



**Katarzyna Grebieszko**

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej  
Zakład Fizyki Jądrowej  
Pracownia Reakcji Ciężkich Jonów



# Do czego potrzebny nam Wielki Zderzacz Hadronów (Large Hadron Collider)?



Wykład dla szkół średnich  
w ramach:



# Cząstki elementarne (podstawowe cegiełki):

6 kwarków, 6 leptonów (rys), dodatkowo 6 antykwarków, 6 antyleptonów (nie pokazane na rys.) i cząstki przenoszące oddziaływania (bozony pośredniczące)

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

$u, c, t$  ładunek =  $+ 2/3 e$

$d, s, b$  ładunek =  $- 1/3 e$

neutrino ładunek =  $0 e$

$e, \mu, \tau$  ładunek =  $- 1 e$

antycząstki mają przeciwne znaki ładunku

## Nośniki oddziaływań:

**foton** (bezmasy) – oddziaływania elektromagnetyczne

**$Z^0, W^+, W^-$**  (ciężkie) - oddziaływania słabe

**gluon** (bezmasy) – oddziaływania silne

**grawiton** (nie odkryty!) – oddziaływania grawitacyjne

**dodatkowo: Higgs ???**

→ Masy cząstek elementarnych (kwarków, leptonów) generowane poprzez oddziaływanie z polem Higgsa

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

Jednostka energii [eV]

$$= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Jednostka pędu [eV/c]

Jednostka masy [eV/c<sup>2</sup>]

$$= 1.78 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

Typowe skale odl. którymi się zajmujemy to 1 fm = 10<sup>-15</sup> m

stosujemy układ w którym

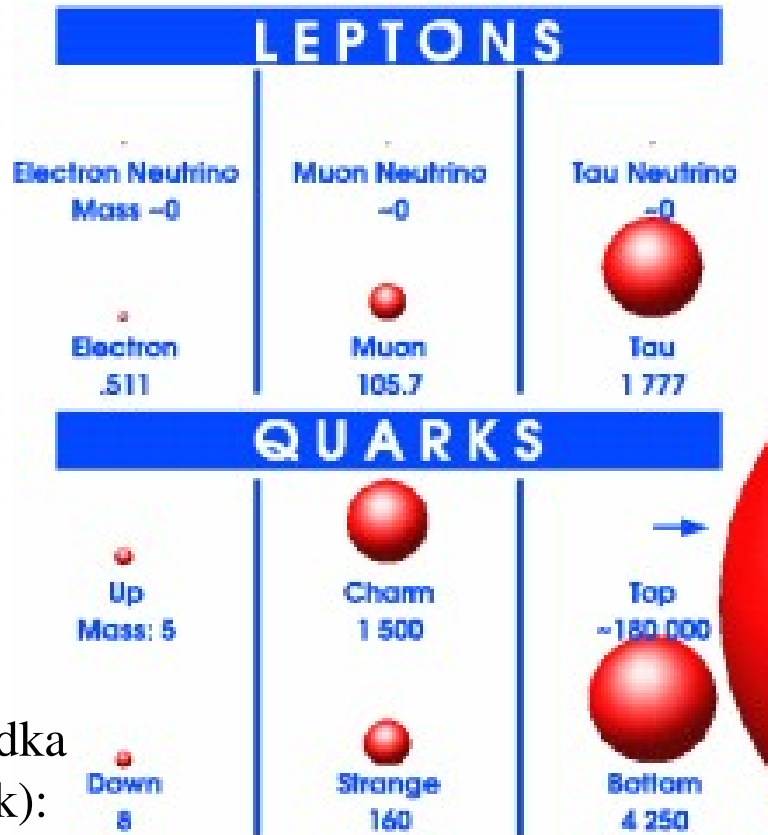
$$c=1 \Rightarrow [E] = [p] = [m] = \text{eV}$$

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

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

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

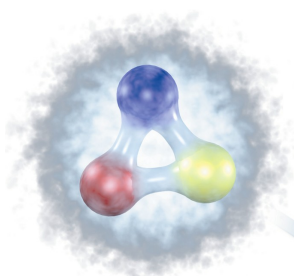
# Skale mas różnych typów leptonów i kwarków



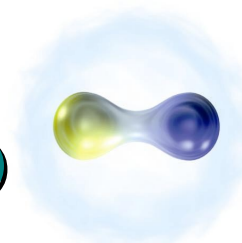
Masy podane w MeV

# Cząstki, które kiedyś uważano za elementarne:

bariony(qqq)

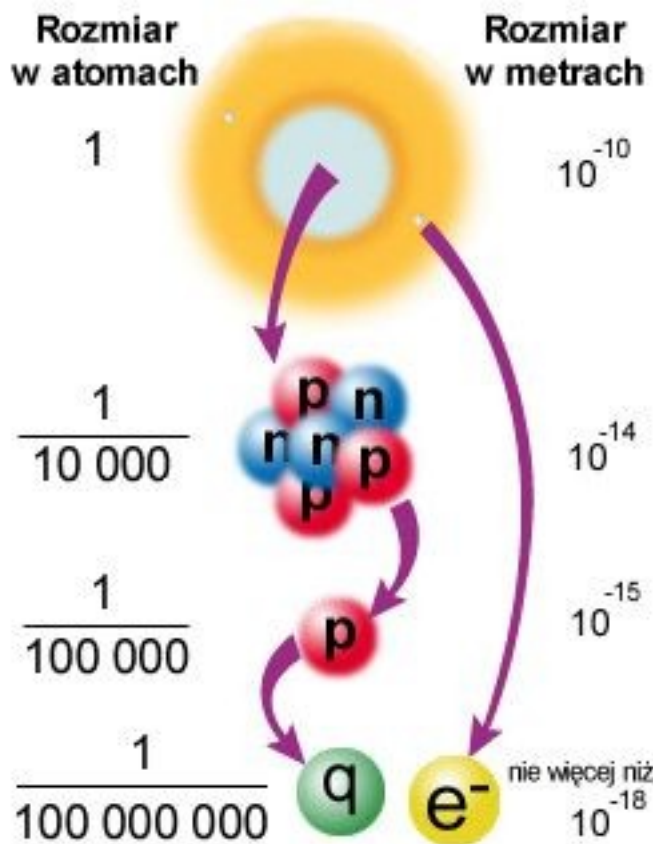


mezony(q anty\_q)

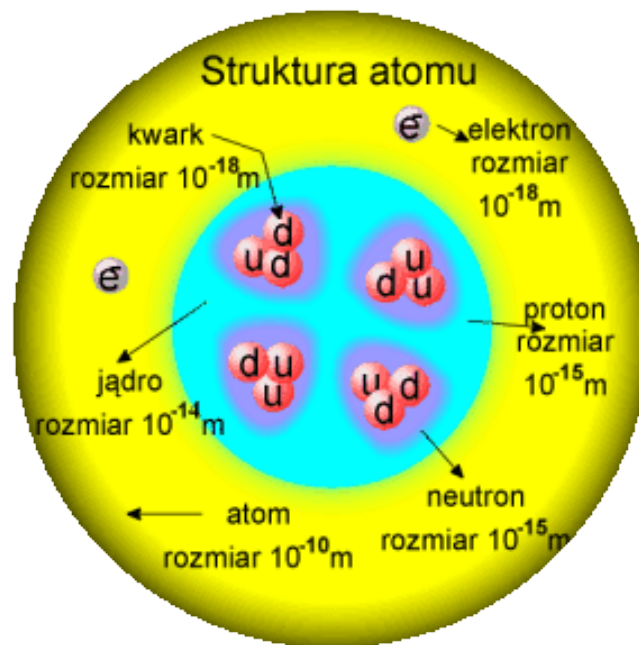


p (uud), n (ddu),  $\Xi^-$  (ssd)  
 $\Delta^{++}$  (uuu),  $\Omega^-$  (sss)

$\pi^-$  (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

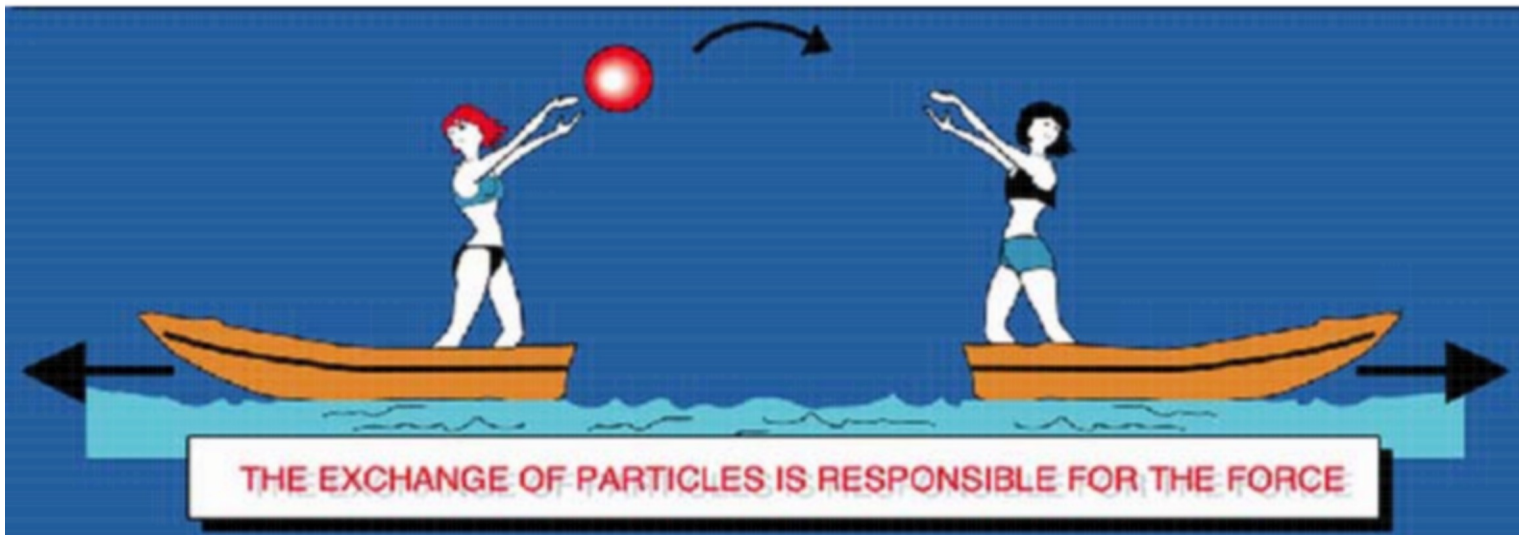


Hadrony – cząstki które oddziałują  
silnie (bariony i mezony)


# Oddziaływania:

**Oddziaływania – można opisywać za pomocą pól lub za pomocą wymiany nośników oddziaływań tzw. bozonów pośredniczących**

Analogia makroskopowa – wymiana piłki (bozonu) powoduje odpychanie  
(uwaga: to nie znaczy że wszystkie oddziaływania są odpychające!)



Wymiana cząstki (tu piłka) jest odpowiedzialna za siłę



Oddziaływanie	grawitacyjne	słabe elektrosłabe	elektromagnetyczne	silne
Przenoszone przez	grawiton	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	foton	gluon
Działa na	wszystko	kwarki i leptony	kwarki, naładowane leptony i $W^+$ , $W^-$	kwarki i gluony

Rys. PA

## Typy oddziaływań w fizyce cząstek:

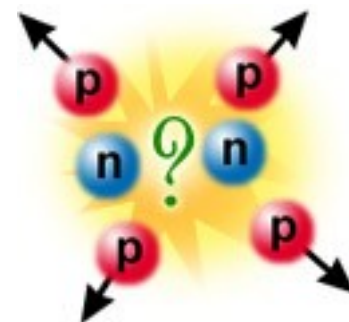
**Oddziaływania silne (nośnikami są gluony)** – odpowiadają za wiązanie kwarków w nukleonie (neutronie i protonie) oraz neutronów i protonów w jądrach

**Oddziaływania elektromagnetyczne (nośnikami są fotony)** – przyciąganie obiektów o różnych znakach i odpychanie o tych samych znakach; odpowiadają za prawie wszystkie zjawiska w skalach powyżej jądrowej (atomy, cząsteczki, siły międzycząsteczkowe)

**Oddziaływania słabe (nośnikami są bozony W i Z)** – np. procesy rozpadów jądrowych (rozpad  $\beta$ )

## Dlaczego jądro atomowe się nie rozpada?

przecież oddziaływania elektromagnetyczne między protonami to odpychanie.



Jednak oddziaływania silne między kwarkami (przenoszone przez gluony) są znacznie silniejsze od oddziaływań elektromagnetycznych



Rys. PA

Rys. PA

**Względna siła czterech oddziaływań (rzędy wielkości sił działających między dwoma protonami w bezpośrednim kontakcie):**

silne:	1	(silne są 100 razy silniejsze od elektromagnetycznych!)
elektromagnetyczne:	$10^{-2}$	
słabe:	$10^{-7}$	
grawitacyjne:	$10^{-39}$	

grawitacja jest b. słaba – podnosząc przedmiot z ziemi pokonujemy siłę grawitacji całej naszej planety !

# Dlaczego potrzebujemy LHC (Wielki Zderzacz Hadronów)?

Chcemy zderzać

1. Protony (p+p)
2. Jądra (jony) ołowiu Pb+Pb

... ale przedtem te protony lub jądra chcemy przyspieszyć do prędkości bliskich prędkościom światła

⇒ musimy mieć  
akcelerator

Large  
Hadron  
Collider



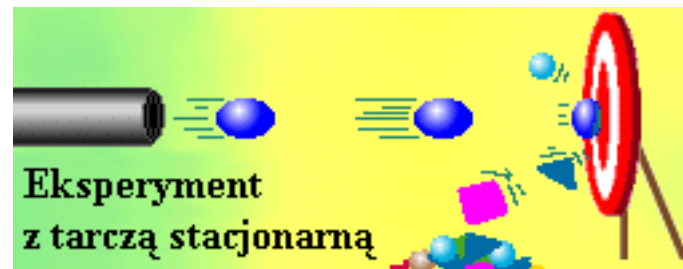
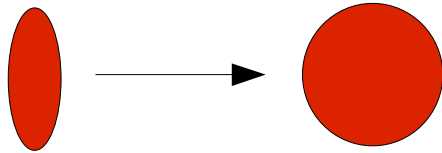


W eksperymentach potrzebne nam protony/jądra ołowiu rozpędzone do prędkości bliskiej prędkości światła... ⇒

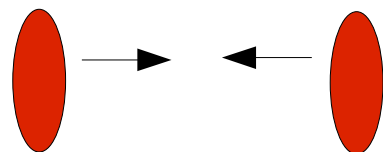
**Akceleratory (kołowe dodatkowo z polem B lub liniowe)** - pobierają cząstki (protony, jony), rozpędzają je za pomocą pola elektrycznego i uderzają nimi w tarczę lub w inną wiązkę cząstek. Detektory rejestrują poszczególne elementy zderzenia (produkowane nowe cząstki).

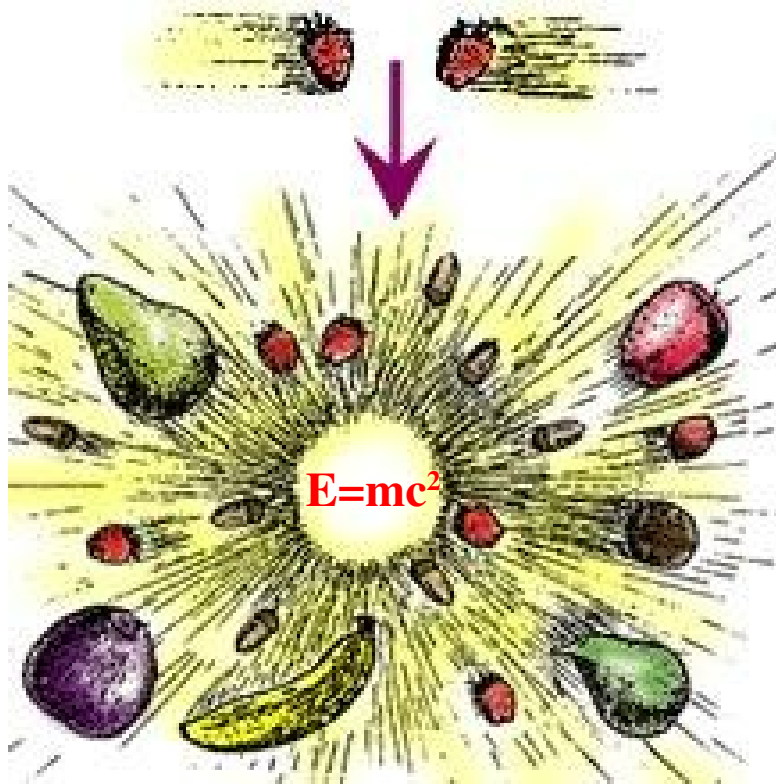
Przy akceleratorach umieszcza się eksperymenty:

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



2. z wiązkami przeciwbieżnymi (zderzacze / kolajdery) np. ALICE przy LHC (akcelerator kołowy) w CERN (Genewa)





← Po zderzeniu z ogromnej energii zderzenia produkują się cząstki różnego typu ( $\pi$ ,  $K$ ,  $\Lambda$ , ...) i “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 głównie do przodu)



Rys. PA

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

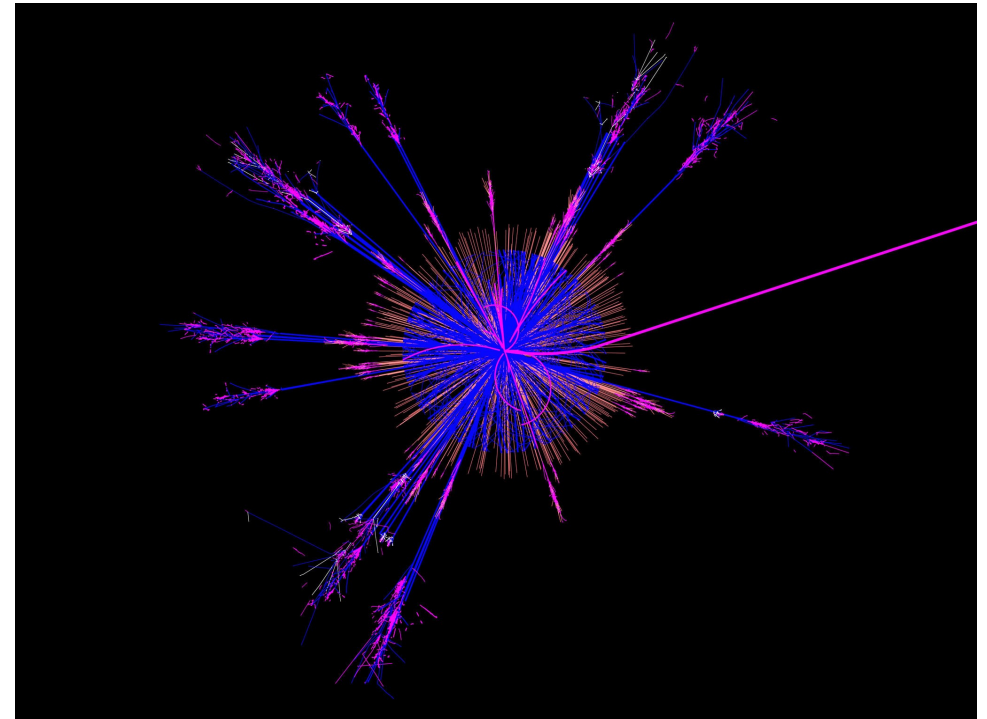
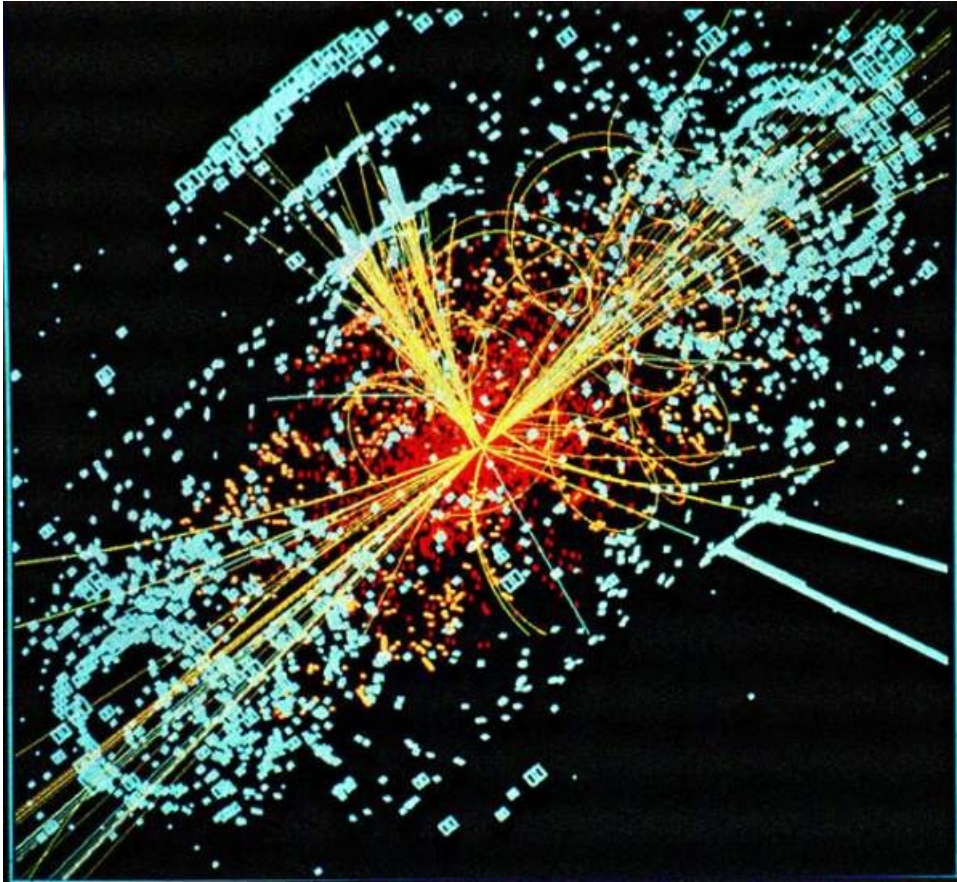


# Jak będzie wyglądało takie zderzenie w LHC?

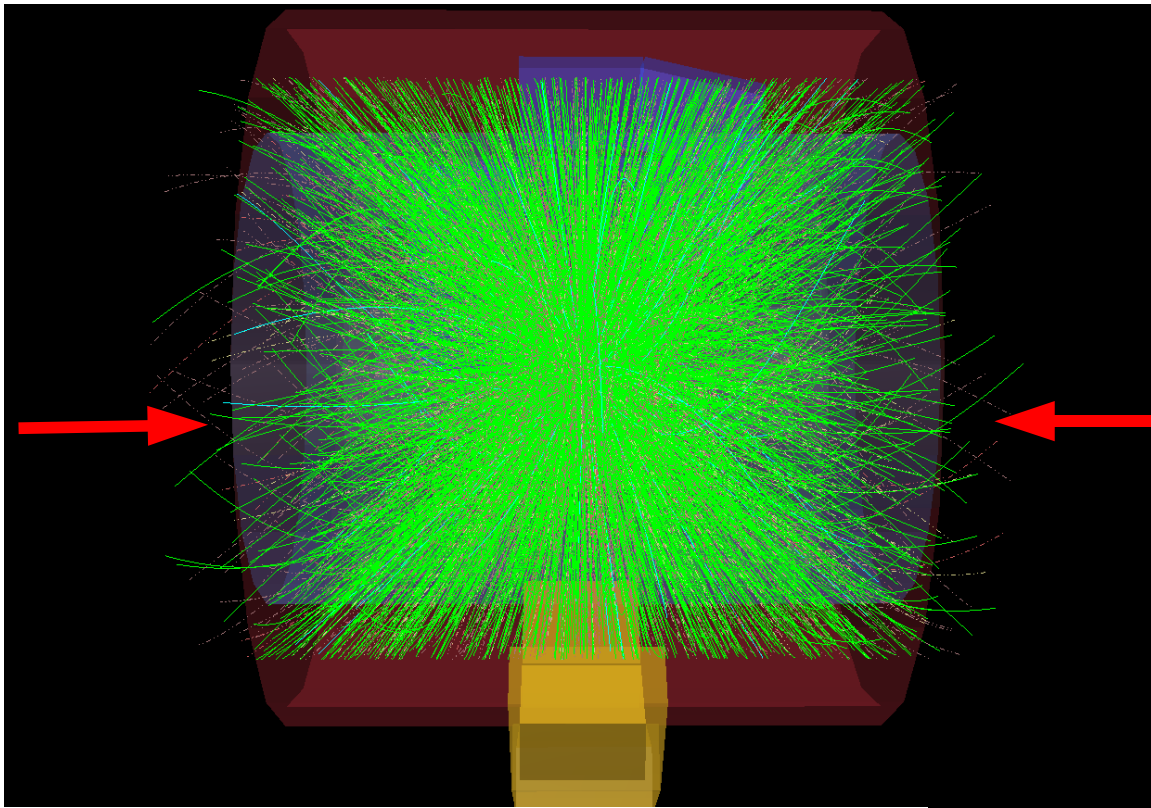
Linie oznaczają tory cząstek naładowanych wyprodukowanych w zderzeniu

1. w zderzeniu p+p przy LHC tych nowo-powstałych cząstek będzie rzędu tysięcy
2. w zderzeniu Pb+Pb nawet kilkadziesiąt tysięcy

**Symulacja zderzenia p+p w LHC**  
(po lewej – w detektorze CMS, po prawej – w detektorze ATLAS)

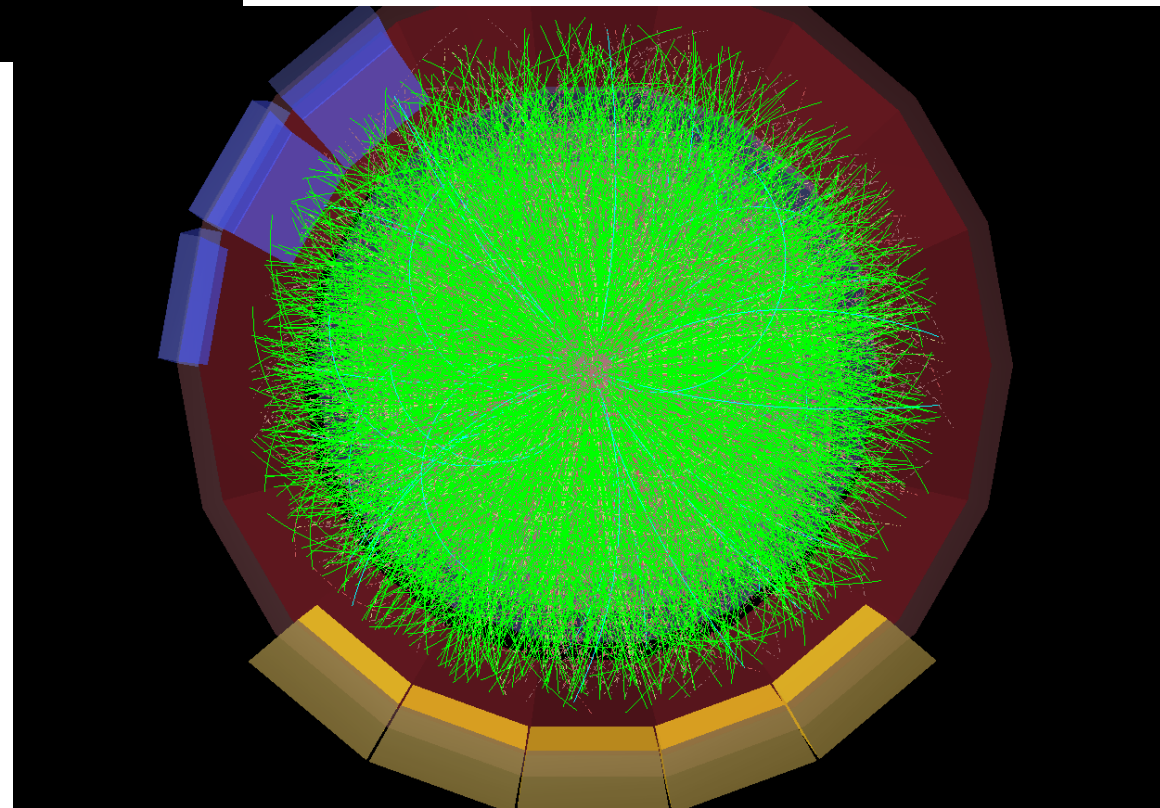
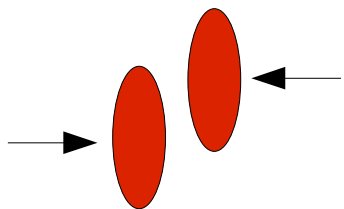


# Symulacja zderzenia Pb+Pb w detektorze ALICE



## **zderzenie średnio-centralne**

(tj. nie całe jądra atomowe oddziałują ale ich fragmenty; jądra z obu wiązek nie spotkały się idealnie naprzeciwko siebie)



# Dlaczego chcemy zderzać p+p oraz Pb+Pb w LHC?

## Chcemy odkrywać nową, nieznaną fizykę

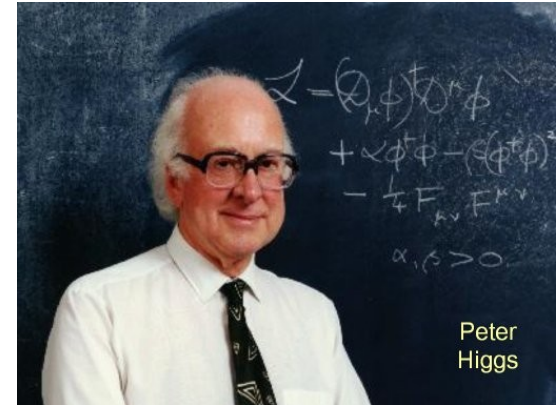
1. Chcemy znaleźć cząstkę Higgsa
2. Chcemy dowiedzieć się czegoś o zaniknięciu antymaterii we Wszechświecie
3. Szukamy cząstek supersymetrycznych
4. Chcemy produkować i badać własności plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP)
5. ...

Możemy te cele osiągnąć badając cząstki produkowane w zderzeniach p+p i Pb+Pb (np.  $\pi$ , K, p,  $\Lambda$ ,  $\Omega$ , ...) czyli ich liczbę, pędy, energie, kąty emisji, etc.

# 1. Cząstka Higgsa

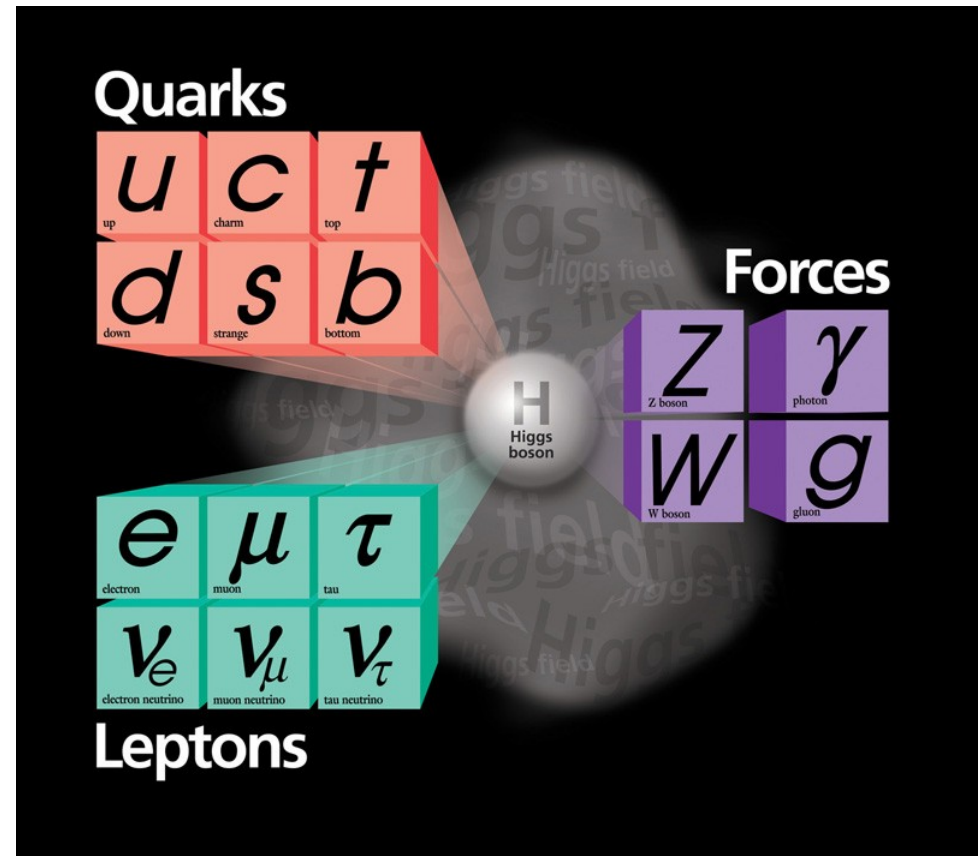
**Bozon Higgsa** – zaproponowany przez Petera Higgsa

**Pytanie:** czy masa jest fundamentalną cechą materii? Dlaczego np. mion ( $\mu$ ) mimo podobnych właściwości co elektron jest 200 razy od niego cięższy? Albo przykład masywnego bozonu Z oraz pozbawionego masy fotonu.



**A może masa nie jest dana raz na zawsze tylko zmienia się i w jakiś sposób zależy od reakcji obiektu z otoczeniem?**

*P. Higgs:* Musi istnieć siła nadająca cząstkom materii ich masę. Zaproponował specjalne pole (**pole Higgsa**) **wypełniające przestrzeń** (niezerowa wartość (amplituda) pola Higgsa w próżni). **Różne masy cząstek byłyby wtedy miarą ich sprzężenia się (oddziaływania) z tym polem** (im silniejsze jest oddziaływanie z polem, tym większą masę uzyskuje cząstka).



Wpływ pola Higgsa na materię przenosiłyby **bozony Higgsa (kwanty pola Higgsa)**, tak jak fotony przenoszą wpływ pola elektromagnetycznego.

Problem: bozonu Higgsa dotychczas nie znaleziono (mimo poszukiwań w akceleratorze LEP i w Tevatron'ie)

⇒ w dalszej kolejności poszukiwania przy **Large Hadron Collider (CERN)**

**Zastosowanie praktyczne** (na razie Science Fiction):

1. odkrywamy cząstkę Higgsa → uczymy się ekranować pole Higgsa (np. elektromagnetyczne już potrafimy; tzw. niewidzialność optyczna) → samochody potrafią przyspieszać do ogromnych prędkości w ułamkach sekund

2. odkrywamy cząstkę Higgsa → wiemy/rozumiemy skąd się bierze masa → potrafimy kontrolować bezwładność → wypadki samochodowe/lotnicze przestają być groźne bo wyeliminujemy obrażenia związane z gigantycznymi przeciążeniami.

→ **szukanie cząstki Higgsa to główne zadanie dla eksperymentów ATLAS i CMS**

## 2. Antymateria

**Antycząstki** – to cząstki o takiej samej masie ale przeciwnym ładunku

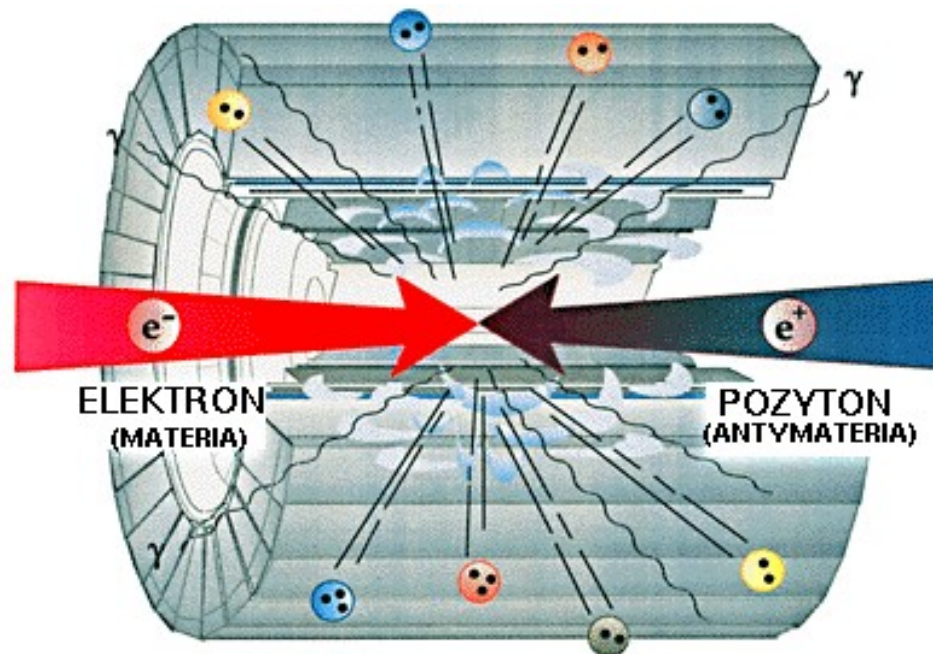
Przykłady:

**elektron** ma antycząstkę o nazwie **pozyton** (taka sama masa ale ładunek +1)

**proton** ma antycząstkę o nazwie **antyproton** (taka sama masa ale ładunek -1)

**mezon  $\pi^-$**  ma antycząstkę o nazwie **mezon  $\pi^+$**  (taka sama masa ale przeciwny ładunek)

**Łączenie się cząstki materii z cząstką antymaterii nazywa się anihilacją** – wydziela się wtedy duża energia z której można produkować kolejne cząstki oraz antycząstki





Czego na razie nie rozumiemy:

**Na początku ewolucji Wszechświata musiała istnieć taka sama ilość cząstek i antycząstek.** Cząstki i antycząstki oczywiście mogły anihilować ale z uzyskanej energii w dalszym ciągu powinny produkować się zarówno cząstki jak i antycząstki w podobnych proporcjach.

Jednak...

**Obecnie nasz Wszechświat zawiera prawie wyłącznie materię.**

**Co się stało z antymaterią??**

**Jaki mechanizm doprowadził do końcowej bardzo znaczącej przewagi materii nad antymaterią?**

**Ten mechanizm być może uda się zrozumieć (proponuje się asymetrię oddziaływań w anihilacji materii i antymaterii) badając zderzenia p+p w LHC i analizując produkcję oraz rozpady cząstek zawierających ciężki kwark 'b' (tzw. mezony B)**

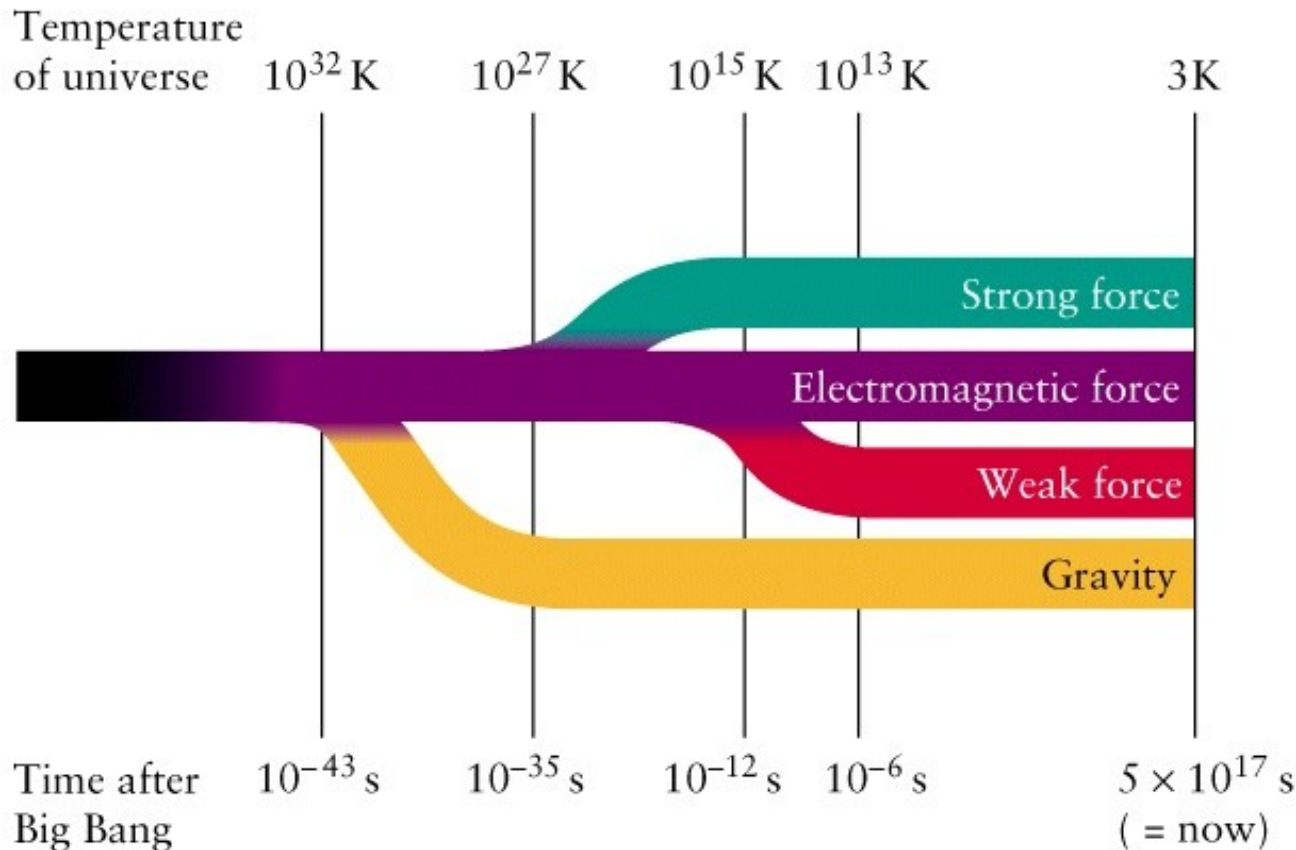
**→ to główne zadanie dla eksperymentu LHCb**

# 3. Poszukiwanie cząstek supersymetrycznych

Obecnie:

**oddziaływania silne, elektromagnetyczne i słabe charakteryzują się różną siłą.**

Hipoteza: przypuszczamy że nie zawsze te cztery oddziaływania miały różną siłę tj. np. **tuż po Wielkim Wybuchu (moment powstania Wszechświata) miała miejsce tzw. unifikacja oddziaływań i siły wszystkich oddziaływań były takie same.** W miarę upływu czasu kolejno odłączały się różne typy oddziaływań.



Rys. Zgodnie z hipotezą Wielkiego Wybuchu na początku ewolucji Wszechświata wszystkie cztery typy oddziaływań były zunifikowane. Z czasem kolejno odłączały się grawitacja, silne i na koniec podział elektroslabych na elektromagnetyczne i słabe.

My dążymy do UNIFIKACJI wszystkich oddziaływań tj. chcemy udowodnić że ta hipoteza (pop. strona) jest prawdziwa.

**Dotychczas udało się udowodnić że jesteśmy w stanie zunifikować oddziaływania słabe i elektromagnetyczne w jedno o tej samej sile – oddziaływanie elektroślabe.** Potrzebne były do tego zderzenia o dużej energii w akceleratorze LEP (w CERN).

**Teraz teoretycy opracowują aparat matematyczny który połączy oddziaływania elektroślabe i silne w jedno o tej samej sile** (z dołączeniem grawitacji niestety nie jest tak prosto...).

Jest jeden problem...

Żeby ta teoria była spójna i żeby dało się to policzyć **teoretycy musieli założyć istnienie dodatkowych nieobserwowanych dotąd cząstek – cząstek supersymetrycznych.**

My mamy ich szukać w LHC!

## Co to są te cząstki supersymetryczne?

Wprowadza się dla każdej znanej dotąd cząstki jej partnera supersymetrycznego o “przeciwnym” spinie (własny/wewnętrzny moment pędu): dla bozonu fermion a dla fermionu bozon (“brat bliźniak” różni się wartością spinu o  $-1/2$ )

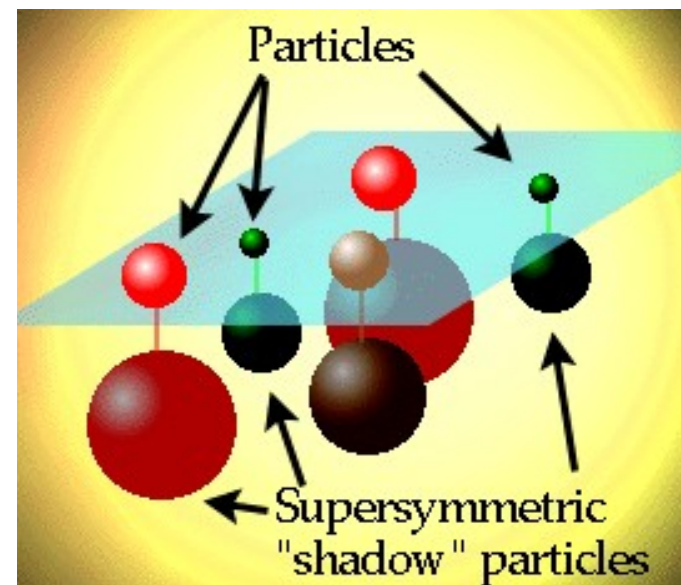
fermiony – wszystkie cząstki które mają wartości spinu połówkowe:  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$   
(w jednostkach  $\hbar = h/2\pi$ , gdzie  $h$  to stała Plancka)

bozony – cząstki o całkowitych wartościach spinu:  $0, 1, 2, 3, \dots$

Na początku wydawało się że “zwyczajne” cząstki i ich supersymetryczni partnerzy muszą mieć te same masy ale wtedy już dawno byłyby zauważone (jak przeoczyć w doświadczeniach np. supersymetrycznego partnera elektronu – o tej samej masie a jedynie o innym spinie???)

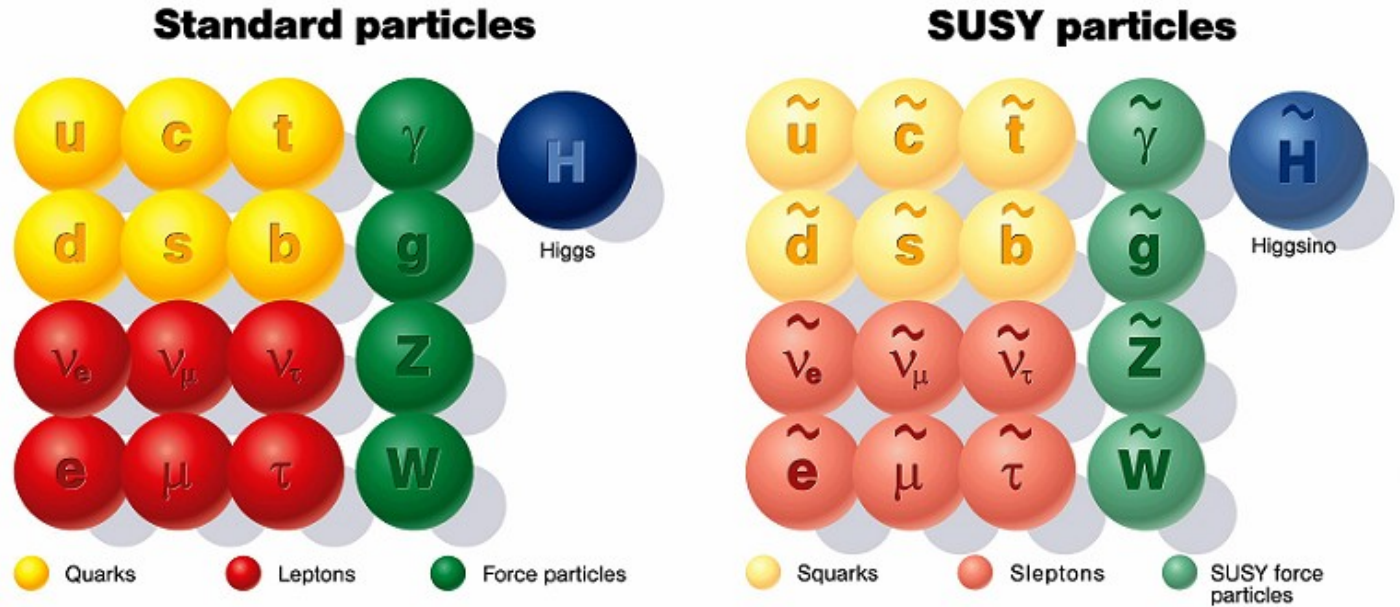
=>

**supersymetria nie może być symetrią ścisłą**  
tj. partnerzy supersymetryczni muszą różnić się dodatkowo masą (np. mogą być dużo ciężsi).



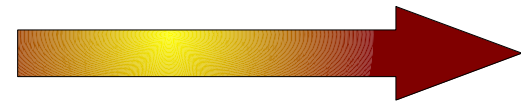
Zaproponowane nazewnictwo cząstek standardowych (po lewej) i ich supersymetrycznych partnerów (po prawej)

elektron → selektron  
kwark → skwark  
(tau → stau)  
bozon W → wino  
foton → fotino  
neutrino → sneutrino



Na razie cząstek supersymetrycznych nie znaleziono wśród lekkich obiektów ale możliwe są cząstki supersymetryczne o masie zbliżonej do masy bozonu Z czyli rzędu  $90 \text{ GeV}/c^2$  (→ poszukiwania w LHC)

Są hipotezy, że w skład ciemnej materii mogą wchodzić cząstki supersymetryczne.

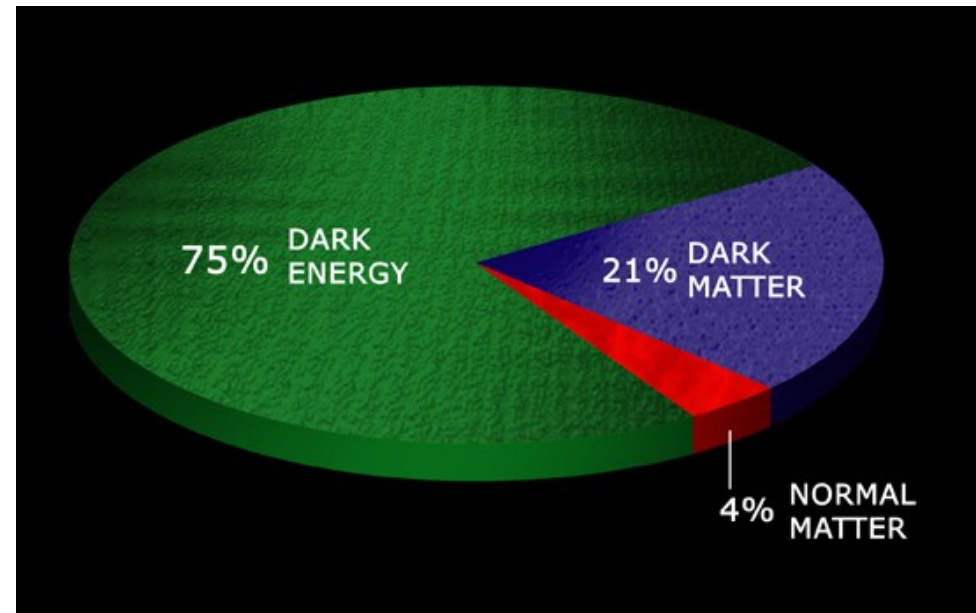


# Rozkład energii / masy we Wszechświecie

“Widoczna” (świecząca w różnych dł. fali) materia to tylko około 10-20% całej materii tworzącej Wszechświat. Czym jest “ciemna materia”?

Ciemna materia nie wysyła żadnego promieniowania – o jej obecności wnioskujemy z badania dynamiki obrotowej galaktyk spiralnych (z ich ruchu wynika że muszą istnieć dodatkowe ogromne masy).

**Być może w skład ciemnej materii wchodziłyby cząstki supersymetryczne**



**normalna, widzialna materia (barionowa) (3-5%)** – gwiazdy, mgławice, planety, my...

**ciemna materia (21-23%)** – jej obecność stwierdzamy poprzez jej wpływ na ruchy gwiazd i galaktyk; szacuje się że 90% ciemnej materii to materia niebarionowa

**ciemna energia (72-75%)** – z przyspieszającej ekspansji Wszechświata; związana jest z „tajemniczą siłą odpychania“ działającą przeciwnie jak grawitacja

# 4. Plazma kwarkowo-gluonowa (QGP)

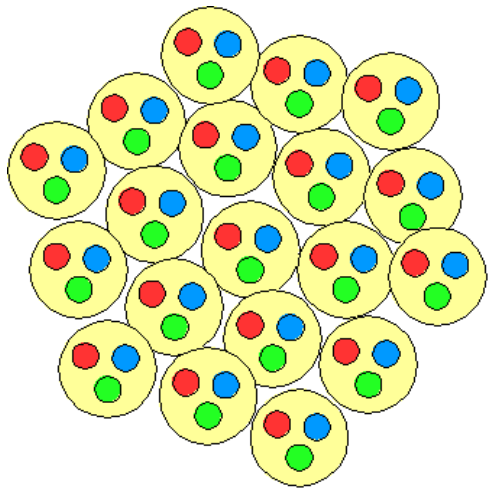
W przyrodzie nie obserwuje się kwarków swobodnych a jedynie “uwięzione” w hadronach (mezony i bariony)



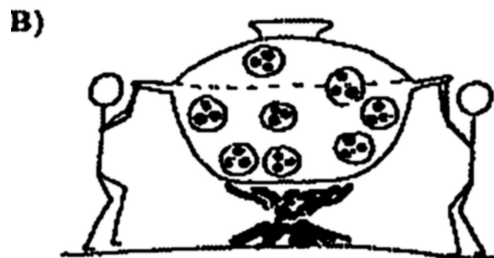
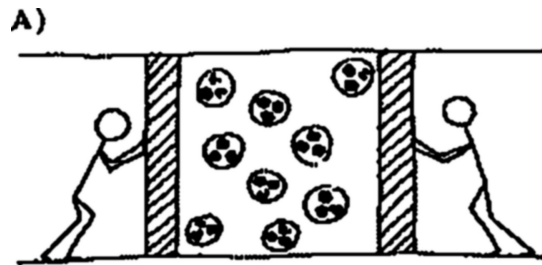
**proton**

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

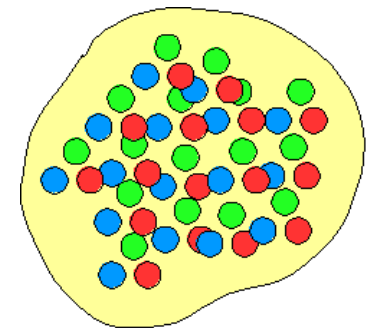
Przewidziano jednak, że przy bardzo dużych gęstościach i temperaturach kwarki przestają “pamiętać” do którego hadronu (np. proton, neutron) należały i powstaje **plazma kwarkowo-gluonowa (QGP)**



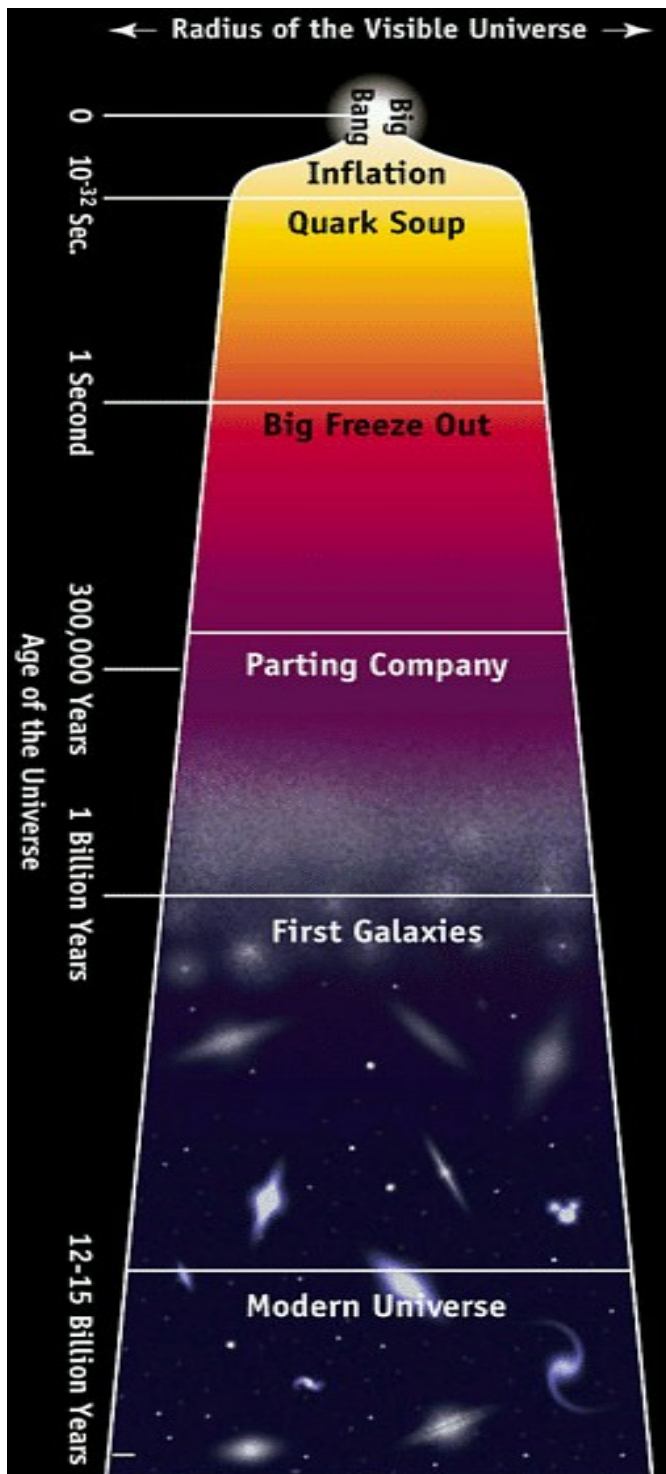
**protony i  
neutrony**



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



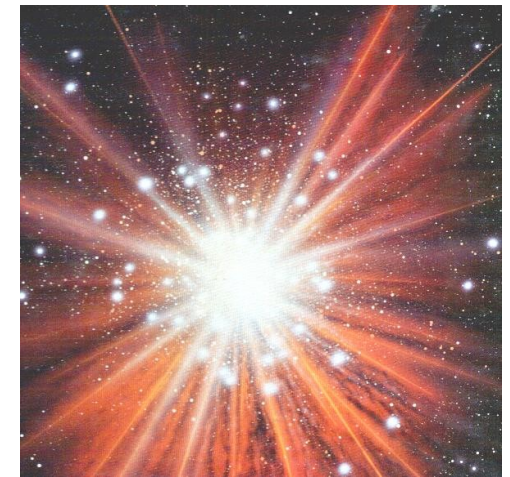
**QGP**



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)

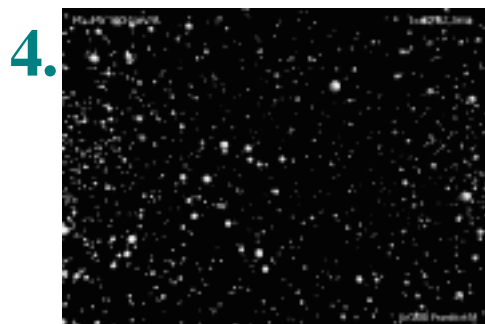
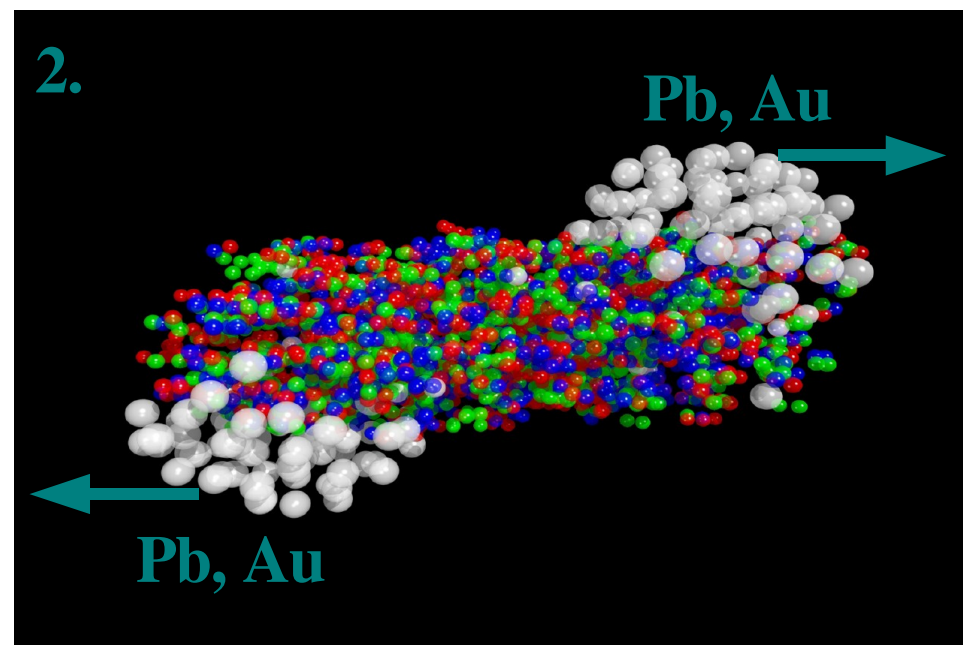
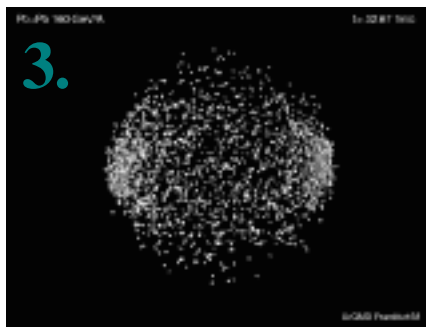
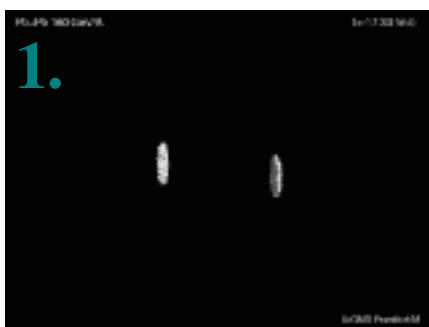
Kolejny etap: stygnięcie i rozszerzanie się Wszechświata

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!**



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

Zaraz po zderzeniu powstaje QGP, następnie rozszerzanie się układu, stygnięcie, łączenie kwarków w hadrony (nie tylko protony i neutrony!!!, głównie mezony  $\pi$ )

**Badanie cząstek w stanie końcowym → informacja o stanie początkowym**

**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** – przynajmniej 20 razy gęściej niż jądro atomowe

## Fazy wody

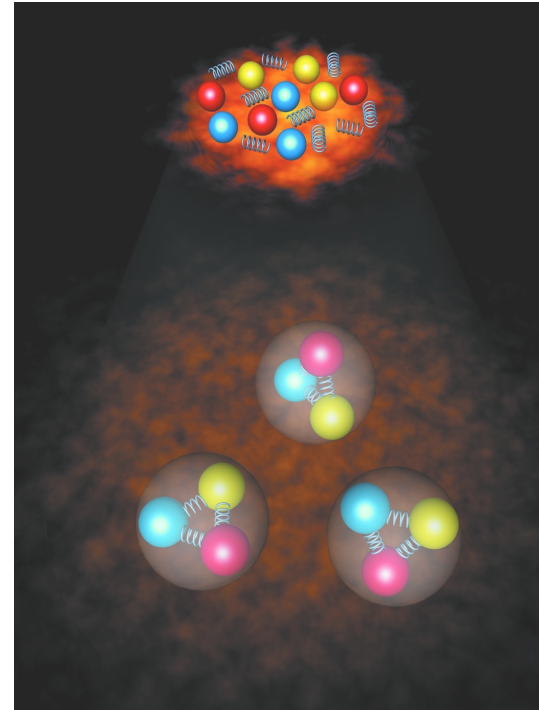


**Woda: 3 stany (lód, ciecz, para woda)**

**Jedynym dostępnym dla nas sposobem na utworzenia nowego stanu materii jądrowej (QGP) jest zderzanie ciężkich jąder atomowych przy ogromnych prędkościach.**

Analogia: to tak jakbyśmy próbowali stopić lód (uzyskać wodę - inny stan materii) rzucając w siebie kostkami lodu i dostarczając w ten sposób energię

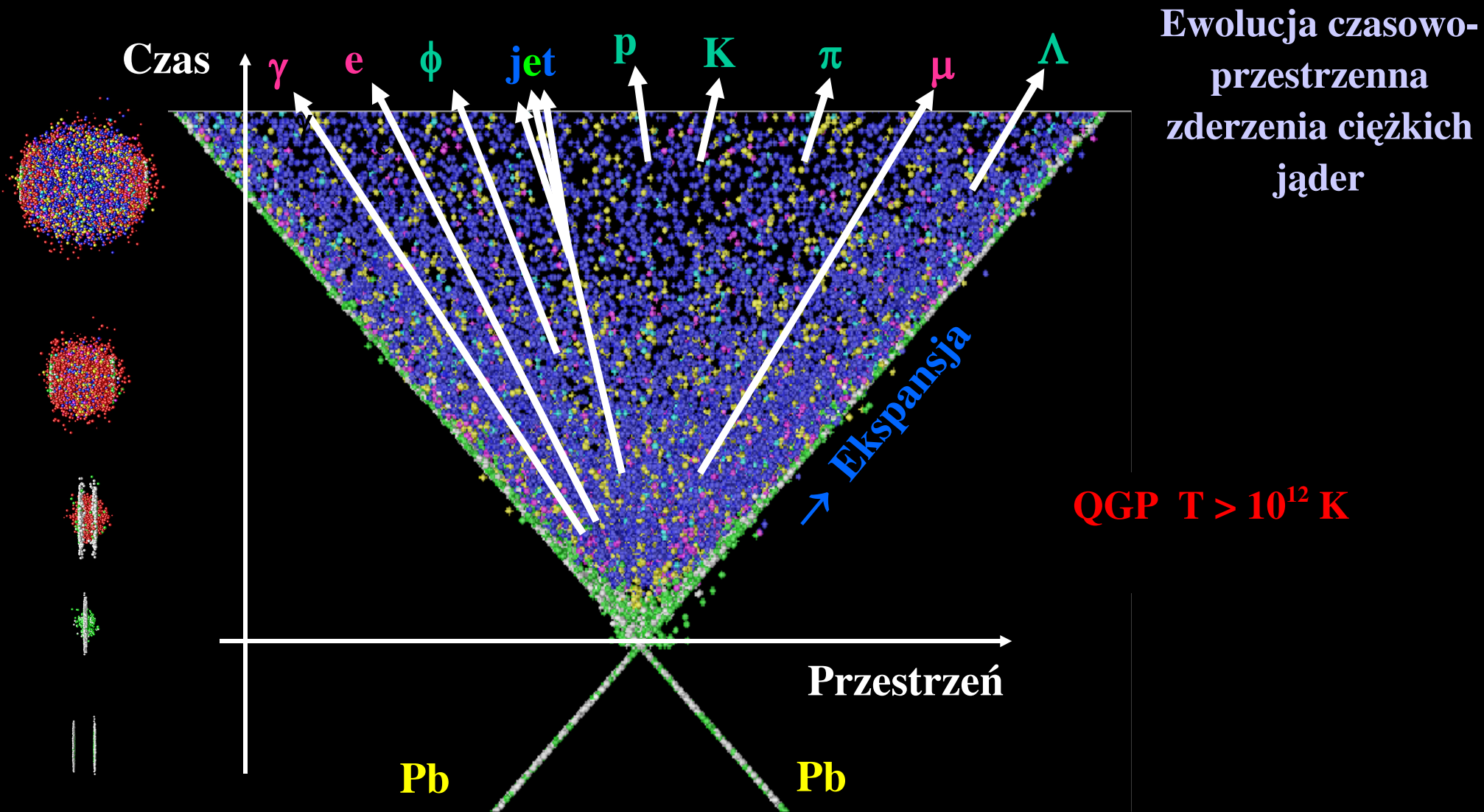
## Fazy silnie oddziałującej materii



**Materia jądrowa: (normalna materia, QGP)**



QGP tworzona przy LHC będzie miała **rozmiary rzędu kilku femtometrów (1 fm =  $10^{-15}$  m)** i **czasy życia rzędu  $10^{-23}$  sekundy** (straszliwie mało)



Wyprodukowane cząstki w stanie końcowym (piony, kaony, protony, lambdy....) niosą informacje o stanie początkowym (QGP)

# Niektóre z eksperymentów i 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**

(w planach zejście do 5) na parę nukleonów

maks. około **4000 produkowanych cząstek naładowanych**

## **Eksperyment ALICE**, laboratorium CERN

Szwajcaria, Genewa

przy 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 ... A ściślej  
dwie małe wioski (po stronie Szwajcarskiej i po stronie Francuskiej)

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

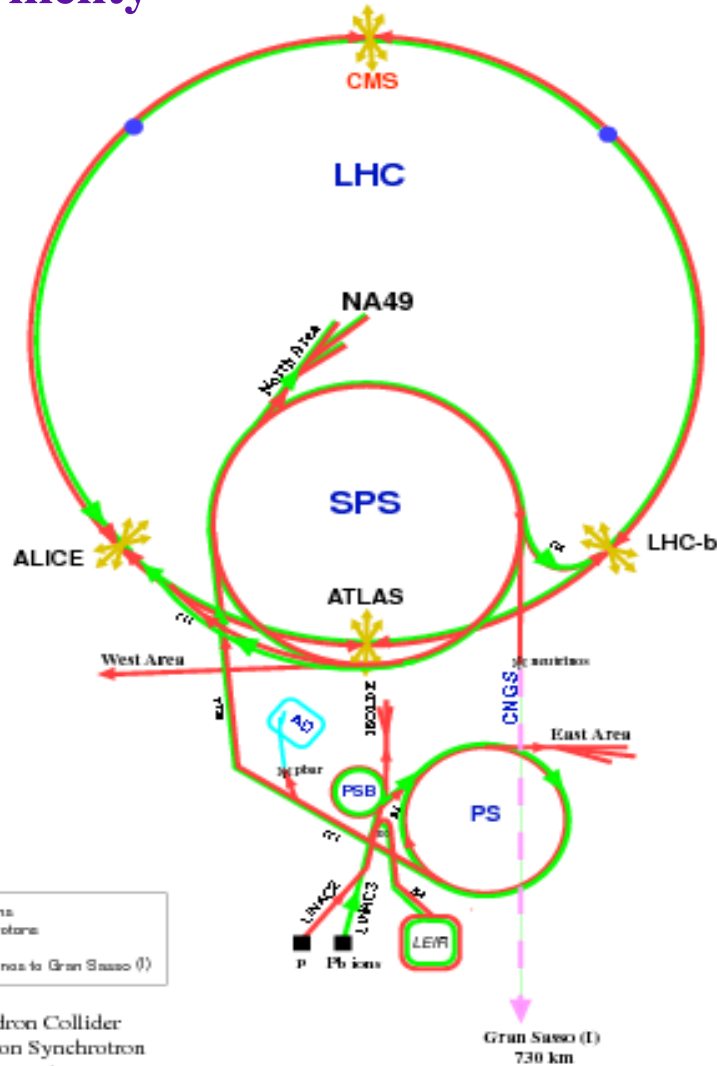


# Akceleratory SPS i LHC



Na granicy Szwajcarsko-Francuskiej (l. kropkowana)  
Tunel SPS – 6km obwodu (m.in. NA49)  
Tunel **LHC – 27 km obwodu** (exp: ATLAS, ALICE,  
CMS, LHC-b, TOTEM, LHCf); **50 -175m pod ziemią**

W LHC dwie wiązki protonów krążą w przeciwnych kierunkach i przecinają się (zderzają) w miejscu gdzie ustawione są eksperymenty



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

## 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, przed wpuszczeniem wiązek **w rurze akceleratora jest próżnia podobna do tej w kosmosie, Protony utrzymywane są na obwodzie przez nadprzewodzące magnesy utrzymywane w temp. -271.3 °C (najniżej we Wszechświecie!) - chłodzenie nadciekłym helem**

# 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 akceleratora LHC to około 5 miliardów CHF  
magnesy pracujące w temp. 1.9 K (-271.3 °C) i  
wytworzące pole 8.33 T (!)

# Ciekawostki o LHC

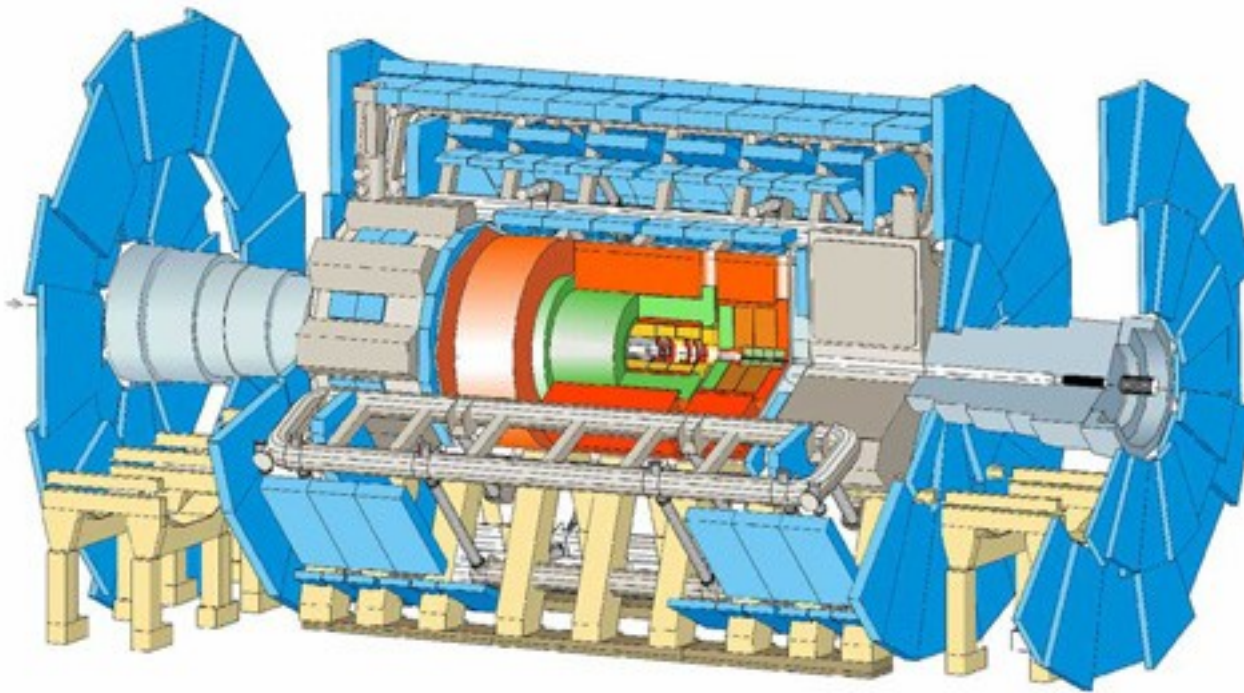
- Żeby uzyskać silne pole magnetyczne magnesy nadprzewodzące trzeba chłodzić – wykorzystuje się **60 ton nadciekłego helu**
- **Cząstki poruszają się z prędkością** bliską  $c$  czyli 300 000 km/s (wiązki protonów rozpędzane do prędkości **0.999999991 c**)
- LHC będzie zderzać zarówno p+p jak i Pb+Pb
- 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

# Ciekawostki techniczne z LHC

- Największy detektor przy LHC to ATLAS – zająłby połowę katedry Notre Dame. Przy tych rozmiarach niektóre składowe detektora muszą być ustawione z dokładnością do  $50 \mu\text{m}$
- ATLAS i CMS w ciągu sekundy zapisywałyby danymi 100 płyt CD => potrzeba kilku poziomów trygera żeby wybrać interesujące nas zderzenia. Ostatecznie zostaje zapisanych około 100 zderzeń na sekundę.
- Gdy Księżyc jest w pełni, w fazie przyptywu grunt w pobliżu Genewy wznosi się o 25 cm a obwód LHC rośnie o 1 mm. W związku z tym energia wiązki zmienia się o 0.02%. Ten fakt został uwzględniony(!!!) bo fizycy muszą znać energie wiązki z dokładnością do 0.002%

Detektory przy akceleratorze LHC





## ATLAS:

**Wymiary:** 46 m (dług.) x 25 m (wys.) x 25 m (szer.)

**Masa:** 7 000 ton

**Koszt:** 427 mln CHF

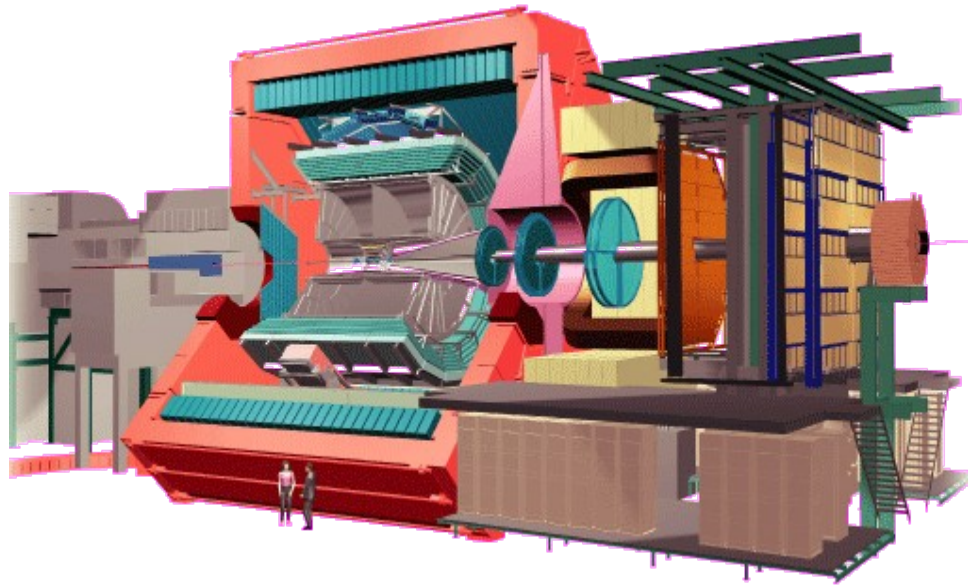
**Miejsce:** Meyrin (Szwajcaria)

### **Eksperyment ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)**

ATLAS (toroidalny detektor LHC) to jeden z dwóch detektorów ogólnego przeznaczenia. W tym eksperymencie, podobnie jak w CMS, badania będą dotyczyły **poszukiwań cząstki Higgsa, dodatkowych wymiarów, cząstek tworzących ciemną materię (np. cząstek supersymetrycznych) itp.** ATLAS jest **największym objętościowo detektorem cząstek, jaki dotąd zbudowano.**

W eksperymencie ATLAS bierze udział ponad 1900 naukowców ze 164 instytutów z 35 państwami (kwiecień 2007), w tym polscy naukowcy z:

- Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie (65 osób),
- Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (17 osób),
- Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie (5 osób),
- Politechniki Krakowskiej w Krakowie (4 osoby).



## ALICE:

**Wymiary:** 26 m (dług.) x 16 m (wys.) x 16 m (szer.)

**Masa:** 10 000 ton

**Koszt:** 148 mln CHF

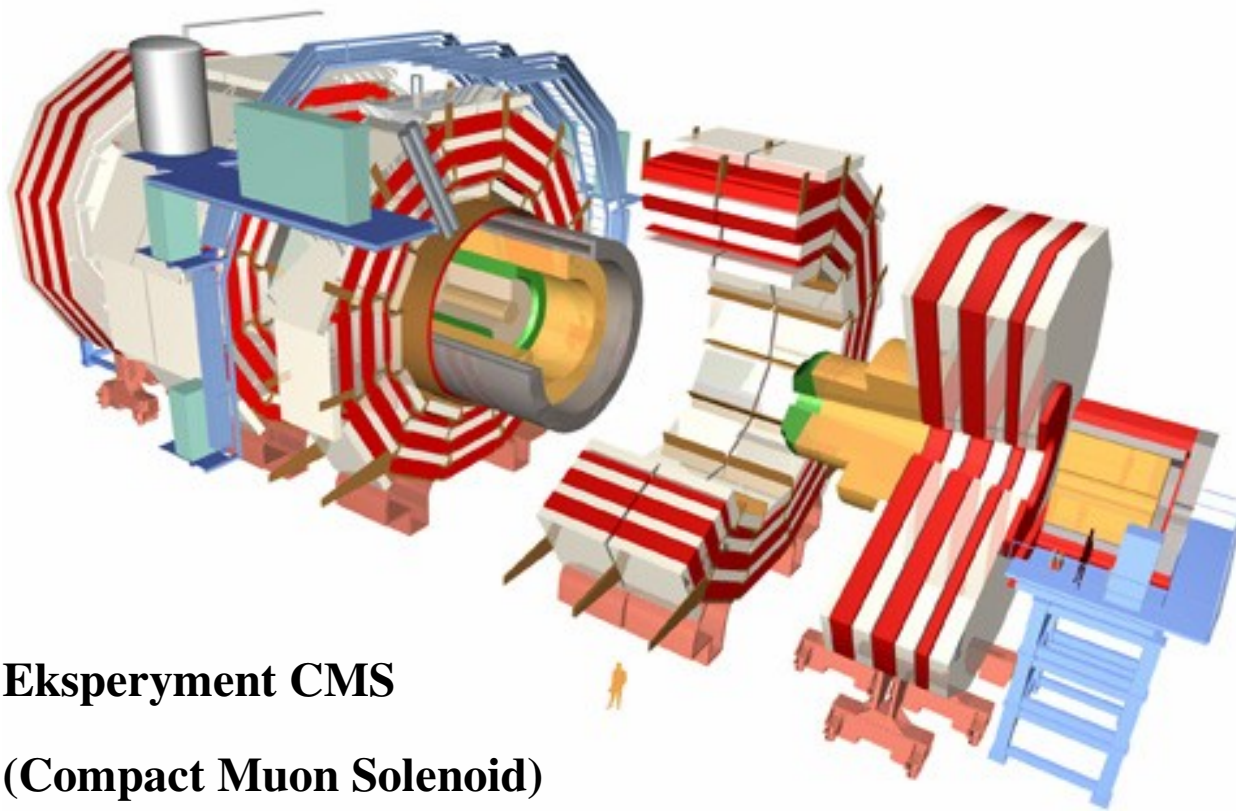
**Miejsce:** St. Genis-Pouilly (Francja)

### **Eksperyment ALICE (A Large Ion Collider Experiment)**

ALICE (eksperyment przy wielkim zderzaczu jonów) jest **eksperymentem badającym plazmę kwarkowo-gluonową w zderzeniach jonów ołowiu**, co pozwoli odtworzyć w laboratorium warunki tuż po Wielkim Wybuchu, zanim powstały takie cząstki jak proton i neutron.

W eksperymencie ALICE bierze udział ponad 1500 naukowców ze 104 instytutów z 31 państw (lipiec 2007), w tym polscy naukowcy z:

- Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie,
- Instytutu Problemów Jądrowych w Warszawie,
- Politechniki Warszawskiej w Warszawie.



## CMS:

**Wymiary:** 21 m (dług.) x 15 m (wys.) x 15 m (szer.)

**Masa:** 12 500 ton

**Pole magnetyczne:** 4 T

**Koszt:** 400 mln CHF

**Miejsce:** Cessy (Francja)

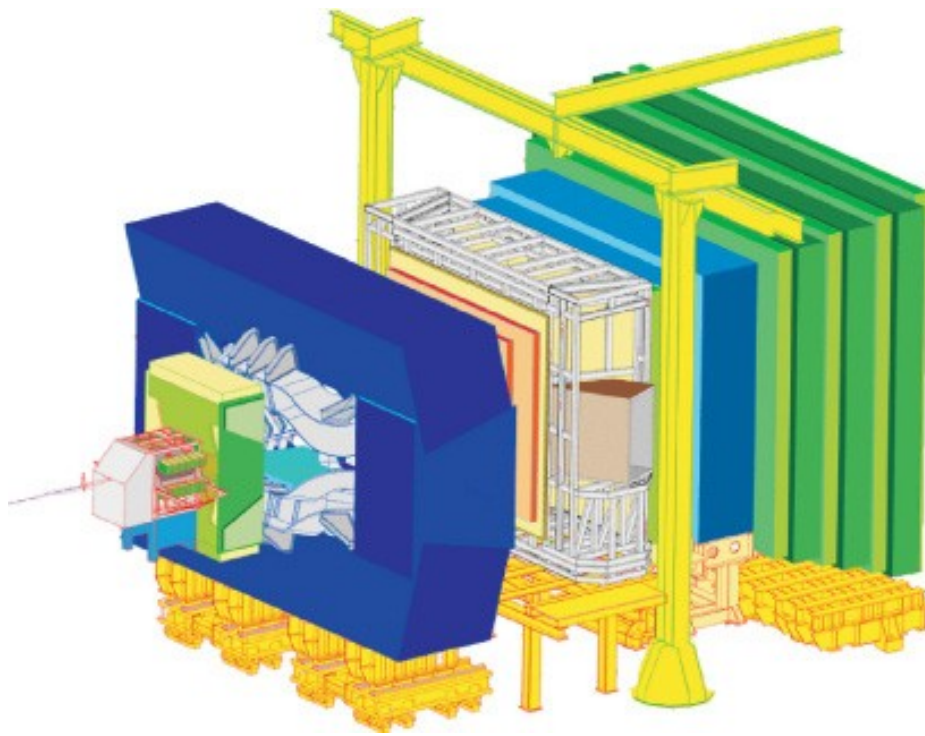
### Eksperyment CMS

#### (Compact Muon Solenoid)

CMS (zwarty solenoidalny detektor mionów) to jeden z dwóch detektorów ogólnego przeznaczenia. W tym eksperymencie, podobnie jak w eksperymencie ATLAS, badania będą dotyczyły **poszukiwań cząstki Higgsa, dodatkowych wymiarów, cząstek tworzących ciemną materię (np. cząstek supersymetrycznych) itp.** CMS jest **najcięższym detektorem przy LHC.**

W eksperymencie CMS bierze udział ponad 2000 naukowców ze 181 instytucji z 38 państwami (maj 2007), w tym polscy naukowcy z:

- [Uniwersytetu Warszawskiego](#) w Warszawie,
- [Instytutu Problemów Jądrowych](#) w Warszawie,
- [Politechniki Warszawskiej](#) w Warszawie.



## LHCb:

**Wymiary:** 21 m (dług.) x 10 m (wys.) x 13 m (szer.)

**Masa:** 5 600 ton

**Koszt:** 96 mln CHF

**Miejsce:** Ferney-Voltaire (Francja)

### **Eksperyment LHCb (Large Hadron Collider beauty)**

LHCb jest eksperymentem poświęconym **badaniom mezonów B zawierających kwarki piękne (kwarki b) i pozwoli nam zrozumieć, dlaczego nasz Wszechświat jest zbudowany prawie całkowicie z materii, a nie antymaterii.** W tym eksperymencie miejsce zderzenia nie jest całkowicie otoczone zamkniętym detektorem, gdyż używa się wielu subdetektorów do detekcji głównie cząstek produkowanych pod małymi kątami w stosunku do wiązki.

W eksperymencie LHCb bierze udział ponad 650 naukowców z 47 instytutów z 14 państw (maj 2007), w tym polscy naukowcy z:

- Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie,
- Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie,
- Instytutu Problemów Jądrowych w Warszawie.

## Podstawowe składniki dużych układów detektorów w fizyce wysokich energii i zderzeń ciężkich jonów:

1. **Komora rejestrująca tory (detektor śladowy)**– np. komora dryfowa, TPC (*time projection chamber*); wypełniona gazem w którym cząstki naładowane tracą energię na jonizację ( $dE/dx$ ); całość w polu B do wyznaczenia dodatkowo ładunku i pędu cząstki

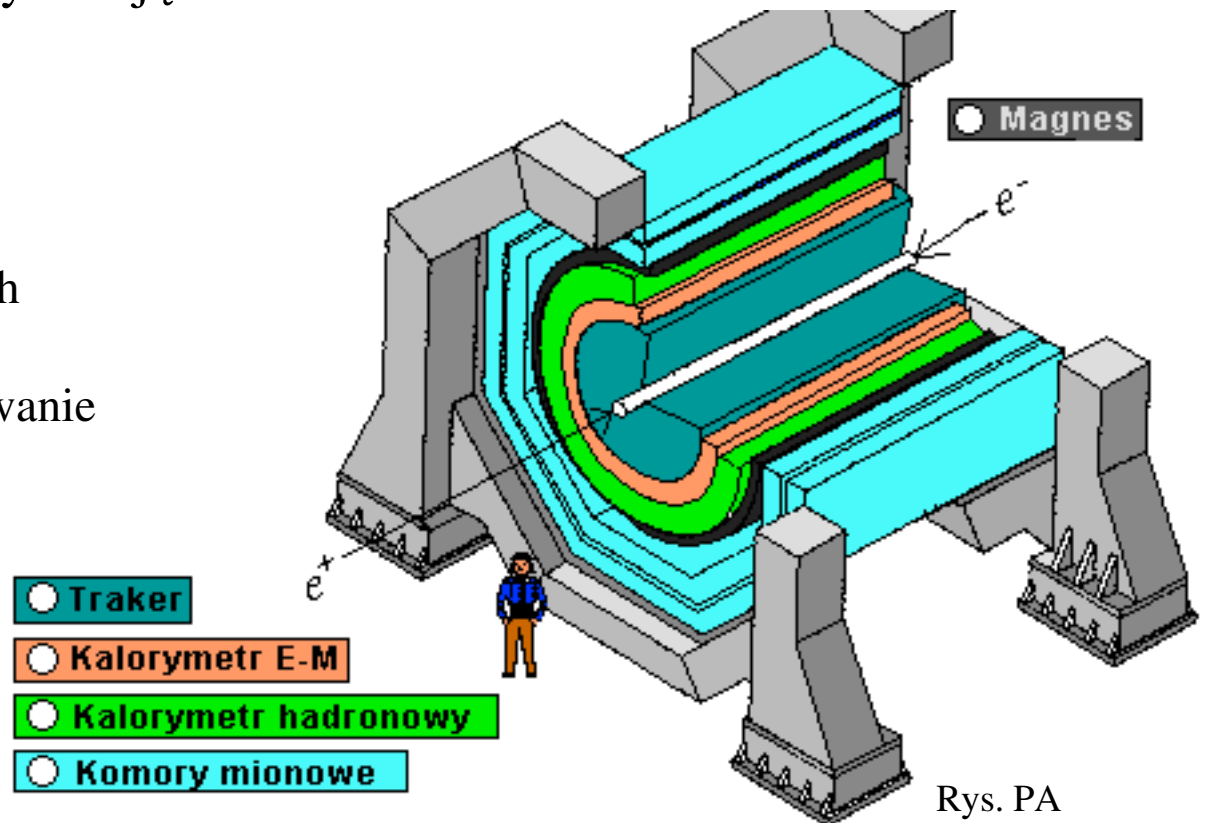
2. **Kalorymetr elektromagnetyczny – mierzy energię  $e^+$   $e^-$  i fotonów;**  
cząstki te w materiale kalorymetru wywołują  
tzw. kaskady elektromagnetyczne

rozwój kaskady:

$e^+$   $e^-$  są odchylane w polach elektrycznych atomów => emisja fotonów hamowania

=> produkcja par  $e^+e^-$  => wypromieniowanie fotonów ...

liczba par  $e^+e^-$  proporcjonalna do energii cząstki wywołującej kaskadę



Rys. PA

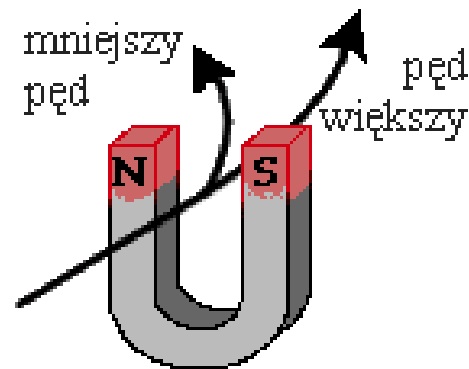
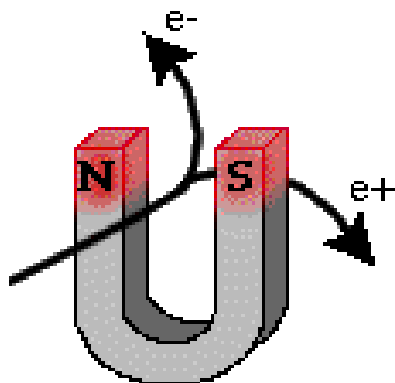


3. **Kalorymetr hadronowy** – mierzy całkowitą energię hadronów (**protony, neutrony, piony, etc**); oddziaływania silne z gęstym materiałem ośrodka (nieelastyczne) => produkcja cząstek wtórnych; pomiar energii naładowanych cząstek kaskady

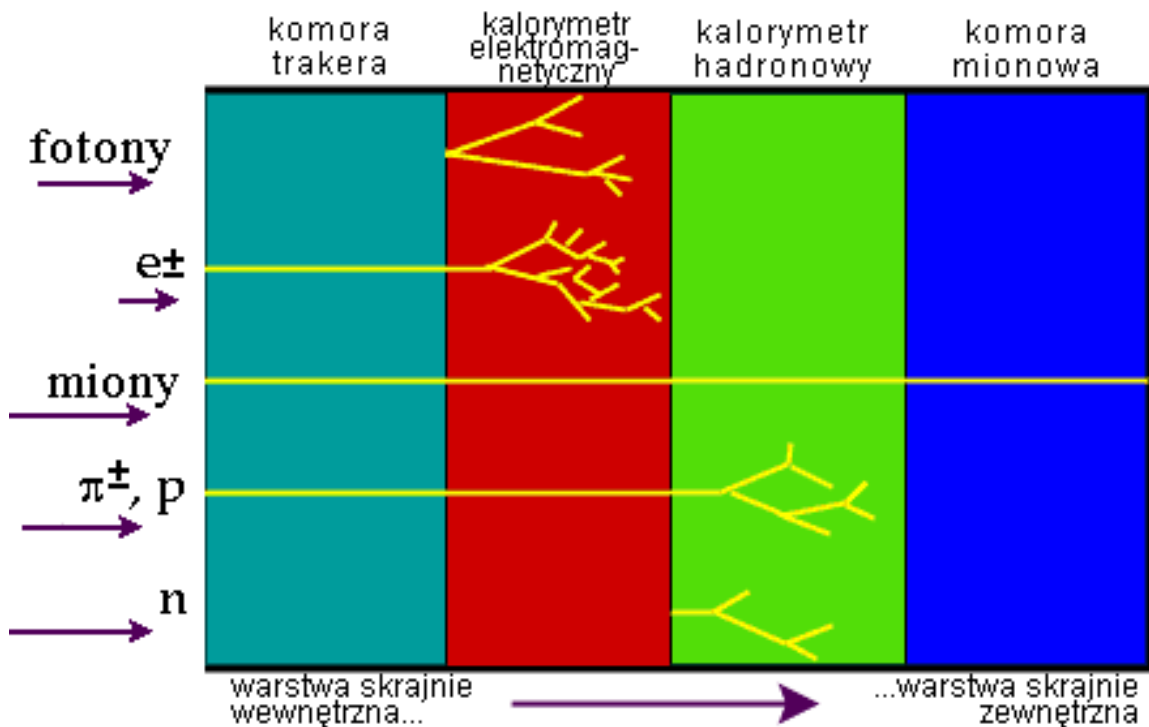
Kalorymetry hadronowe umieszcza się za kalorymetrami elektromagnetycznymi i są większe od kalorymetrów elektromagnetycznych

4. **Komory mionowe** – do tych komór **dochodzą tylko miony i neutrino**; miony zostawiają sygnał w komorach, neutrino uciekają (ich obecność – z brakującej energii)

5. **Magnesy** – otaczają detektory śladowe; **pole magnetyczne powoduje zakrzywienie toru cząstek naładowanych (zgodnie z siłą Lorentza)** a promień krzywizny i kierunek śladu daje informację o pędzie i znaku ładunku cząstki



Rys. PA







Gdzie poszczególne cząstki są rejestrowane

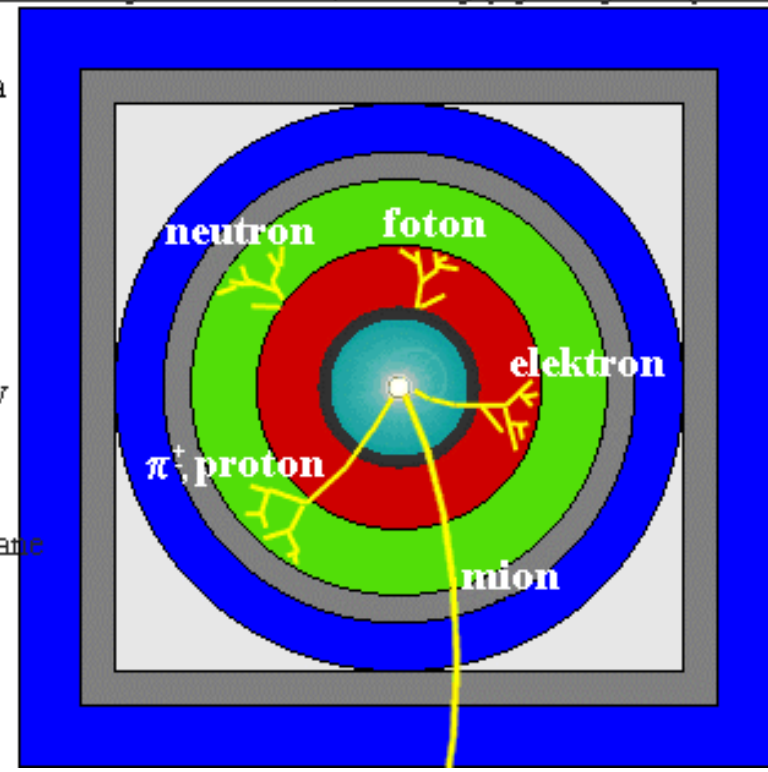
- brak neutrin na rysunku (o ich obecności wnioskujemy tylko z brakującej energii)

w detektorach śladowych – rejestracja tylko cząstek naładowanych!

Przekrój podłużny (górną) i poprzeczny przez typowy detektor hybrydowy (tzw. eksperyment)

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

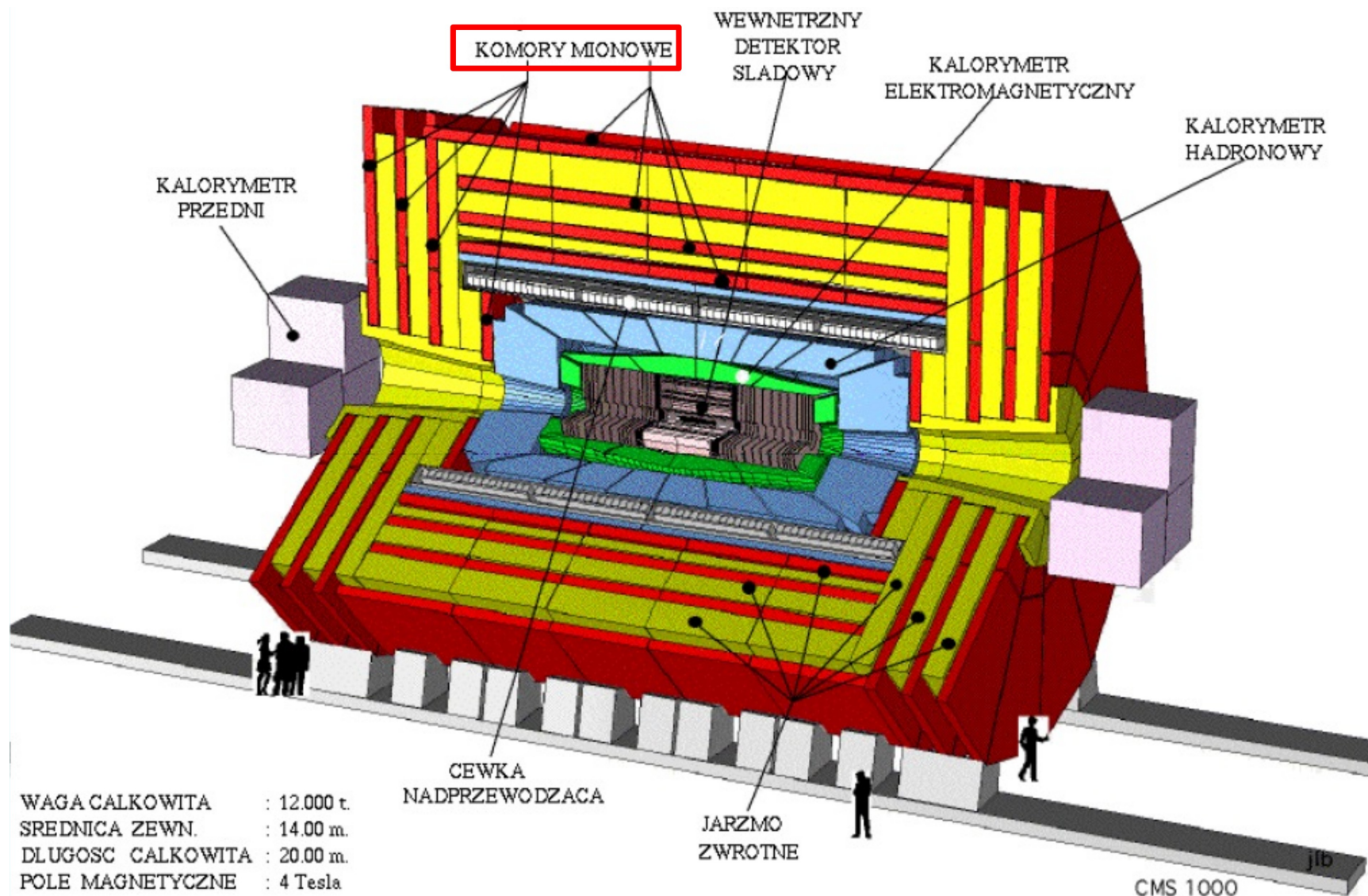
-  rura dryfowa
-  komora trakera
-  solenoid magnesu
-  kalorymetr elektromagnetyczny
-  kalorymetr hadronowy
-  namagnesowane żelazo
-  komory mionowe



Rys. PA

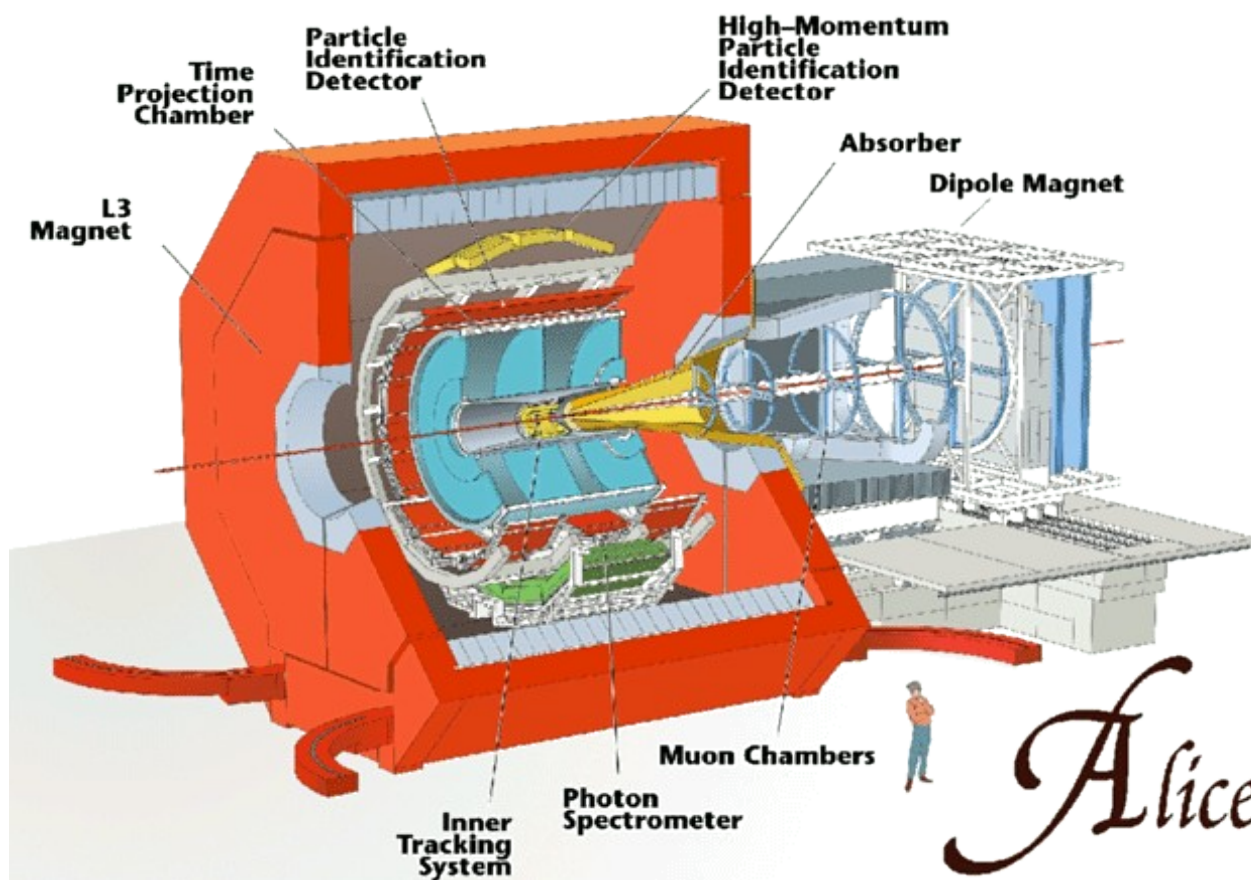
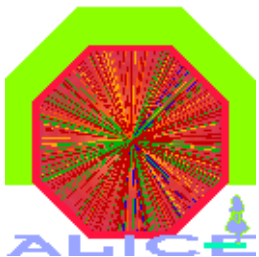
# Eksperyment CMS przy akceleratorze LHC w CERN

(główne składowe detektora - rozmieszczenie)



# Eksperyment ALICE przy akceleratorze LHC w CERN

(główne składowe detektora)



*Alice*

Niektóre elementy detektora:

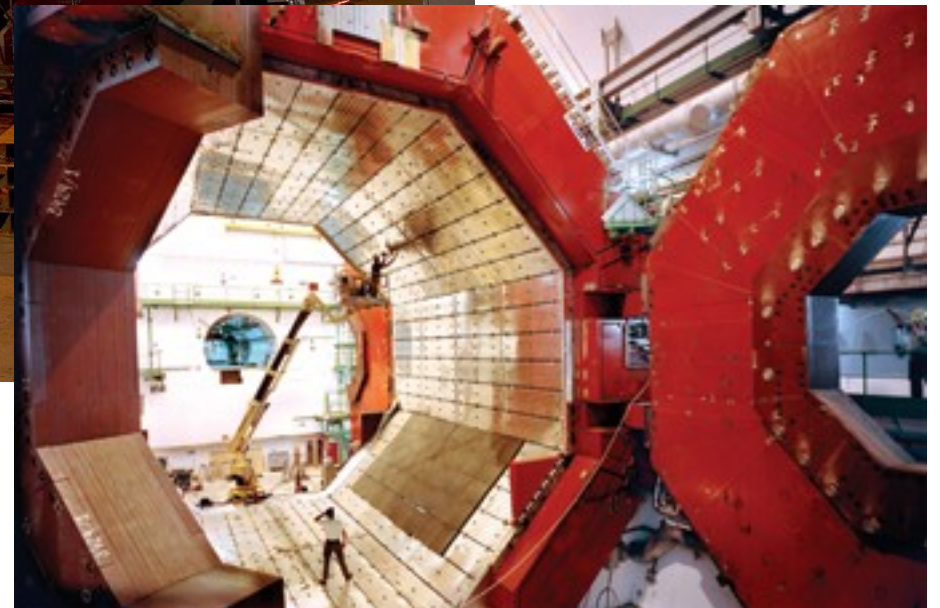
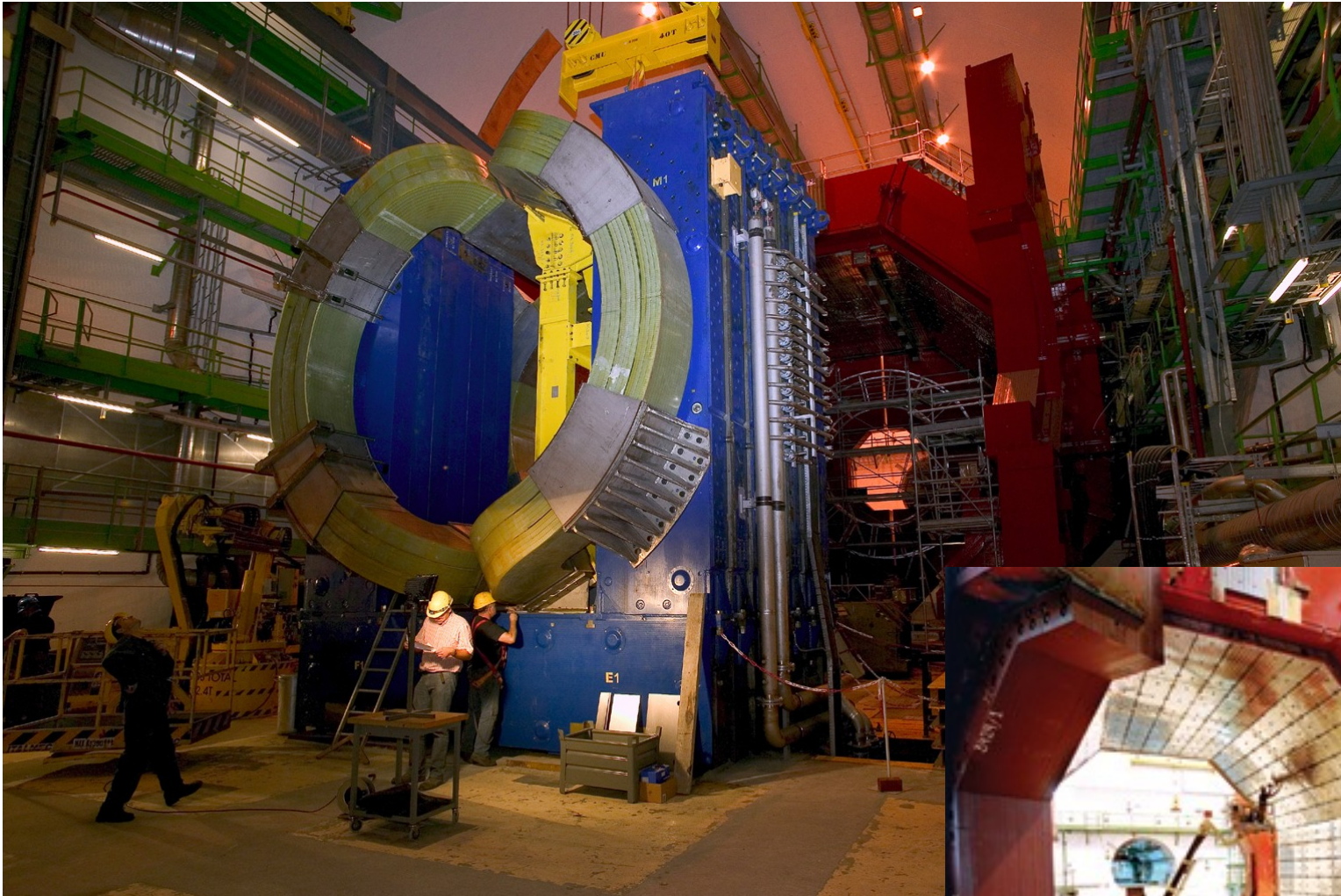
ITS i TPC - “śledzą” tor cząstki naładowanej (pęd,  $dE/dx$ )

ITS – do pomiaru cząstek krótko-życiowych (o czasach życia rzędu  $10^{-10}$  s)

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

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

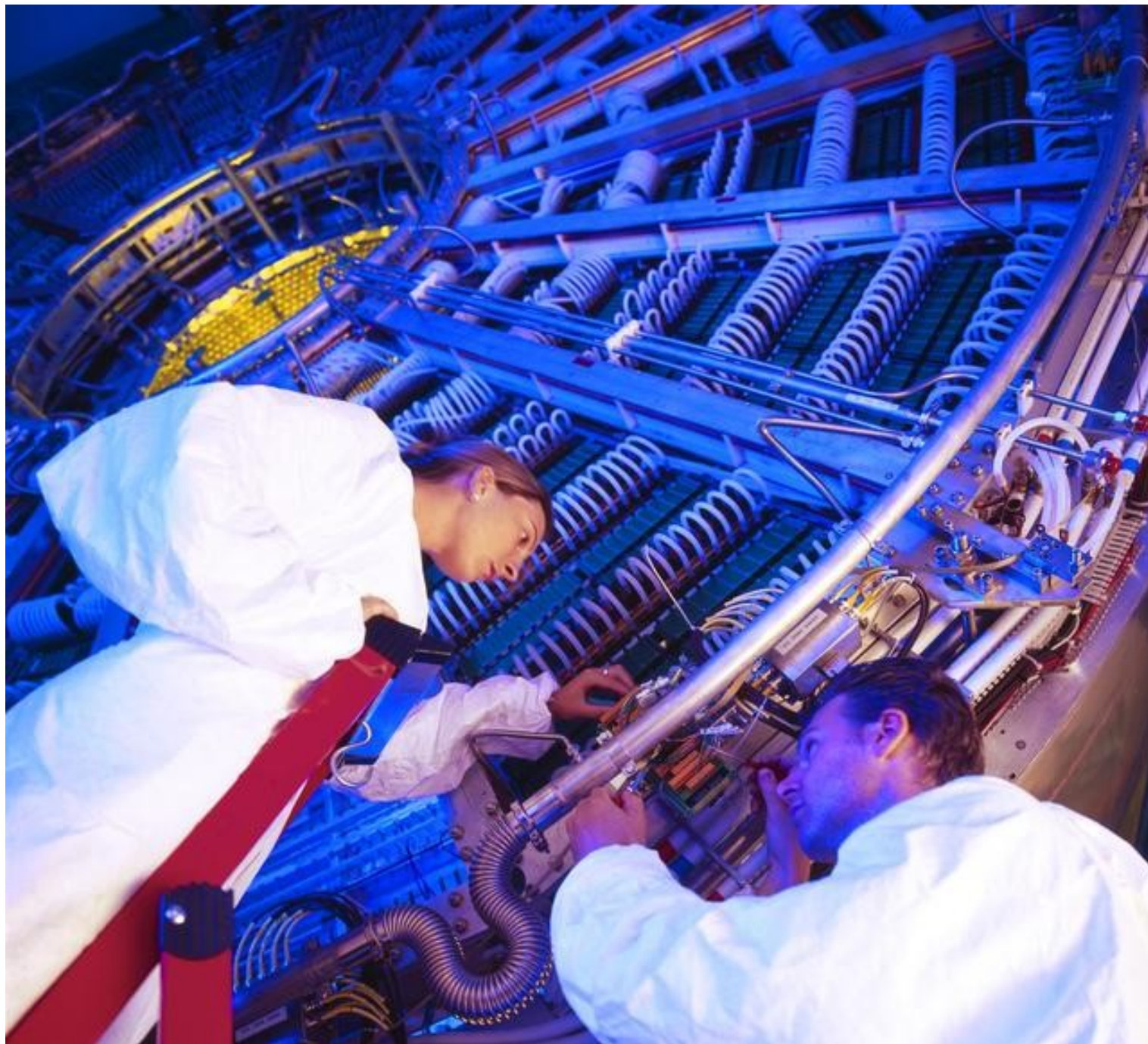
# Jak to wygląda w rzeczywistości...



Koszt ALICE to około 150 milionów CHF

**Jak to wygląda w  
rzeczywistości...**

**montaż TPC  
wewnątrz magnesu**



Polska jako jedno z 20 państw członkowskich CERN-u finansowała i uczestniczyła w budowie LHC, zwłaszcza w przygotowaniu oprogramowania i symulacji oraz budowie aparatury i systemów wyzwalania. W eksperymenty przy LHC zaangażowane są następujące instytucje naukowe:

- **Instytut Problemów Jądrowych w Warszawie (CMS, LHCb, ALICE),**
- **Uniwersytet Warszawski (CMS),**
- **Politechnika Warszawska (CMS, ALICE),**
- **Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie (ATLAS, LHCb, ALICE),**
- **Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (ATLAS, LHCb),**
- **Uniwersytet Jagielloński (ATLAS),**
- **Politechnika Krakowska (ATLAS).**

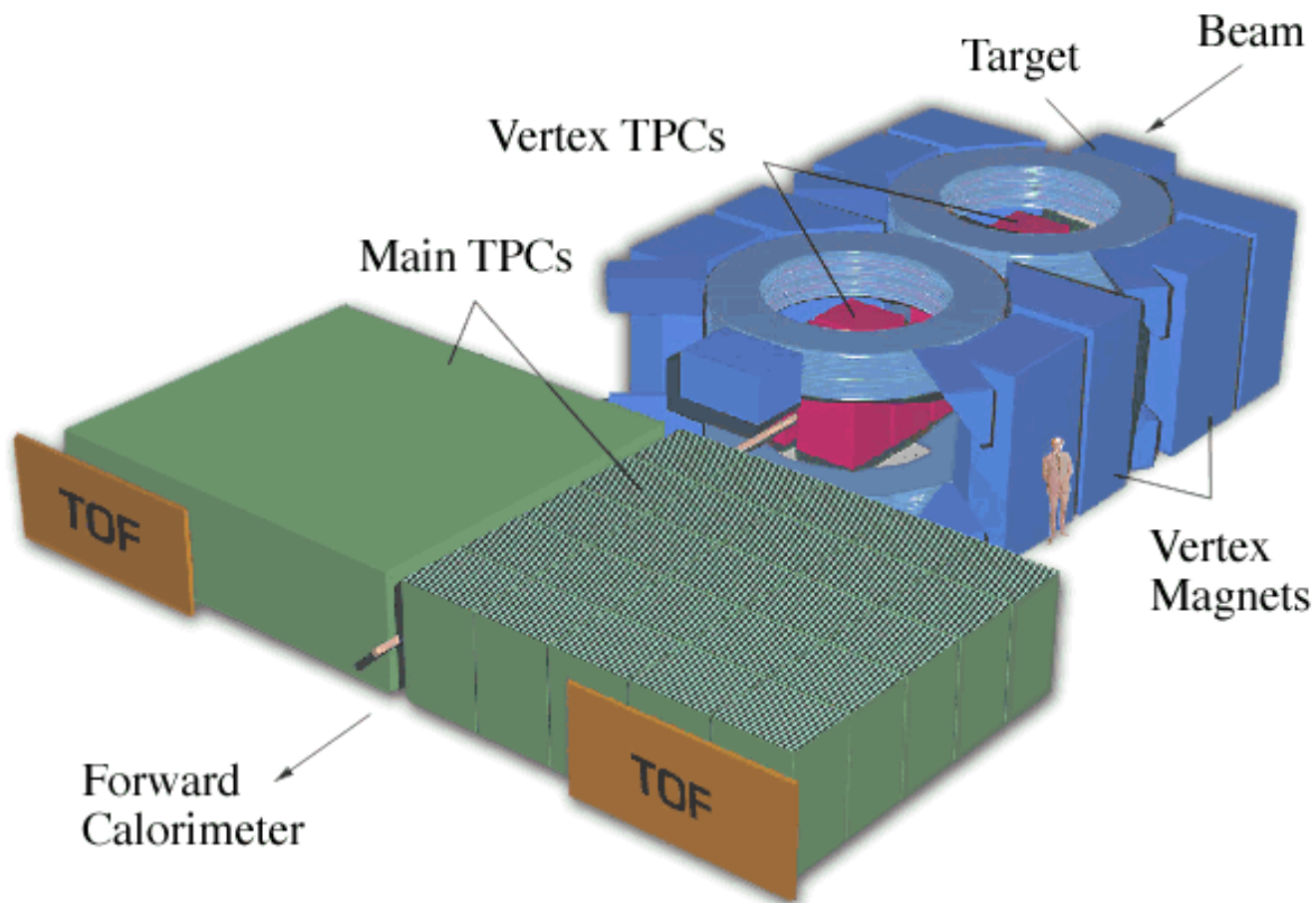
# CERN to nie tylko LHC!

Ale także eksperymenty (zakończone i działające) przy akceleratorze SPS np.

## eksperyment NA49



ja pracuję przy NA49/NA61 ;-)



Jony również przyspieszane do prędkości bliskiej  $c$ !  
maks. 1500 produkowanych cząstek naładowanych

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

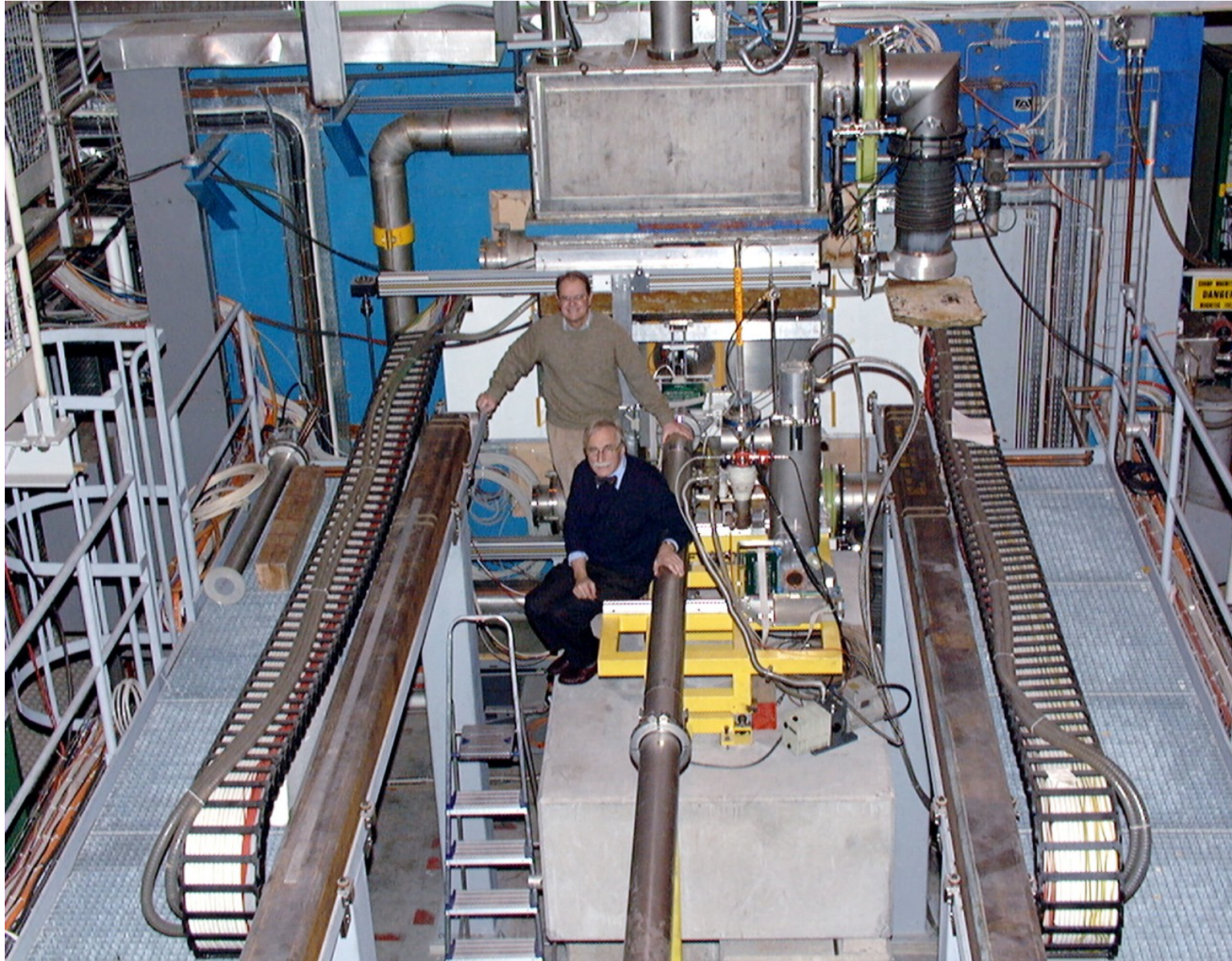
Identyfikacja:  $dE/dx$ +pęd lub  
czas przelotu (TOF)+pęd

VCAL – do pomiaru centralności

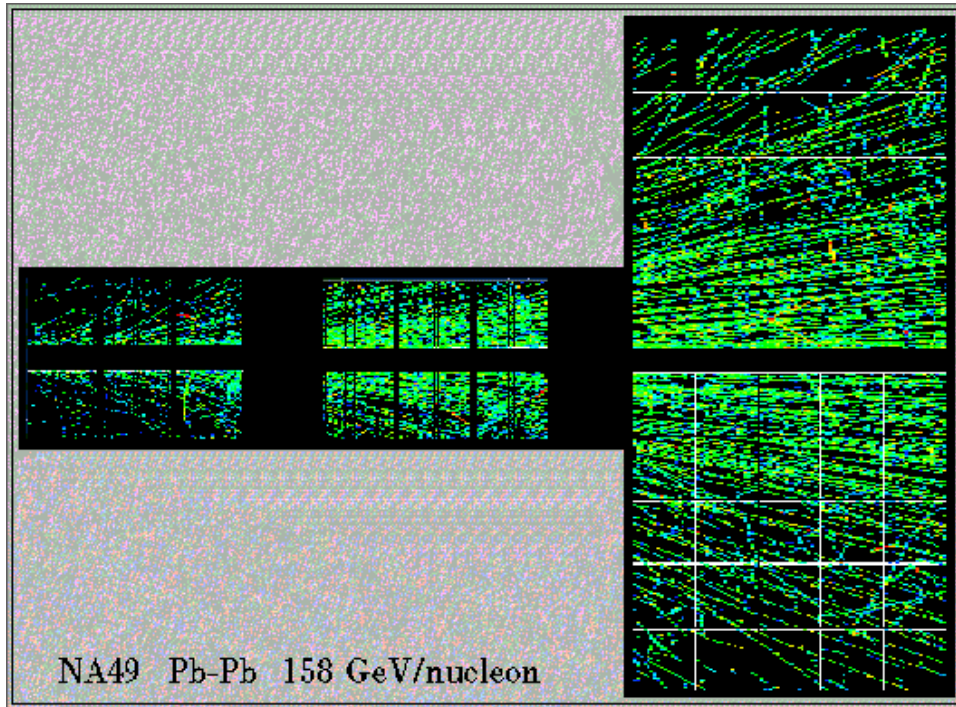
Obecnie mamy następcę NA49: eksperyment NA61 (SHINE)



Jak to wygląda w rzeczywistości...

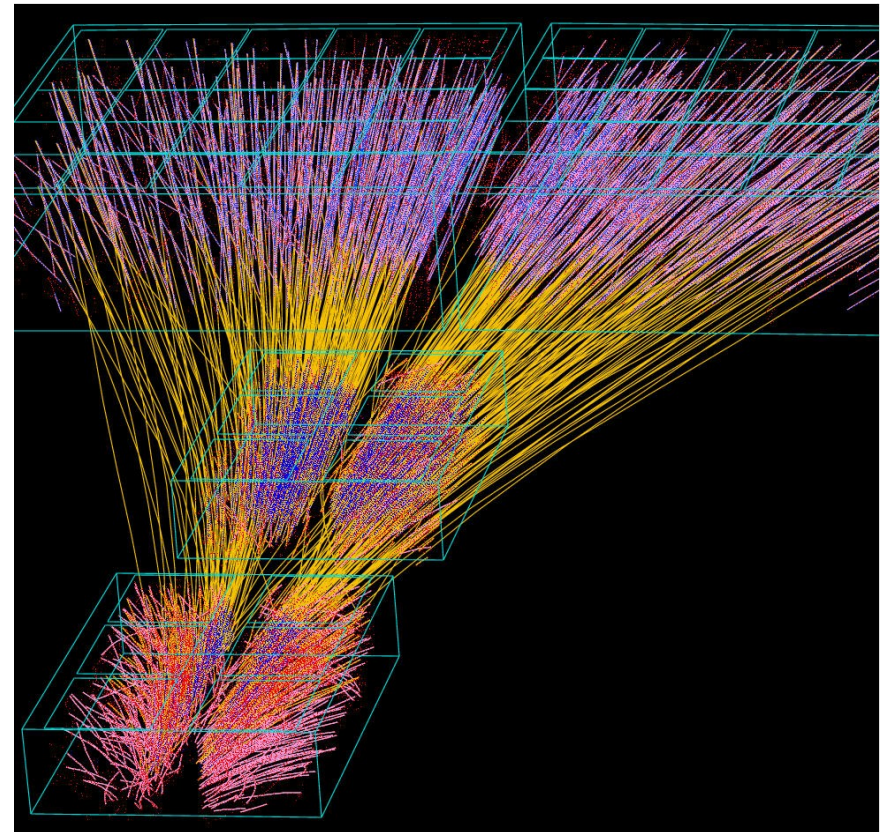


# Zderzenie centralne Pb+Pb przy najwyższej energii SPS

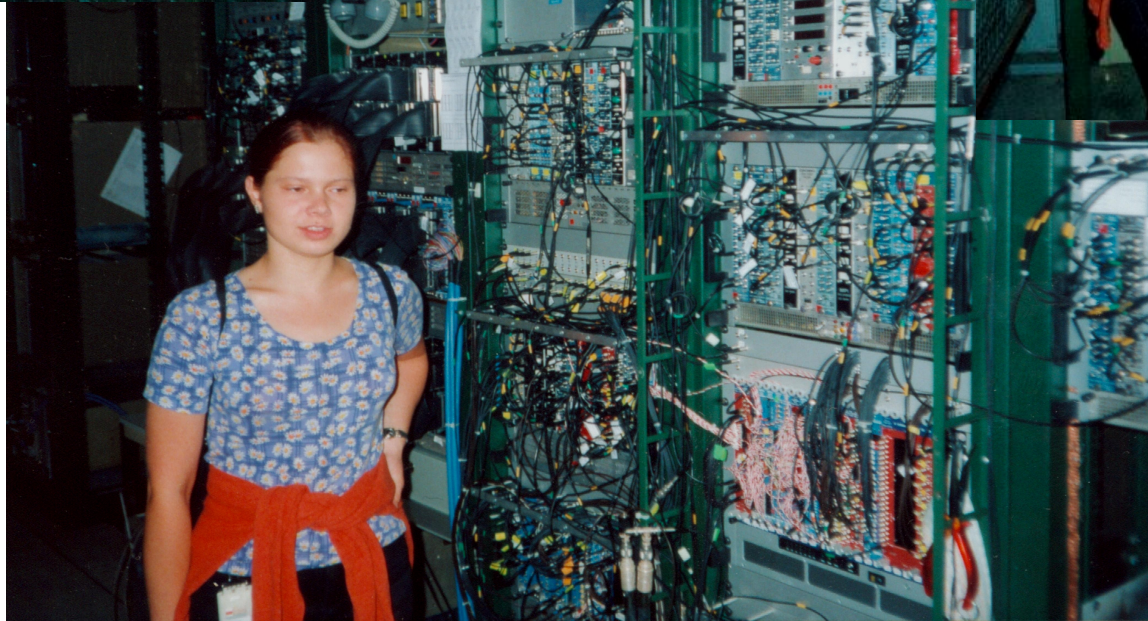


**Eksperymenty przy akceleratorze SPS jako pierwsze zaobserwowały plazmę kwarkowo-gluonową (już w latach 90-tych ubiegłego wieku)**

**Eksperyment NA49 dodatkowo ustalił jaka jest minimalna energia potrzebna na produkcję QGP (energia graniczna na przejście fazowe)**



NA49





Praca w CERN to nie tylko praca przy detektorze/zbieraniu i analizowaniu danych ale również różnego rodzaju szkolenia, konferencje...

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





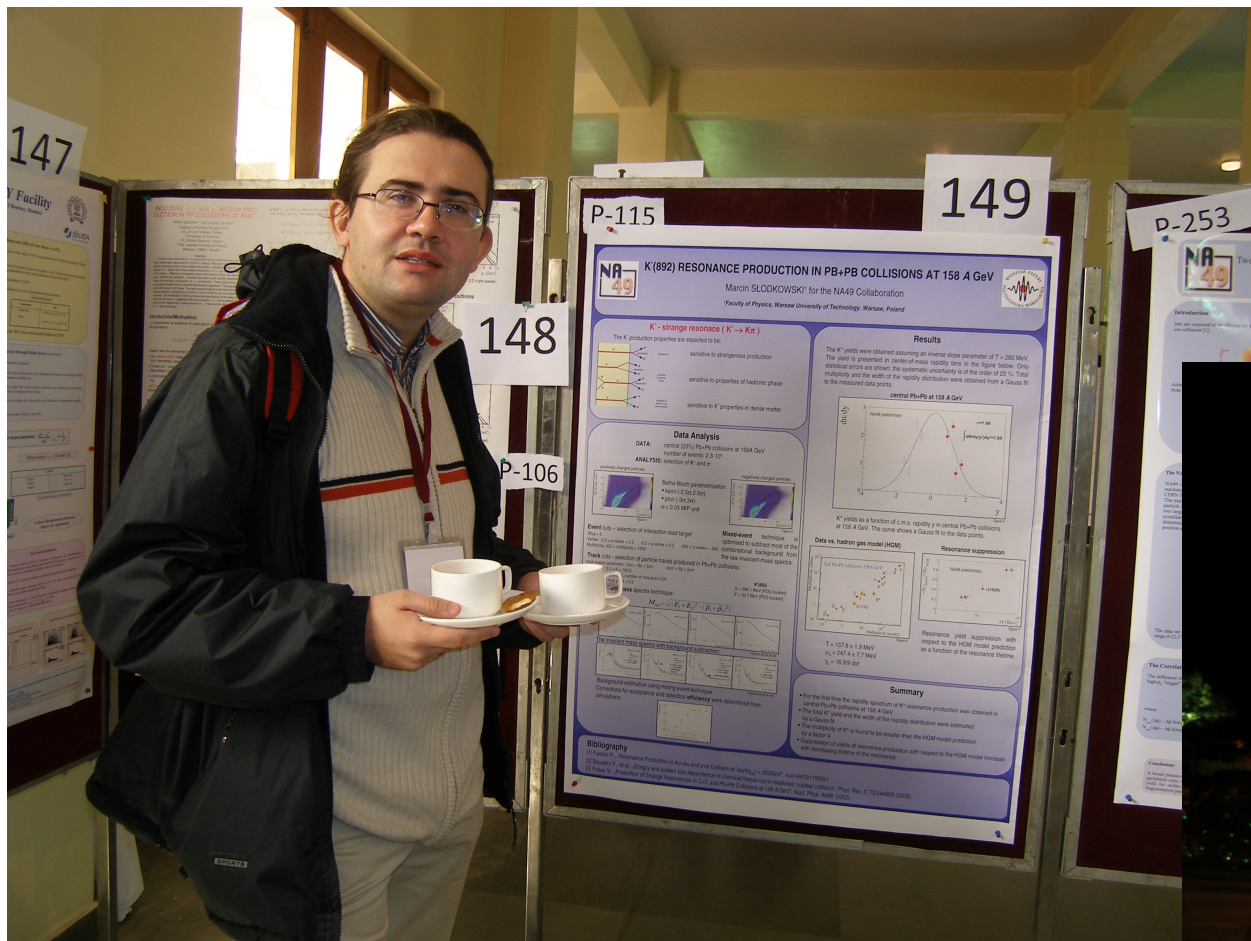


Wyniki analiz pokazujemy na międzynarodowych konferencjach.

Indie  
Konferencja  
Quark Matter 2008









## Polecana literatura:

1. <http://www.cern.ch> - strona ośrodka CERN
2. <http://lhc.edu.pl> - strona tej wystawy
3. <http://press.web.cern.ch/press/PhotoDatabase/> - strona ze zdjęciami z CERN
4. <http://particleadventure.org> (również po polsku) - bardzo ciekawa strona o materii, cząstkach elementarnych i oddziaływaniach

Slajdy dodatkowe

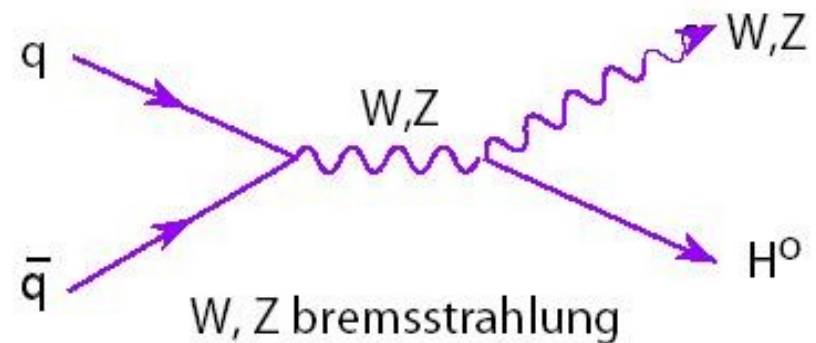
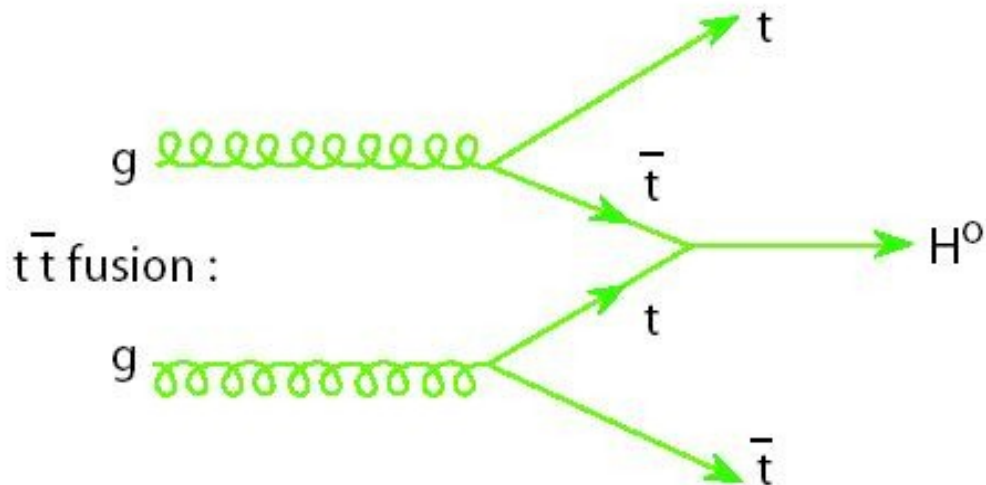
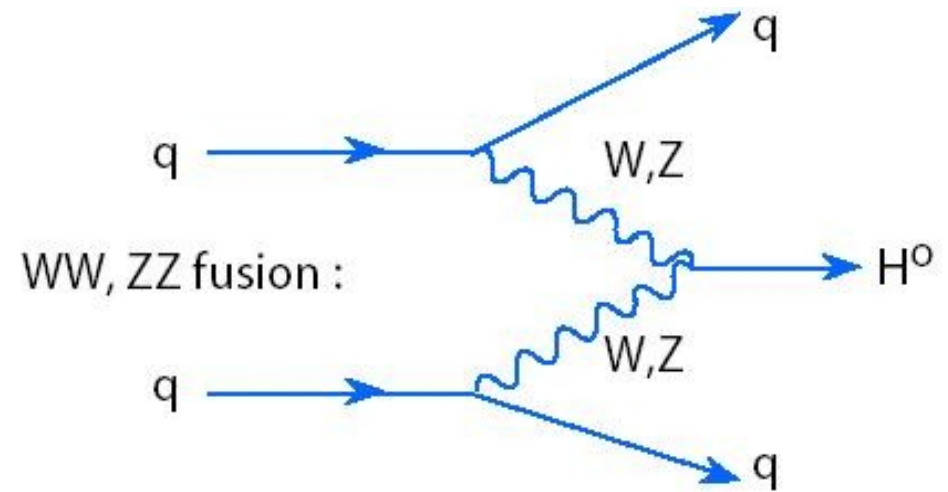
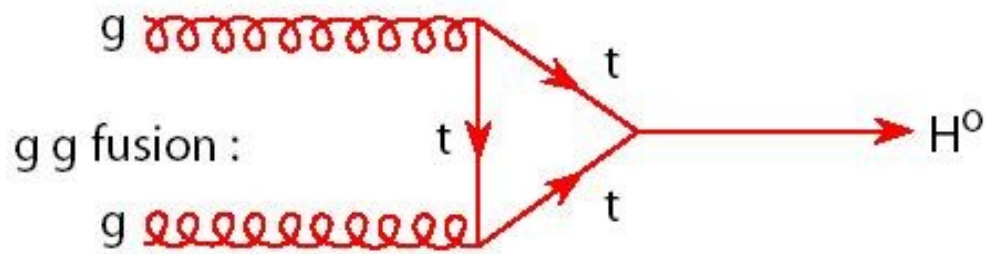
- Age of the Universe: 15 billion years =  $10^{17}$  s = 100,000,000,000,000,000 s = 100 petaseconds
- Age of homosapien species:  $10^{13}$  s = 10 teraseconds
- Typical human life:  $10^9$  s = 1 gigasecond
- Length of this lecture:  $10^3$  s = 1 kilosecond (though it may seem longer)
- Typical breath:  $10^0$  s = 1 second
- Very fast flash exposure:  $10^{-7}$  s = 100 nanoseconds
- Pentium™ 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.**

Przykłady diagramów Feynmana w których tworzona jest cząstka Higgsa:  
 (rys. CMS przy LHC)



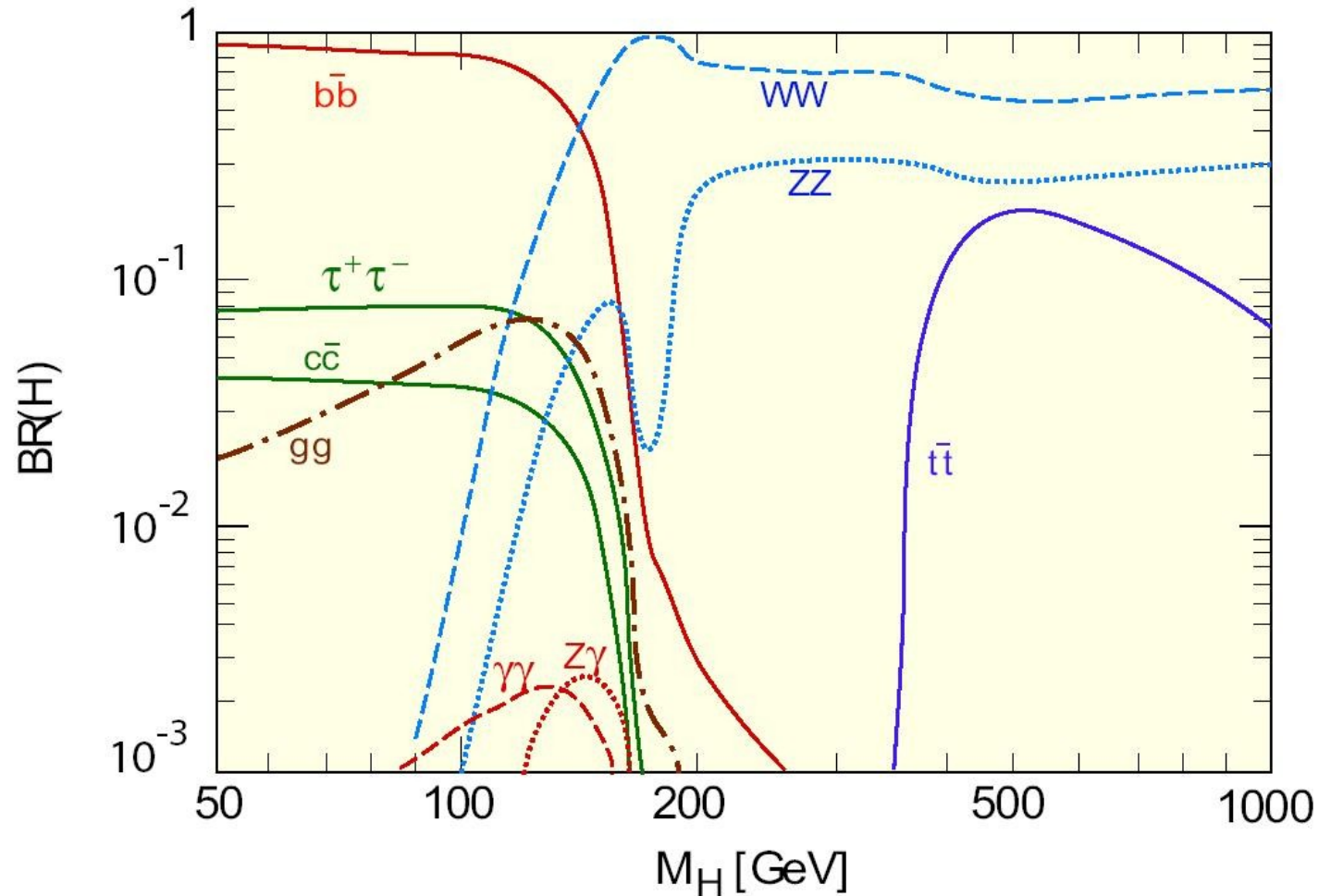
## Jak złapać Higgsa w detektorze?

Przewidywane kanały rozpadu cząstki Higgsa zależą od jego masy.

Dla mas poniżej 130 GeV/c<sup>2</sup>, Higgs rozpada się głównie na parę b anty-b. Rozpad na parę leptonów tau również przy niskich masach.

Poszukiwać w kanale rozpadu na dwa fotony można przy masach Higgsa niższych niż 150 GeV/c<sup>2</sup>. Dla wyższych mas Higgsa, jego rozpad jest głównie poprzez procesy H→WW\*/WW oraz H→ZZ\*/ZZ.

\* - oznacza cząstkę wirtualną



Rys. CMS przy LHC

Jedną z podstawowych zagadek Modelu Standardowego jest **problem asymetrii oddziaływań elektroślabych**: siły elektromagnetyczne mają daleki zasięg a słabe są prawie kontaktowe (wynika to z mas nośników obu oddziaływań: bezmasowe fotony oraz ciężkie bozony W i Z)

Hipoteza: siły te są symetryczne tylko ich symetria jest “złamana”

**Mechanizm Higgsa odpowiada za: spontaniczne łamanie symetrii oddziaływań elektroślabych**

**Mamy (??) dodatkowe oddziaływanie – oddziaływanie Higgsa.** Pole Higgsa wypełnia całą przestrzeń i nadaje masy cząstkom m.in. bozonom W i Z. Nadanie masy z kolei ogranicza zasięg oddziaływaniom słabym.

Symetria oddziaływań elektroślabych – jest związana z dowolnością wyboru np. które leptony są elektronami a które neutrinami lub która cząstka jest bozonem Z a która fotonem. Przy złamanej symetrii jeśli “ktoś” nazwie cząstkę np. elektronem to z tym wyborem muszą zgodzić się wszyscy.

Symetria oddziaływań elektroślabych wymuszałaby aby wszystkie cząstki przenoszące oddziaływanie były bezmasowe.

Złamana symetria nadaje masę bozonom W i Z a foton pozostawia bezmasowy.

Mechanizm Higgsa ma pewne problemy: opisuje jak można uzyskać masę ale nie przewiduje jej wartości. Teoria nie określa też masy nośnika oddział. - bozonu Higgsa (trzeba znaleźć doświadczalnie)

Masa bozonu Higgsa w Modelu Standardowym nie jest przewidywana. Ograniczenie doświadczalne:

$H^0$  Masa  $m > 114.4 \text{ GeV}$ ,  $CL=95\%$  (**PDG2008**)

Supersymetria (SUSY) -> Supersymetryczny Model Standardowy (MSSM): wprowadzenie partnerów supersymetrycznych (bozony  $\leftrightarrow$  fermiony) i dwóch pól Higgsa (5 bozonów Higgsa) co pozwala na unifikację elektroślabych i silnych.

W modelach supersymetrycznych mamy nie jeden tylko 5 bozonów Higgsa

MSSM  $\rightarrow$  5 Higgsów:  $h^0$ ,  $H^0$ ,  $A^0$ ,  $H^+$ ,  $H^-$

H – skalary

A – pseudo-skalary

$H_1^0$  w Supersymetrycznych Modelach ( $m(H_1^0) < m(H_2^0)$ )

Masa  $m > 92.8 \text{ GeV}$ ,  $CL=95\%$

$A^0$  Pseudoskalarny Bozon Higgsa w Supersymetrycznych Modelach

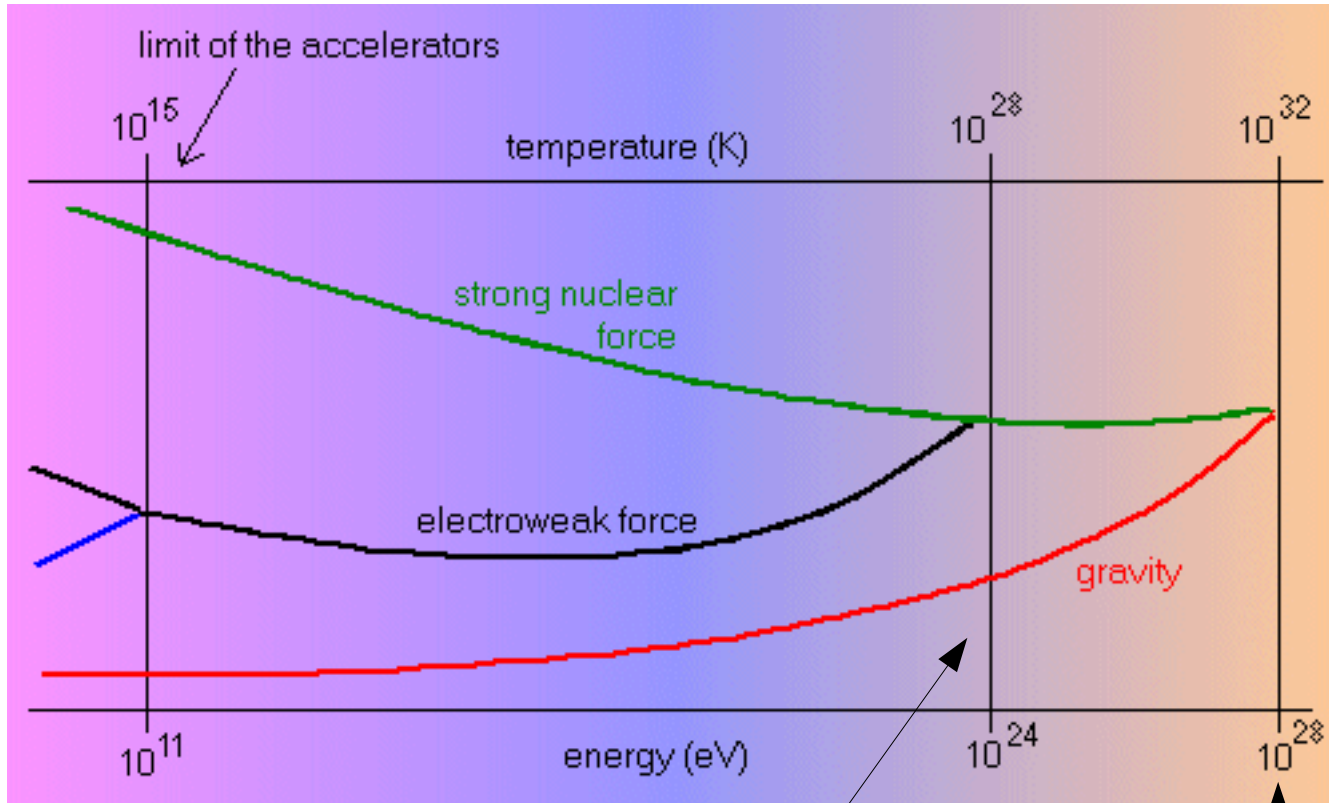
Masa  $m > 93.4 \text{ GeV}$ ,  $CL=95\%$

$H^+$  Mass  $m > 79.3 \text{ GeV}$ ,  $CL=95\%$



Rysunek pokazuje granicę gdzie możemy dojść we współczesnych akceleratorach. Reszta jest jedynie ekstrapolacją.

Masa Planck'a  $M_p = \sqrt{\hbar c / G_N} = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$



skala energii  $E_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$   
 tu działają teorie wielkiej unifikacji (GUT)

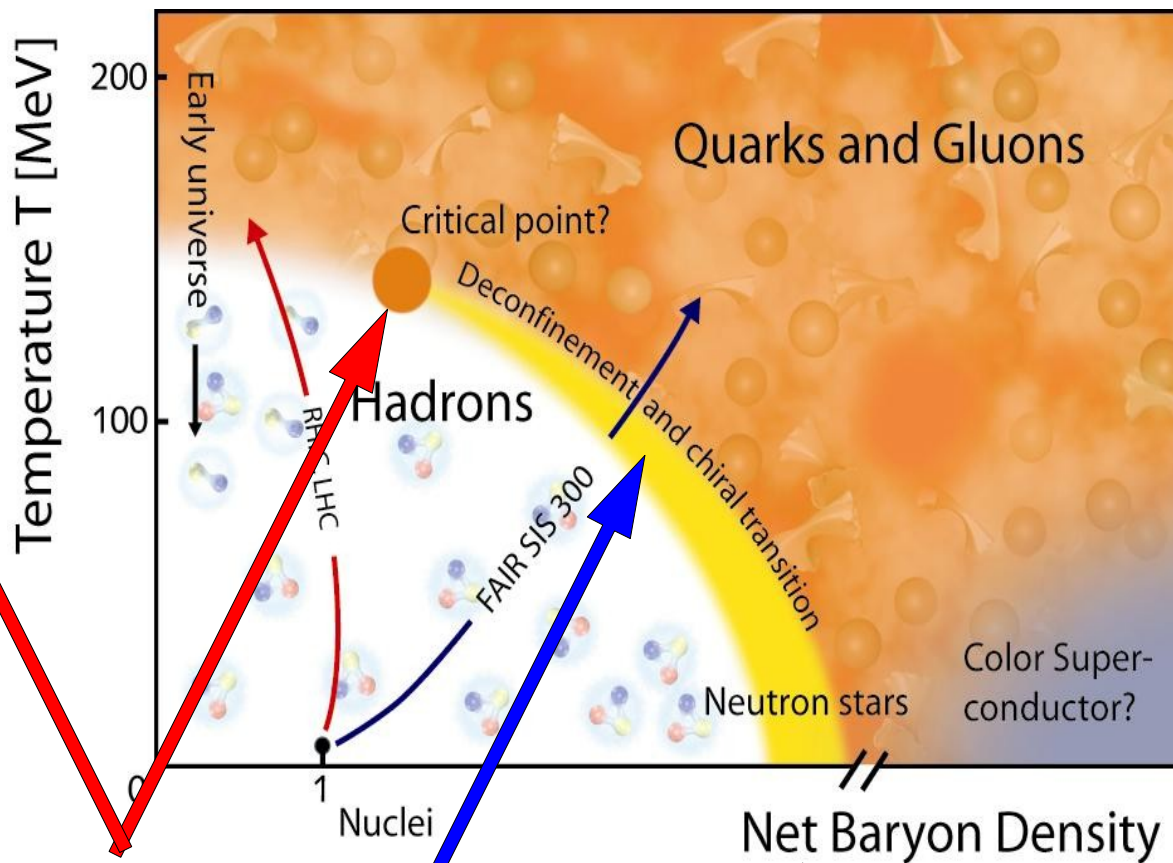
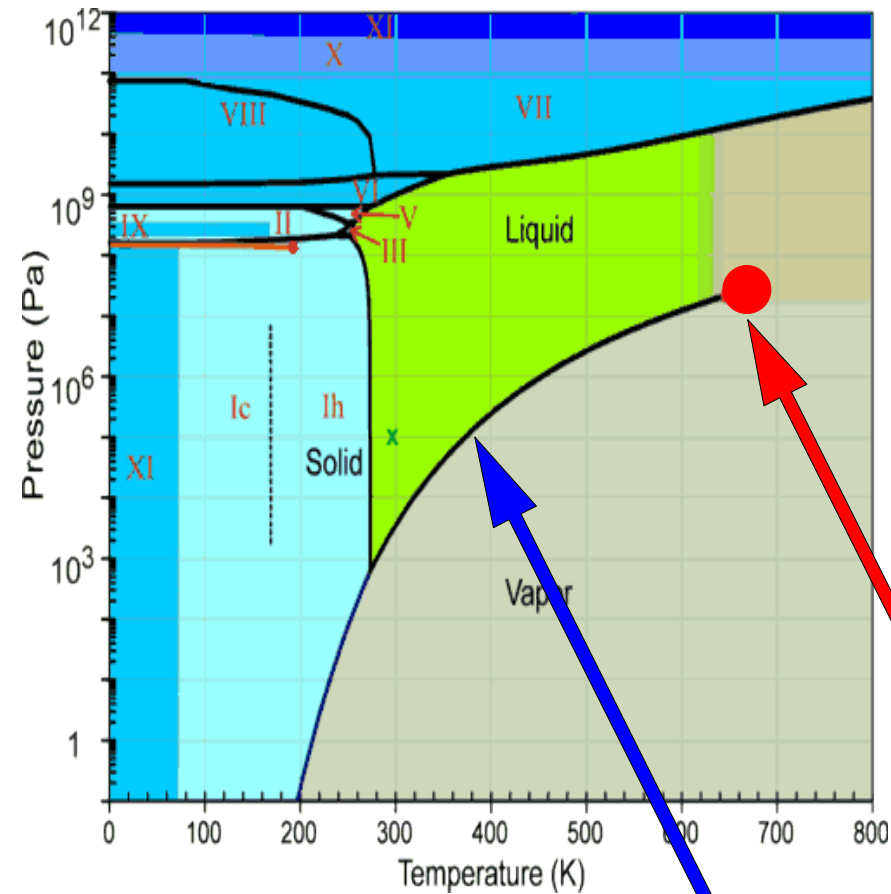
skala (masa) Plancka  $10^{19} \text{ GeV}$   
 istotne będą kwantowe efekty grawitacyjne

**Mamy obecnie kilka propozycji teorii unifikacji, lecz potrzebujemy danych doświadczalnych, by zdecydować, która z nich poprawnie opisuje przyrodę.**

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

**ale**

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



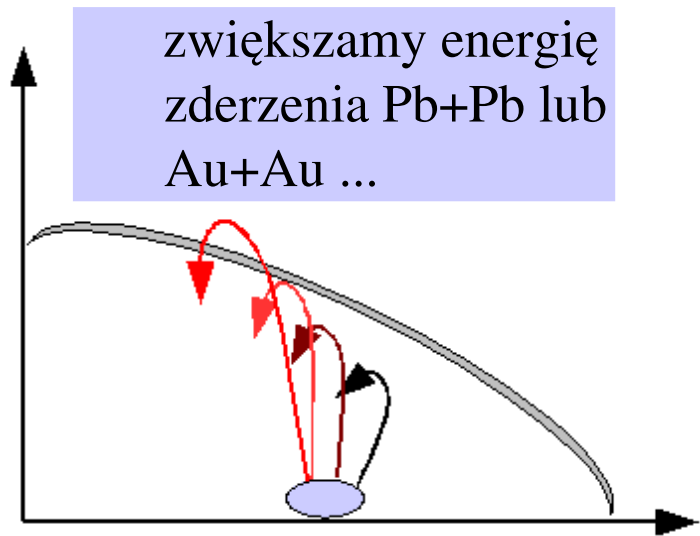
Wzdłuż linii koegzystencji faz zbliżając się do CEP gęstość wody spada a pary wzrasta. W i powyżej punktu krytycznego (CEP) nie da się odróżnić wody od pary

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

gwiazdy neutronowe  
około  $4-10\rho_0$

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

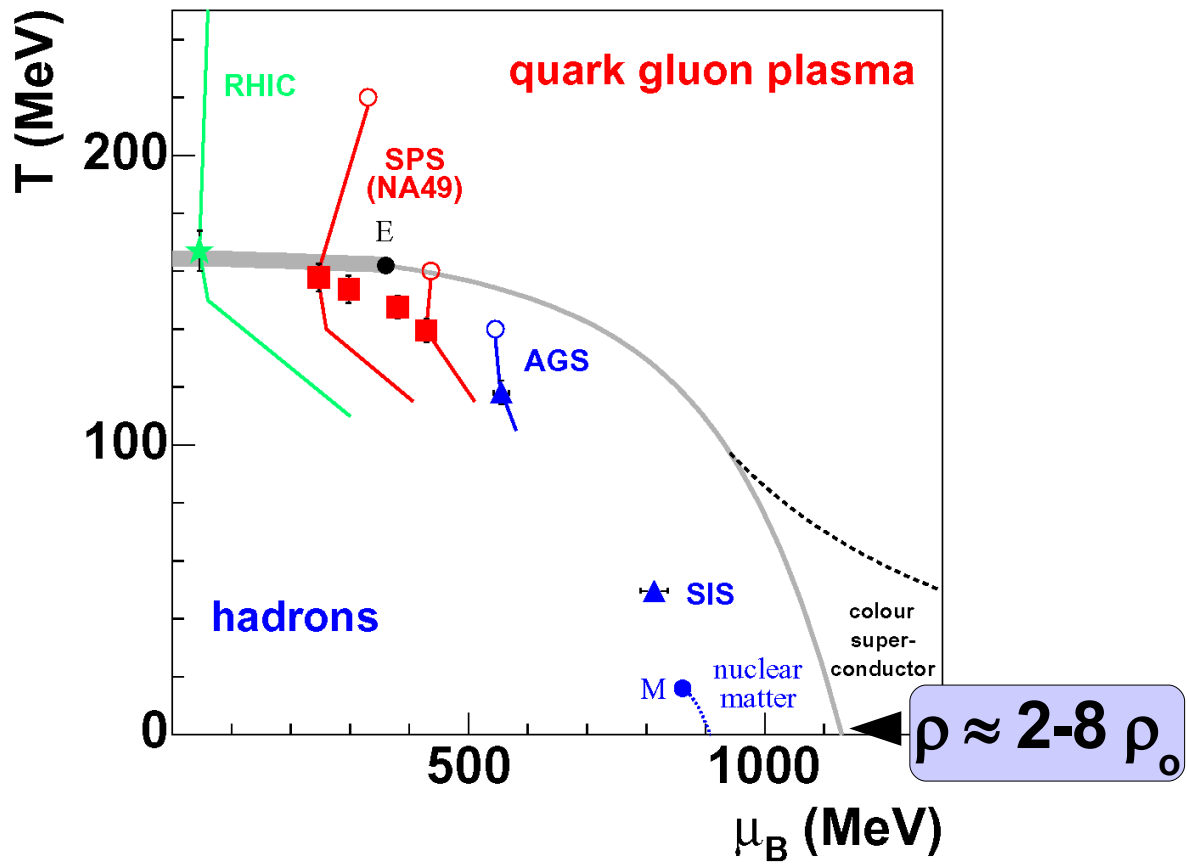
**Jak poruszać się po diagramie fazowym**  
 jak przekroczyć granicę przejścia fazowego



zwiększamy energię zderzenia Pb+Pb lub Au+Au ...

...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



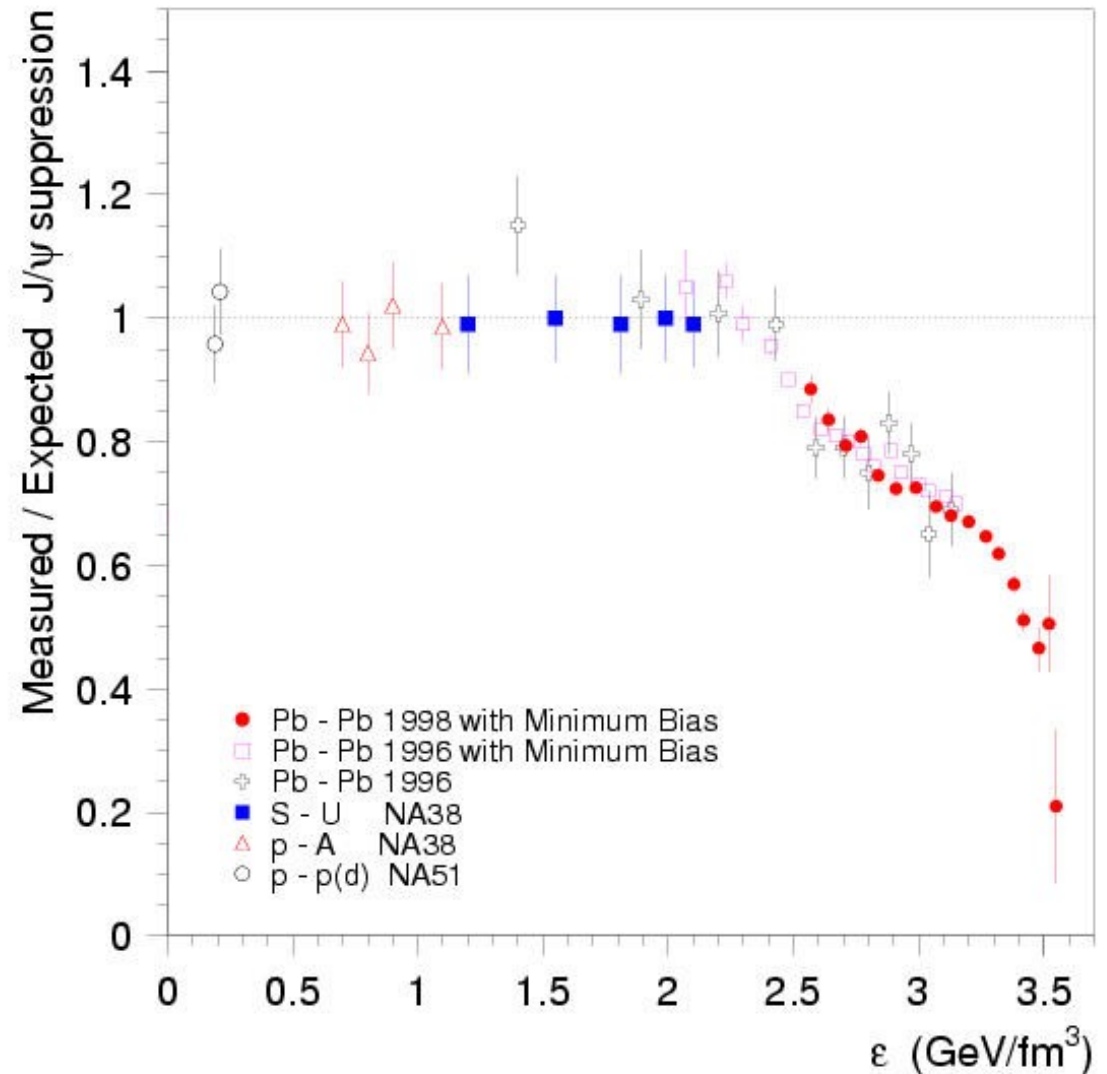
normalne jądra atomowe (materia jądrowa): dla  $T=0$  MeV  $\mu_B \approx m_N = 940$  MeV  
 a dla  $\mu_B = 0 \Leftrightarrow \rho_B = 0$

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 “przeżyć” w środowisku QGP

lekkie 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 $\pi$ )

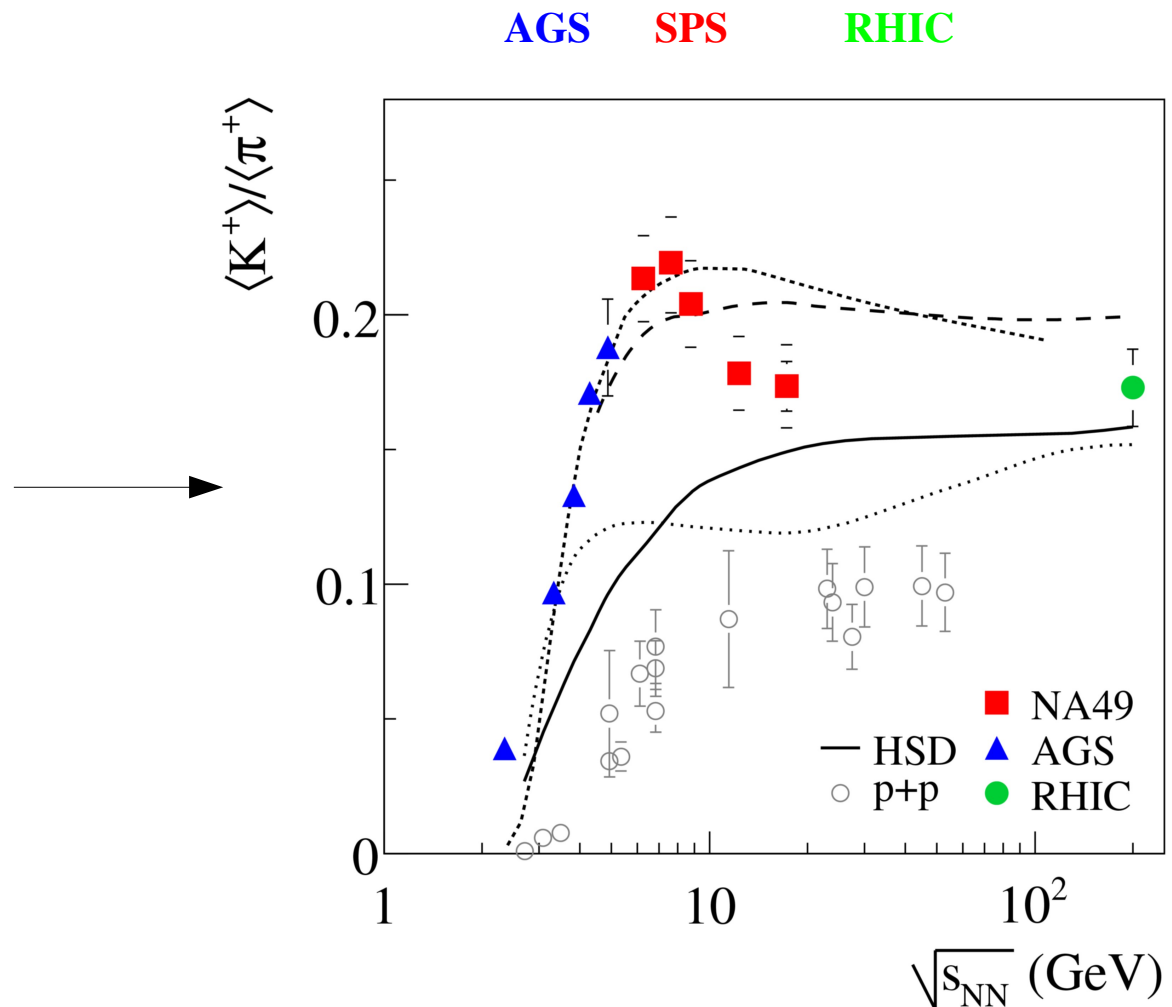
Przy jakiej dokładnie energii następuje przejście fazowe?

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)**

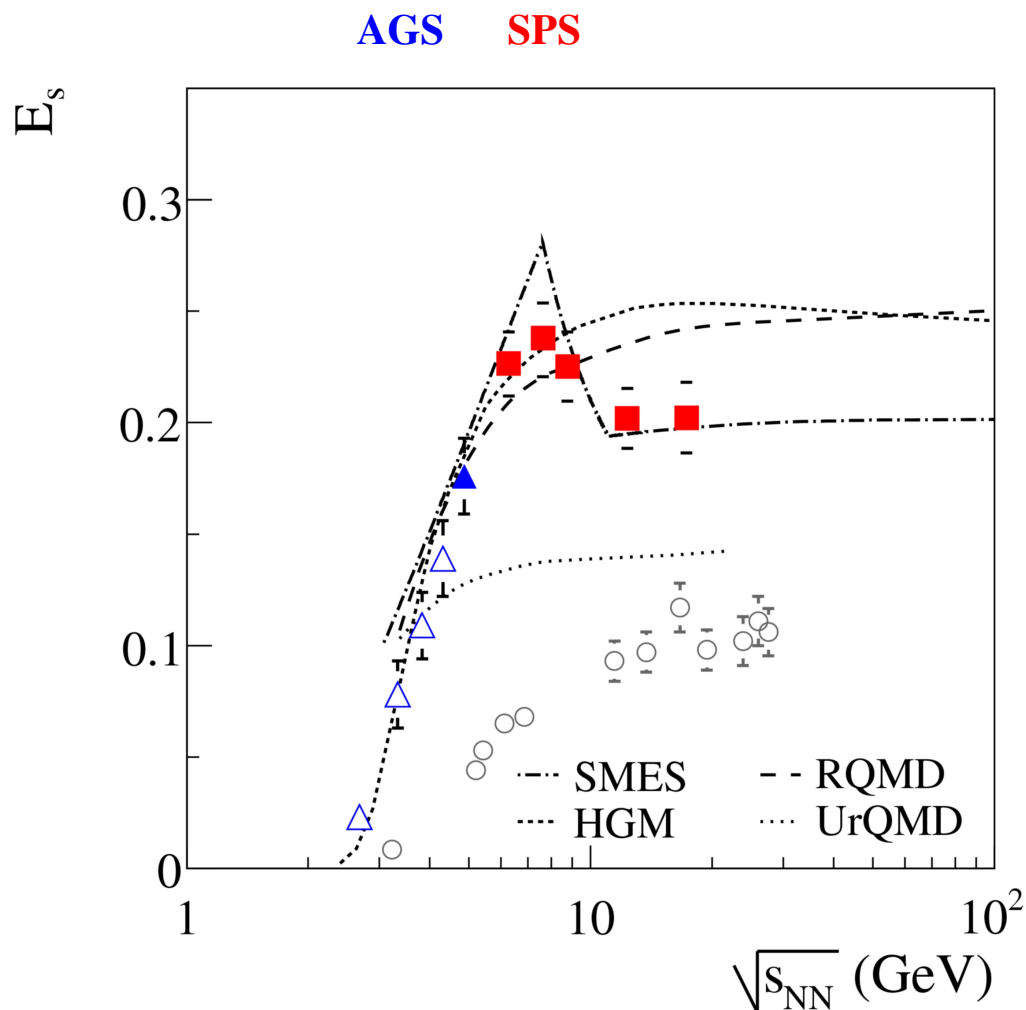


# Produkcja kaonów (mezon $K$ ), pionów (mezon $\pi$ ) oraz lambd ( $\Lambda$ również zawierają kwark 's')

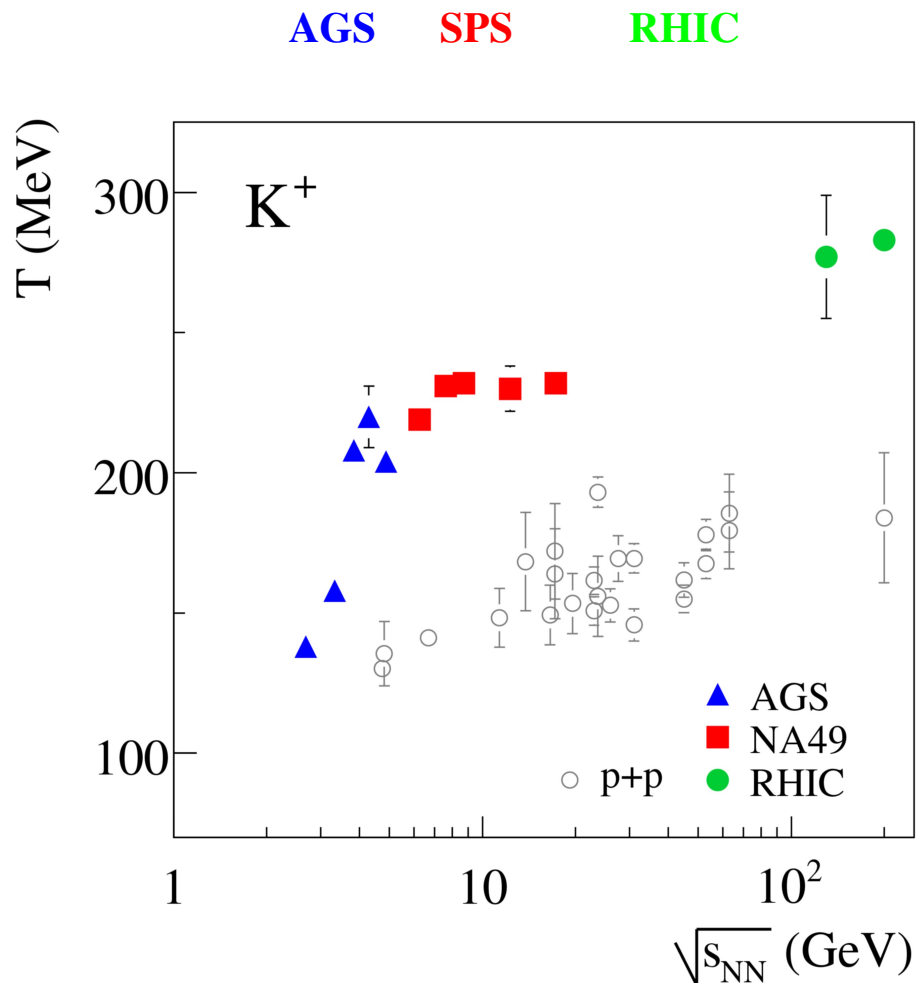
$$E_s = (\langle \Lambda \rangle + \langle K + \bar{K} \rangle) / \langle \pi \rangle$$

**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

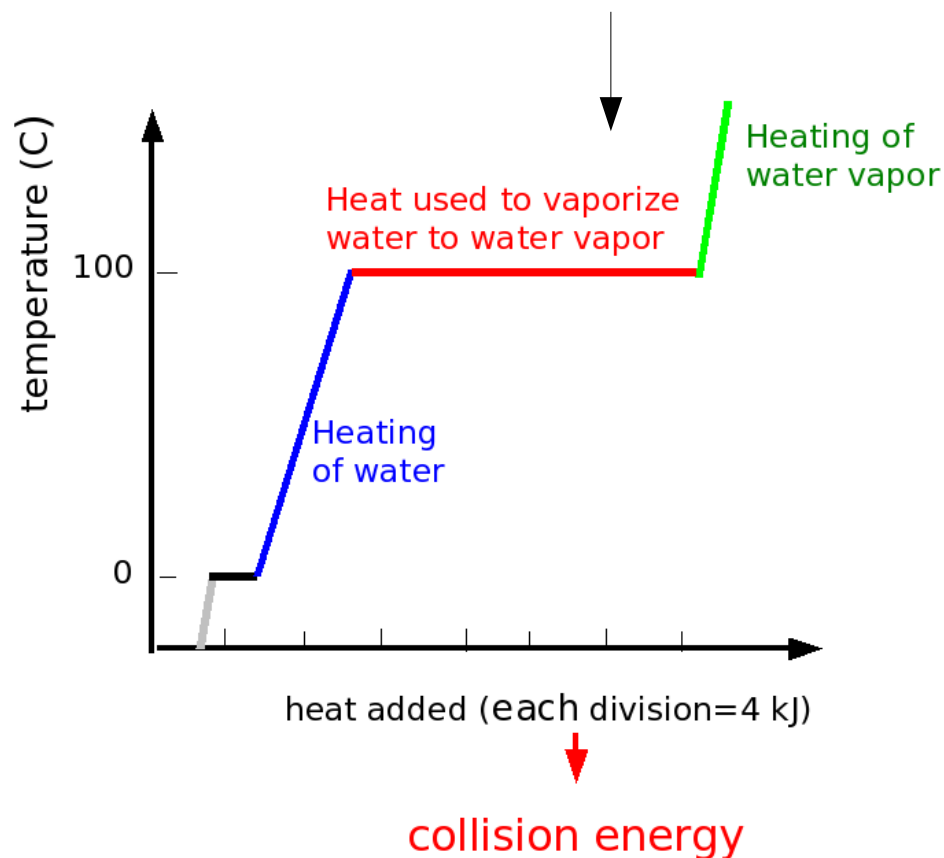


# Temperatury źródła cząstek produkowanych w zderzeniu Pb+Pb lub Au+Au



Lewy: temperatura źródła emitującego cząstki

To nam coś przypomina ...



Faza mieszana???