

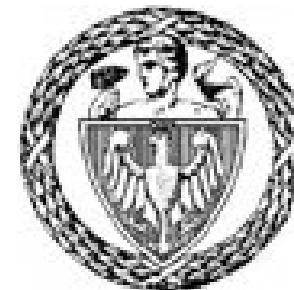


**Katarzyna Grebieszko**

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

Zakład Fizyki Jądrowej

Pracownia Reakcji Ciężkich Jonów



# W poszukiwaniu plazmy kwarkowo-gluonowej



Wykład dla szkół średnich  
2008



# Plan prezentacji

- Jak zbudowana jest materia?
- Co to jest plazma kwarkowo-gluonowa (QGP)?
- Dlaczego interesuje nas szukanie plazmy kwarkowo-gluonowej?
- Produkcja QGP w zderzeniach ciężkich jonów
- Akceleratorzy ciężkich jonów na świecie
- **Eksperymenty** przy akceleratorach SPS, RHIC i LHC – te, **w których uczestniczy Politechnika Warszawska**
- Trochę wyników eksperymentalnych
- Dlaczego warto studiować na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej?

# Cząstki elementarne (podstawowe cegiełki):

6 kwarków, 6 leptonów, 6 antykwarków, 6 antyleptonów i cząstki przenoszące oddziaływania

Kwarki	$u$	$c$	$t$
	górnym up	powabny charm	prawdziwy top
	$d$	$s$	$b$
	dolny down	dziwny strange	piękny bottom
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	neutrino elektronowe	neutrino mionowe	neutrino tau
Leptony	$e$	$\mu$	$\tau$
	elektron	mion	tau
	I	II	III
Rodziny materii			

$u, c, t$  ładunek =  $+2/3$

$d, s, b$  ładunek =  $-1/3$

neutrino ładunek = 0

$e, \mu, \tau$  ładunek =  $-1$

antycząstki mają przeciwne ładunki



Oddziały- wanie	gravitacyjne	ślabe elektrosłabe	elektromagnetyczne	silne
Przenoszo- ne przez	grawiton	$W^+ W^- Z^0$	foton	gluon
Działa na	wszystko	kwarki i leptony	kwarki, naładowane leptony i $W^+, W^-$	kwarki i gluony

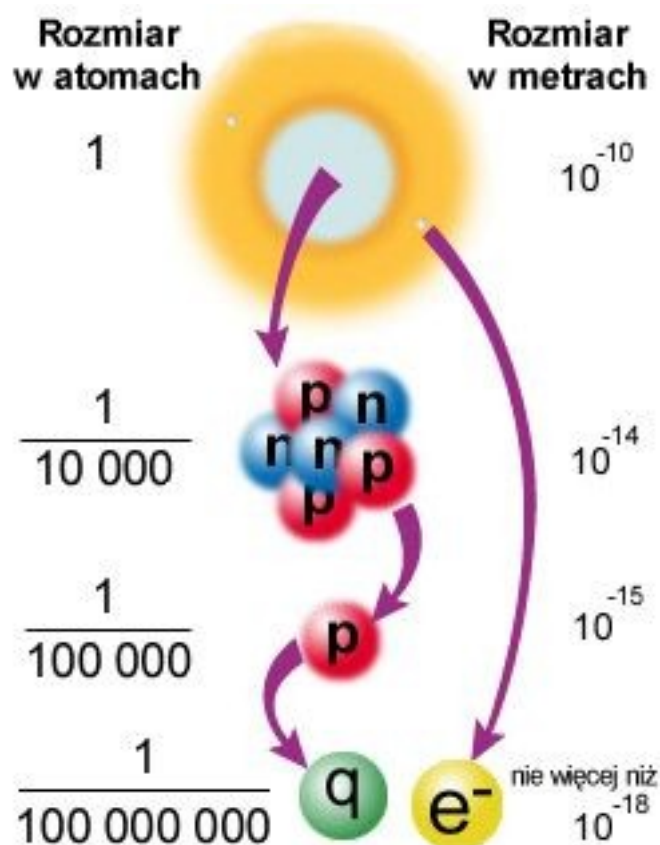
... i te, które kiedyś uważano za elementarne:

bariony(qqq)

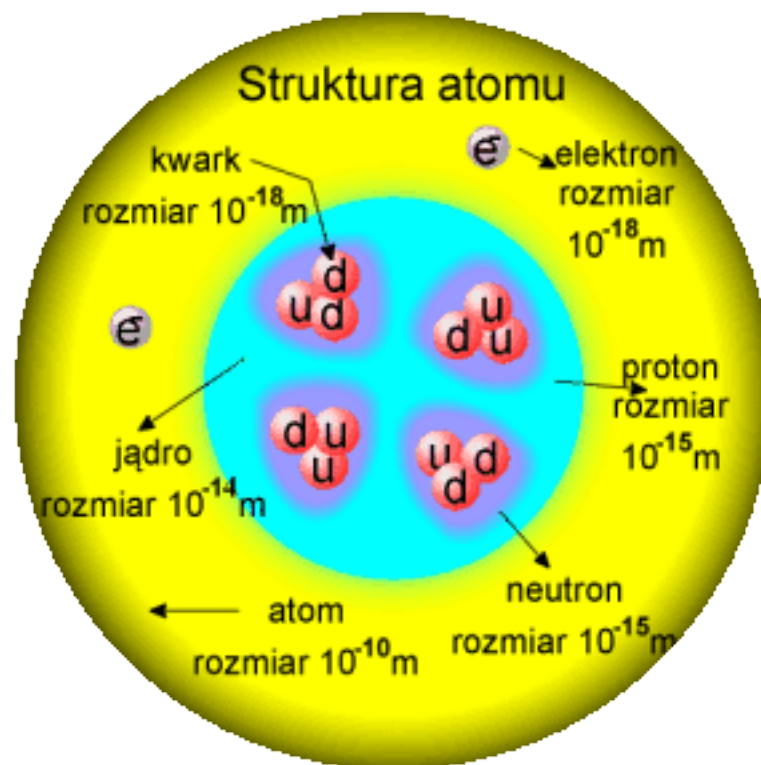
mezony(q anty\_q)

p (uud), n (ddu),  $\Xi^-$  (ssd)  
 $\Delta^{++}$  (uuu),  $\Omega^-$  (sss)

$\pi^-$  (d anty\_u),  $\pi^+$  (u anty\_d),  $K^-$  (s anty\_u),  
 $K^+$  (u anty\_s),  $K^0$  (d anty\_s),  $\phi$  (s anty\_s)

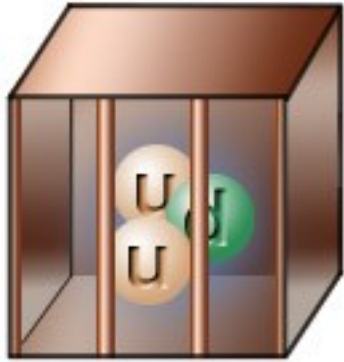


Atom zgodnie  
z aktualną  
wiedzą





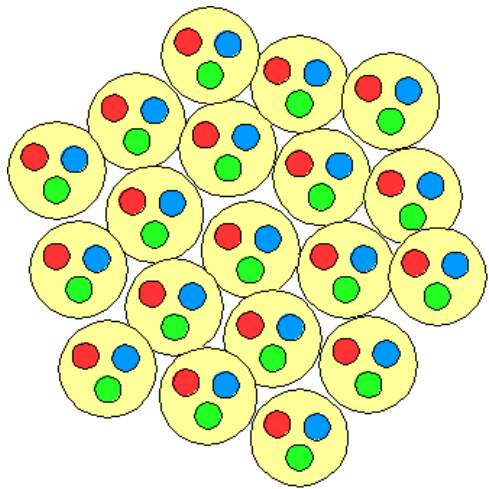
W przyrodzie nie obserwuje się kwarków swobodnych  
a jedynie “uwięzione” w hadronach (mezony i bariony)



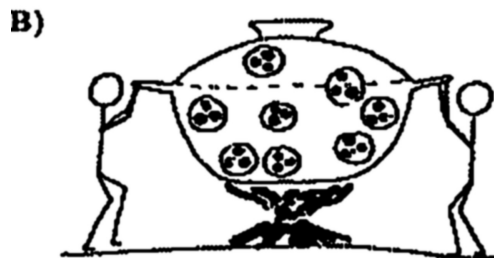
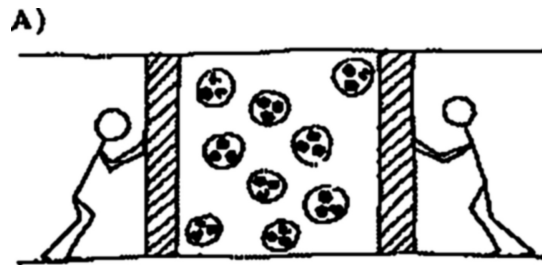
## proton

z protonu nie da się “wyrwać”  
pojedynczego kwarka, ale...

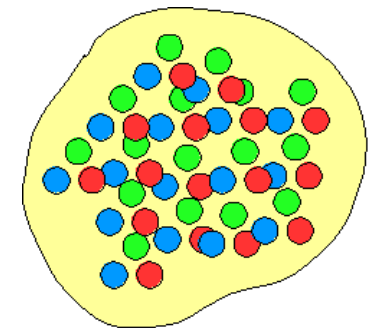
Przewidziano jednak, że przy bardzo dużych gęstościach i temperaturach kwarki przestają “pamiętać” do którego hadronu (np. proton, neutron) należały i powstaje plazma kwarkowo-gluonowa (QGP)



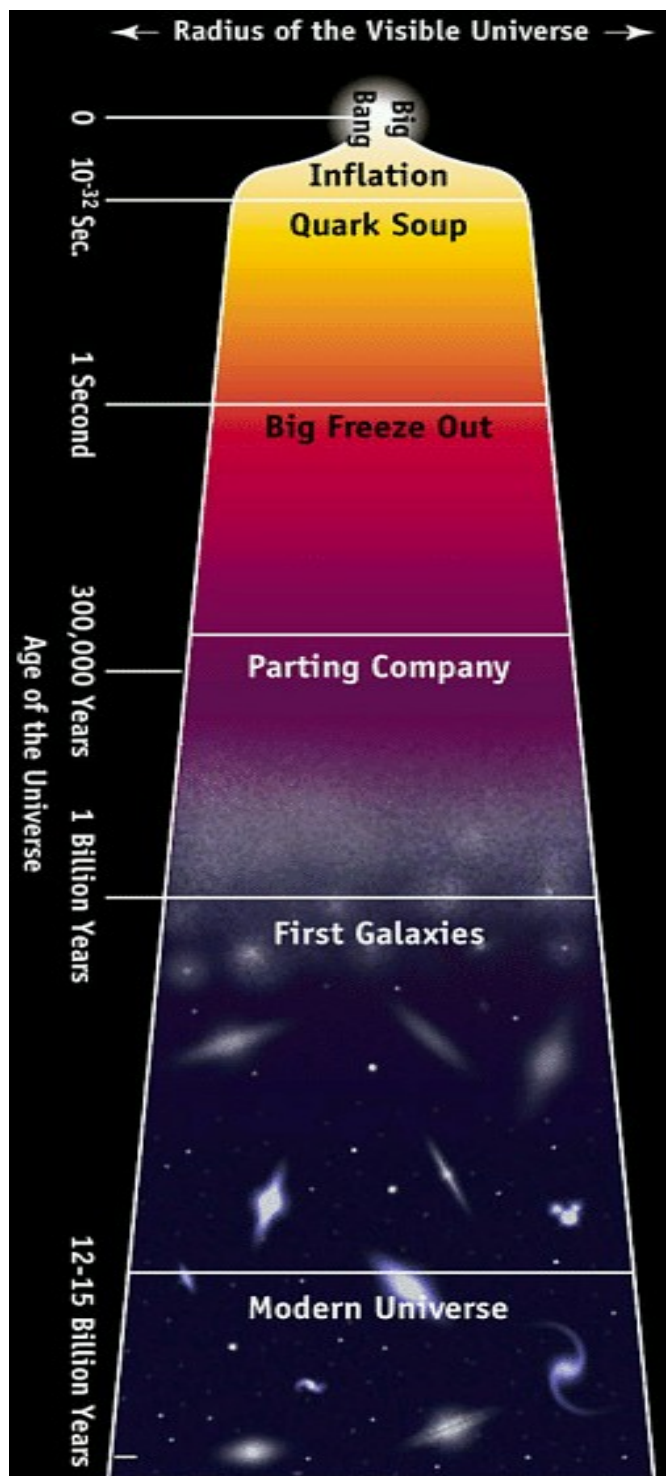
protony i  
neutrony



... ściskamy  
lub/i  
podgrzewamy  
... →



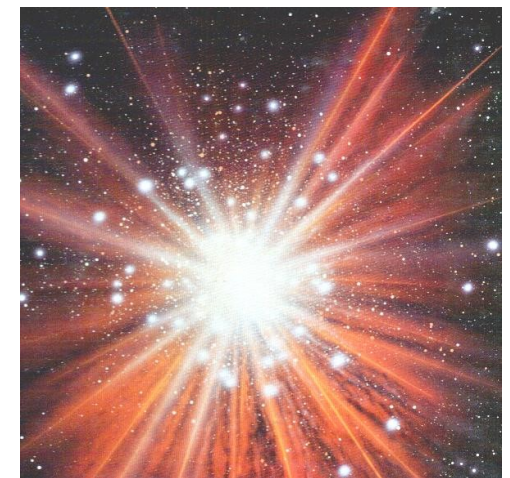
QGP



Ale dlaczego w ogóle interesuje nas ta plazma???



Wszechświat powstał 12-15 miliardów lat temu (miliard =  $10^9$ )



## Model Wielkiego Wybuchu (Big Bang Model)

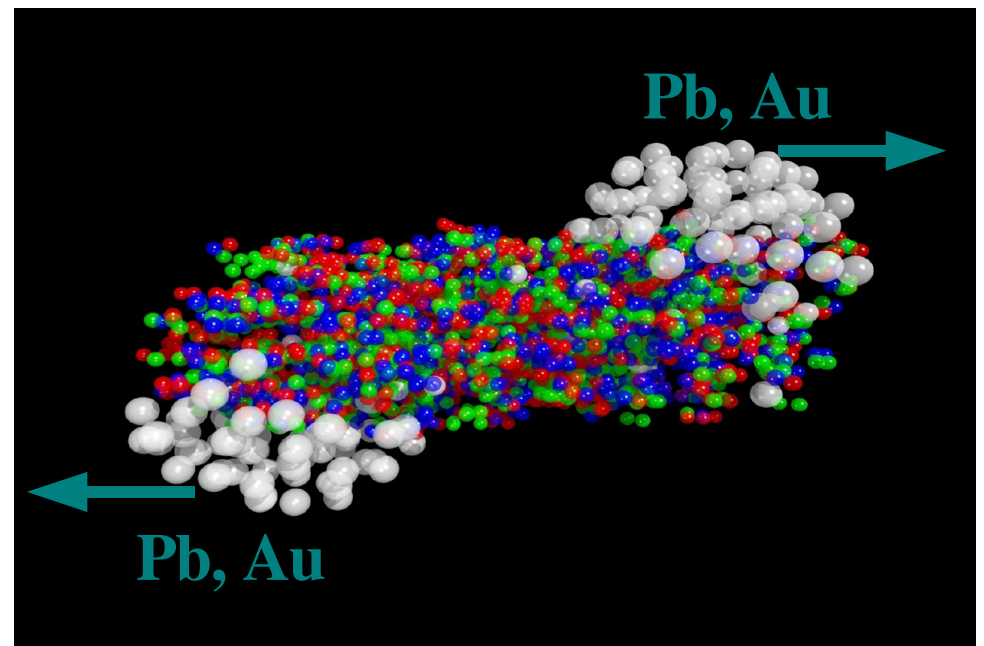
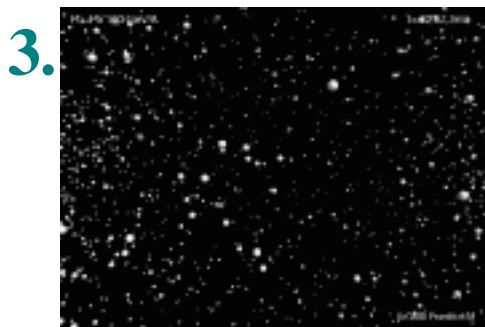
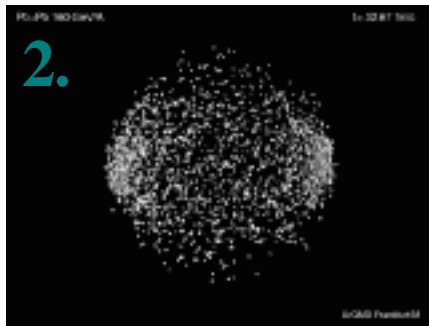
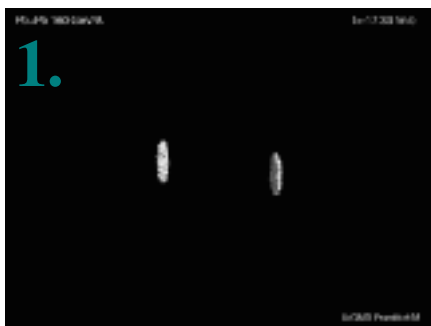
—zakłada, że jednym z etapów ewolucji Wszechświata było powstanie takiej właśnie “zupy” kwarkowo-gluonowej (QGP)

Kolejny etap: stygnięcie i rozszerzanie się Wszechświata

kwarki → hadrony (p, n) → atomy → cząsteczki → .... →  
galaktyki → gromady galaktyk

Czy to się da odtworzyć w laboratorium ?

**Little Bang** – próba otrzymania QGP w zderzeniach ciężkich jonów (jąder) np. Pb, Au przy wysokich energiach. **Jony przyspieszane są do prędkości bliskiej prędkości światła!**



Zaraz po zderzeniu powstaje QGP, następnie rozszerzanie się, stygnięcie, łączenie kwarków w hadrony (nie tylko protony i neutrony!!!)

**Badanie cząstek w stanie końcowym -> informacja o stanie początkowym**

Wyprodukowane cząstki w stanie końcowym (piony, kaony, protony, lambda....) niosą informacje o stanie początkowym – czy była QGP czy nie

**osiągane temperatury QGP**  $>150$  MeV (co najmniej 100 tysięcy razy goręcej niż we wnętrzu Słońca !!!) czyli przynajmniej **rzędu  $10^{12}$  K**

**osiągane gęstości (energii) w QGP** - 20 razy gęściej niż jądro atomowe

# Jednostki używane w fizyce wysokich energii i w fizyce zderzeń ciężkich jonów

Jednostka energii [eV] =  $1.602 \times 10^{-19}$  J

Jednostka pędu [eV/c]

Jednostka masy [eV/c<sup>2</sup>] =  $1.78 \times 10^{-36}$  kg

1 fm =  $10^{-15}$  m

stosujemy układ w którym  $c=1 \Rightarrow [E] = [p] = [m] = \text{eV}$

$$E_{tot} = \sqrt{p^2 + m_0^2}$$

Energia dostępna w układzie środka masy (na produkcję nowych cząstek):

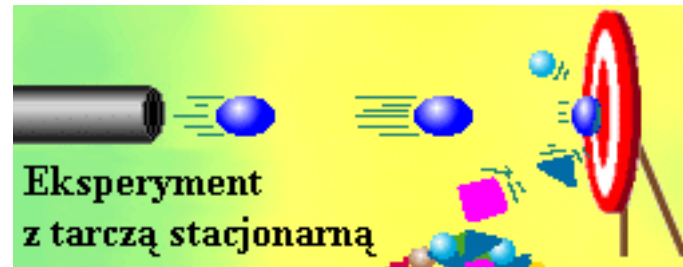
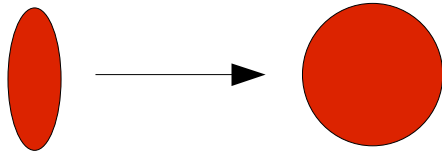
$$\sqrt{s} = \sqrt{(\sum E)^2 - (\sum \vec{p})^2}$$

W eksperymentach potrzebne nam jony/jądra rozpędzone do prędkości bliskiej prędkości światła...  $\Rightarrow$

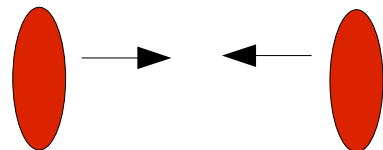
**Akceleratory (kołowe dodatkowo z polem B lub liniowe)** - pobierają cząstki (jony, jądra), rozpędzają je za pomocą pola elektrycznego i uderzają nimi w tarczę lub w inną wiązkę cząstek. Detektory rejestrują poszczególne elementy zderzenia (produkowane nowe cząstki).

## Eksperymenty:

**1. ze stacjonarną tarczą** np. NA49/NA61 przy SPS (akcelerator kołowy) w CERN (Genewa)



**2. z wiązkami przeciwbieżnymi (kolajdery)** np. STAR przy RHIC (akcelerator kołowy) w BNL (USA), ALICE przy LHC (akcelerator kołowy) w CERN (Genewa)





# Niektóre z laboratoriów poszukujących QGP

**Eksperyment NA49/NA61**, laboratorium CERN  
Szwajcaria, Genewa  
przy akceleratorze **SPS**  
**stacjonarna tarcza**  
działa od 1994 roku  
zderzenia m.in. Pb+Pb, C+C, Si+Si, p+p  
dostępna energia w środku masy: **6.3 – 17.2 GeV**  
na parę nukleonów  
maksymalnie około **1500-1600 produkowanych cząstek naładowanych** (wszystkich rzędu 2700)

**Eksperyment STAR**, laboratorium BNL  
USA, stan Nowy Jork  
przy akceleratorze **RHIC**  
**wiązki przeciwbieżne**  
działa od 2001 roku  
zderzenia m.in. Au+Au, Cu+Cu, p+p  
dostępna energia w środku masy: **20 – 200 GeV**  
na parę nukleonów  
maks. około **4000 produkowanych cząstek naładowanych**



**Eksperyment ALICE**, laboratorium CERN  
Szwajcaria, Genewa  
przy budowanym akceleratorze **LHC**  
**wiązki przeciwbieżne**  
będzie badać Pb+Pb od 2010 roku  
zderzenia Pb+Pb  
dostępna energia w środku masy: **5.5 TeV** na  
parę nukleonów  
maks. około **20 000 produkowanych cząstek naładowanych** (uwaga: różne modele dają tu różnice o czynnik 2)  
w zderzeniach p+p – tysiące cząstek

# Laboratorium CERN (Szwajcaria) – takie małe miasteczko ...

tu powstała sieć www (1990) !!! Tu opracowano sieci gridowe  
tu pierwszy raz uzyskano obraz z PET (pozytronowa tomografia emisyjna) (1977)





# Akceleratory SPS i LHC



Na granicy Szwajcarsko-Francuskiej  
(linia kropkowana)

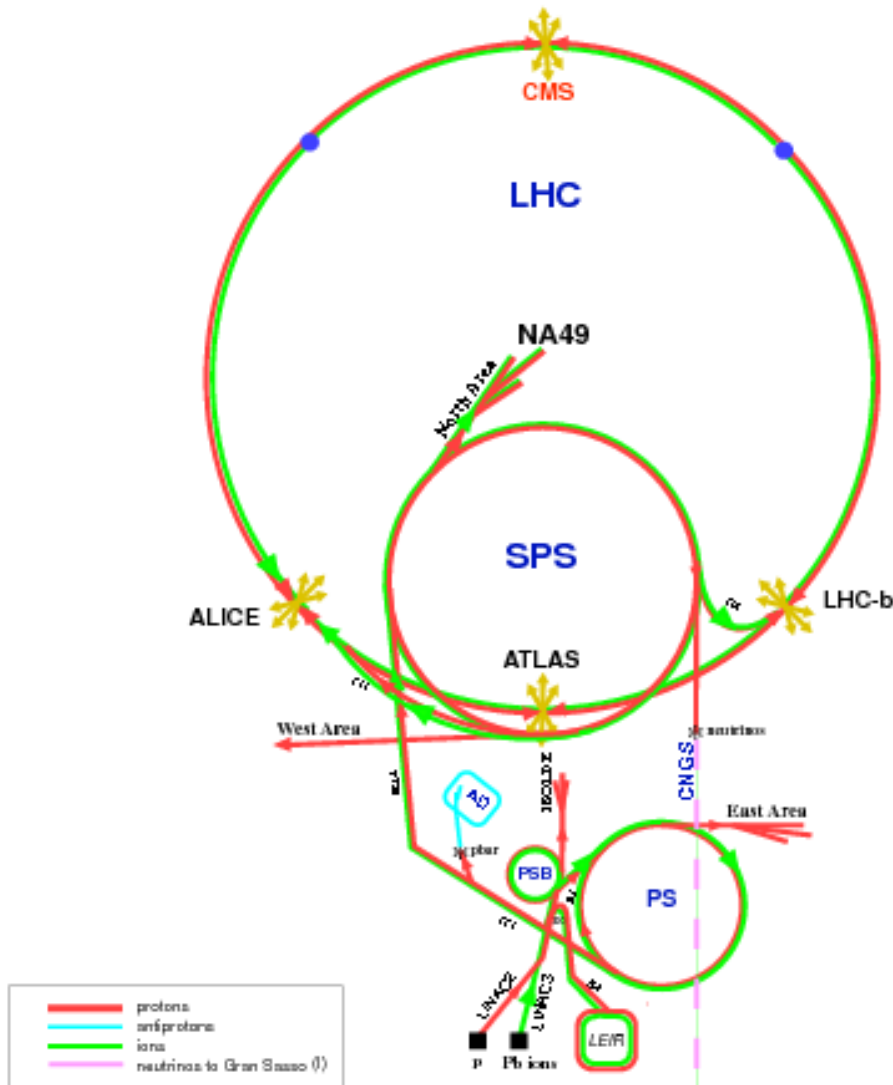
Tunel SPS – 6km obwodu (m.in. NA49

Tunel **LHC** – **27 km obwodu** (exp: ATLAS,  
ALICE, CMS, LHC-b); **50 -175m pod ziemią**

# Schemat akceleratorów w CERN

Etapy przyspieszania cząstek (w kolejnych akceleratorach otrzymuje się większe prędkości/energije):

1. LINAC
2. PS Booster
3. PS – 200m obwodu
4. SPS – 6 km obwodu (**już na tym etapie cząstki o prędkości 0.994 c**)
5. LHC – 27 km obwodu, próżnia w rurze akceleratora podobna do tej w kosmosie, **kilka tysięcy nadprzewodzących magnesów w temp. -271.3 °C czyli 1.9 K** (najniżej we Wszechświecie!) - chłodzenie ciekłym helem



LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso



# Tunel akceleratora SPS





# Tunel akceleratora LHC

(instalacja magnesów i sam magnes nadprzewodzący)

cząstki (wiązki) będą poruszać się wzdłuż tunelu (27 km) w próżniowych rurach; rury otaczane są przez magnesy nadprzewodzące do utrzymania cząstek na kolistym torze



Koszt samego LHC około 3 miliardów CHF  
magnesy pracujące w temp. 1.9 K i  
wytworzące pole 8.33 T (!)

# Ciekawostki o LHC

- Żeby uzyskać silne pole magnetyczne magnesy nadprzewodzące trzeba chłodzić – wykorzystuje się **60 ton nadciekłego helu**
- **Cząstki poruszają się z prędkością** bliską  $c$  czyli 300 000 km/s (wiązki protonów rozpędzane do prędkości **0.999999991 c**)
- LHC będzie zderzać zarówno p+p jak i Pb+Pb
- W akceleratorze może zachodzić **600 mln zderzeń p+p w ciągu sekundy**, protony które nie zderzyły się mogą krążyć dalej wciąż mając szanse na zderzenie
- **Energia krążących w tunelu protonów** będzie **porównywalna do energii 400-tonowego pociągu TGV jadącego z prędkością ponad 200 km/h** (uwaga: mimo że atomy wodoru z których uzyskano krążące protony w normalnych warunkach zajęłyby kostkę o boku 0.2 mm)
- **Energia w pojedynczym zderzeniu p+p będzie 14 TeV** (7+7) czyli porównywalne do zderzenia dwóch lecących szybko komarów lub delikatne klaśnięcie dłoni (uwaga: ale energia jest bardzo “skoncentrowana” - w miliardy razy mniejszym obszarze więc znacznie poważniejsze skutki zderzenia, por. uderzenia dłonią w dłoń a dłonią w szpilkę)
- **protony będą okrążać tunel (27 km obwodu) około 11 tysięcy razy na sekundę**
- **pobór energii w LHC (120 MW)** – jedynie kilka razy mniejszy od elektryczności zużywanej przez województwo mazowieckie

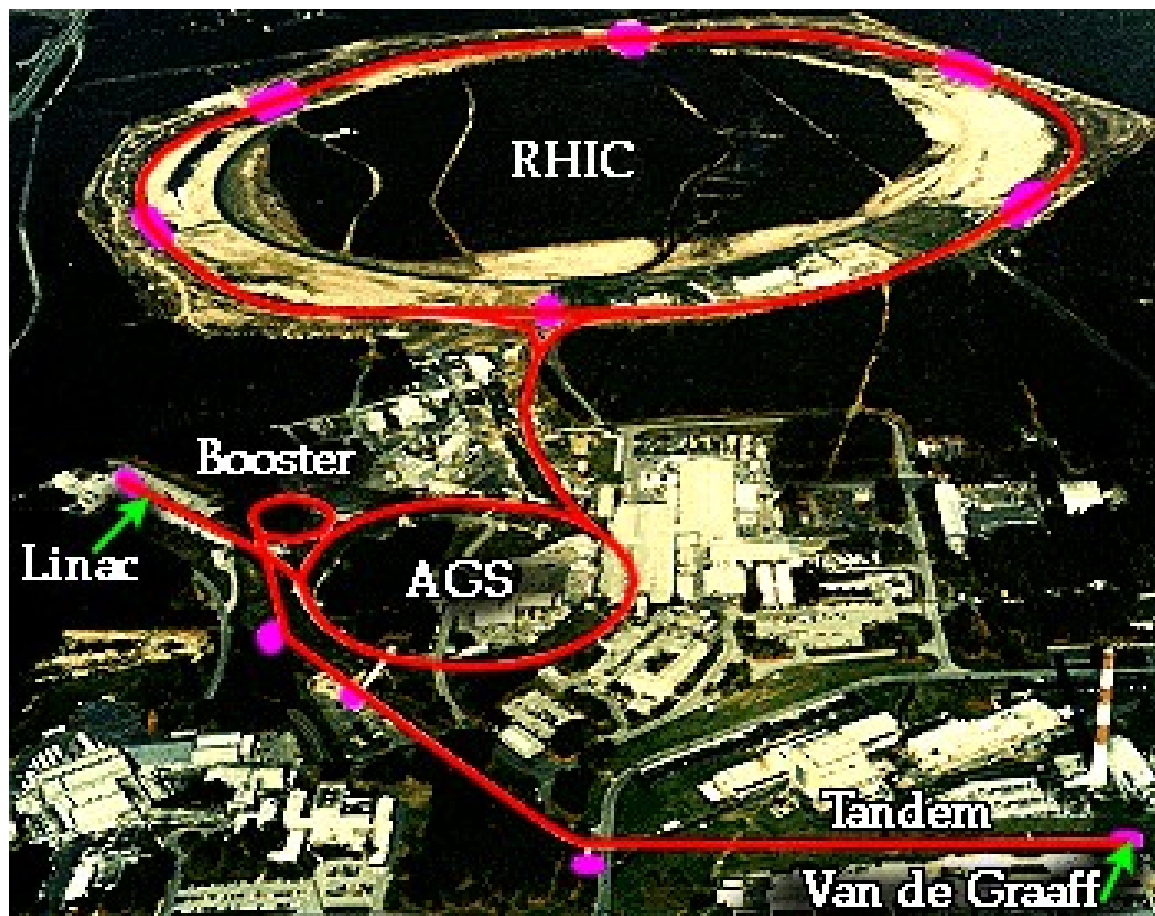


# Laboratorium BNL (USA)





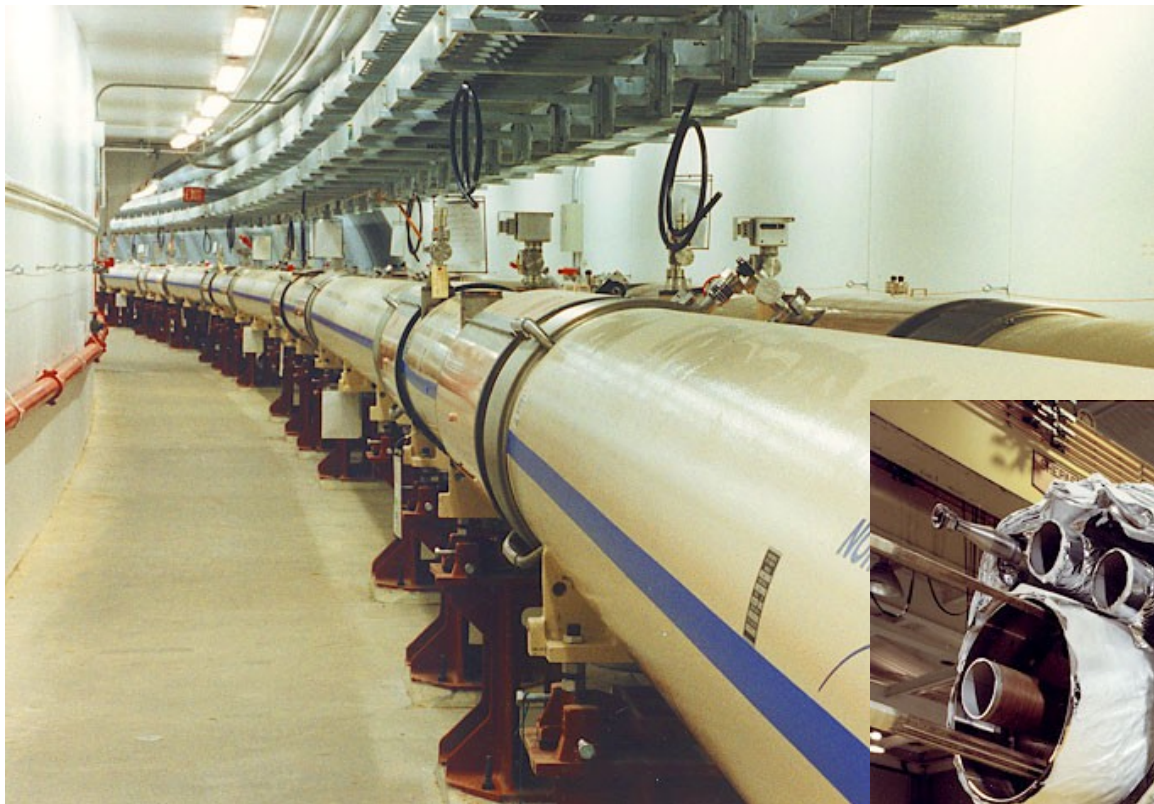
# Schemat akceleratorów w BNL



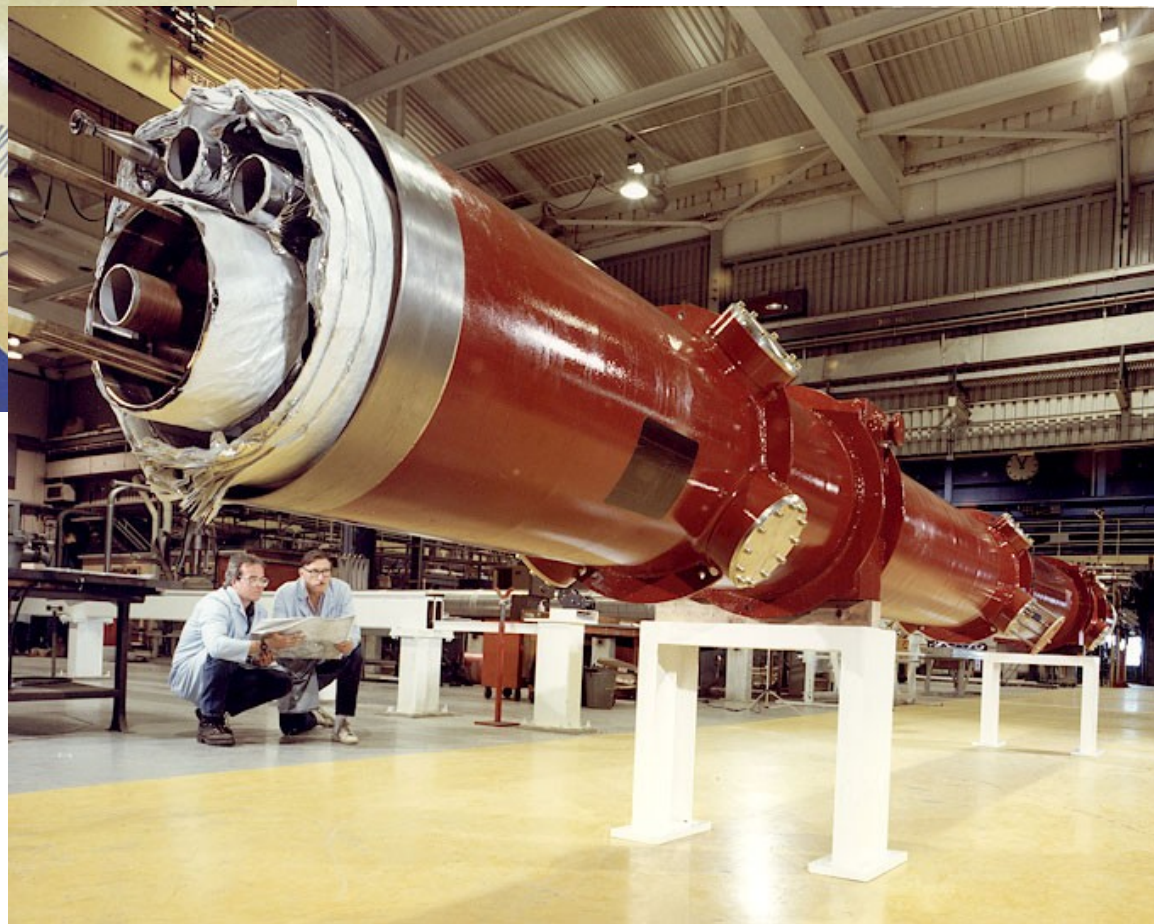
Etapy przyspieszania cząstek:

- 1a. Linac – 145m (przyspiesza protony do 0.2 GeV)
- 1b. Generator Van de Graaff'a – wytwarza ciężkie jony
2. Booster – 50m średnicy
3. AGS – 250m średnicy (przyspiesza ciężkie jony do energii całkowitej 11-15 GeV)
4. pierścień RHIC – 3.8 km obwodu

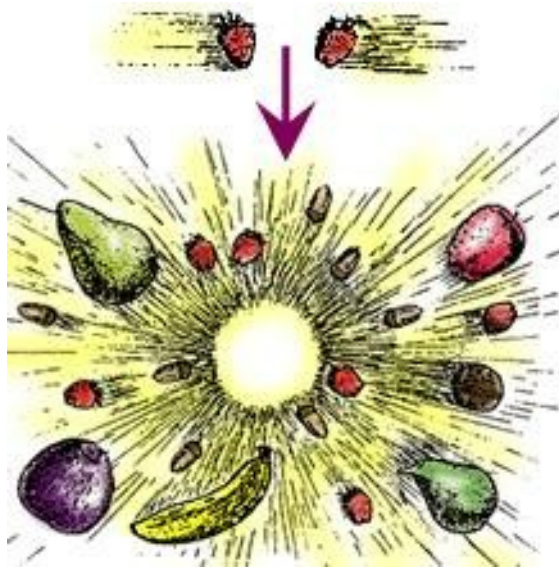
# Tunel akceleratora RHIC



w akceleratorze RHIC  
przyspieszane są dwie wiązki  
jąder złota w przeciwnych  
kierunkach (dwie rury  
akceleratora, rys. górny)



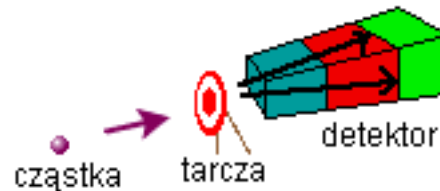




← Po zderzeniu wyprodukowane cząstki “rozpryskują się” w różnych kierunkach

**Typy detektorów** (detekcja jest w tych obszarach, gdzie spodziewany jest “deszcz” cząstek, powstałych w wyniku analizowanego zderzenia)

**1. do eksperymentów ze stacjonarną tarczą**  
(produkcja do przodu)

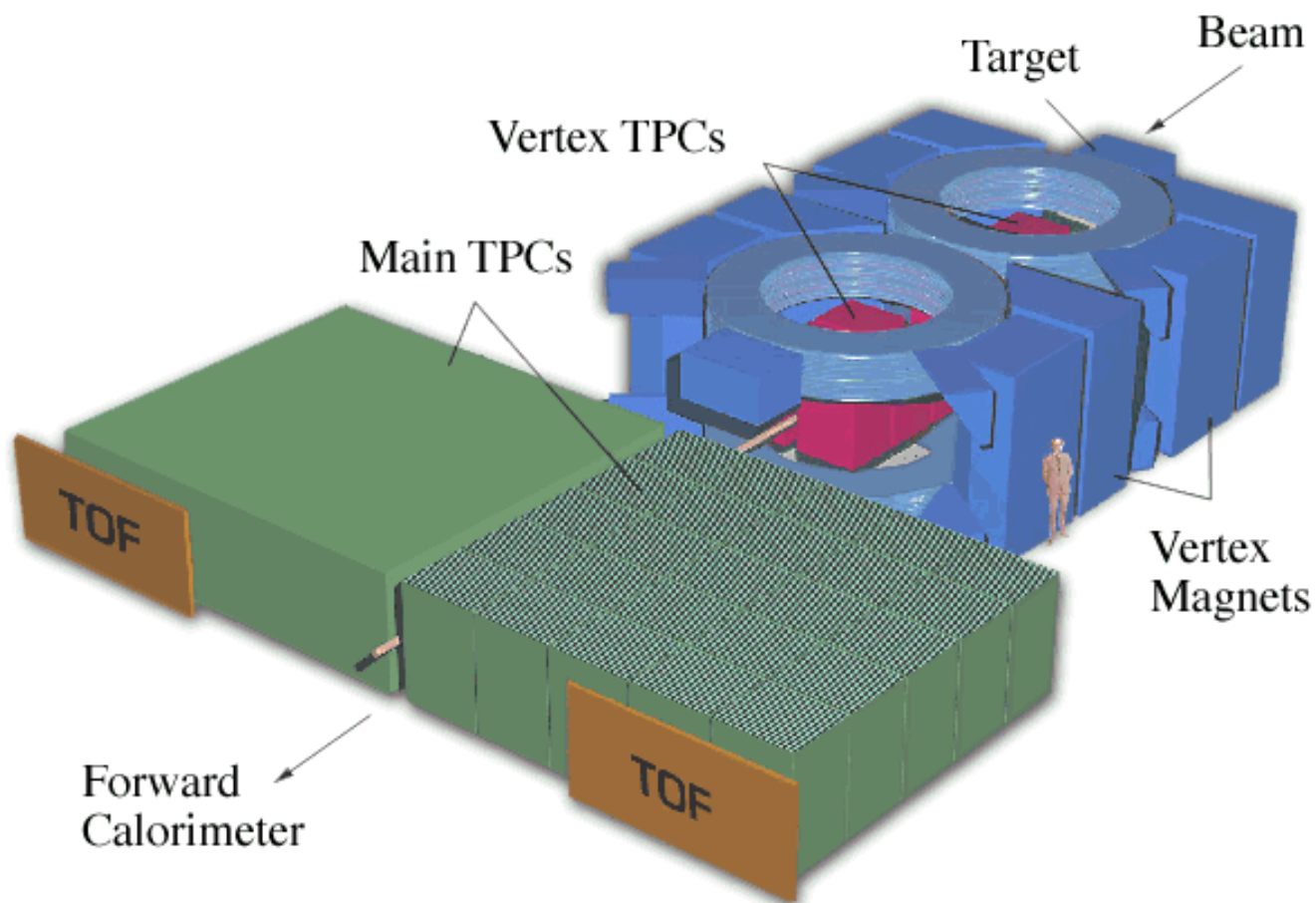


**2. do eksperymentów z wiązkami przeciwbieżnymi**  
(produkcja we wszystkich kierunkach)





# Eksperyment NA49 przy akceleratorze SPS w CERN (Szwajcaria)



Jony przyspieszane do prędkości bliskiej  $c$ !  
maks. 1500 nowych cząstek

VTPC(1/2) w polu B (maks. 1.5T) oraz MTPC(R/L) - do pomiaru pędu i  $dE/dx$   
komory wypełnione gazem

Identyfikacja:  $dE/dx$ +pęd lub  
czas przelotu (TOF)+pęd

VCAL – do pomiaru  
centralności

w chwili obecnej mamy następcę: eksperyment NA61

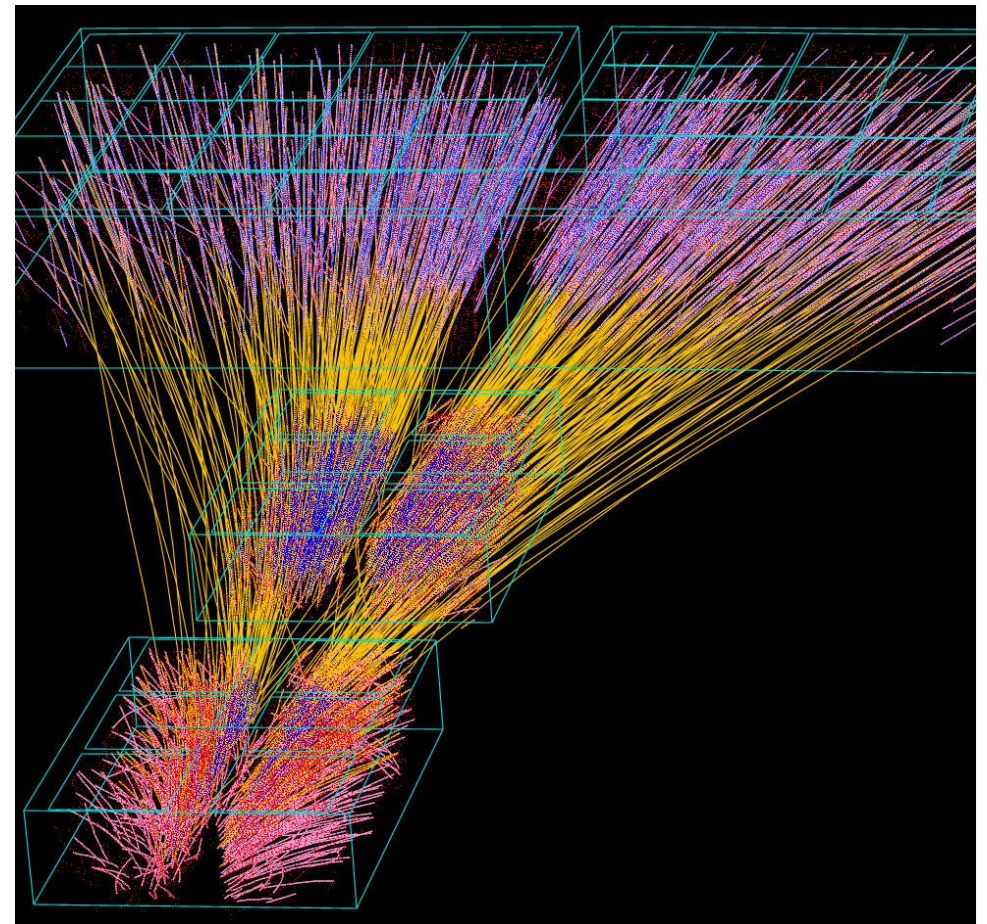
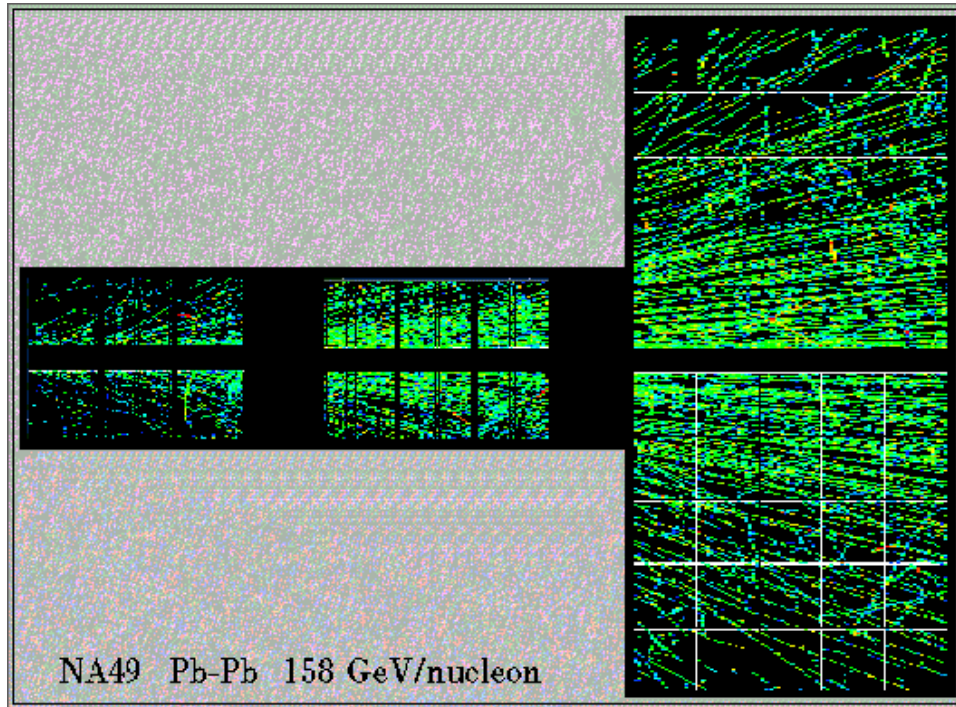


Jak to wygląda w rzeczywistości...





# Zderzenie centralne Pb+Pb @ $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$ GeV

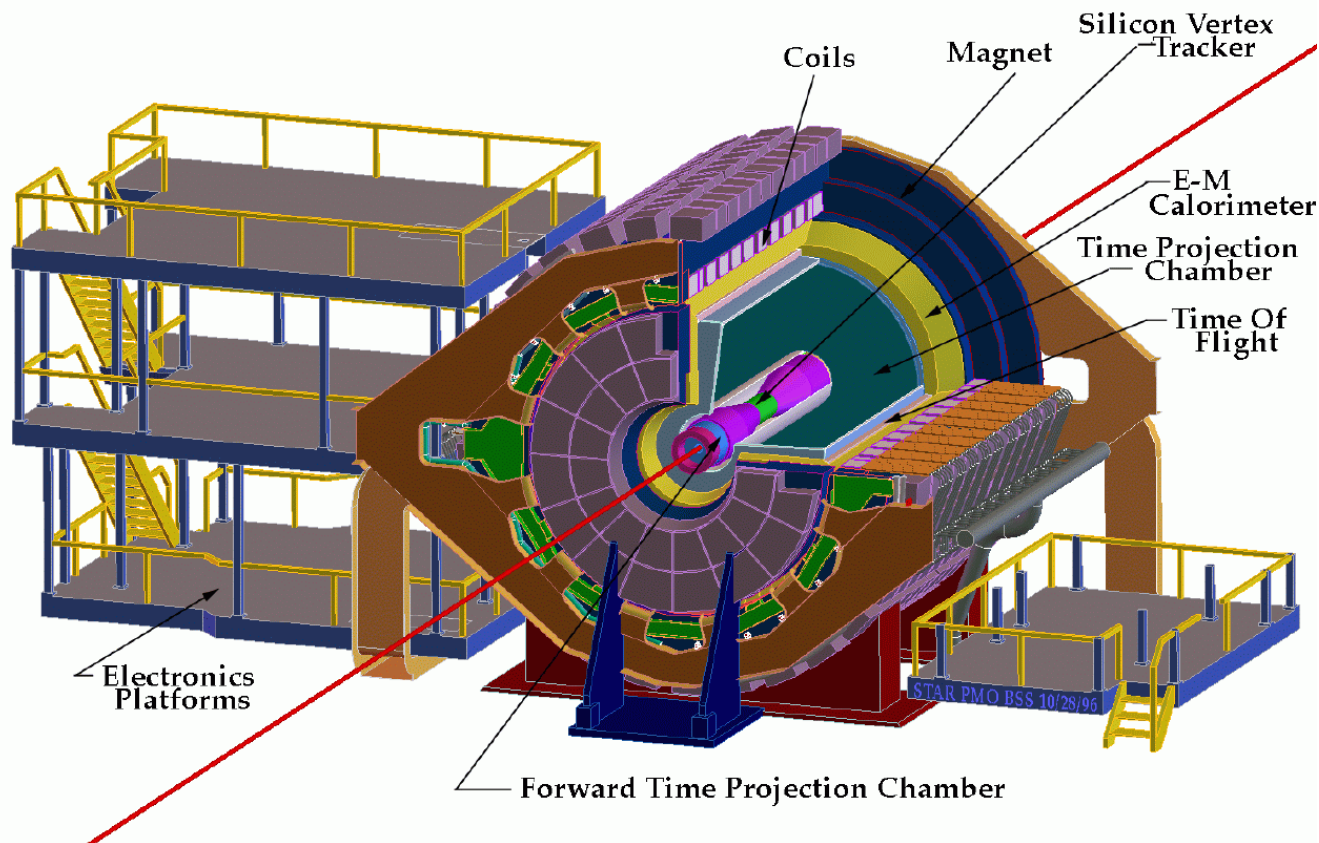


# Eksperyment STAR przy akceleratorze RHIC w BNL (USA)



**BROOKHAVEN**  
NATIONAL LABORATORY

## STAR Detector



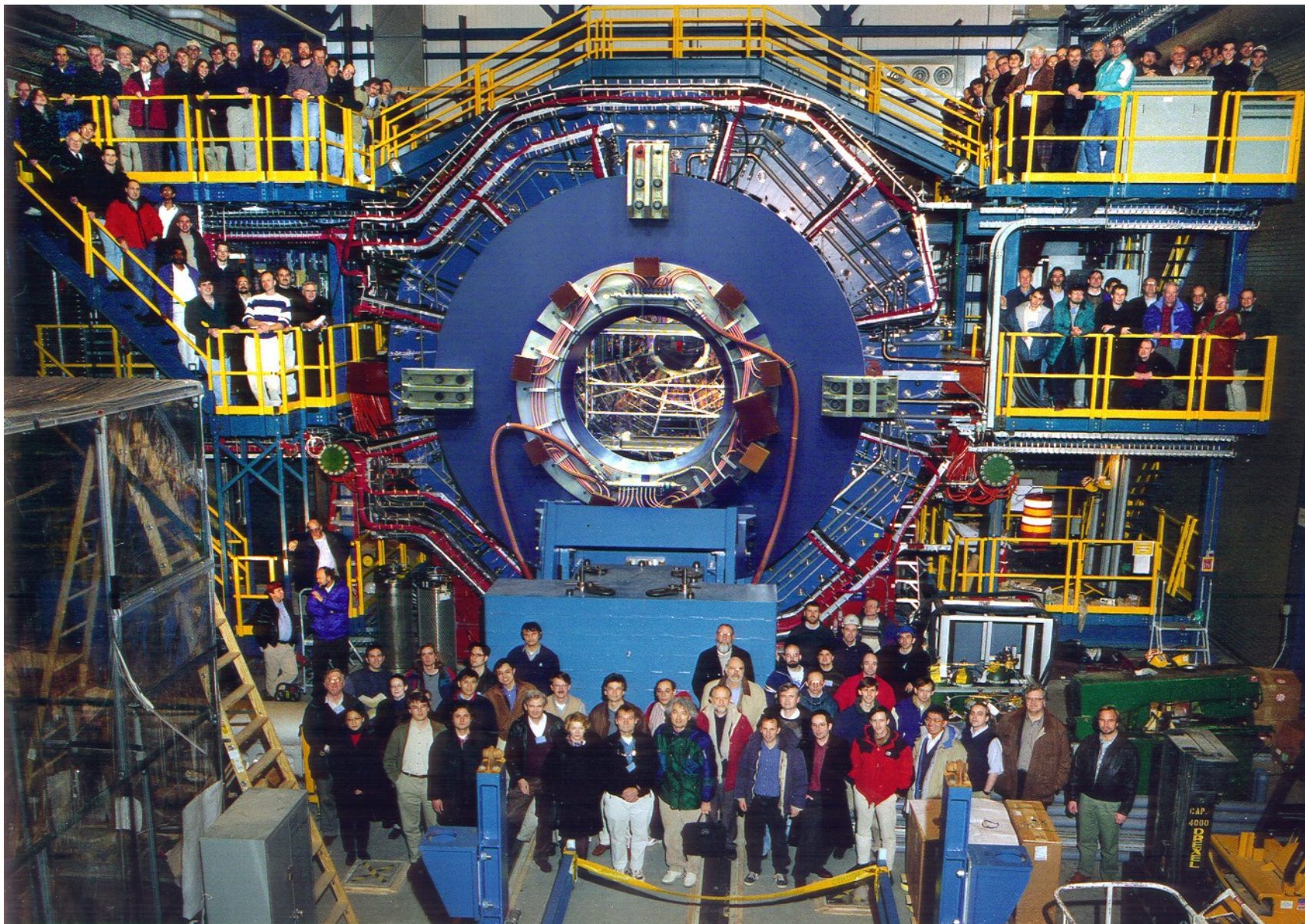
Jony przyspieszane do prędkości bliskiej  $c$  !

SVT – b. dokładny pomiar cząstek krótko-życiowych (o czasach życia nawet nieco poniżej  $10^{-10}$  s czyli  $\tau$  około kilka cm)

TPC w polu  $B$  -> do pomiaru pędu i  $dE/dx$   
TOF – do pomiaru czasu przelotu  
EM Cal. - do pomiaru energii kaskad EM

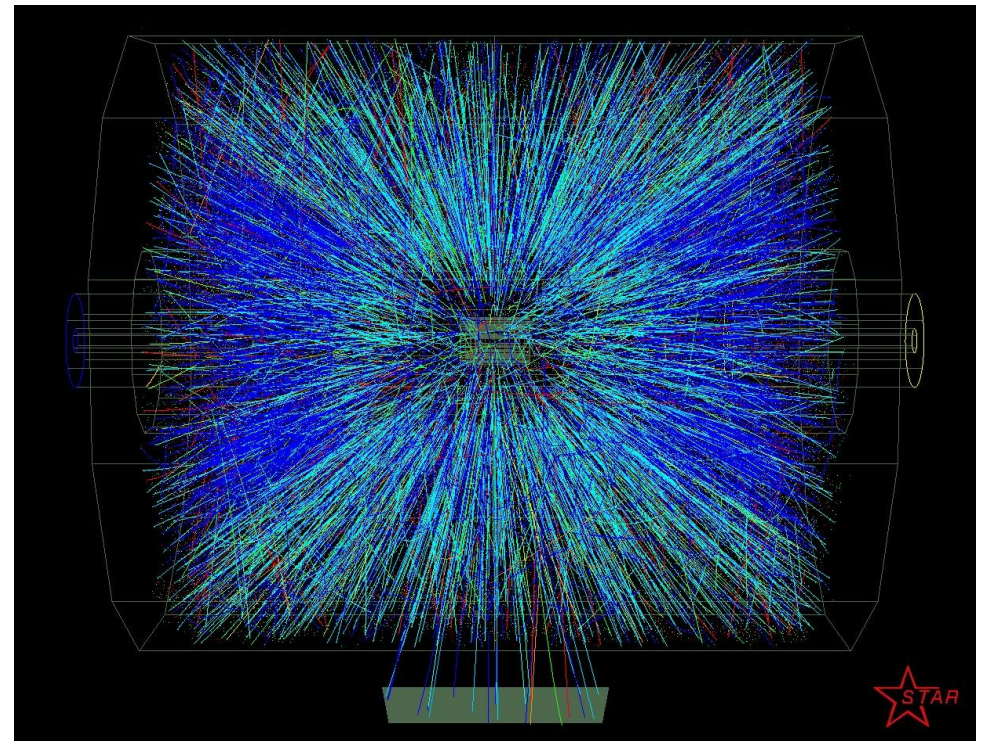
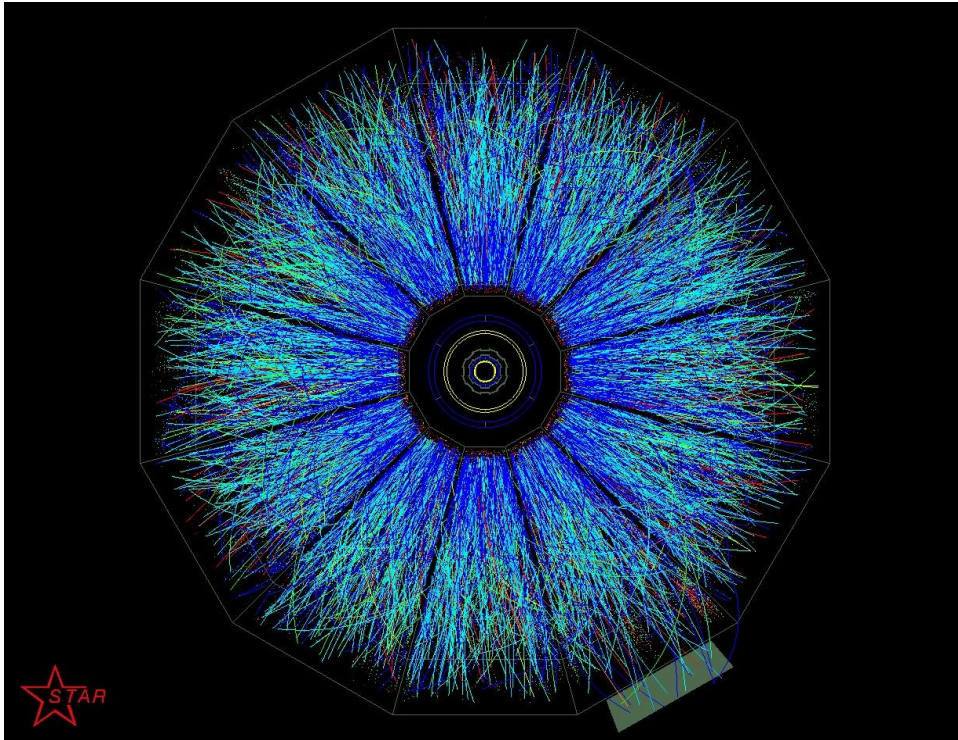


Jak to wygląda w rzeczywistości...

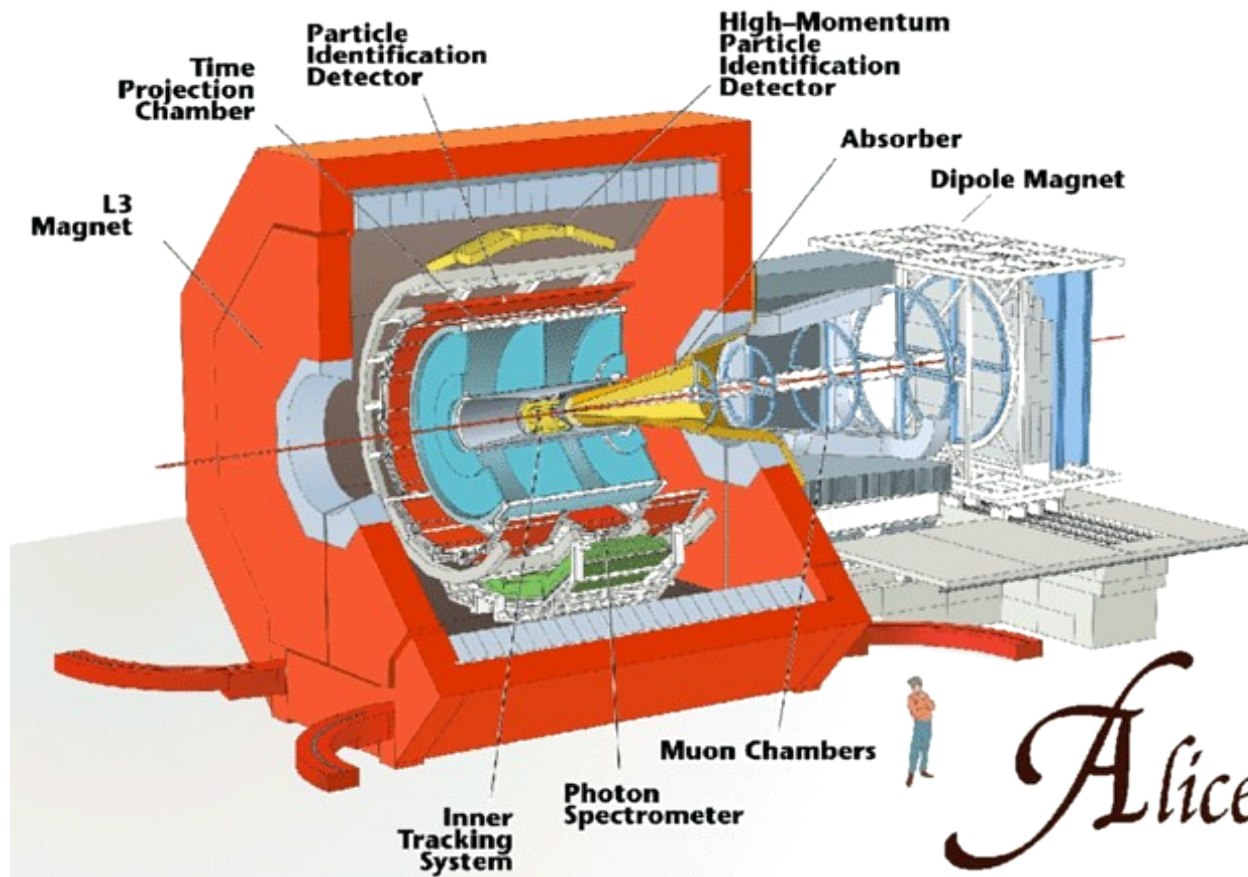
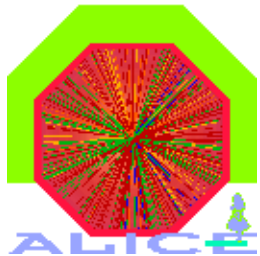




# Zderzenie centralne Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



# Eksperyment ALICE przy akceleratorze LHC w CERN (Szwajcaria) – planowane $\sqrt{s}_{NN} = 5.5 \text{ TeV}$



*Alice*

Największy detektor w fizyce jądrowej!

ITS i TPC - “śledzą” tor cząstki naładowanej

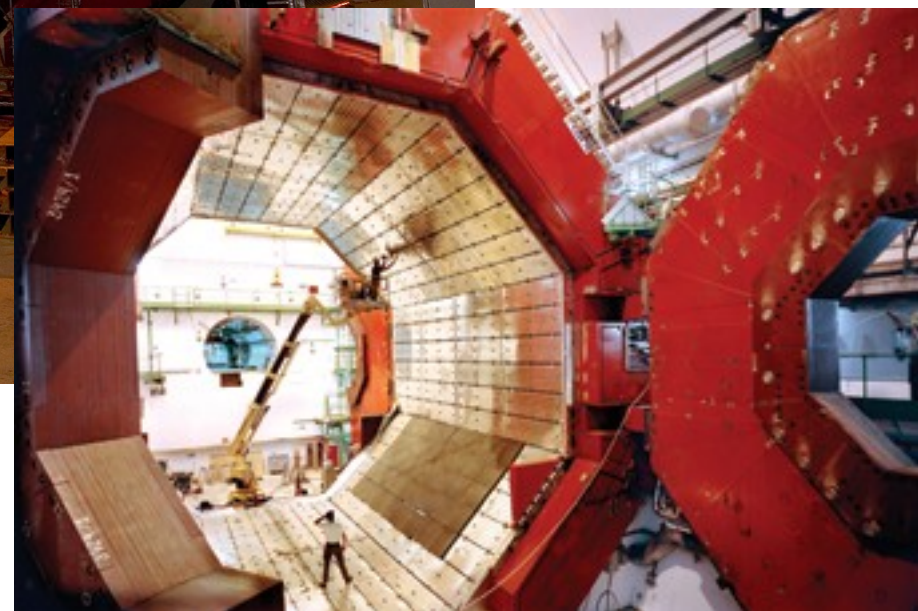
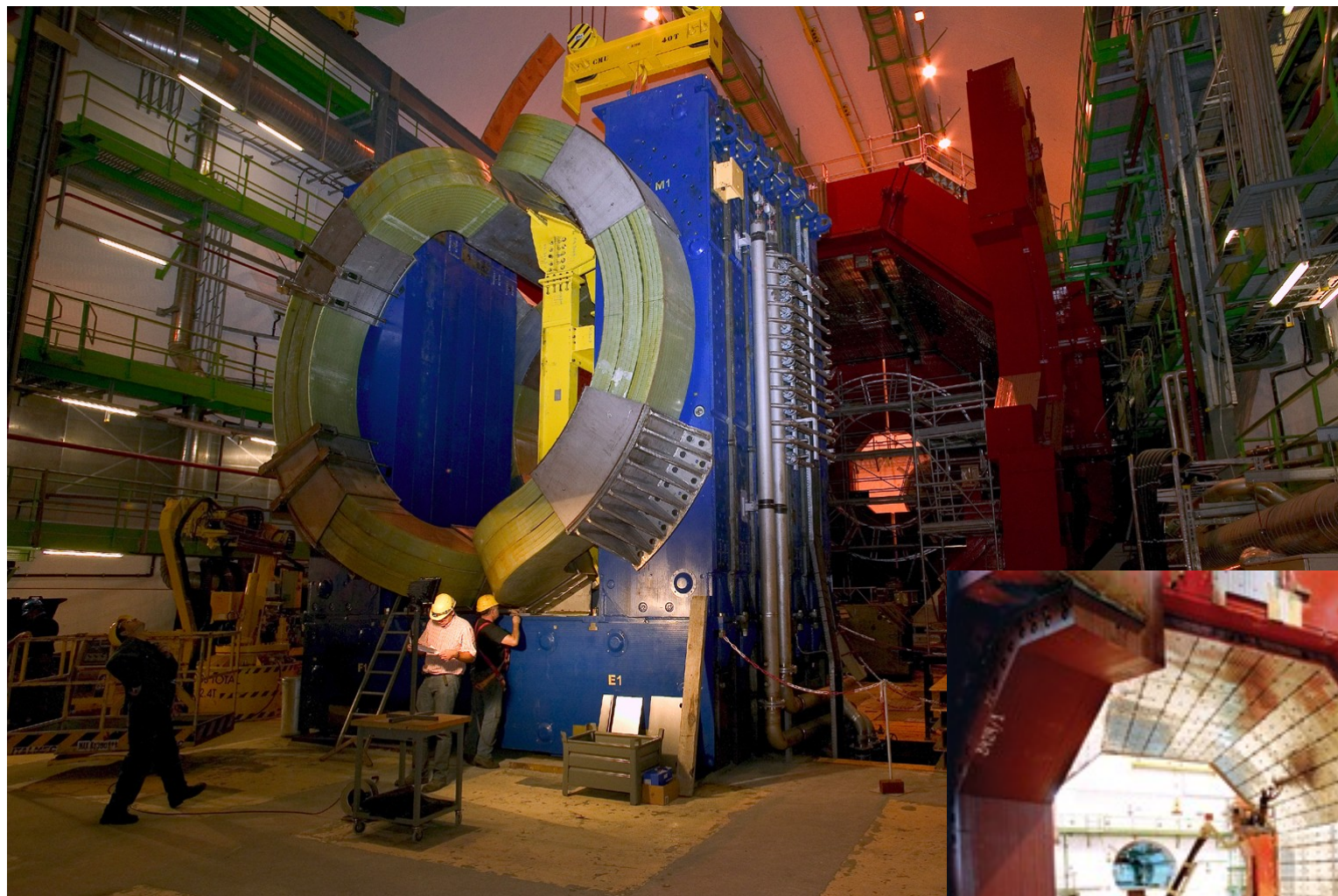
ITS – do pomiaru cząstek krótko-życiowych

TPC – mierzą pęd w polu B i  $dE/dx$  w materiale ośrodka (gaz)

spektrometr mionowy (z przodu za absorberem) – tu dolatują jedynie miony i neutrina



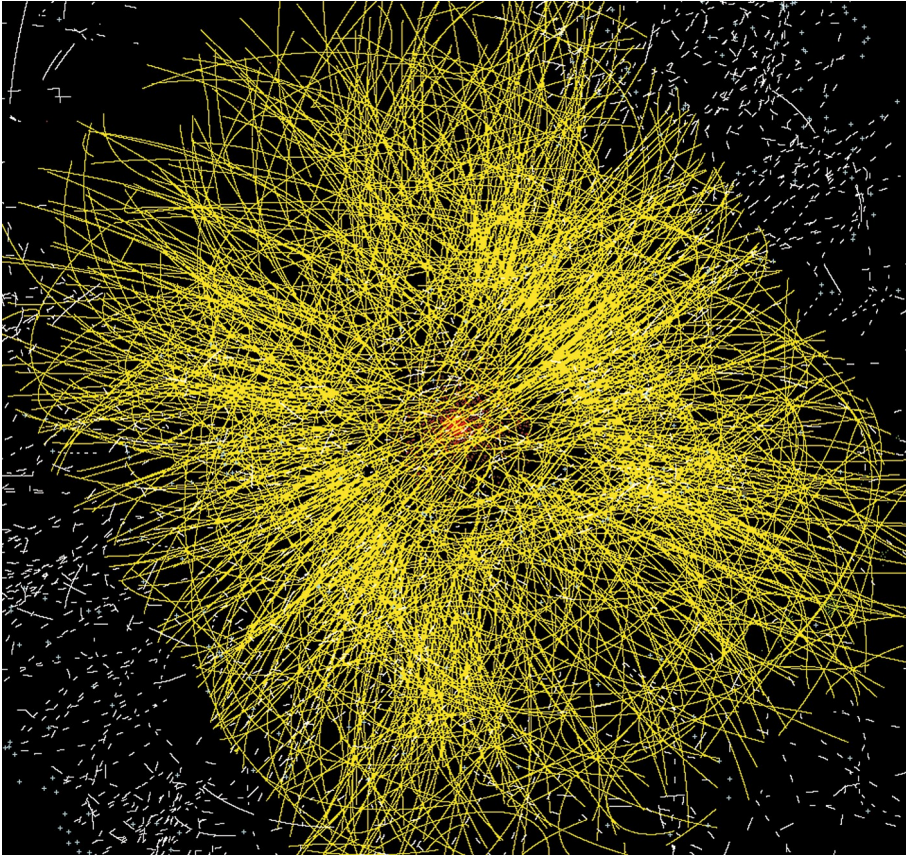
Jak to wygląda w rzeczywistości...



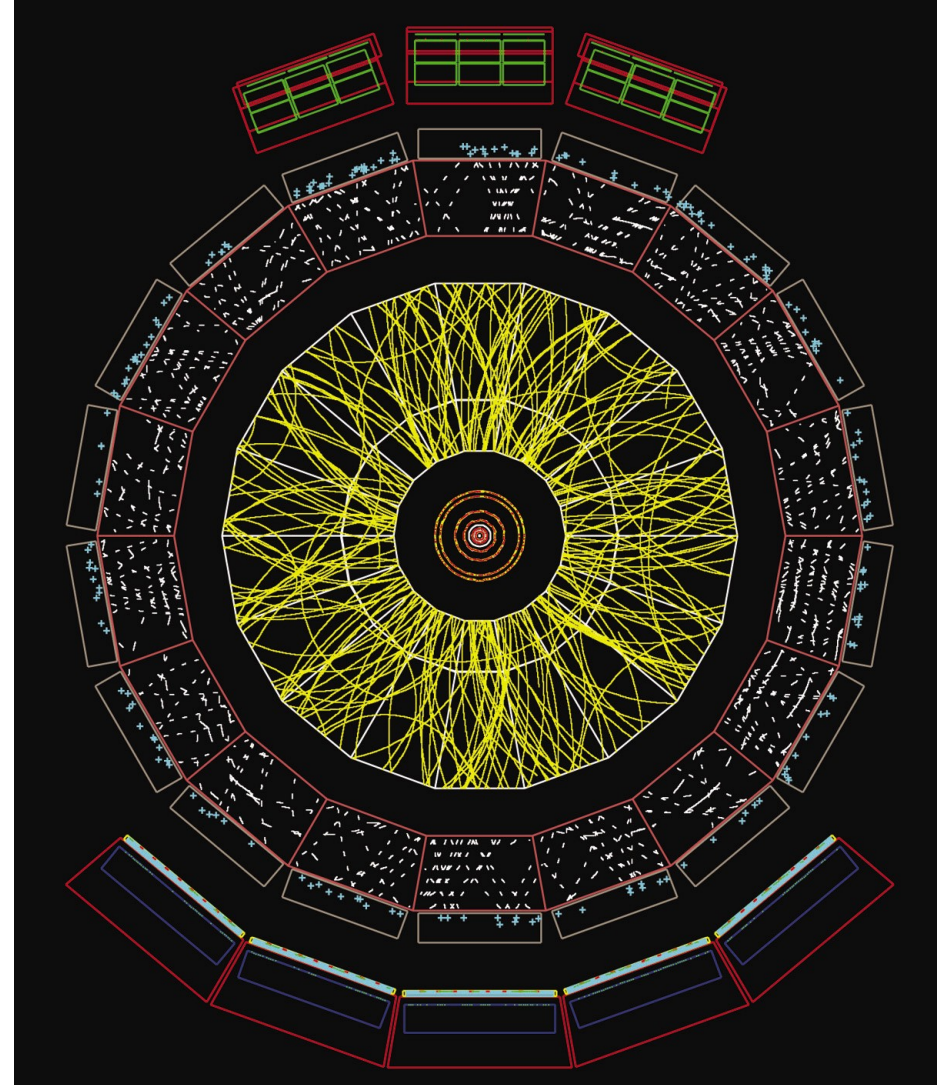
Koszt ALICE to około 150 milionów CHF



# Symulacja zderzenia Pb+Pb w detektorze ALICE



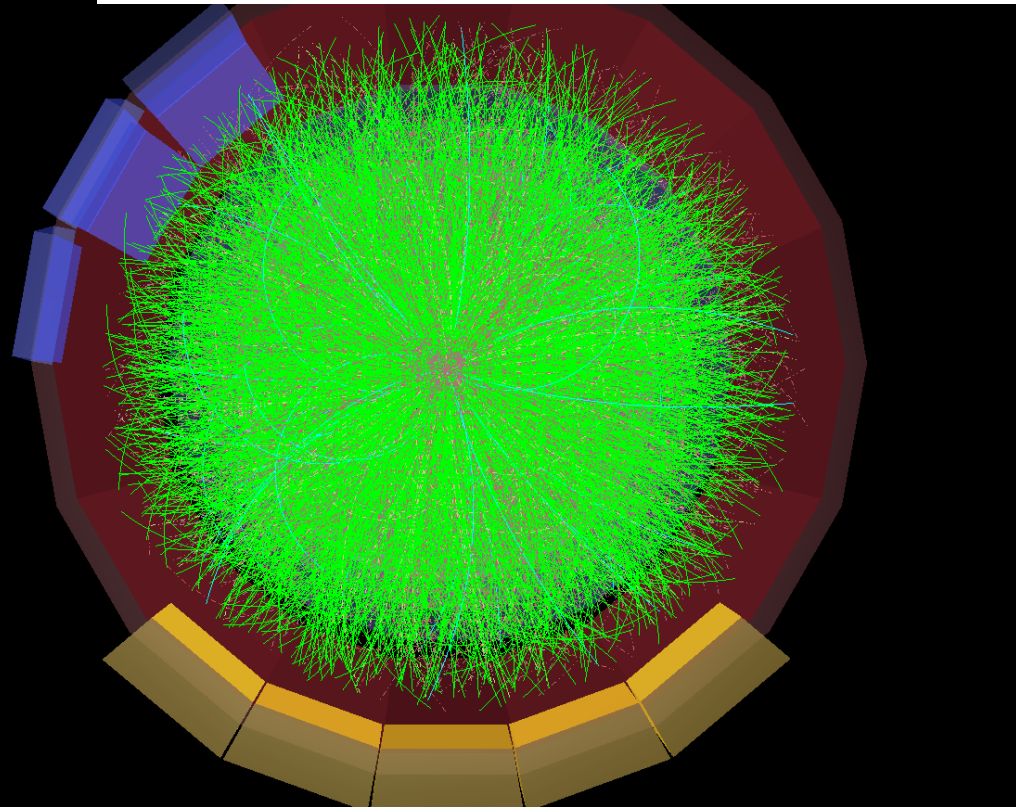
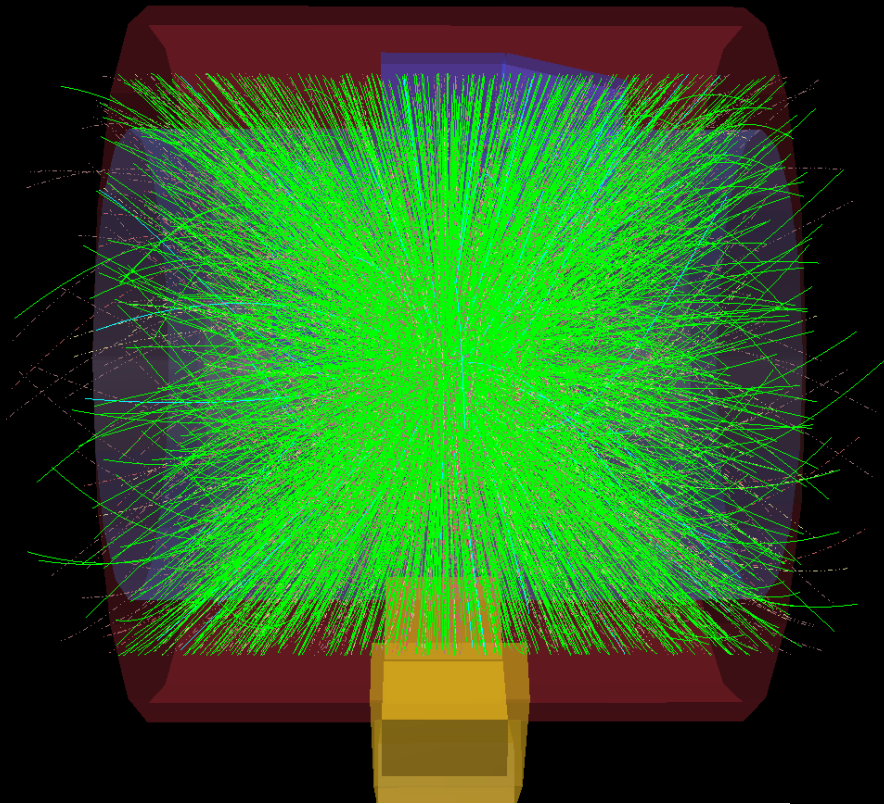
**zderzenie peryferyczne**; w zderzeniu centralnym przy tych energiach byłaby to jedna wielka żółta plama ze śladów cząstek ...





# Symulacja zderzenia Pb+Pb w detektorze ALICE

**zderzenie średnio-centralne**  
(centralność 20-30%)

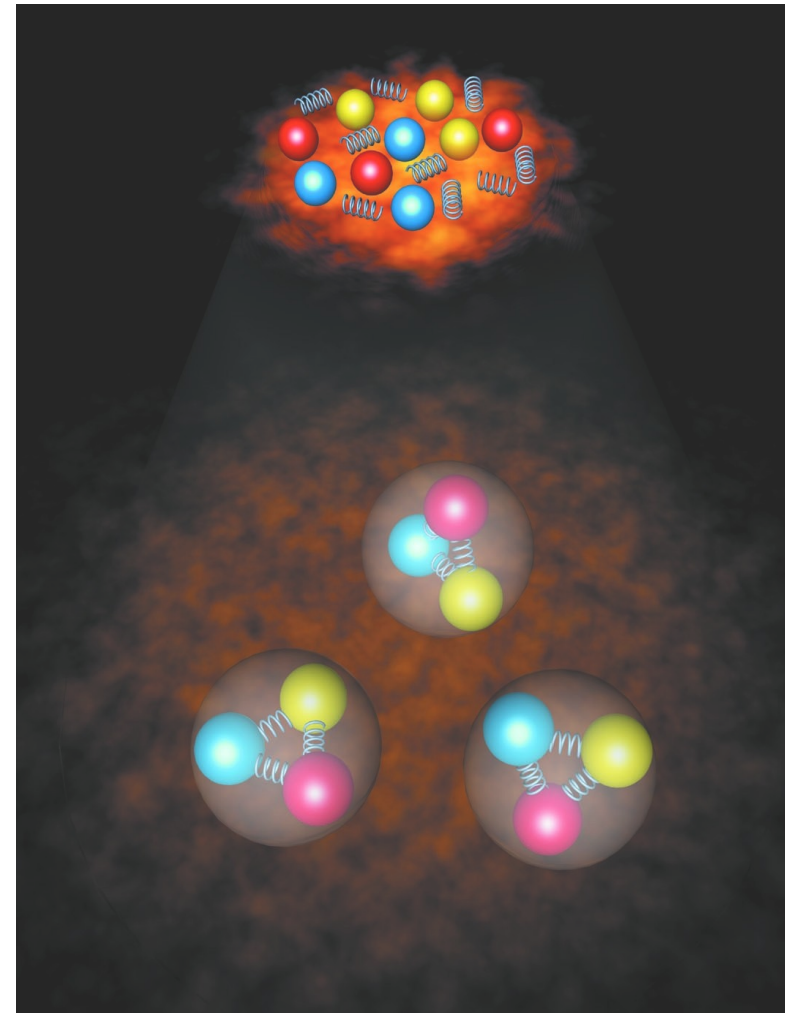


Trochę o kluczowych wynikach czyli skąd wiemy że plazma kwarkowo-gluonowa powstała tuż po zderzeniu ???

## Diagram fazowy silnie oddziałującej materii



Fazy wody



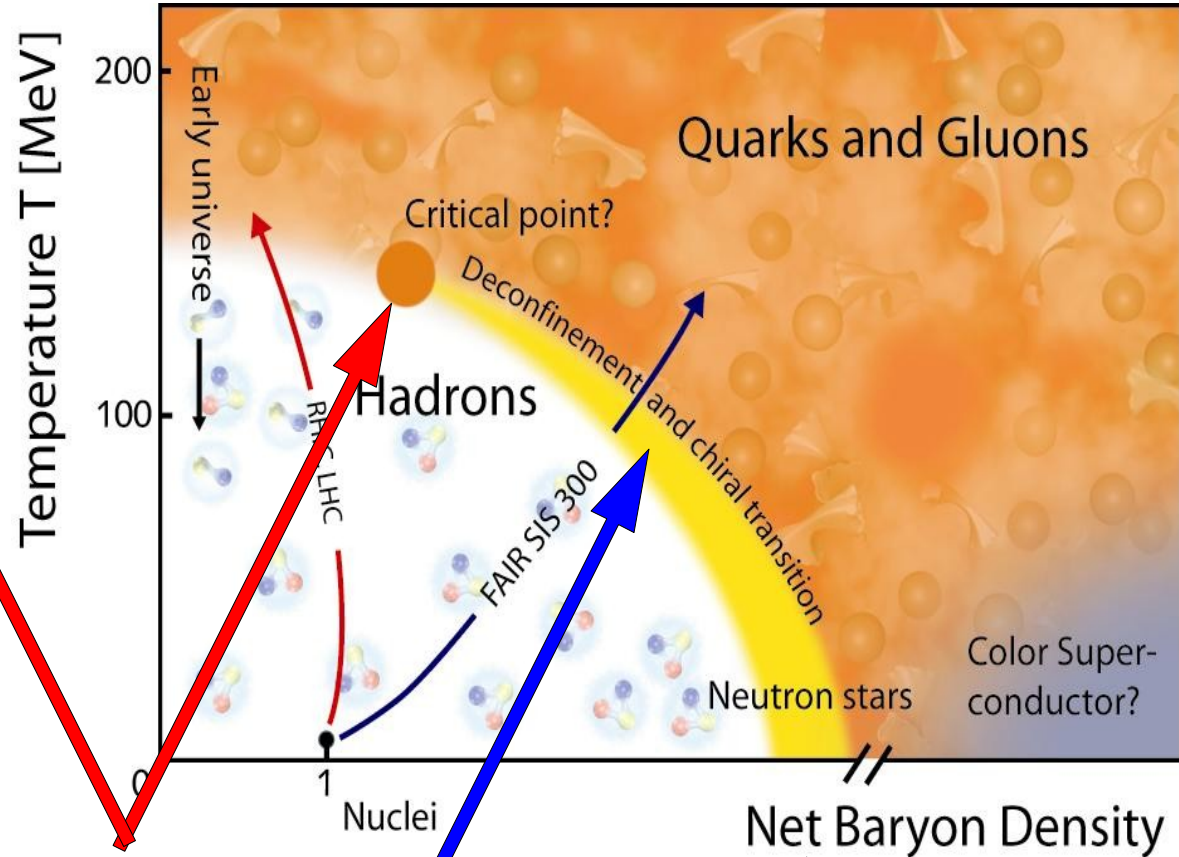
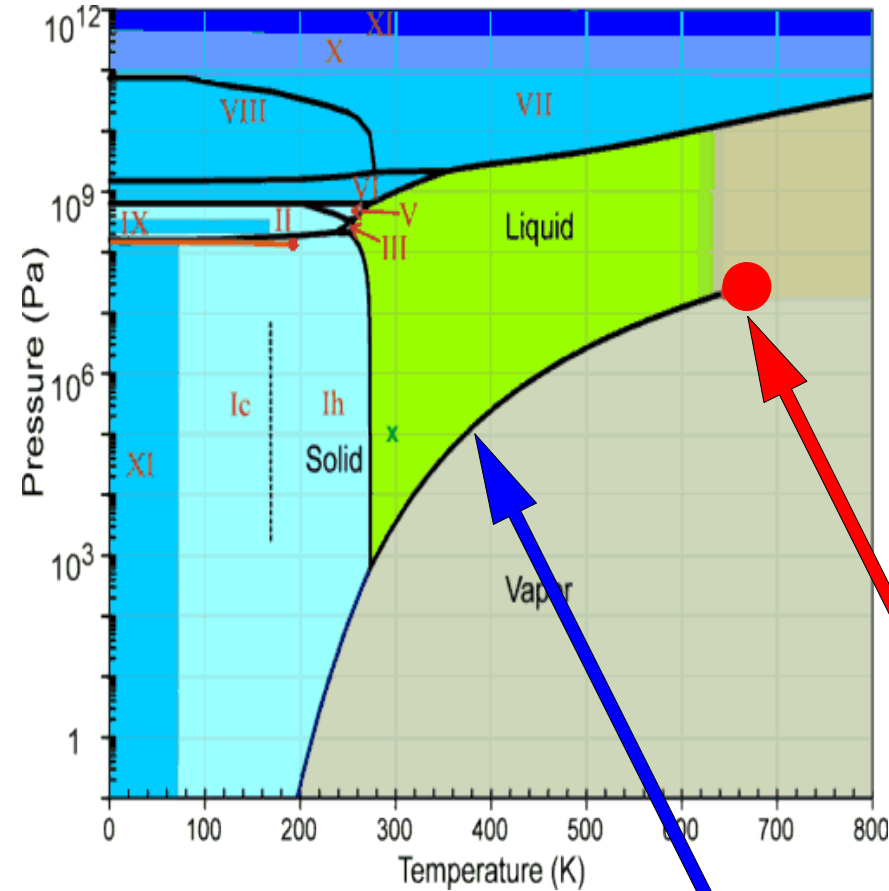
Fazy silnie oddziałującej  
materii



**Diagram fazowy dla  
wody jest bardzo  
dobrze poznany**

**ale**

**własności przejścia między  
gazem hadronowym  
a plazmą kwarkowo-gluonową  
jeszcze muszą być odkryte**



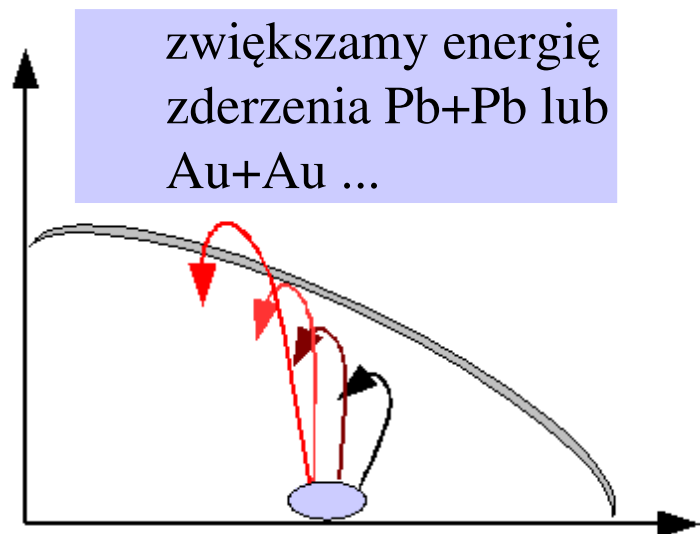
**punkt krytyczny**  
**przejście fazowe 1. rodzaju**

gwiazdy neutronowe  
około  $4-10\rho_0$

materia jądrowa gęstość  $\rho_0$  rzędu  $10^{14} \text{ g/cm}^3$

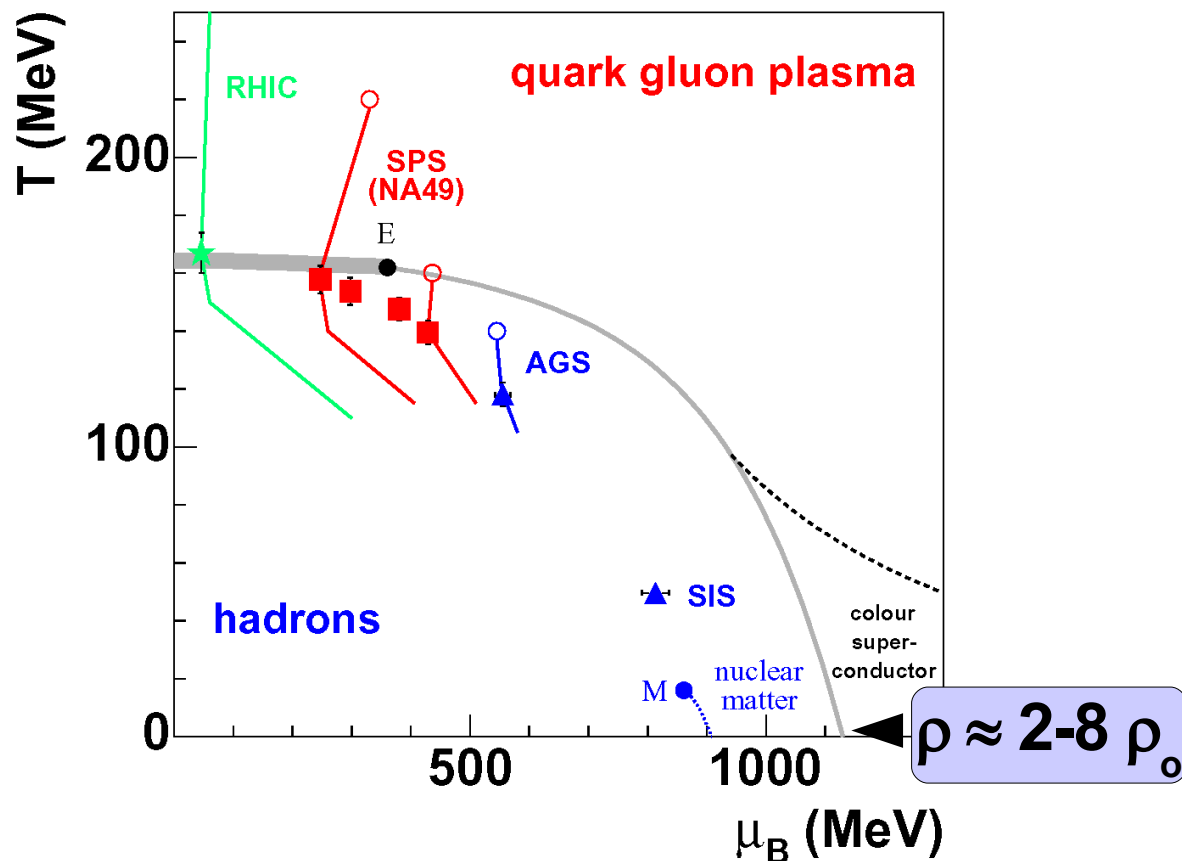
Wzdłuż linii koegzystencji faz  
zbliżając się do CEP gęstość  
wody spada a pary wzrasta.  
W i powyżej punktu krytycznego  
(CEP) nie da się odróżnić  
wody od pary

Jak poruszać się po diagramie fazowym  
jak przekroczyć granicę przejścia fazowego



...i zbliżamy się do granicy przejścia fazowego

**Barionowy potencjał chemiczny ( $\mu_B$ )** –  
zmienna termodynamiczna mówi o tym jak zmieni  
się energia układu jeśli zabierzemy (dodamy) jeden  
barion



normalne jądra atomowe (materia jądrowa): dla  $T=0$  MeV  $\mu_B \approx m_N = 940$  MeV

a dla  $\mu_B = 0 \Leftrightarrow \rho_B = 0$

Prawy rysunek:

**otwarte kółka** - hipotetyczne(!) lub prawie hip. punkty osiągnane tuż po zderzeniu (w QGP)

**zamknięte punkty** – punkty gdy ustają oddział. nieelastyczne między wyprod. cząstkami

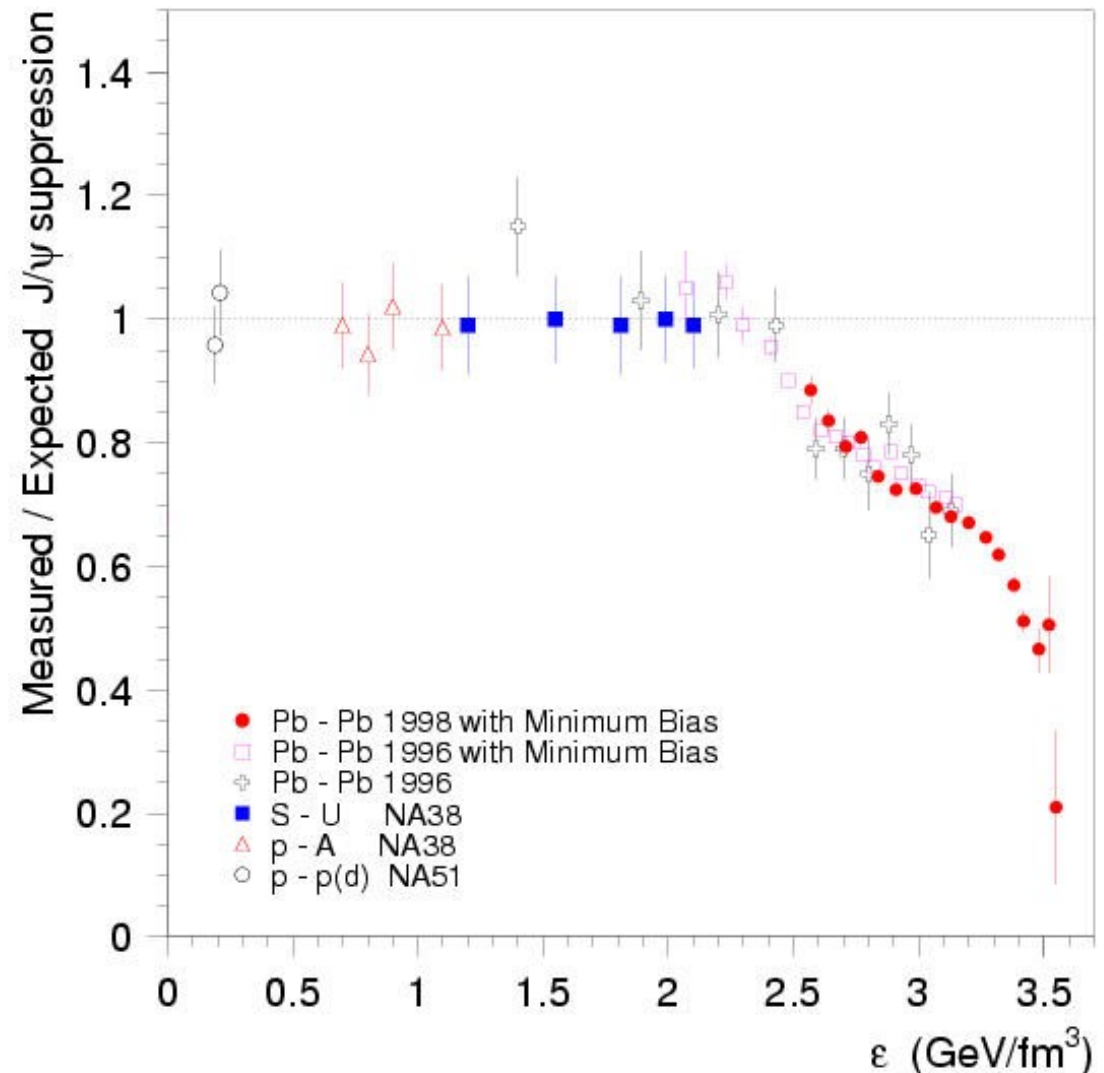
**końce krzywych** – punkty gdy ustają oddział. elastyczne między wyprod. cząstkami



# Produkcja cząstki $J/\Psi$ czyli mezonu zawierającego kwark c oraz anty\_c

Przewidziano teoretycznie że przejście fazowe do QGP powoduje tłumienie produkcji cząstki  $J/\Psi$  - utworzona para (c anty-c) nie może “przetrwać” w środowisku QGP

lekke systemy p+p, p+A, S+U – nie produkuje się QGP, ciężkie systemy np. Pb+Pb i centralne zderzenia (duża gęstość energii) – produkcja QGP



# Produkcja kaonów (mezon K) oraz pionów (mezon $\pi$ )

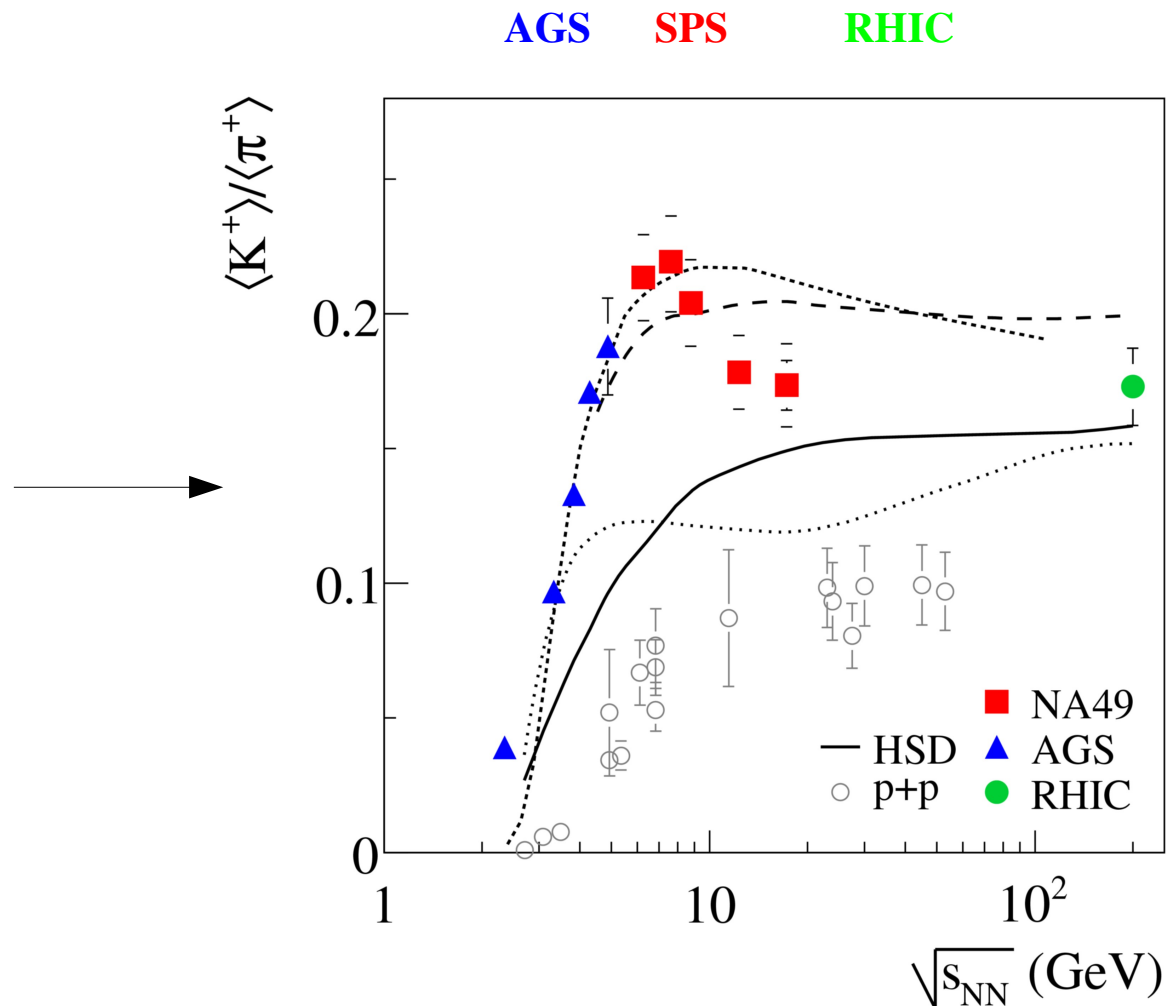
Przy jakiej dokładnie energii następuje przejście fazowe?

Stosunek produkcji kaonów (zawierają kwark 's') do pionów w funkcji energii zderzenia

Średnia liczba kaonów w pojedynczym zderzeniu do średniej liczby pionów na zderzenie

Taki kształt (ilościowo i jakościowo) przewidziano teoretycznie kilka lat temu!!!

**Tylko model z produkcją QGP tuż po zderzeniu potrafi zadowalająco wyjaśnić takie zachowanie ! (patrz następna strona)**



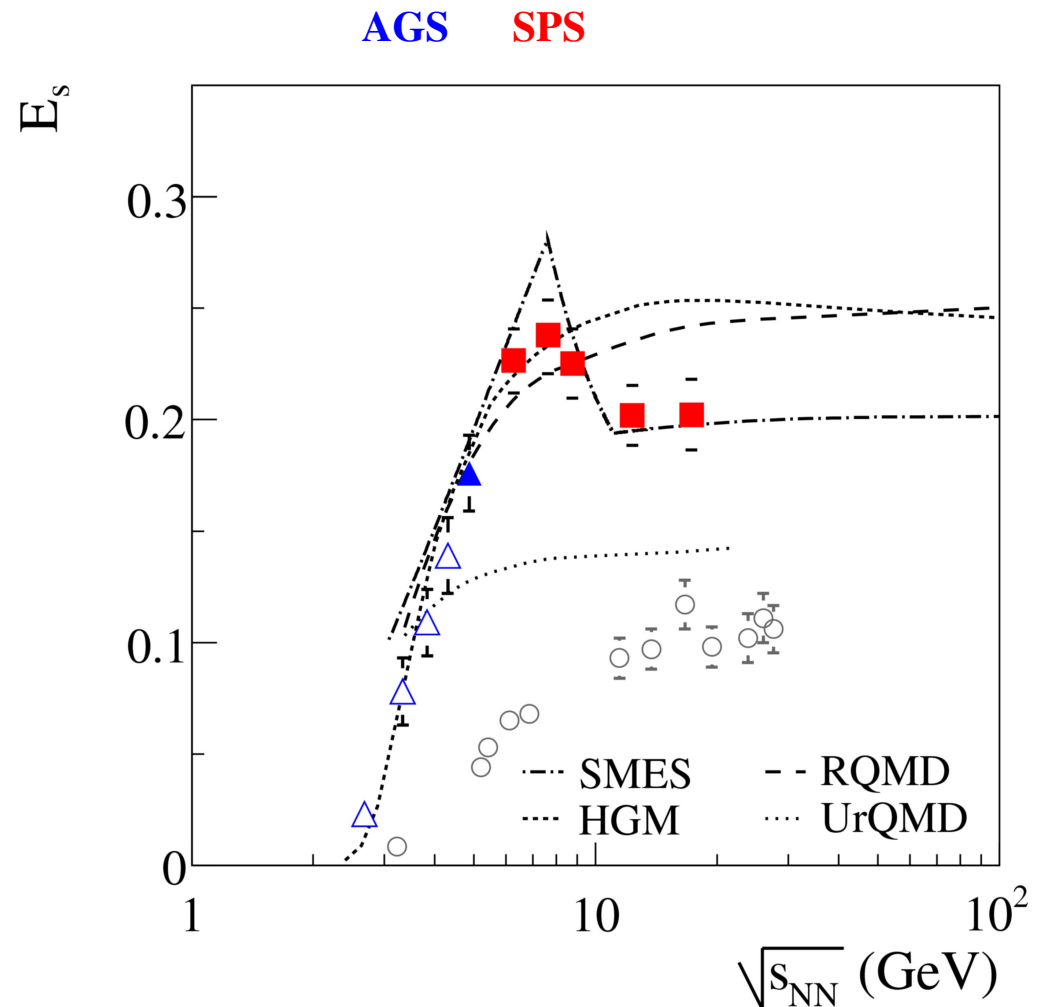


# Produkcja kaonów (mezon K), pionów (mezon $\pi$ ) oraz lambd ( $\Lambda$ również zawierają kwark 's')

$$E_s = (\langle \Lambda \rangle + \langle K + \bar{K} \rangle) / \langle \pi \rangle$$

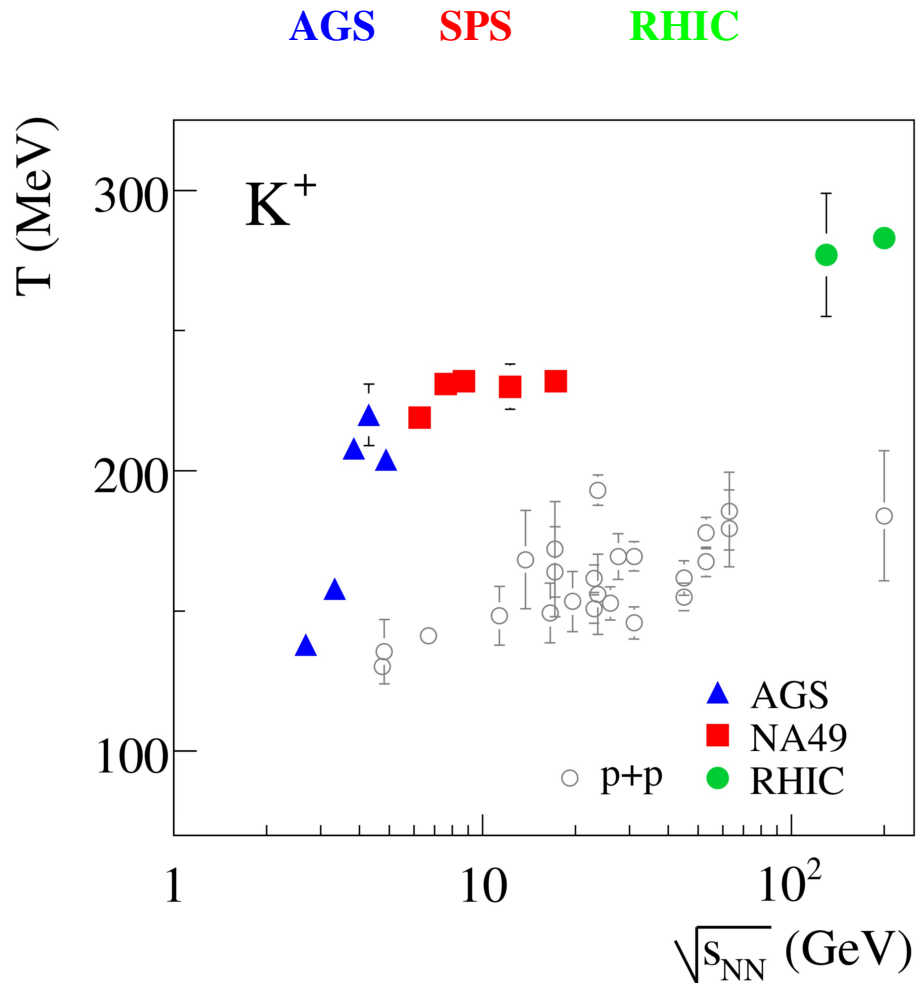
**Tylko model SMES z produkcją QGP tuż po zderzeniu** (dla energii zderzenia w środku masy powyżej 7 GeV na parę nukleonów) **potrafią zadowalająco wyjaśnić takie zachowanie !**

Do przewidywań użyto Statistical **Model of the Early Stage** (SMES) z przejściem fazowym dla energii w środku masy = 7 GeV na parę nukleonów



# Temperatury źródła cząstek produkowanych w zderzeniu Pb+Pb lub Au+Au

Lewy: temperatura źródła emitującego cząstki







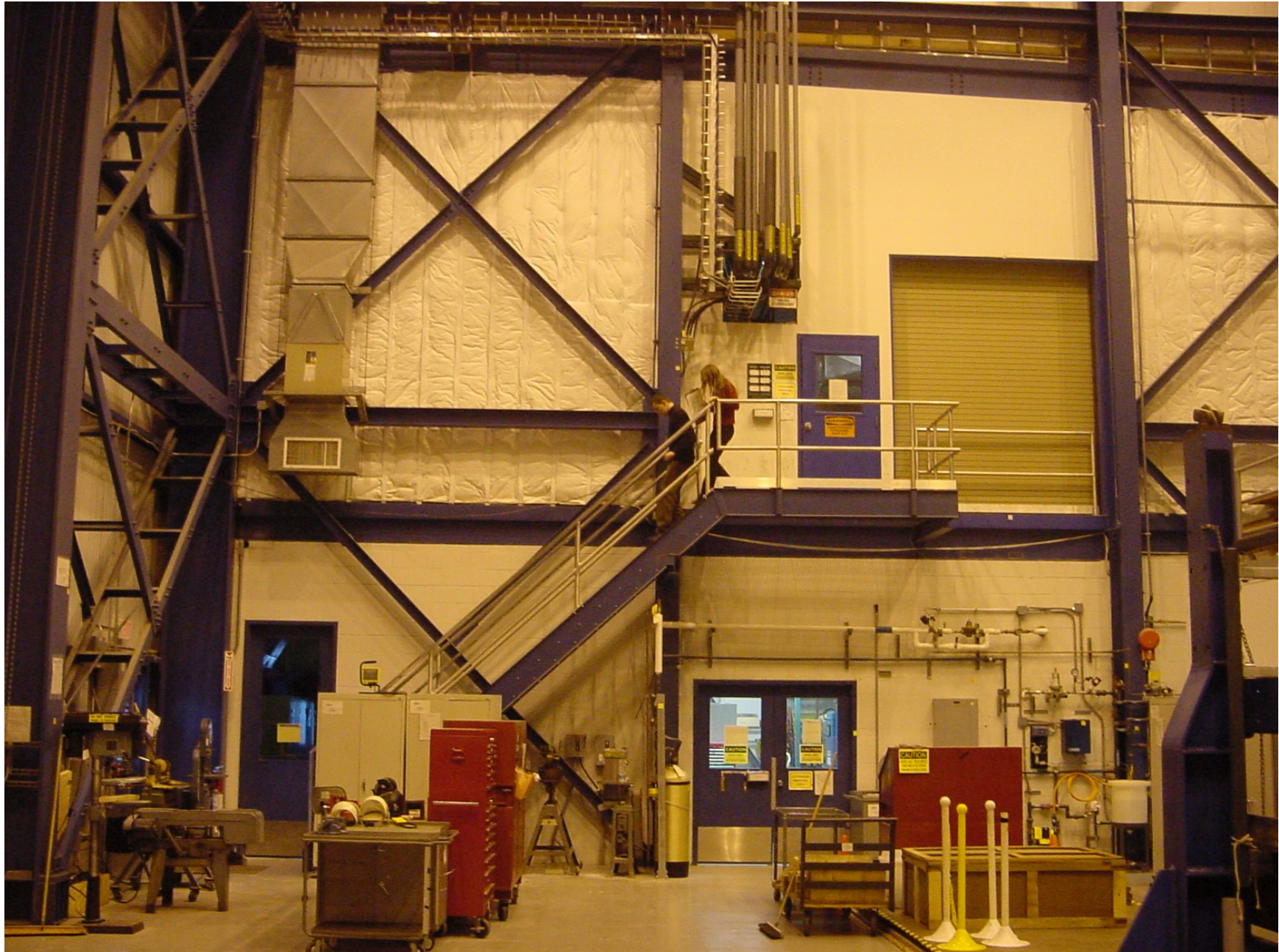
Nasz wkład we wszystkie omówione eksperymenty jest bardzo istotny...

STAR

w trakcie zbierania danych

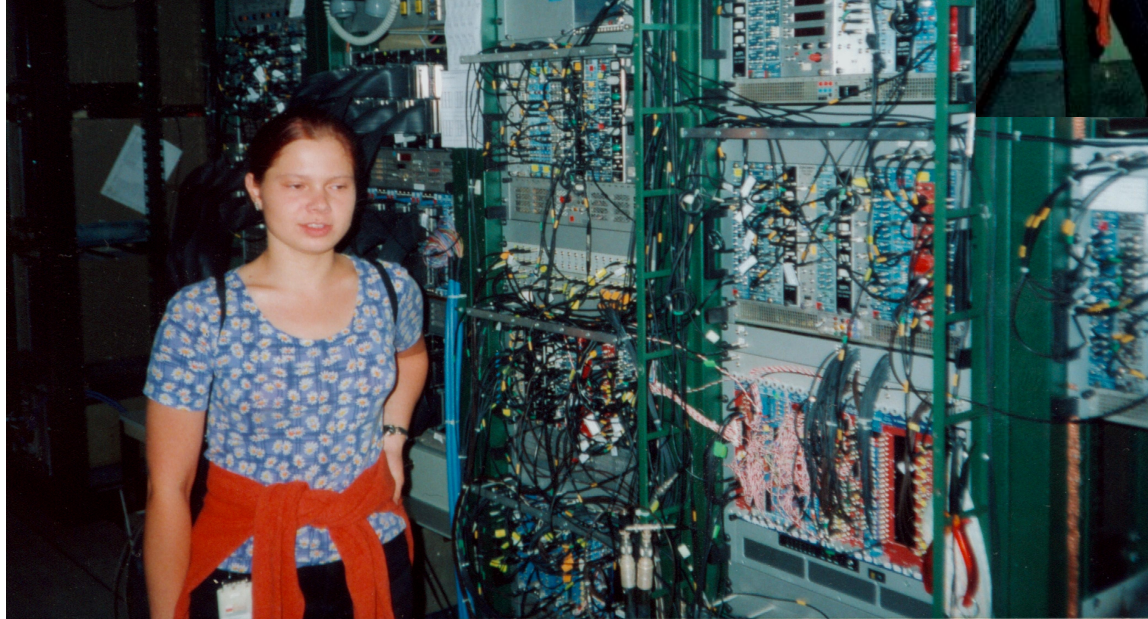








NA49







**Pylos, Grecja**  
European (CERN-JINR)  
School of High Energy  
Physics











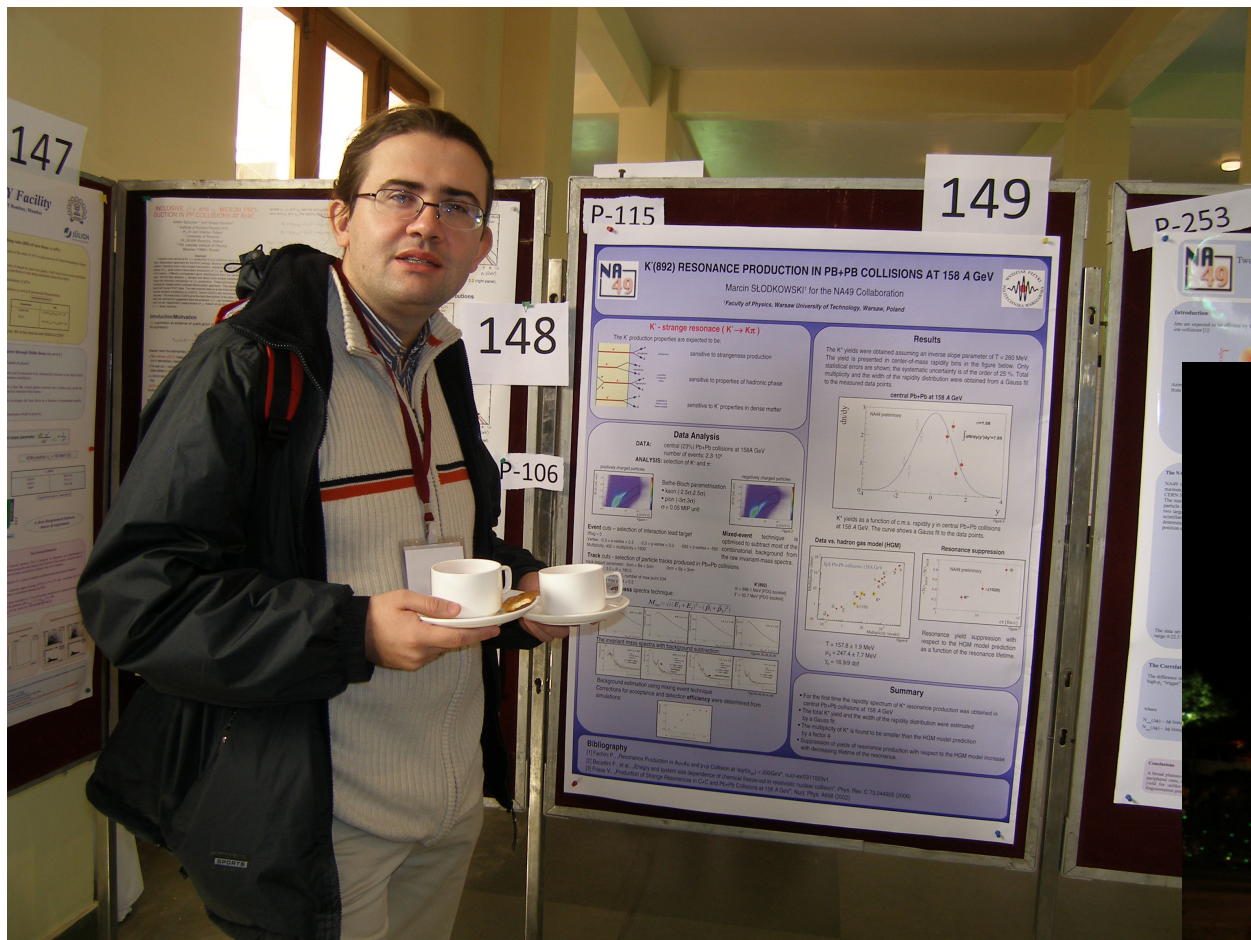
Indie  
Konferencja  
Quark Matter 2008













## Zamiast podsumowania:

1. Politechnika Warszawska uczestniczy we wszystkich omawianych eksperymentach: NA49/NA61, STAR, ALICE
2. Możliwość pisania pracy magisterskiej oraz studiów doktoranckich
3. Współpraca w ramach międzynarodowych Kolaboracji (100-1000 osób) – prestiżowe środowisko
4. Wyjazdy na tzw. szkoły letnie np. do CERN (już od 3 roku studiów)
5. Udział w międzynarodowych konferencjach naukowych
6. Możliwość poznania najnowocześniejszych rozwiązań elektronicznych, komputerowych.
7. Co zyskujemy nawet jeśli nie planujemy na stałe zajmować się nauką:
  - a) bardzo dobrą znajomość języka angielskiego
  - b) umiejętność programowania i obsługi komputera.→ to bardzo ważne na każdym rynku pracy...

# Literatura

rysunki i zdjęcia użyte w prezentacji pochodzą z następujących źródeł:

1. <http://www.cern.ch> - strona ośrodka CERN
2. <http://press.web.cern.ch/press/PhotoDatabase/> - strona ze zdjęciami z CERN
3. <http://na49info.cern.ch/> - strona eksperymentu NA49
4. <http://www.star.bnl.gov/> - strona eksperymentu STAR
5. <http://www.bnl.gov/RHIC/STAR.htm> - strona eksperymentu STAR
6. <http://aliceinfo.cern.ch/index.html> - strona eksperymentu ALICE
7. <http://chall.ifj.edu.pl/przygodazczastkami/> - bardzo ciekawa strona o materii, cząstkach elementarnych i oddziaływaniach
8. prywatne zdjęcia i rysunki moje i moich współpracowników z NA49/NA61, STAR i ALICE



Slajdy dodatkowe

- Age of the Universe: 15 billion years =  $10^{17}$  s = 100,000,000,000,000,000 s = 100 petaseconds
- Age of homosapien species:  $10^{13}$  s = 10 teraseconds
- Typical human life:  $10^9$  s = 1 gigasecond
- Length of this lecture:  $10^3$  s = 1 kilosecond (though it may seem longer)
- Typical breath:  $10^0$  s = 1 second
- Very fast flash exposure:  $10^{-7}$  s = 100 nanoseconds
- Pentium<sup>TM</sup> clock cycle:  $10^{-9}$  s = 1 nanosecond
- Oscillation period of atomic clock :  $10^{-10}$  s = 100 picoseconds
- Lifetime of source at RHIC:  $10^{-23}$  s = 0.000000000000000000000001 s = 10 yoctoseconds<sup>9</sup>

**Wiek Wszechświata jest  $10^{17}$  razy dłuższy niż czas jednego oddechu.  
Ale jeden oddech jest aż  $10^{23}$  razy dłuższy niż czas życia fireballu.**



- Diameter of Andromeda galaxy:  $10^{21}$  m = 1,000,000,000,000,000,000,000 m = 1 Zettameter
- Diameter of the Sun:  $10^9$  m = 1 gigameter
- Diameter of the Earth:  $10^7$  m = 10 megameters
- Diameter of the RHIC collider:  $10^3$  m = 1 kilometer
- Height of a person:  $10^0$  m = 1 meter
- Diameter of typical amoeba:  $10^{-4}$  m = 100 micrometers
- Length of typical virus:  $10^{-8}$  m = 10 nanometers
- Diameter of an atom:  $10^{-10}$  m = 100 picometers (= 1 Angstrom)
- Size of hot system created at RHIC:  $10^{-15}$  m = 0.000000000000001 m = 1 femtometer

**Jesteśmy mniejsi od Słońca  $10^9$  razy. Ale to nic w porównaniu z tym że: W trakcie zderzenia stworzymy źródło które jest  $10^{15}$  razy mniejsze od nas.**