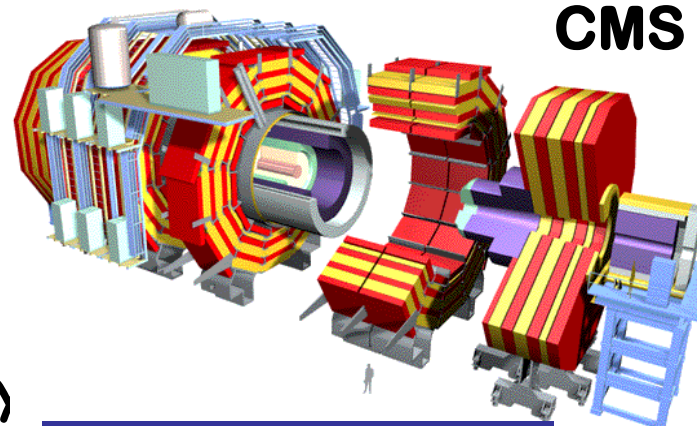
Compact Muon Solenoid

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.

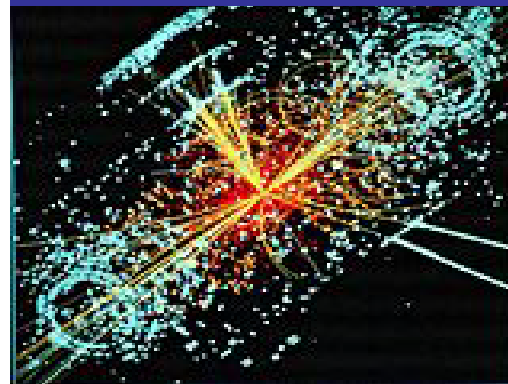


Schemat detektora CMS



CMS

Symulacja zderzenia
z rozpadem cząstki
Higgsa



Cel:

Poszukiwanie cząstek Higgsa
i innych nowych zjawisk, Pb+Pb

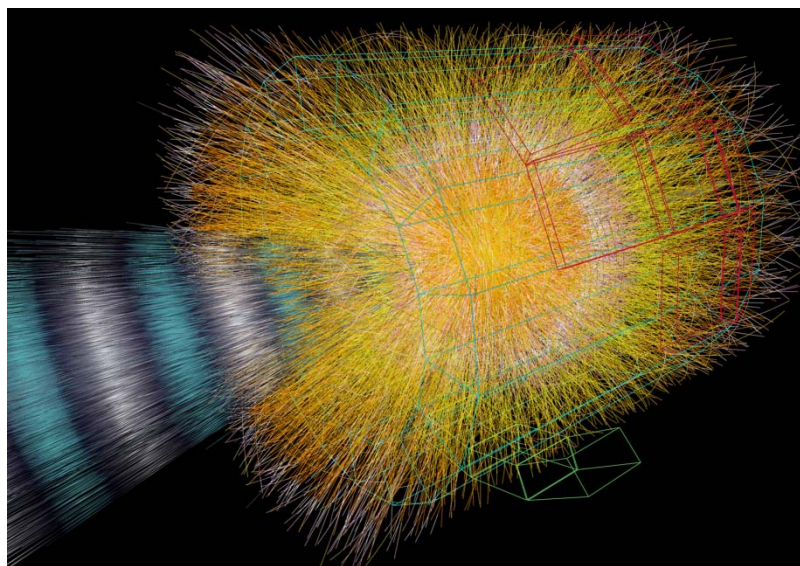


ALICE

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.

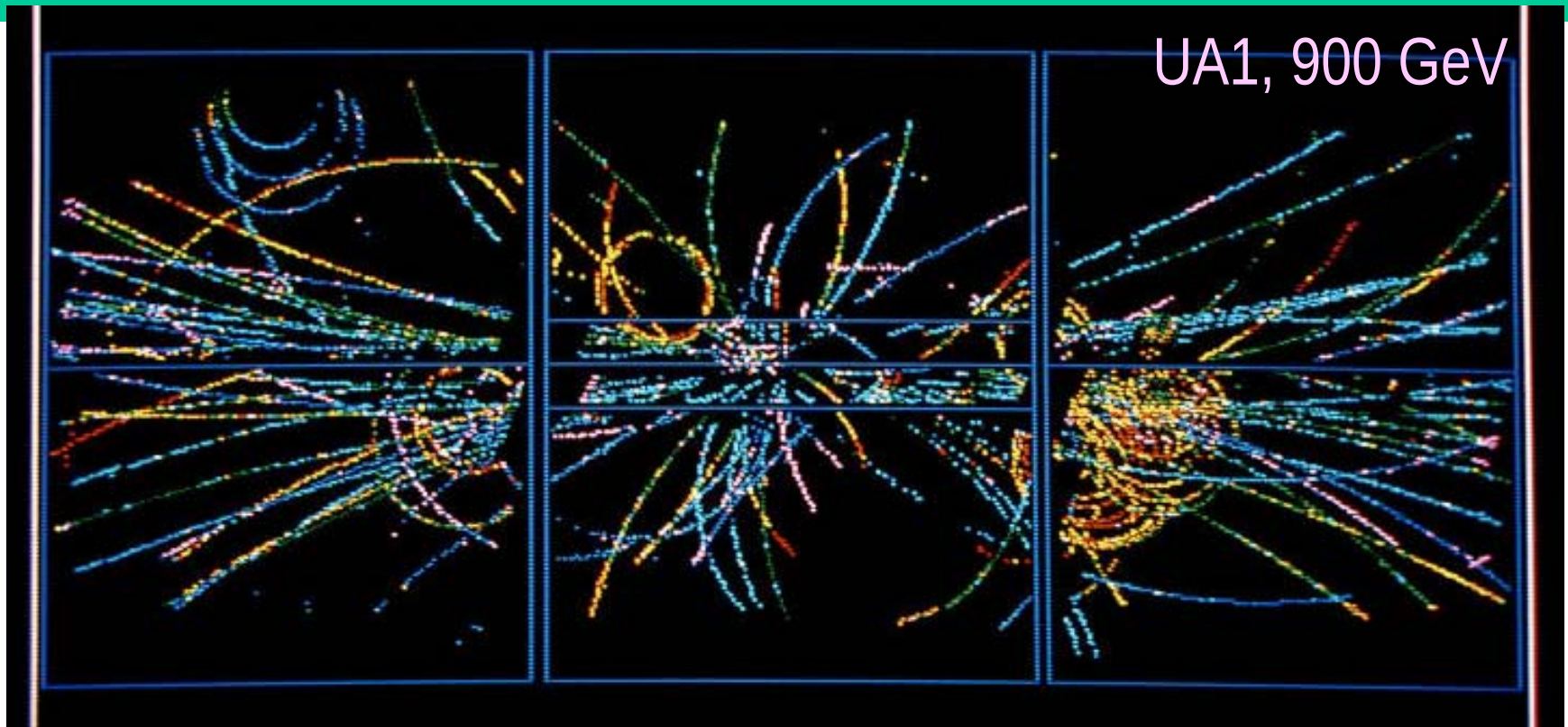


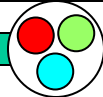
Cel:

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.

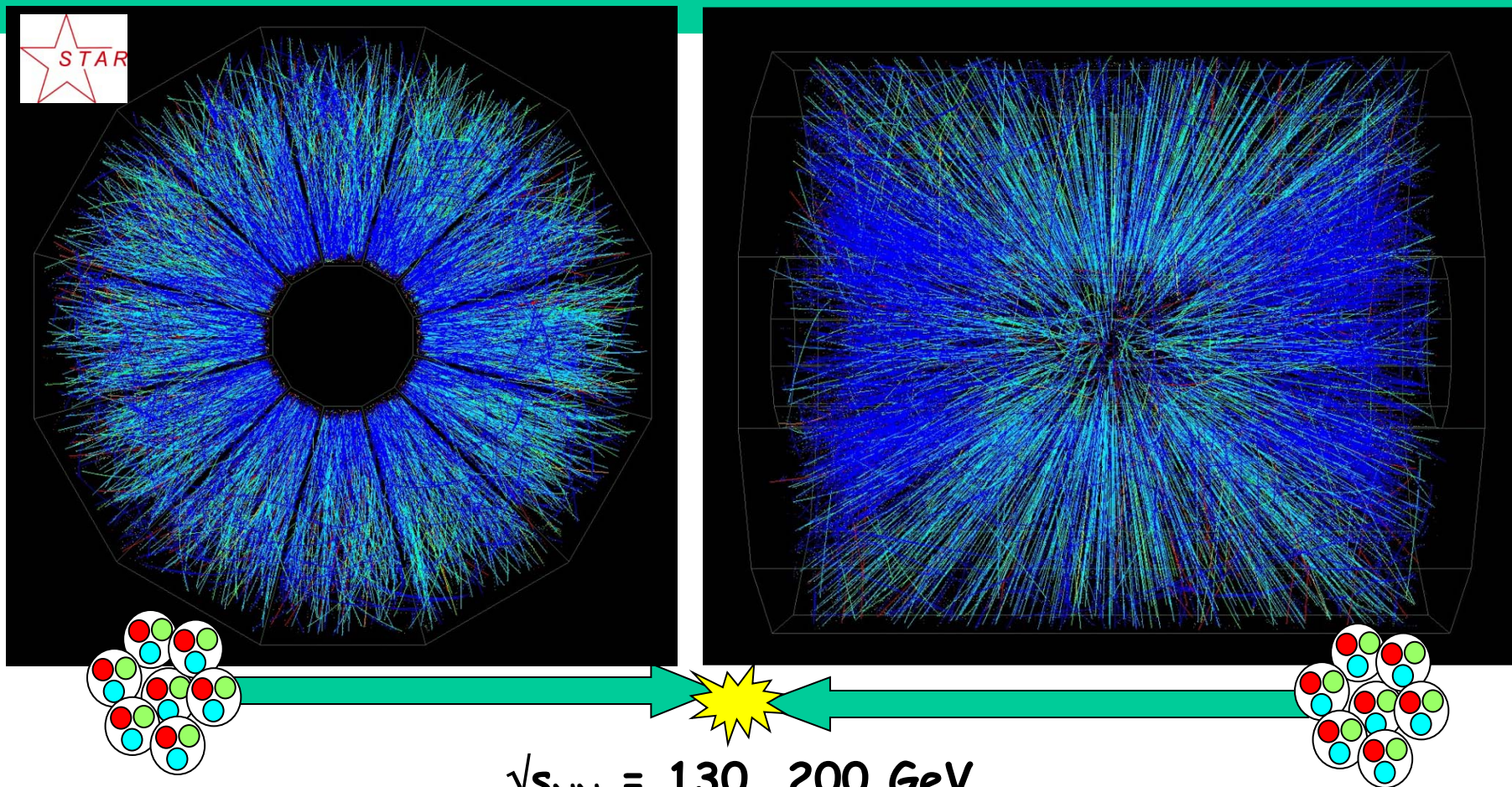
Zderzenia $p\bar{p}$ przy energiach SPS-CERN



  
proton $\sqrt{s} = 200, 546, 900 \text{ GeV}$ anty-proton

Produkowana liczba cząstek ~kilkadziesiąt

Zderzenia Au+Au przy energiach RHIC



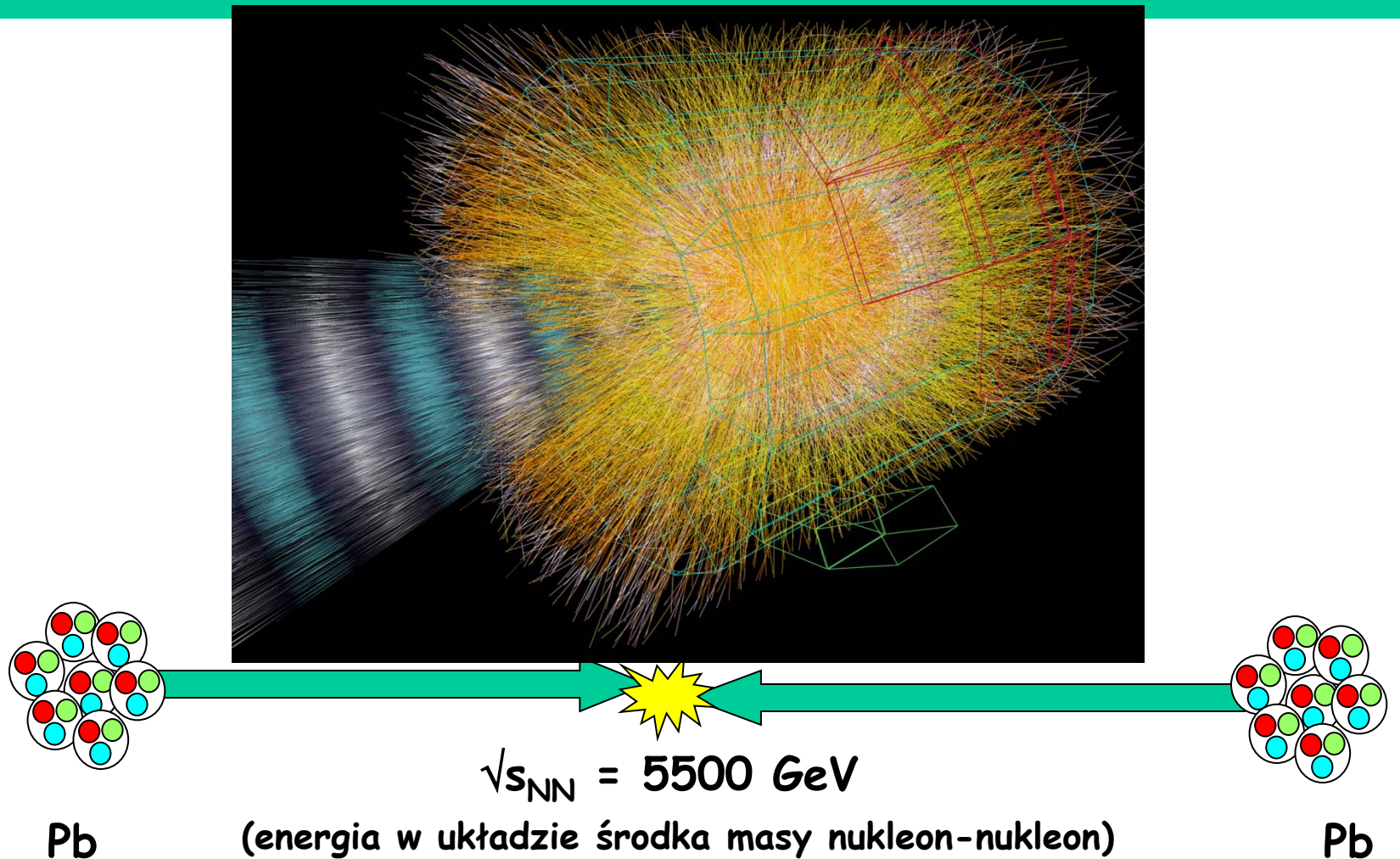
Au

(energia w układzie środka masy nukleon-nukleon)

Au

Liczba produkowanych cząstek ~kilka tysięcy

Zderzenia Pb+Pb przy energiach LHC



Liczba produkowanych cząstek ~kilkadziesiąt tysięcy