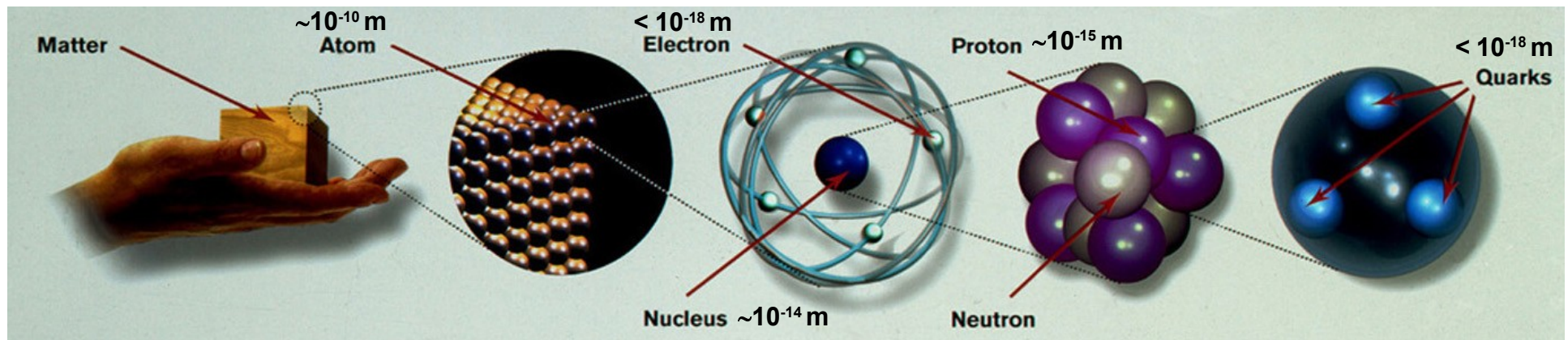


Katarzyna Grebieszko
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

Relatywistyczne zderzenia ciężkich jonów jako narzędzie do badania diagramu fazowego silnie oddziaływającej materii

czerwiec 2012



Od setek/tysięcy lat zastanawiamy się skąd pochodzimy, jaki był nasz początek...

“Na początku był Chaos. Któż zdoła powiedzieć dokładnie, co to był Chaos? Niejedni widzieli w nim jakąś istotę boską, ale bez określonego kształtu. Inni - a tych było więcej - mówili, że to wielka otchłań, pełna sił twórczej i boskich nasieni, **jakby jedna masa nieuporządkowana, ciężka i ciemna (...)**”

J. Parandowski “Mit o stworzeniu świata”

“Na początku Bóg stworzył niebo i ziemię. (...) Wtedy Bóg rzekł: «Niechaj się stanie światłość!» I stała się światłość. Bóg widząc, że światłość jest dobra, **oddzielił ją od ciemności.** “

Stary Testament, Księga Rodzaju

”Uświadom sobie, że **przed Stworzeniem wszystko było Światłem** a to Światło wypełniało wszelkie Stworzenie **i nic poza tym Światłem nie istniało.** Światło było nieskończone i samo było Nieskończonością.

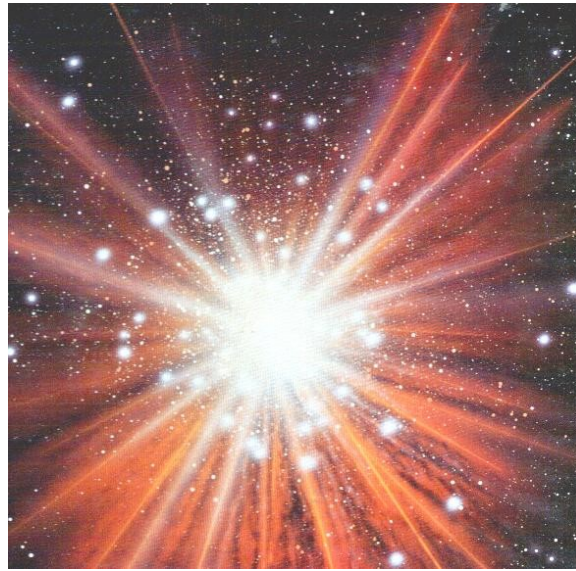
Kiedy On zaczął tworzyć Światy i twory (...)

Skurczył swą potęgę w sobie, tworząc serce Wszechświata **a Światło to wybuchło i zaczęło się oddalać.**

Pozostawiając niczym nienapełnioną przestrzeń-pustkę, która przybrała kształt okręgu.”

Instytut Studiów i Badań Kabały, Isaac Luria (ARI), “Drzewo życia”, XVI w.

... tworzymy teorie.



Model Wielkiego Wybuchu (*Big Bang Model*)

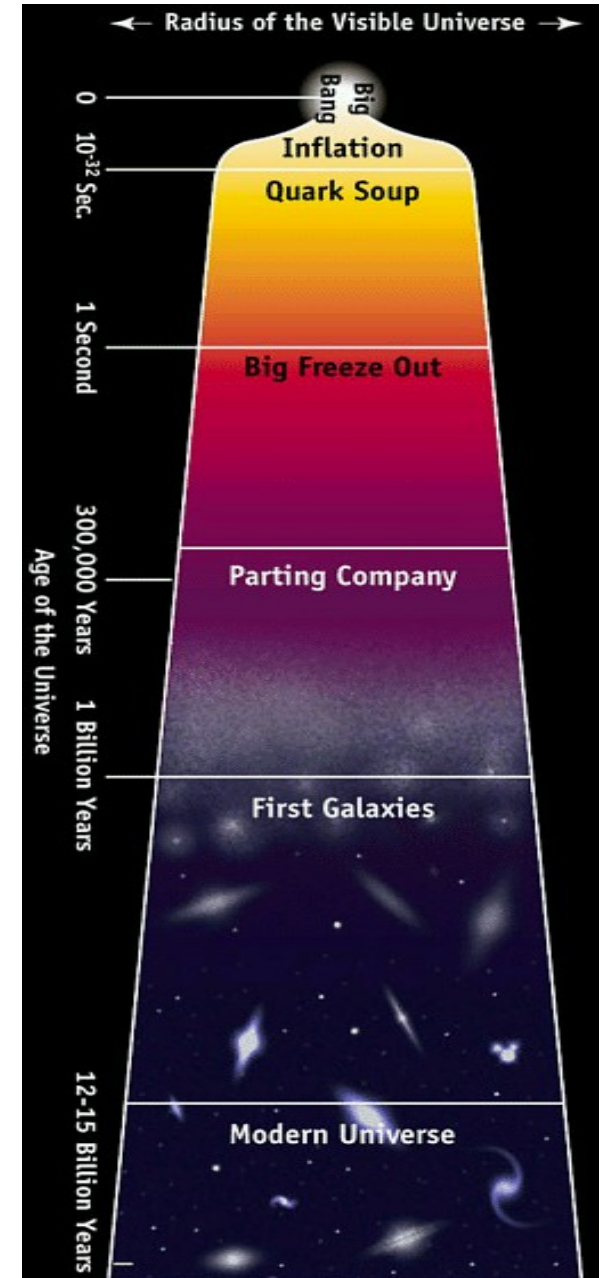
Wszechświat pojawił się 10-15 mld lat temu w wyniku ekspansji zapoczątkowanej Wielkim Wybuchem.

MWW zakłada, że jednym z etapów ewolucji Wszechświata było powstanie czegoś na kształt “zupy” (plazmy) kwarkowo-glonowej (QGP).

Koniec stanu QGP po około kilku μs po WW.

Kolejny etap: stygnięcie i rozszerzanie się Wszechświata

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



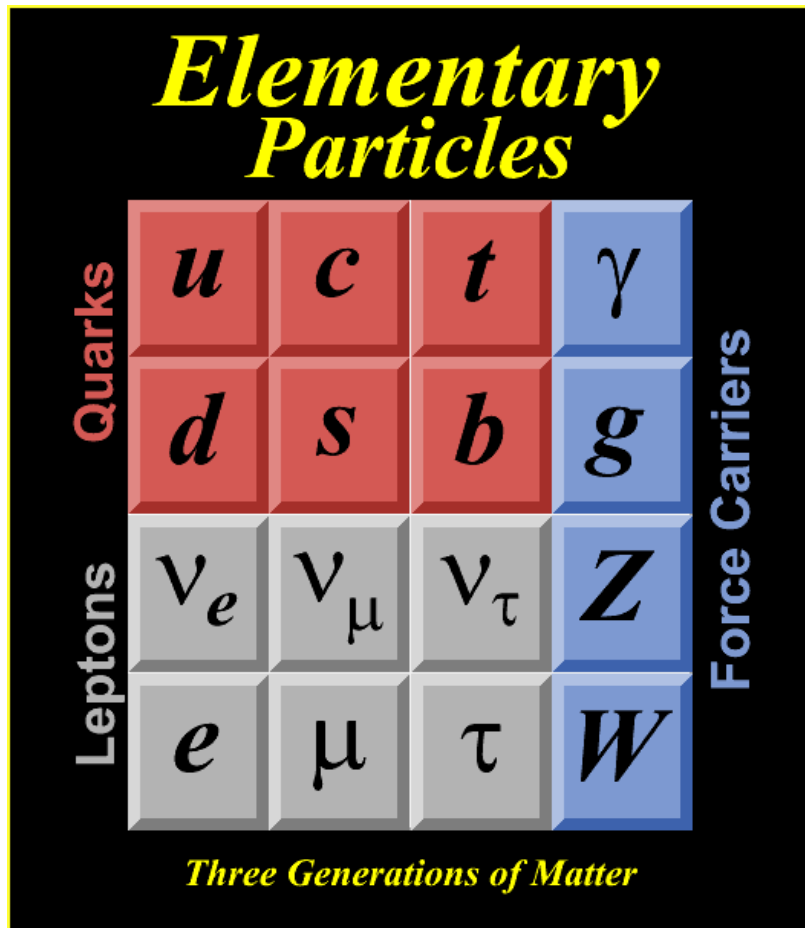
Co dzisiaj wiemy...

Cząstki elementarne

– podstawowe cegiełki

6 kwarków i 6 leptonów (+ ich antycząstki)

i bozony przenoszące oddziaływania



u, c, t ładunek = + 2/3e

d, s, b ładunek = - 1/3e

neutrino ładunek = 0e

e, μ, τ ładunek = - 1e

antycząstki mają przeciwne ładunki

Nośniki oddziaływań:

foton – oddziaływania elektromagnetyczne

Z⁰, W⁺, W⁻ - oddziaływania słabe

gluon – oddziaływania silne

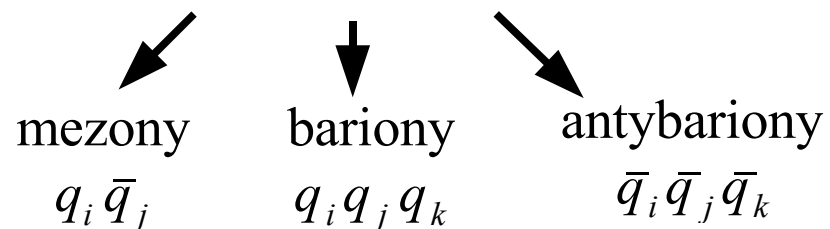
grawiton (nie odkryty!) – oddziaływania grawitacyjne

dodatkowo: bozon Higgsa ?
(Święty Graal współczesnej fizyki cząstek elementarnych)



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

Hadrony (cząstki oddziałujące silnie)

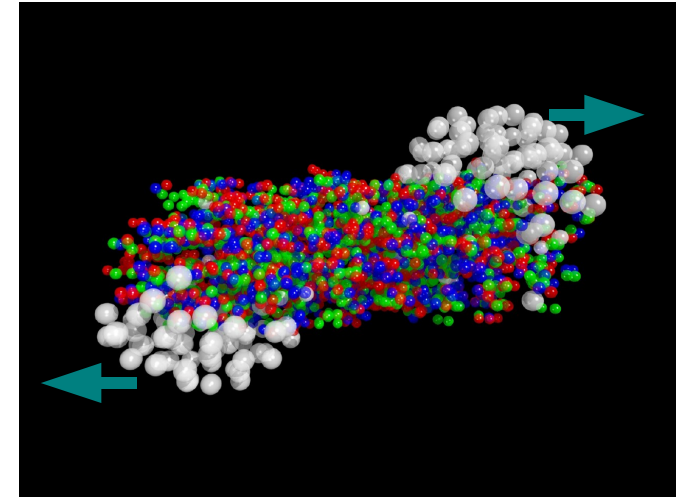


... teorię Wielkiego Wybuchu chcemy sprawdzać w laboratorium.

Mały Wybuch (*Little Bang*)

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

Szare kulki – nukleony (p, n) w jądrze;
kolorowe małe kulki – kwarki (w 3 kolorach)

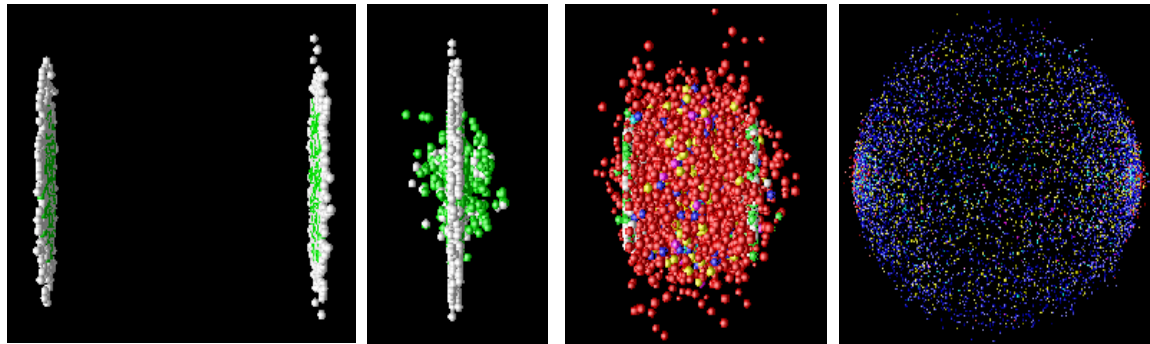


Z ogromnej energii zderzenia (zgodnie z $E=mc^2$) zderzenia produkują się nowe kwarki (nie tylko u i d ale i dużo cięższe s, c, ...)



Analogia do naszego sposobu na podgrzanie materii jądrowej i uzyskanie QGP w laboratorium

Już od pierwszych chwil trwa **ekspansja** (układ rozpryskuje się na wszystkie strony)



Kolejny etap (w czasie trwania ekspansji)– łączenie się swobodnych kwarków w kolorowo obojętne hadrony (**hadronizacja**) – już nie tylko protony i neutrony (!) ale głównie lekkie piony (mezony π). Dalej trwa ekspansja + ochładzanie...

Na zakończenie – ustają oddziaływania między hadronami (**wymrozenie**).

Wyprodukowane cząstki w stanie końcowym (piony, kaony, protony, etc.) a dokładnie ich

1. ilości / względne stosunki produkcji
2. charakterystyki kinematyczne (np. rozkłady pędowe, kątowe)

niosą informacje o stanie początkowym – czy w bardzo wczesnej fazie powstała QGP czy nie.

Jest to więc proces poszlakowy !!! Bezpośrednio plazmy kwarkowo-glonowej nie obserwujemy (nie można “złapać” pojedynczych kwarków).

Plazma kwarkowo-gluonowa

Temperatura: 230-600 MeV (SPS - LHC)

(5 rzędów wielkości cieplej niż we wnętrzu Słońca)

$$T = 173 \text{ MeV} \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ K} \approx 130\,000 \cdot T[\text{jądro Słońca}]$$

Gęstość energii: $\varepsilon \sim 3 \text{ GeV/fm}^3$ (SPS) – 20x gęstość normalnej materii

jądrowej, $\varepsilon > 5 \text{ GeV/fm}^3$ (RHIC), $\varepsilon > 15 \text{ GeV/fm}^3$ (LHC)

Czasy życia: kilka fm/c czyli $\sim 10^{-23} \text{ s}$

Rozmiary: $\sim 10^{-15} - 10^{-14} \text{ m}$

Materia jądrowa w stanie spoczynku:

$$T \cong 0 \text{ MeV}, \varepsilon \cong 0.16 \text{ GeV/fm}^3$$

w jądrach w st. wzbudzenia lub r. o niskiej en. $T < 10\text{-}20 \text{ MeV}$

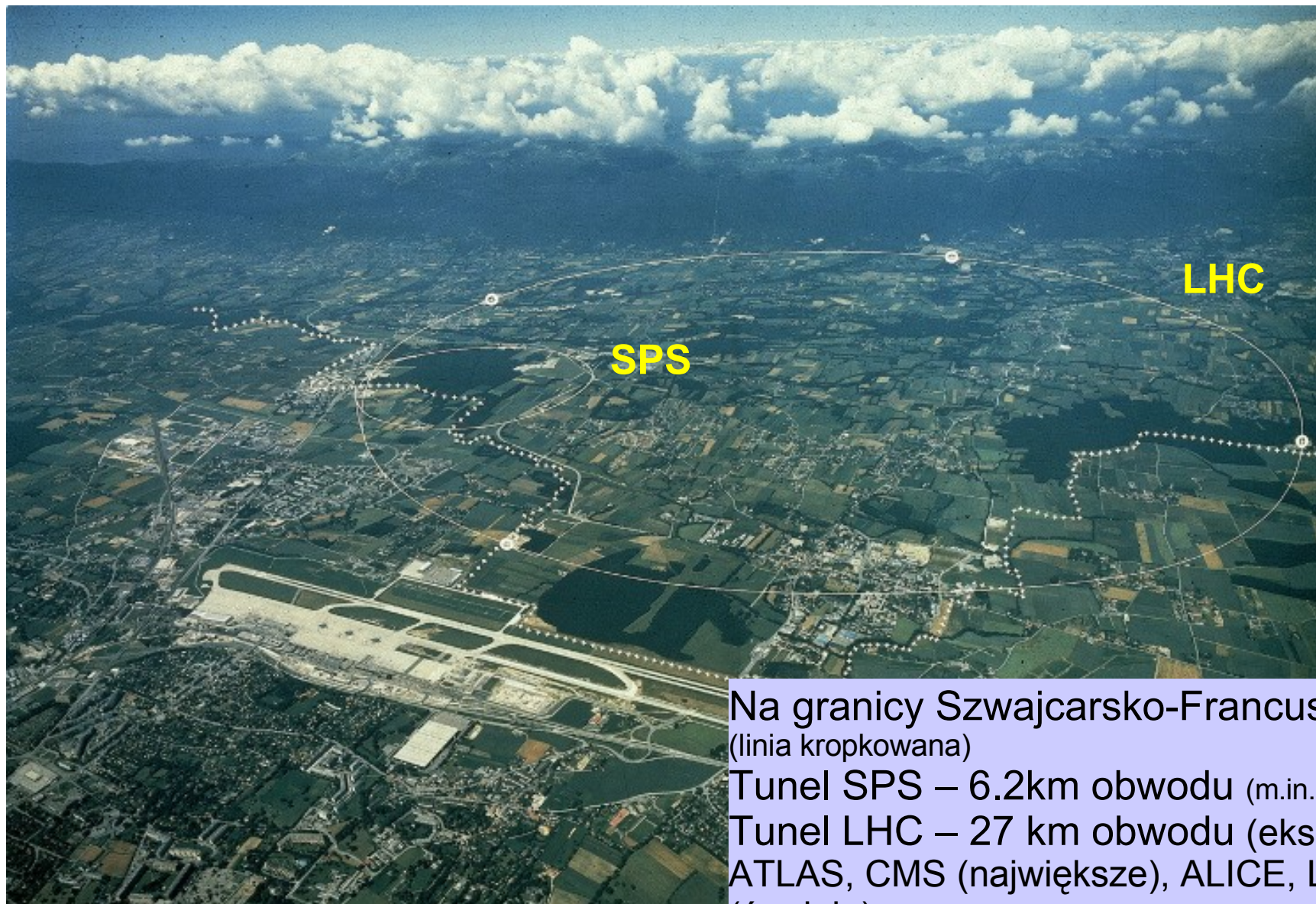
SPS – Super Proton Synchrotron (CERN, Genewa)

RHIC _Relativistic Heavy Ion Collider (BNL, Brookhaven)

LHC – Large Hadron Collider (CERN, Geneva)

Laboratorium CERN (Szwajcaria)

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



Na granicy Szwajcarsko-Francuskiej
(linia kropkowana)

Tunel SPS – 6.2km obwodu (m.in. NA49, NA61)

Tunel LHC – 27 km obwodu (eksperymenty:
ATLAS, CMS (największe), ALICE, LHC-b
(średnie), TOTEM, LHCf, MoEDAL (najmniejsze));
całość 50 -175 m pod ziemią

Eksperymenty NA49 i NA61/SHINE w CERN



- Eksperymenty typu wiązka + stacjonarna tarcza
- Maksymalna prędkość cząstek w wiązce $\beta=0.99998c$
- Zderzenia między innymi:
 - p+p, C+C, Si+Si (najwyższa energia SPS) - w NA49
 - Pb+Pb (5 różnych energii) - w NA49
 - p+p, Be+Be, Ar+Ca, Xe+La (6 różnych energii) - w NA61

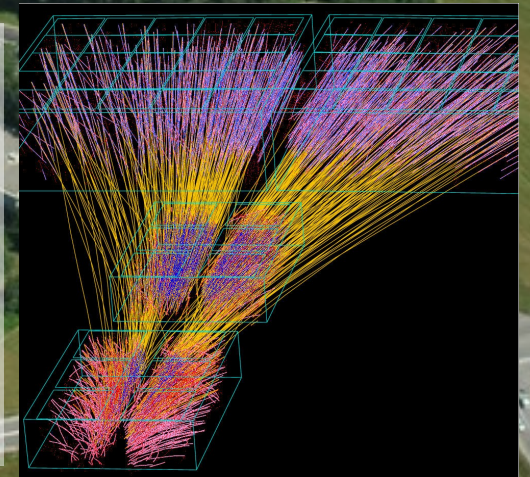
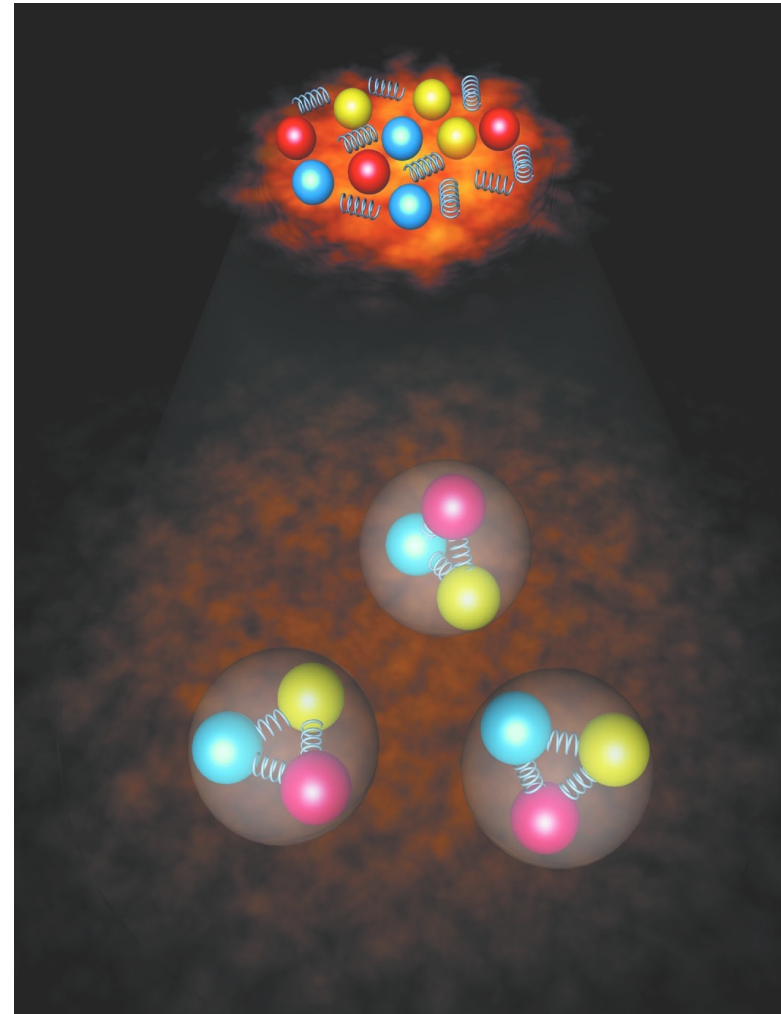


Diagram fazowy silnie oddziałującej materii



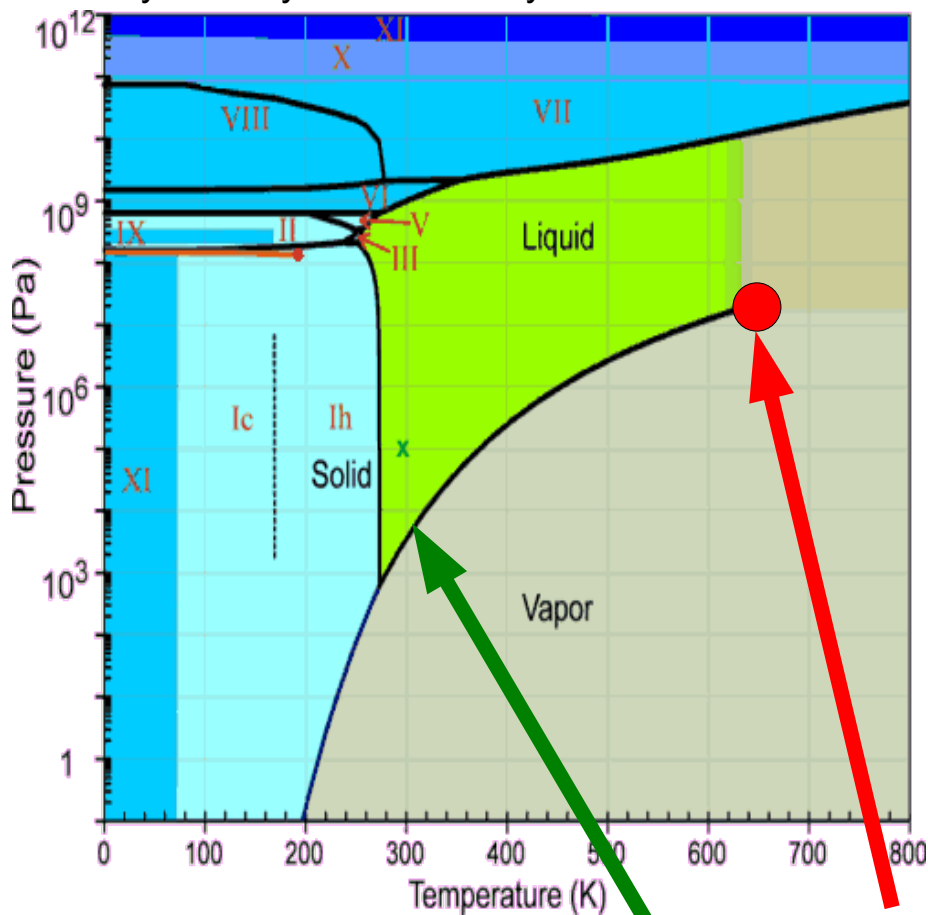
Fazy wody



Fazy silnie oddziałującej materii

Diagram fazowy dla wody jest bardzo dobrze poznany

oprócz cieczy, lodu, pary wiele faz krystalicznych i amorficznych

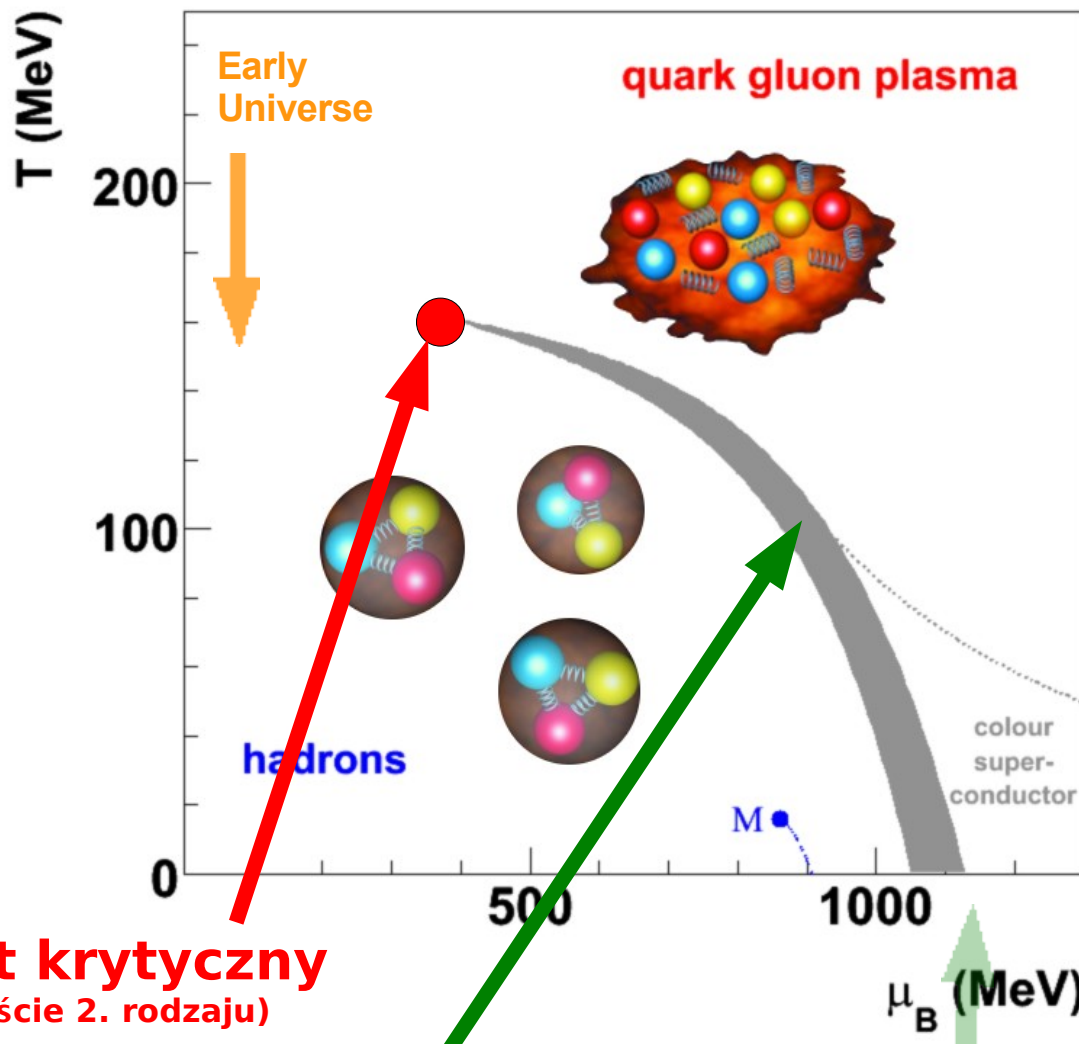


Wzdłuż linii koegzystencji faz zbliżając się do CP gęstość wody spada a pary wzrasta. W i powyżej punktu krytycznego nie da się odróżnić wody od pary

punkt krytyczny
(tu przejście 2. rodzaju)

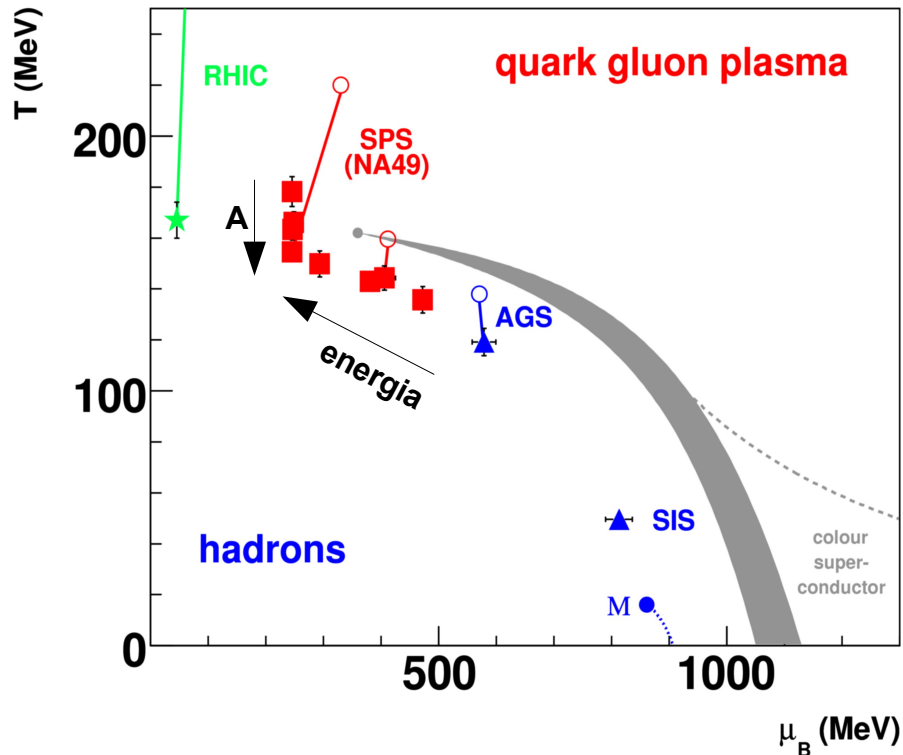
przejście fazowe 1. rodzaju

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



gw. neutronowe $\sim 4-10\rho_0$
 $\rho_0 \sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$ (normalna mat. jądrowa)
 $T \sim 10^5 - 10^9 \text{ K}$

Najciekawszy obszar diagramu fazowego dostępny jest przy SPS!



Otwarte koła: wczesne stadium, po zderzeniu i osiągnięciu równowagi

Zamknięte symbole: punkty wymrozenia chemicznego (koniec oddziaływań nieelastycznych w systemie)

Punktu krytycznego powinno się szukać przy energiach powyżej energii uwolnienia czyli

$$E_{CP} > E_{OD} \approx 30A \text{ GeV (dane NA49)}$$

1. Sygnały energetycznej **granicy uwolnienia** (*onset of deconfinement*) **obserwowane przez NA49 przy $E_{OD} \approx 30A \text{ GeV}$** (Alt et al., PR **C77**, 024903 (2008))

2. **Punkt krytyczny** silnie oddziałującej materii może być zlokalizowany przy energiach SPS

$$\bullet (T^{CP}, \mu_B^{CP}) = (162 \pm 2, 360 \pm 40) \text{ MeV}$$

(Fodor and Katz, JHEP **0404**, 050 (2004))

$$\mu_B^{CP} = 360 \text{ MeV}$$

odpowiada $E_{CP} \approx 50A \text{ GeV}$
(Beccatini, Manninen, Gaździcki, PR **C73**, 044905 (2006))

$$\bullet (T^{CP}/T_c, \mu_B^{CP}/T^{CP}) = (\approx 0.95, 1.1 \pm 0.2)$$

T_c – temperatura przejścia cross-over przy $\mu_B = 0$
Gavai, Gupta, PR **D71**, 114014 (2005)

$$\bullet (T^{CP}, \mu_B^{CP}) = (0.927(5)T_c, 2.60(8)T_c) = (\sim 157, \sim 441) \text{ MeV}$$

Li et al. RIKEN-BNL Workshop, Oct. 4, 2011



W fizyce zderzeń ciężkich jonów bardzo często sprawdza się podejście statystyczne (termodynamiczne), ale rozważmy sytuację....
 Człowiek z psem na spacerze - statystycznie mają po trzy nogi.
Wniosek: nie w każdej sytuacji podejście statystyczne ma sens!

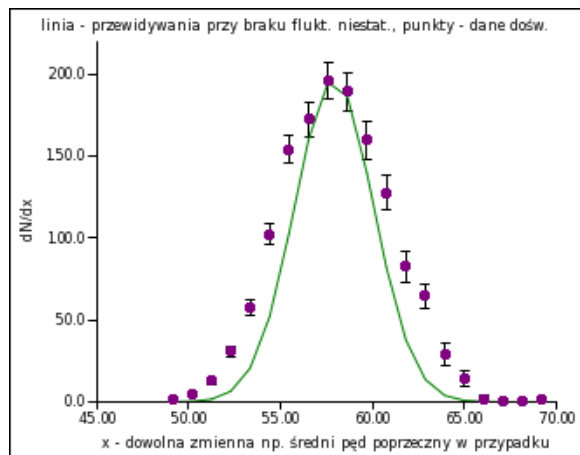
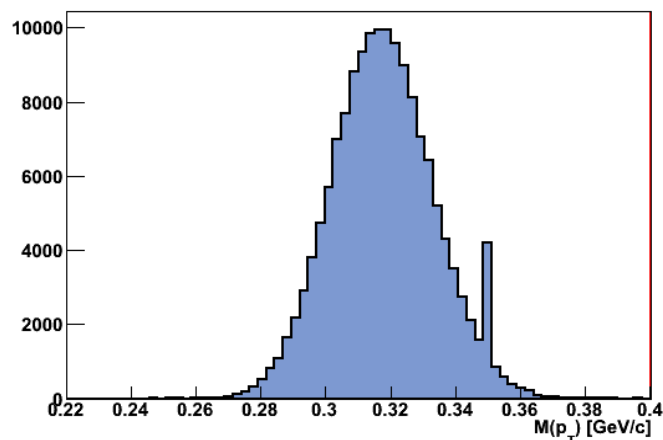
Fluktuacje niestatystyczne (dynamiczne) = wszystkie fluktuacje minus fluktuacje statystyczne (czyli związane z tym, że liczba cząstek $\neq \infty$)

Fluktuacje niestatystyczne mogą występować w:

- **charakterystykach kinematycznych** produkowanych cząstek (p_T , kąt emisji, energia, etc.)
- **charakterystykach globalnych** (średni pęd poprzeczny cząstek w zderzeniu, liczba cząstek w zderzeniu czyli tzw. krotność, stosunki krotności cząstek różnego typu)

Mogą objawiać się **np.** jako:

1. Nieusprawiedliwione statystycznie lokalne maksima (piki) w rozkładach
2. Poszerzone rozkłady w stosunku do przewidywań bez fluktuacji niestatystycznych



Mamy wiele zmiennych które takie efekty ilościowo mierzą, np.:

- **zmienna Φ_{p_T}** - jak średni p_T w każdym zderzeniu odbiega od rozkładu p_T dla wszystkich cząstek ze wszystkich zderzeń
- **zmienna ω** - jak rozkład krotności odbiega od rozkładu Poissona

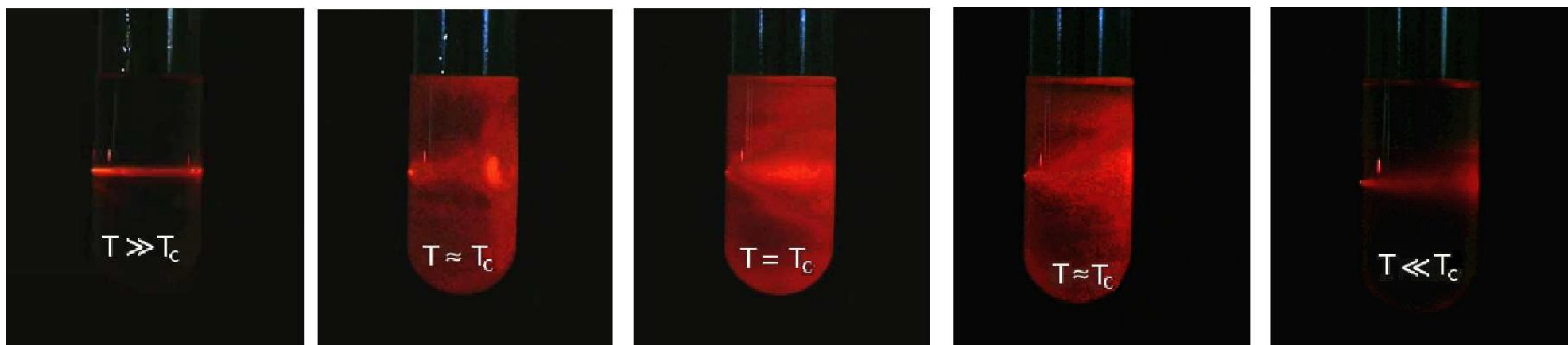
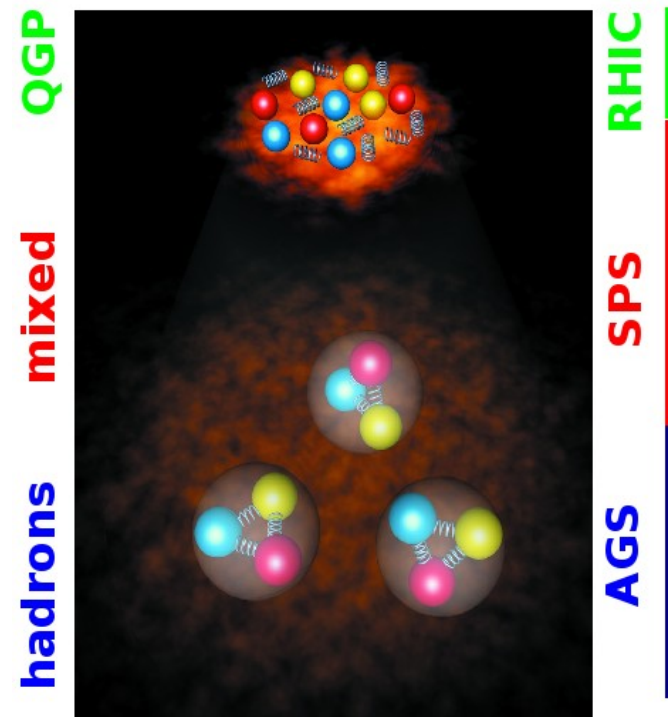
Po co badać fluktuacje dynamiczne?

I. Mogą być sygnaturą uwolnienia (*onset of deconfinement*)

Blisko przejścia fazowego równanie stanu (EoS) zmienia się gwałtownie i może to spowodować **zmiany** różnego typu fluktuacji (w funkcji energii) →

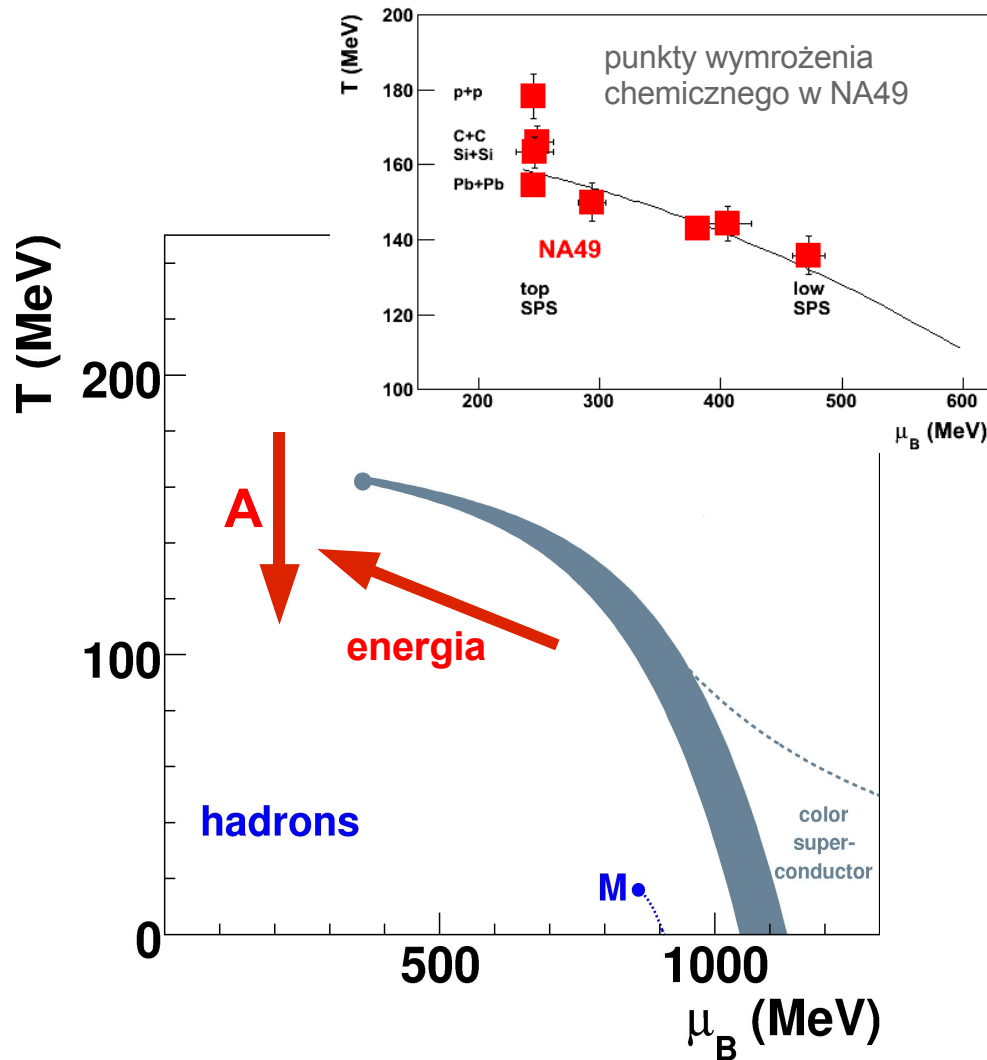
II. Mogą pomóc zlokalizować punkt krytyczny silnie oddziałującej materii

Analogia do krytycznej opalescencji – **zwiększone fluktuacje blisko punktu krytycznego** ↓



Opalescencja krytyczna jest obserwowana w większości cieczy (w tym woda)

Jeśli płyn ochładza się ale tak, że przechodzi blisko punktu krytycznego zmienia się z przezroczystego w opalescentny i znowu w przezroczysty jeśli odpowiednio zbliżamy się a następnie przekraczamy punkt krytyczny. **To niemonotomiczne zachowanie jest z powodu rozpraszania światła na długo-zasięgowych fluktuacjach gęstości.**

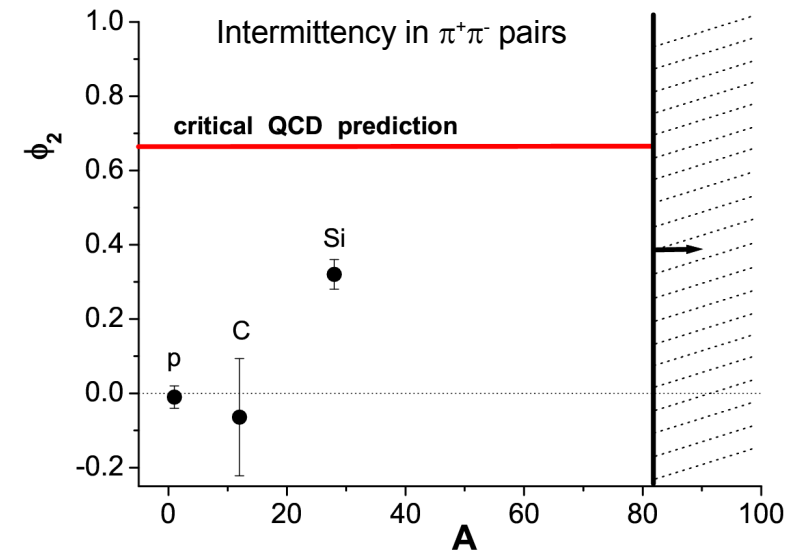
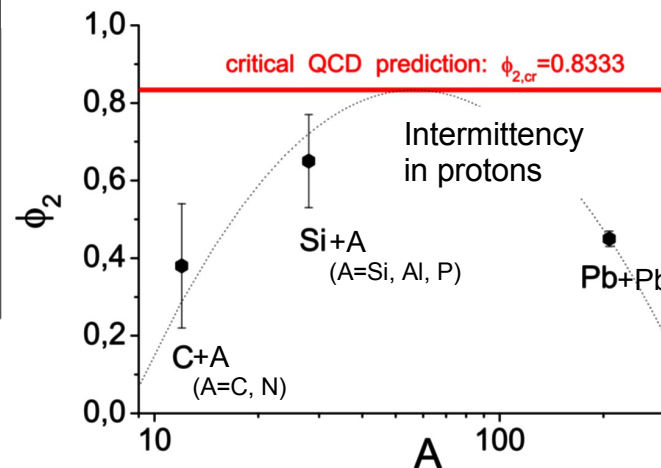
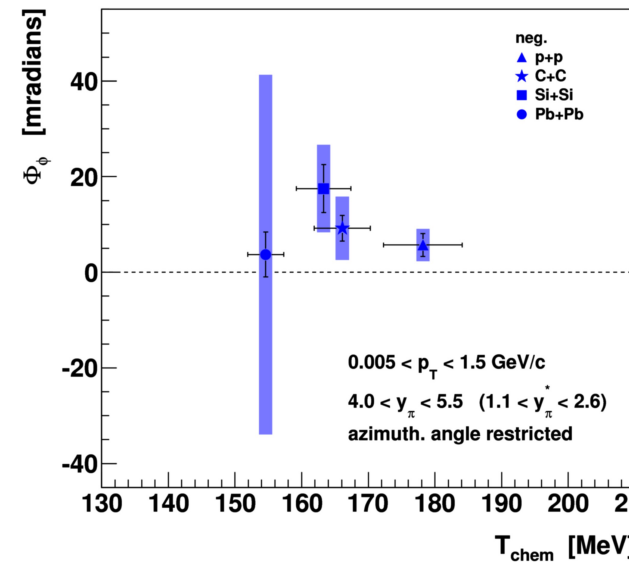
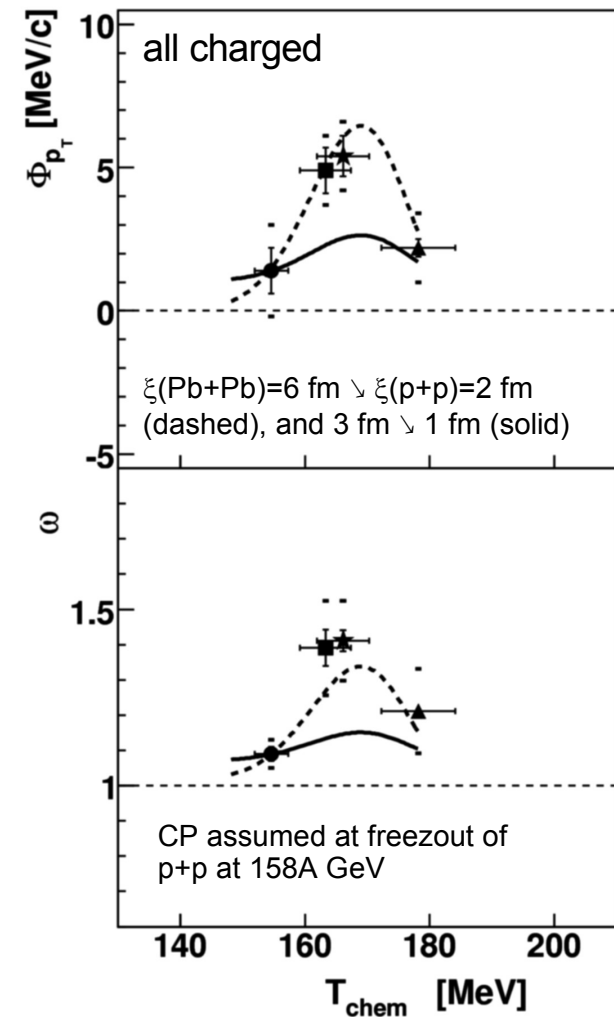


W fizyce zderzeń ciężkich jonów: **niemonotoniczna** zależność fluktuacji dynamicznych w funkcji kontrolnych parametrów takich jak energia, centralność, rozmiar zderzanych jonów pojawi się wtedy, gdy zmiany tych parametrów powodują, że **punkt wymrozenia jest dalej, bliżej i znowu dalej od punktu krytycznego**

Położenie punktów wymrozenia chemicznego (T, μ_B) zależy i od energii i od rozmiaru systemu \Rightarrow możemy poruszać się po diagramie fazowym zmieniając energię, A lub jedno i drugie

Poszukiwanie punktu krytycznego w eksperymencie NA49

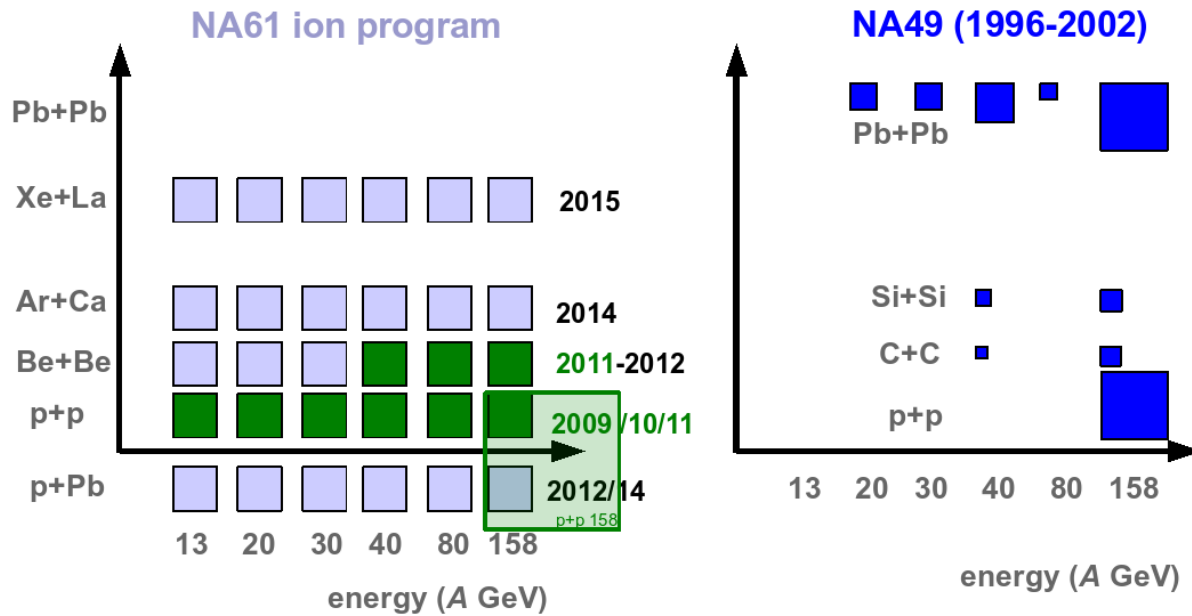
Zależność od rozmiaru systemu (p+p, C+C, Si+Si, Pb+Pb) dla najw. energii SPS



Fluktuacje

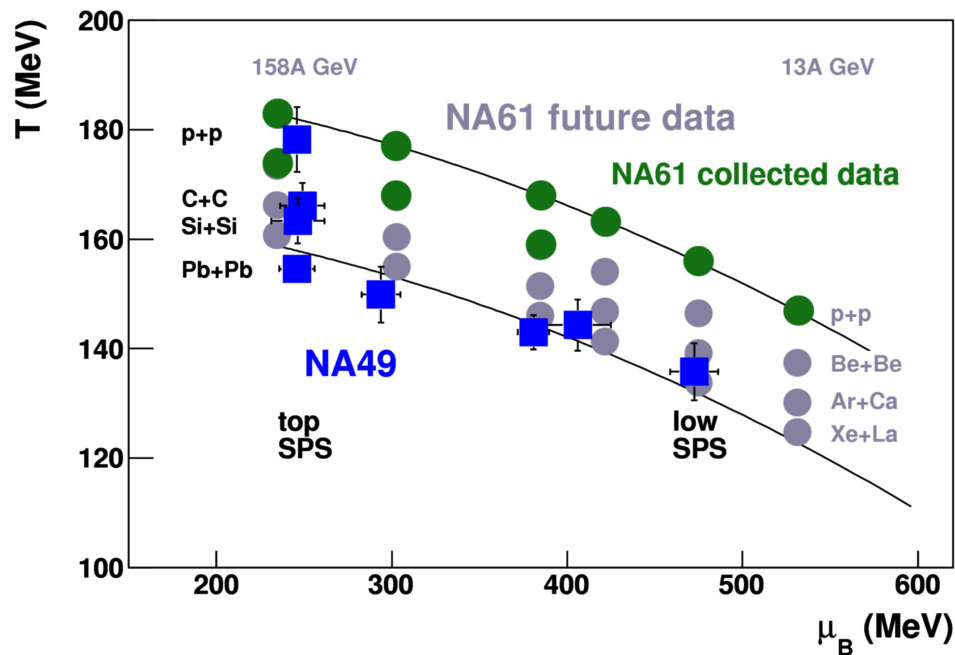
średniego pędu poprzecznego
 krotności (liczba cząstek na zderzenie)
 średniego kąta azymutalnego (?)
 krotności (gęstości) par $\pi^+\pi^-$
 krotności (gęstości) protonów
pokazują maksimum dla zderzeń Si+Si (Si+A) przy 158A GeV (najw. energia SPS)

→ **silna motywacja dla przyszłych eksperymentów**

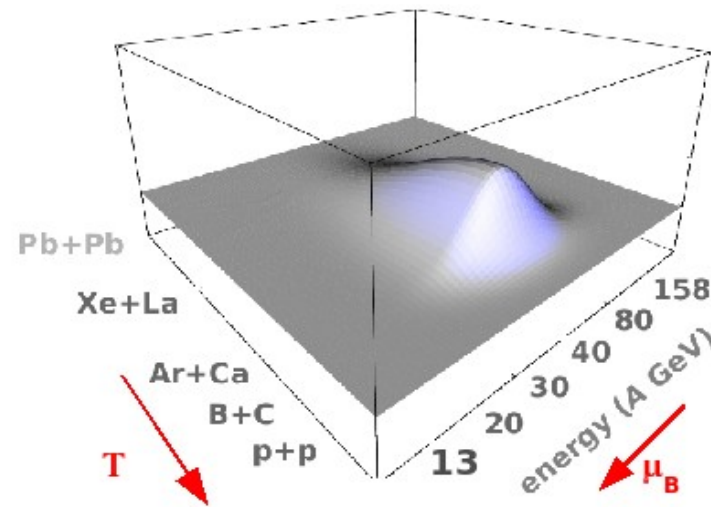


Obszerny **skan** w pełnym obszarze **energii** SPS (pęd wiązki 13A-158A GeV/c) przy użyciu **jąderek o małych i pośrednich masach**

Pierwszy raz w historii taki skan 2D (energia, rozmiar systemu) będzie przeprowadzony

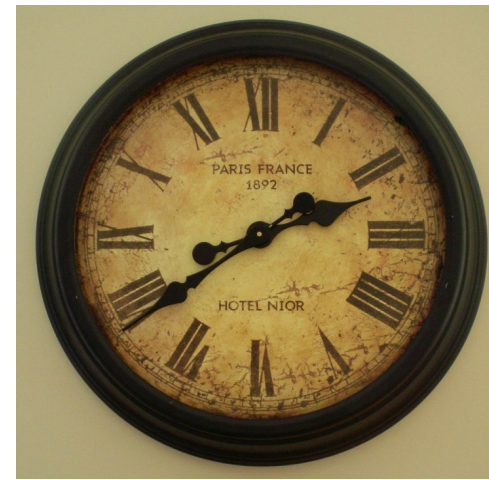


sygnał CP
 ω, Φ_{pT}, \dots



Materia którą produkujemy

- Wiek Wszechświata: rzędu 15 miliardów lat = 10^{17} s =
100 000 000 000 000 000 s (100 petasekund)
- Istnienie gatunku ludzkiego: rzędu 10^{13} s (10 terasekund)
- Czas życia człowieka: rzędu 10^9 s (1 gigasekunda)
- Czas trwania urlopu: rzędu 10^6 s (1 megasekunda)
- Czas tego wykładu: rzędu 10^3 s (1 kilosekunda)
- Czas jednego oddechu: rzędu 10^0 s (1 sekunda)
- Czas trwania błysku w lampie błyskowej: rzędu 10^{-3} s (1 milisekunda)
- Cykl zegara Pentium™: rzędu 10^{-9} s (1 nanosekunda)
- Dokładność zegara atomowego na dzień: rzędu 10^{-10} s (100 pikosekund)
- **Czas życia źródła które tworzymy w zderzeniach: rzędu 10^{-23} s =
0.000000000000000000000001 s (10 jektosekund)**



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

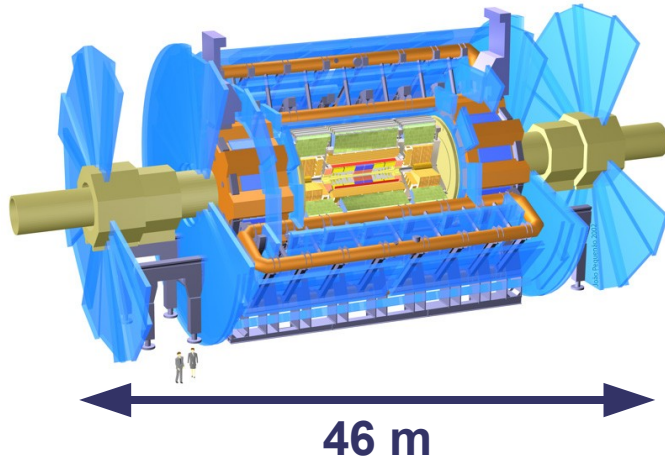
Materia którą produkujemy

- Średnica Galaktyki Andromedy: rzędu 10^{21} m =
1 000 000 000 000 000 000 000 m (1 zettametr)
- Najbliższa gwiazda: rzędu 10^{14} m (10 petametrów)
- Średnica Słońca: rzędu 10^9 m (1 gigametr)
- Średnia Ziemi: rzędu 10^7 m (10 megametrów)
- Promień akceleratora SPS: rzędu 10^3 m (1 kilometr)
- Wzrost człowieka: rzędu 10^0 m (1 metr)
- Średnica typowej ameby: rzędu 10^{-4} m (100 mikrometrów)
- Średnia typowej bakterii: rzędu 10^{-6} m (1 mikrometr)
- Średnica typowego wirusa: rzędu 10^{-8} m (10 nanometrów)
- Średnica atomu: rzędu 10^{-10} m (100 pikometrów)
- **Rozmiar źródła które tworzymy w zderzeniach: rzędu 10^{-15} m =
0.0000000000000001 (1 femtometr)**



Jesteśmy mniejsi od Słońca 10^9 razy. Ale to nic w porównaniu z tym, że w trakcie zderzenia tworzymy źródło które jest 10^{15} razy mniejsze od nas.

Żeby zbadać tę maleńką “kropelkę” budujemy detektory wielkości domu
(... nawet wielorodzinnego domu)



Detektor ATLAS:
25m wysokości, 46m długości
(zająłby połowę katedry Notre Dame)



Paradoks:
im mniejszy obiekt który chcemy badać tym większe detektory musimy zbudować.

Ale mamy nadzieję, że pozwoli to zrozumieć ewolucję jaką przeszedł nasz Wszechświat od niewyobrażalnie małych do niewyobrażalnie dużych rozmiarów.

Slajdy dodatkowe

Skale i jednostki używane w fizyce wysokich energii

typowe rozmiary przestrzenne 10^{-15} m a typowe masy rzędu 10^{-27} kg

w fizyce jądrowej:

Jednostka energii [eV] = 1.602×10^{-19} J

Jednostka pędu [eV/c]

Jednostka masy [eV/c²] = 1.78×10^{-36} kg

masa protonu $mc^2 = 0.938$ GeV

1 fm = 10^{-15} m

1b = 10^{-28} m²

dodatkowo w fizyce wysokich energii:

naturalny układ jednostek: $\hbar=c=1$ ($\hbar=h/2\pi$)

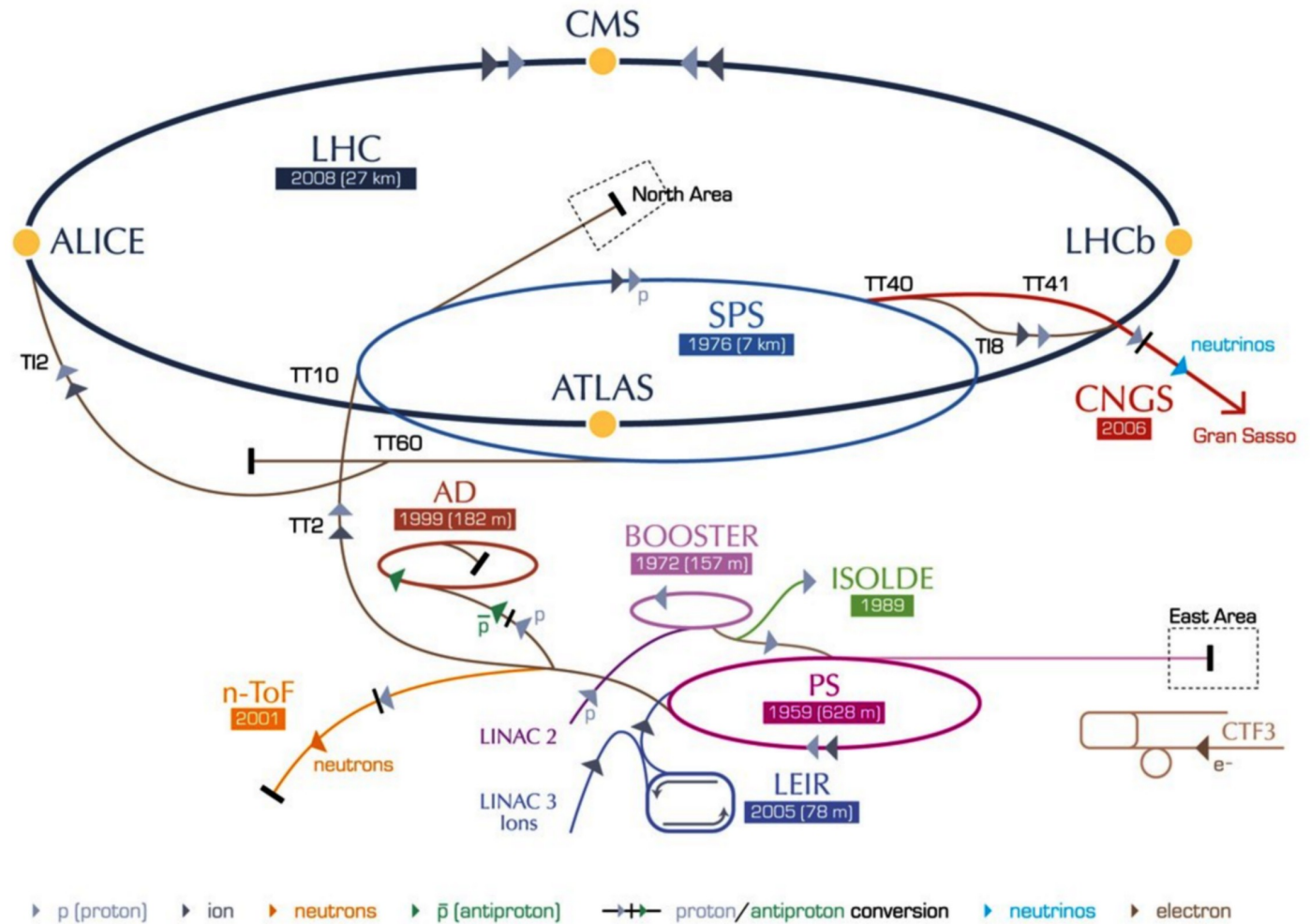
$c=1$ i jest bezwymiarowe tzn. $c \neq 1$ m/s ale $c \equiv 1$

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

całkowita energia: $E^2 = (\mathbf{p}c)^2 + (mc^2)^2 \rightarrow E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$

- Energy: 1 GeV = $1.6 \cdot 10^{-3}$ erg;
- Temperature: 1 GeV = $1.2 \cdot 10^{13}$ K, 1 K = $0.8 \cdot 10^{-13}$ GeV;
- Mass: 1 GeV = $1.8 \cdot 10^{-24}$ grams;
- Length: 1 GeV⁻¹ = $2 \cdot 10^{-14}$ cm, 1 cm = $5 \cdot 10^{13}$ GeV⁻¹;
- Time: 1 GeV⁻¹ = $6.6 \cdot 10^{-25}$ s, 1 s = $1.5 \cdot 10^{24}$ GeV⁻¹;

Schemat akceleratorów w CERN

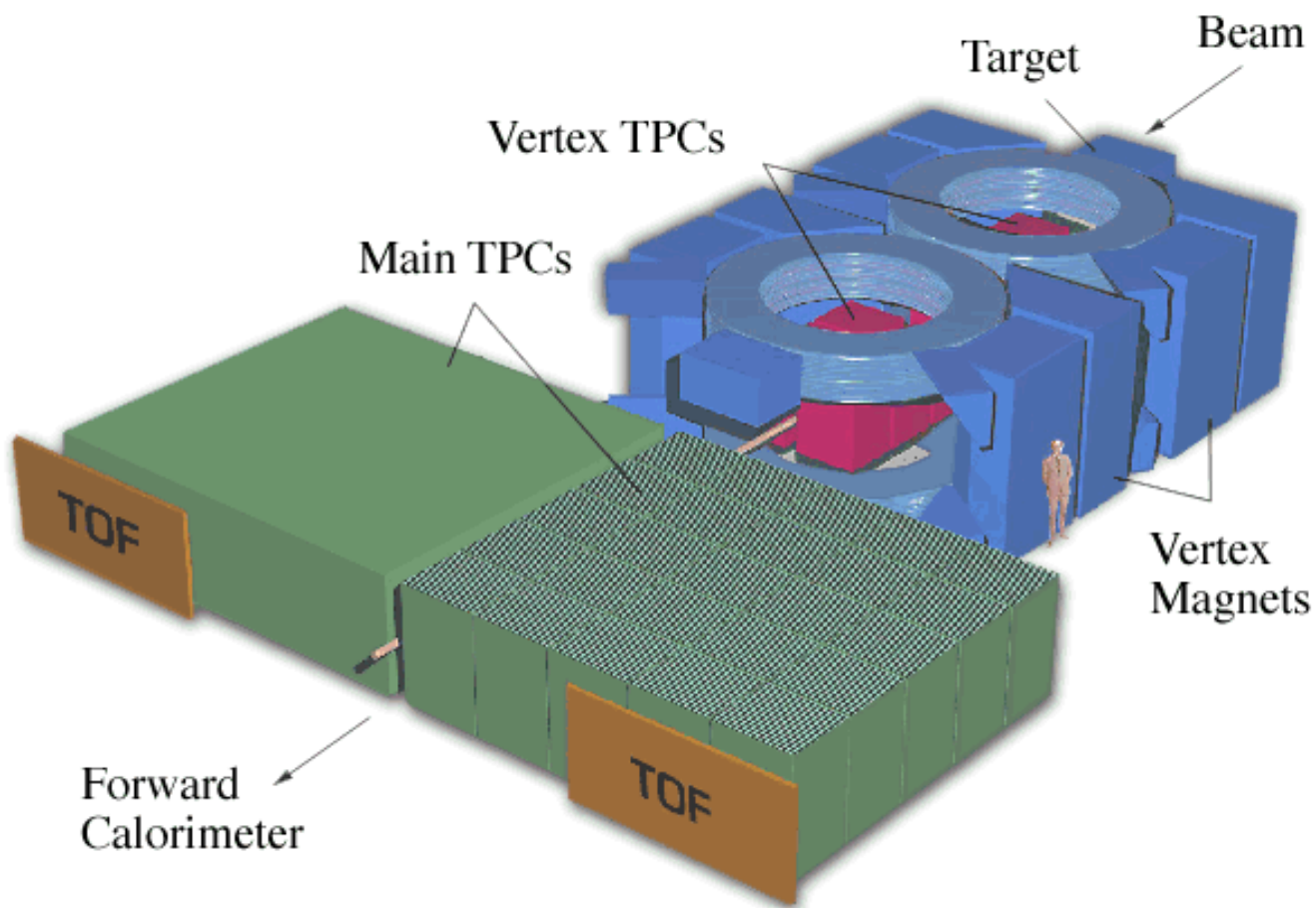


Przyspieszanie kolejno w:

1. LINAC
2. BOOSTER
3. PS
4. SPS – 7 km obwodu
5. LHC – 27 km obwodu; próżnia w rurze akcel. podobna do tej w kosmosie, 9300 nadprzewodzących magnesów w temp. -271.3°C czyli 1.9 K (najniżej we Wszechświecie!) - do chłodzenia ciekły hel

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Eksperyment NA49 przy akceleratorze SPS w CERN (Szwajcaria)



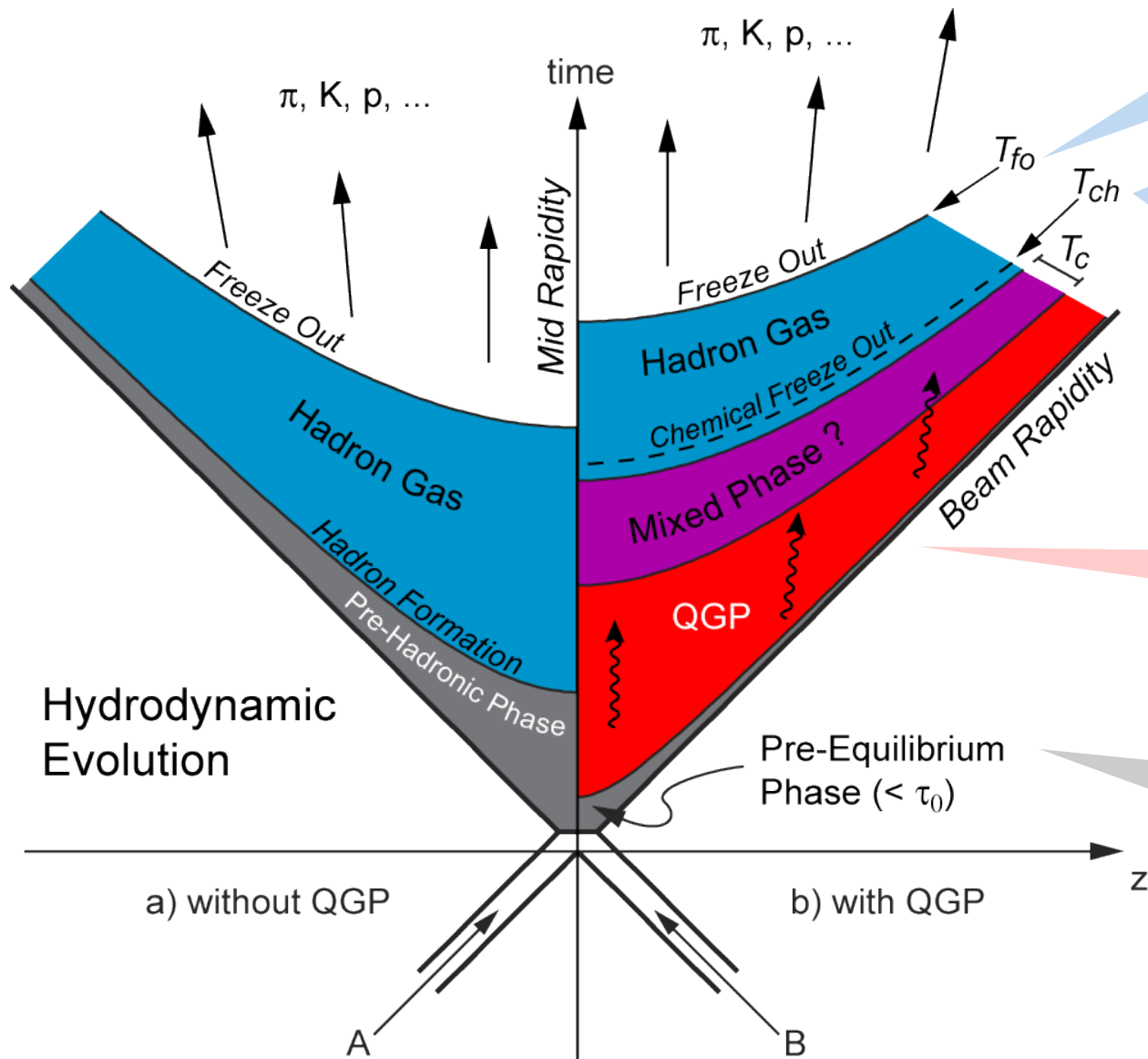
Jony przyspieszane do prędkości bliskiej c !
max. 1500 nowych cząstek naładowanych

VTPC(1/2) w polu B (max. 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

Ewolucja czasowo-przestrzenna zderzenia ciężko-jonowego



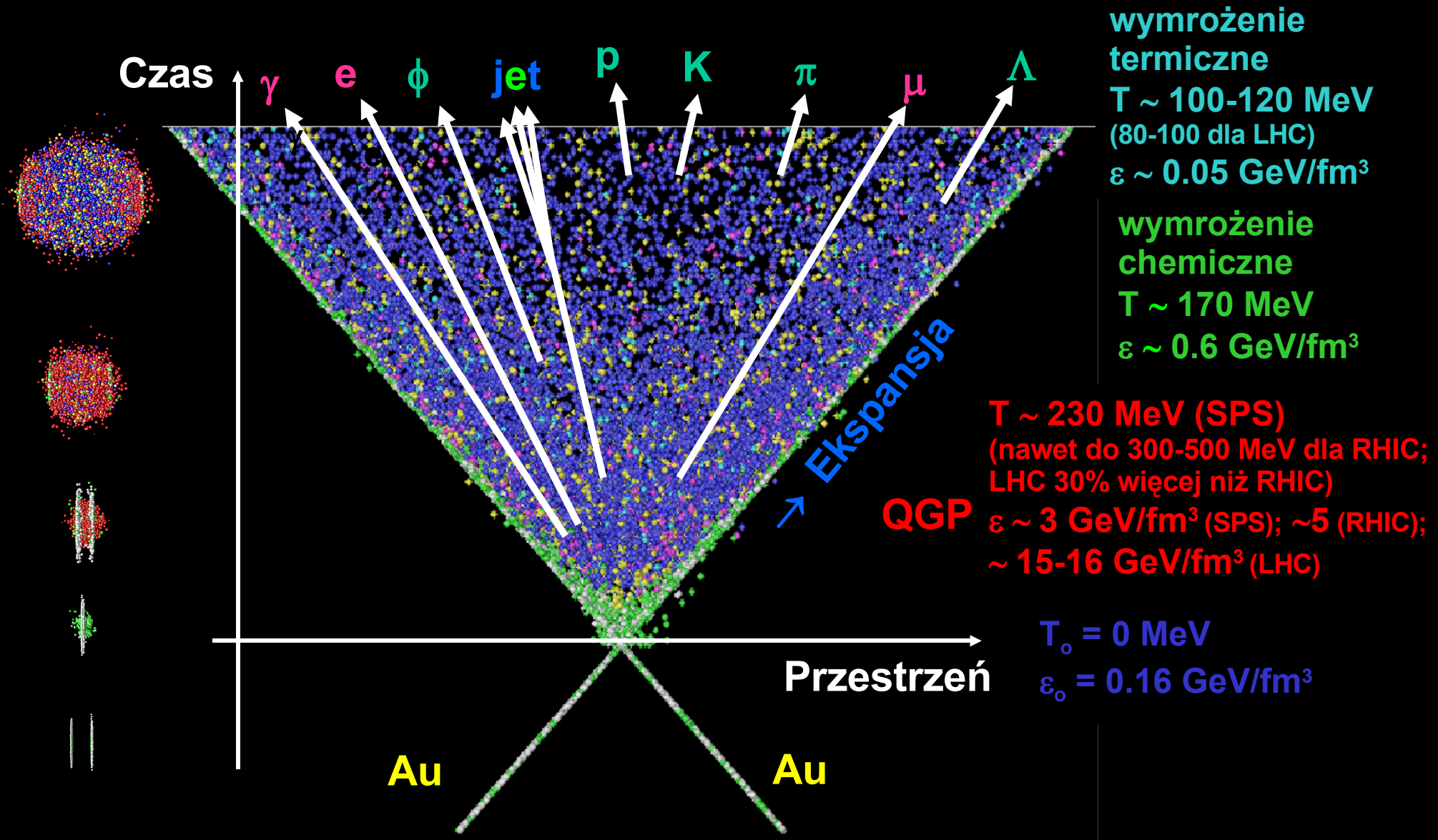
wymrożenie termiczne (późniejsze) – ustalenie pędów produkowanych cząstek czyli koniec oddziaływań elastycznych

wymrożenie chemiczne (wcześniejsze) – ustalenie składu (*chemical composition*) produkowanych cząstek (problemy: rezonanse) czyli koniec oddziaływań nieelastycznych

Czas życia **QGP** przed hadronizacją ~ kilka fm/c

formacja partonów i termalizacja
 $\tau_0 \sim 1$ fm/c (SPS);
 ~ 0.6 fm/c (RHIC)

Temperatura spada podczas ekspansji $\Rightarrow T_{chem} \geq T_{therm}$



Sygnatury QGP - z jakich etapów zderzenia najczęściej pochodzą

**jako że $\epsilon \propto T^4$ to wzrost ϵ w LHC o czynnik 3 odpowiada wzrostowi T QGP o ok. 30%
 uwaga: w liczeniu ϵ czas formacji QGP τ_0 przyjęto taki sam dla RHIC i LHC**

Etapy ewolucji:

1. Wielki Wybuch – na początku punktowa osobliwość o praktycznie nieskończonej gęstości energii (postulat Lemaitre'a (1923) i Gamow'a (1948))

2. Era Plancka ($0 - 10^{-43}$ s) – gęstość większa niż 10^{97} kg/m³; einsteinowska teoria grawitacji nie obowiązuje i nie umiemy obecnie opisać zjawisk jakie wtedy zachodziły (może kwantowa teoria grawitacji kiedyś opisze); zdecydowana dominacja energii nad materią. Na zakończenie ery Planck'a temperatura wynosiła 10^{32} K. **Era superstrun ???**

3. Era plazmy kwarkowo-gluonowej (hadronowa) - od 10^{-43} do 10^{-4} sekundy

a) **Era GUT** (unifikacja wszystkich oddziaływań, możliwe że istnieją bardzo ciężkie bozony przenoszące zunifikowane oddziaływanie), następnie oddzielają się silne (10^{-35} s, temp. 10^{28} K) i to prawdopodobnie powoduje:

b) **Superszybką “inflację”** (od 10^{-35} do 10^{-33} s) - w małym ułamku sekundy Wszechświat z rozmiarów atomu ekspanduje do rozmiarów grejpfruta

c) Po inflacji: Wszechświat to gorąca **“zupa” kwarków, leptonów i innych cząstek** (antymaterii jest dużo), wszystkie typy kwarków (również ciężkie)

d) Wszechświat stygnie, ciężkie kwarki rozpadają się, lżejsze **kwarki łączą się w hadrony** (protony, neutrony, hiperony, piony, kaony, rezonanse); **zanika antymateria** (w wyniku zjawisk anihilacji), nowa produkuje się rzadziej (łamane CP??)

Przejście QGP → hadrony najprawdopodobniej gdy T spadła do 170 MeV i gęstość energii do około 1 GeV/fm³ (około 30 μs po WW – J. Rafelski, arXiv:1112.4890; niektóre źródła podają też od jednej do kilku mikrosekund po WW)

4. Era leptonowa - od 10^{-4} sekundy do 10 sekund

... właśnie minęła sekunda od chwili Wielkiego Wybuchu....

a) teraz leptony wysuwają się na pierwsze miejsce, duża produkcja par lepton-antylepton, następnie anihilacja cięższych (mionów i taonów), zostają głównie elektrony

b) pod koniec ery: protony i neutrony łączą się w jądra atomowe – głównie wodoru i helu (oddzielna nazwa: **era nukleosyntezy – odpowiednik wymrożenia chemicznego**)

5. Era promieniowania - od 10 sekund do 300 000 lat

elektrony i pozytony zanihilowały (pozostała niewielka nadwyżka elektronów); Wszechświat wypełniony głównie promieniowaniem (niewielka domieszka protonów, neutronów i cząstek alfa)

Po 300 000 latach temperatura spadła do 3000 K; jądra atomowe i elektrony łączą się trwale w atomy; fotony poruszają się niemal swobodnie

Termiczne wymrożenie po WW → gdy T spadała do 3000 K – “uwolnienie” promieniowania elektromagnetycznego (pędy fotonów ustalone przy $T=3000\text{K}$)

6. Era gwiazdowa (galaktyczna) od 300 000 lat do dzisiaj

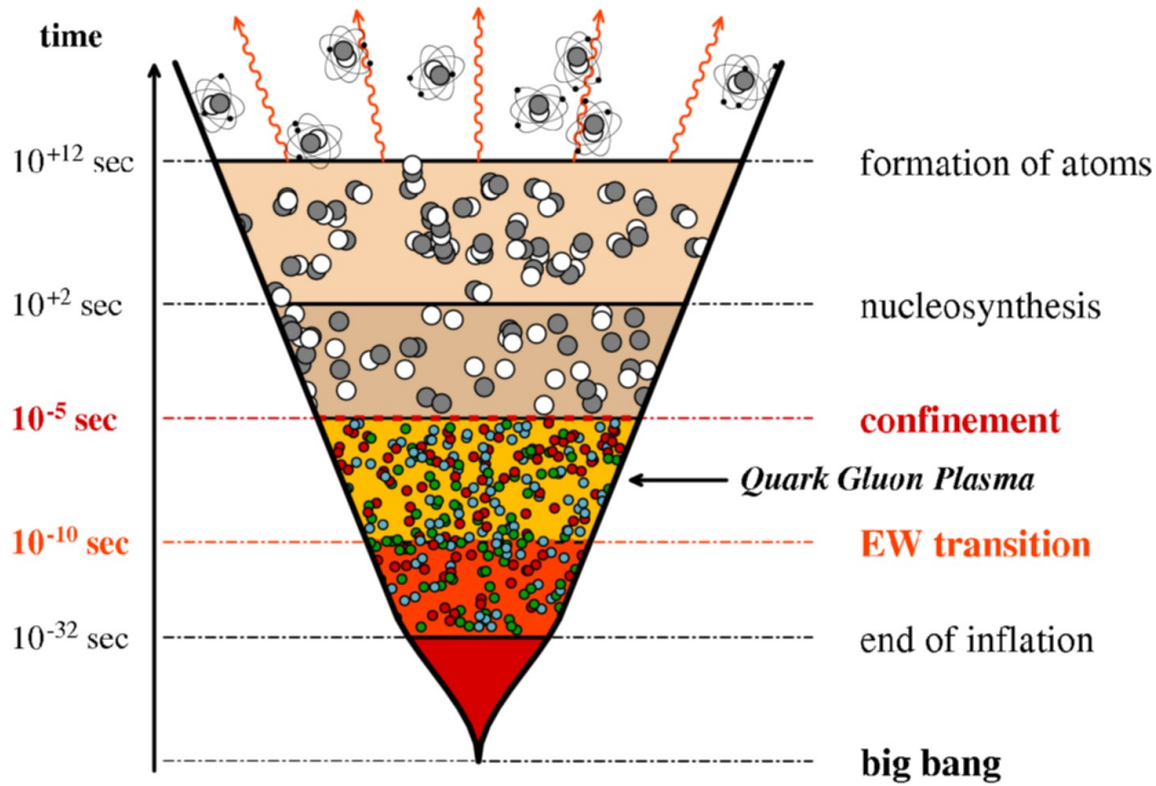
a) od uwolnienia promieniowania aż do chwili, w której pojawiły się pierwsze gwiazdy (100 mln lat od Wielkiego Wybuchu), we Wszechświecie panowała niemal ciemność (epoka ciemności).

b) w ciemności toczą się procesy doprowadzające do powstania galaktyk: grawitacja powoduje koalescencję gazu wodoru i helu w chmury → skupiska gazu kolapsują → pierwsze gwiazdy, galaktyki

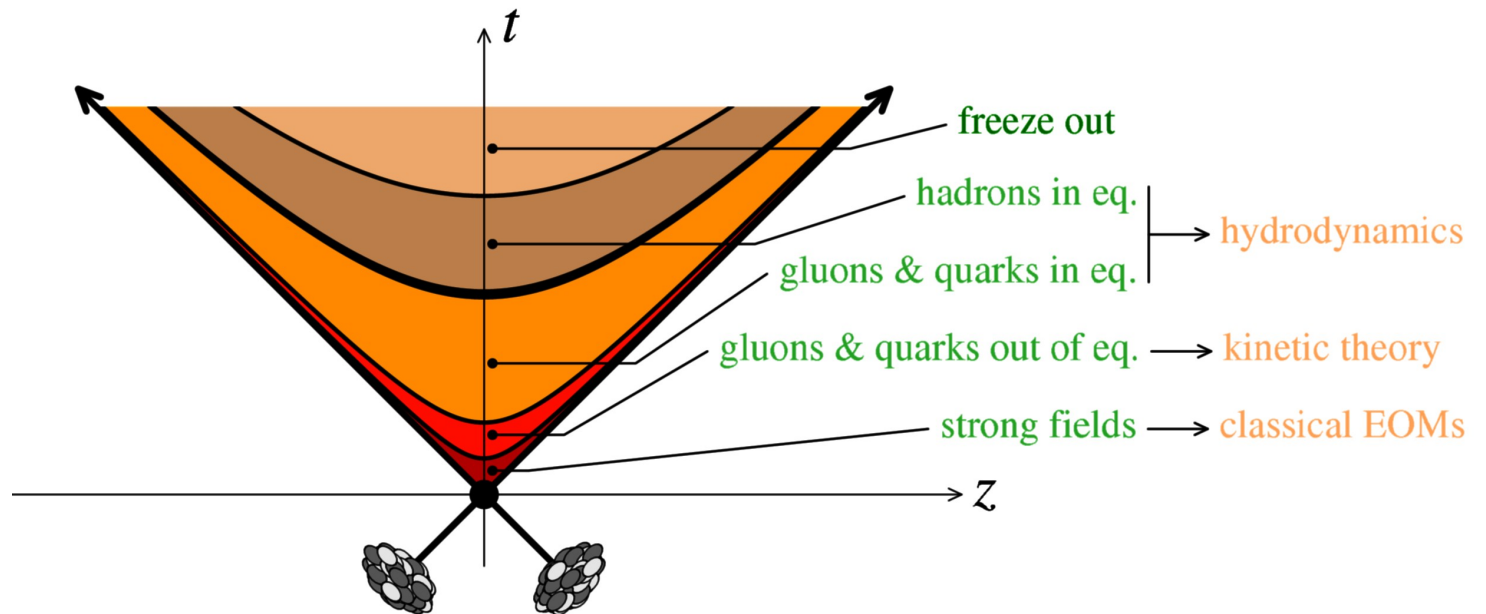
Koniec ery ciemności !

c) pierwsze gwiazdy zaczynają umierać wyrzucając cięższe pierwiastki, które mogą być użyte do formowania się nowych gwiazd i planet; każde kolejne pokolenie gwiazd (z zapadających się obłoków gazu), zawiera coraz większą ilość pierwiastków ciężkich.

Słońce jest gwiazdą drugiej lub trzeciej generacji dlatego zawiera w swym wnętrzu od 1% do 2% pierwiastków ciężkich.

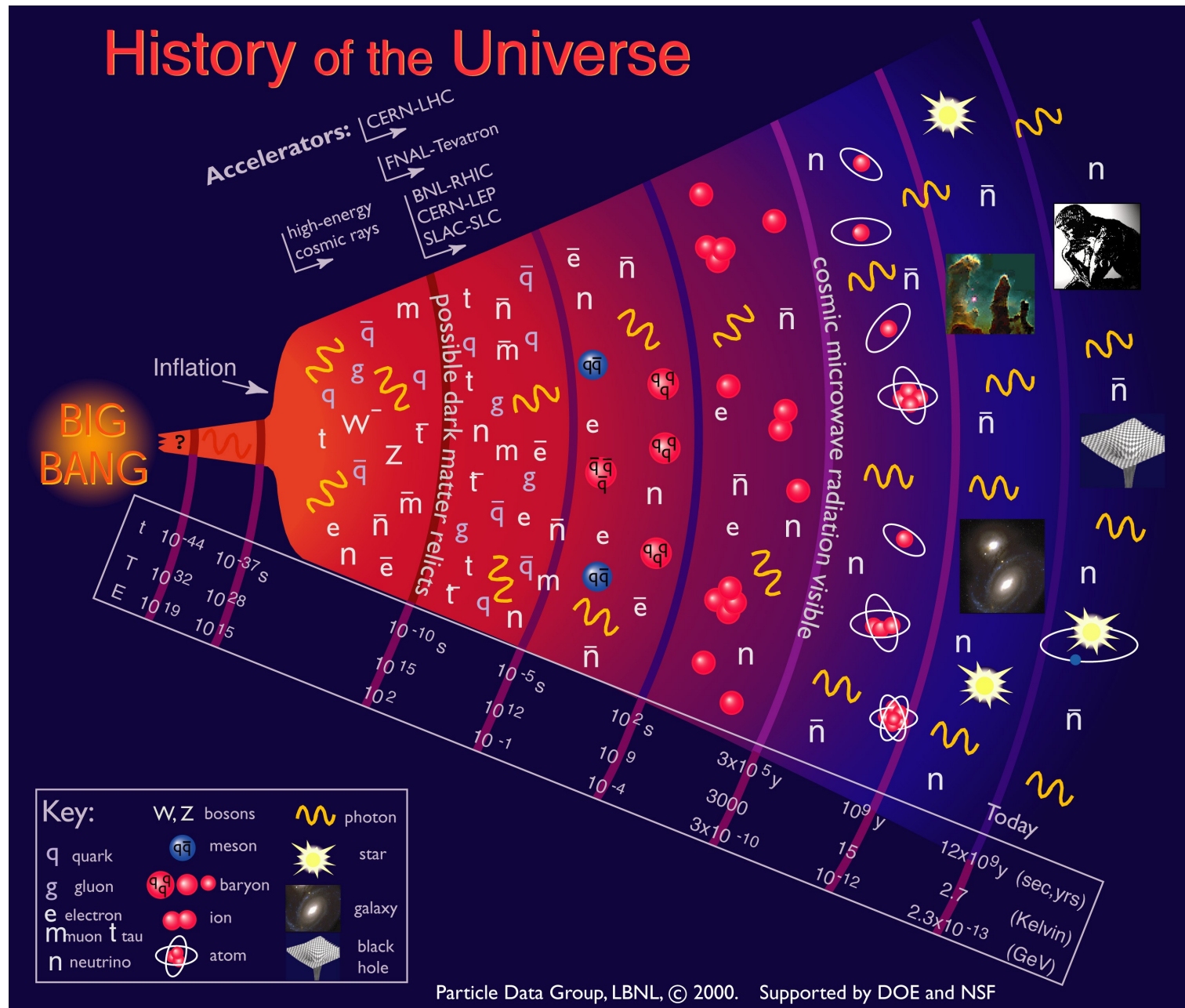


Porównanie Big Bang i Little Bang



Rys. arXiv:0711.4947

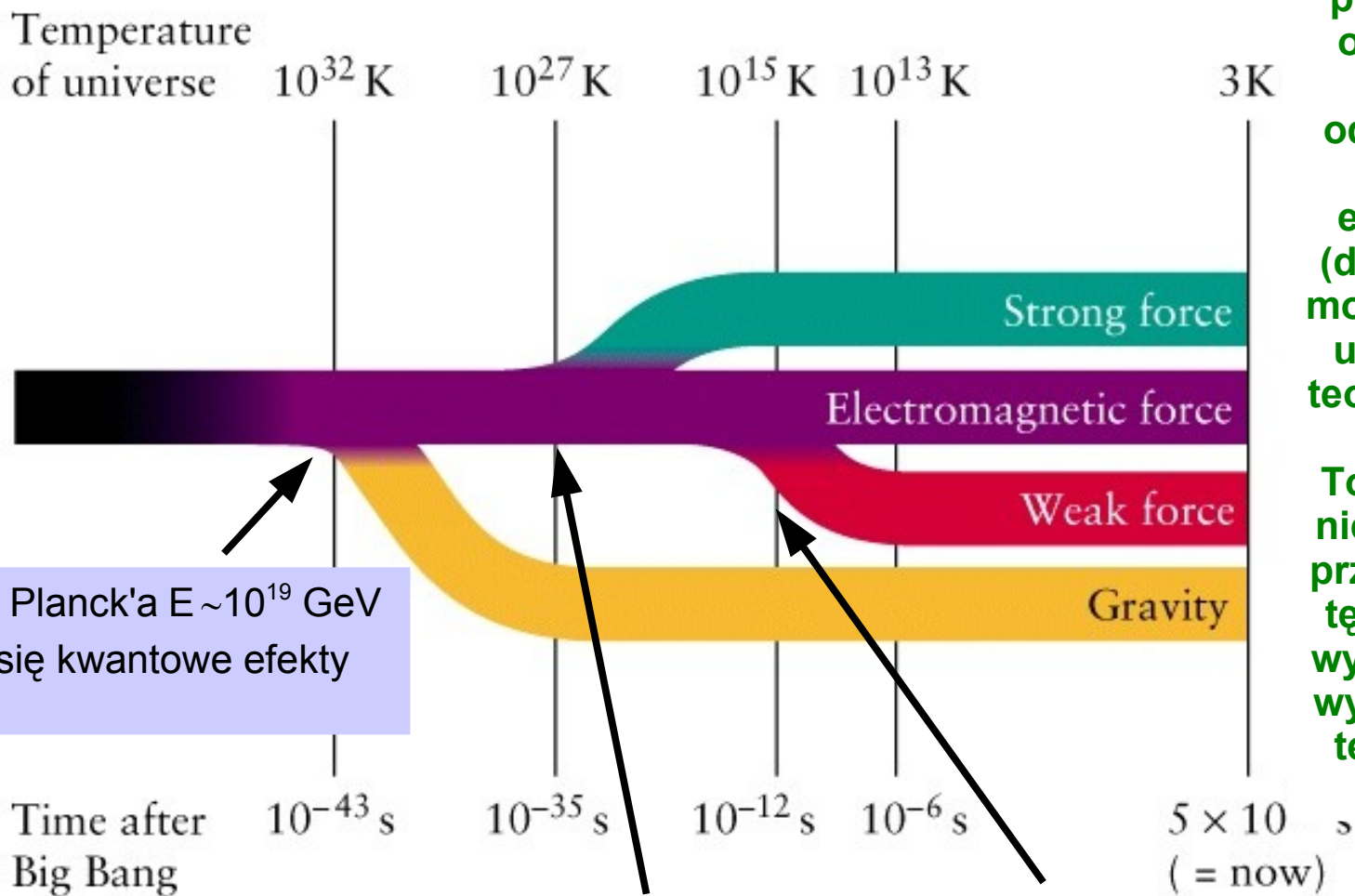
My w laboratoriach próbujemy utworzyć QGP – warunki podobne to tych jakie panowały zaraz po BB. Rysunek pokazuje jak daleko w głąb ewolucji sięgają współczesne akceleratory (t, T, E)



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.

Dla niskich energii (prawa strona rysunku) każde z oddziaływań opisujemy oddzielną teorią: OTW, teor. Fermiego, QED, QCD (czyli oddział. są rozdzielone)



skala (masa) Planck'a $E \sim 10^{19}$ GeV istotne stają się kwantowe efekty grawitacyjne

skala energii $E_{GUT} \sim 10^{15} - 10^{16}$ GeV tu działają teorie wielkiej unifikacji (GUT)

skala energii $E \sim 10^2$ GeV (akcelerator LEP w CERN)

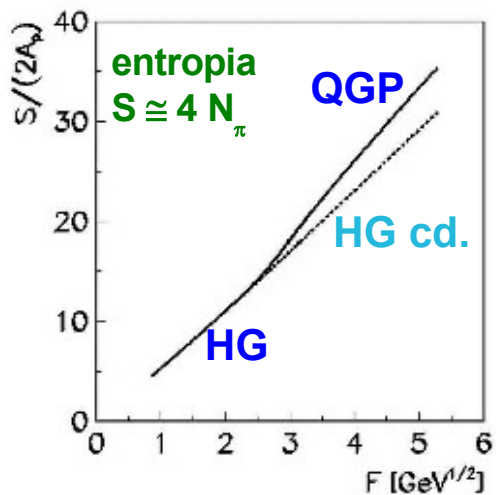
Uwaga: począwszy od energii LEP (w c.m.s. rzędu 100 GeV) nie ma potrzeby używać oddzielnie teorii Fermiego (do oddział. słabych) oraz elektrodynamiki (do oddział. EM) a można/powinno się używać wspólnej teorii elektroslabej.

To jednak jeszcze nie oznacza że np. przekrój czynny na tę samą reakcję z wymianą fotonu i z wymianą Z^0 będzie ten sam już przy energii LEP

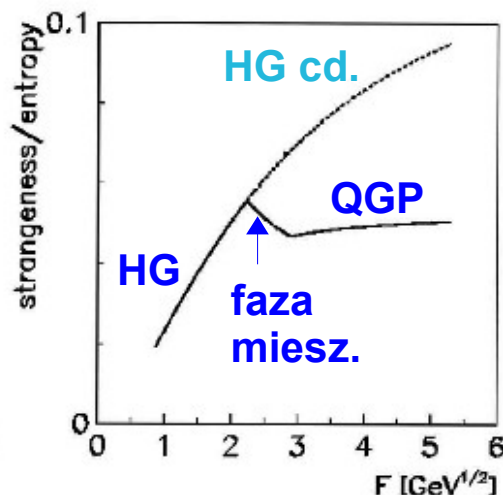
Przewidywania modelu SMES dotyczące produkcji entropii (piony), dziwności oraz temperatury

$$F \simeq \sqrt{\sqrt{s}}$$

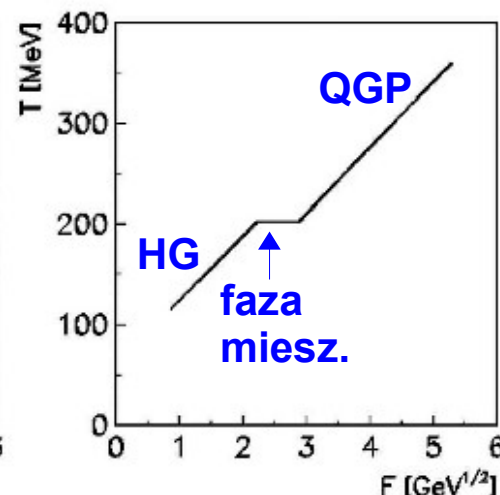
“kink”



“horn”

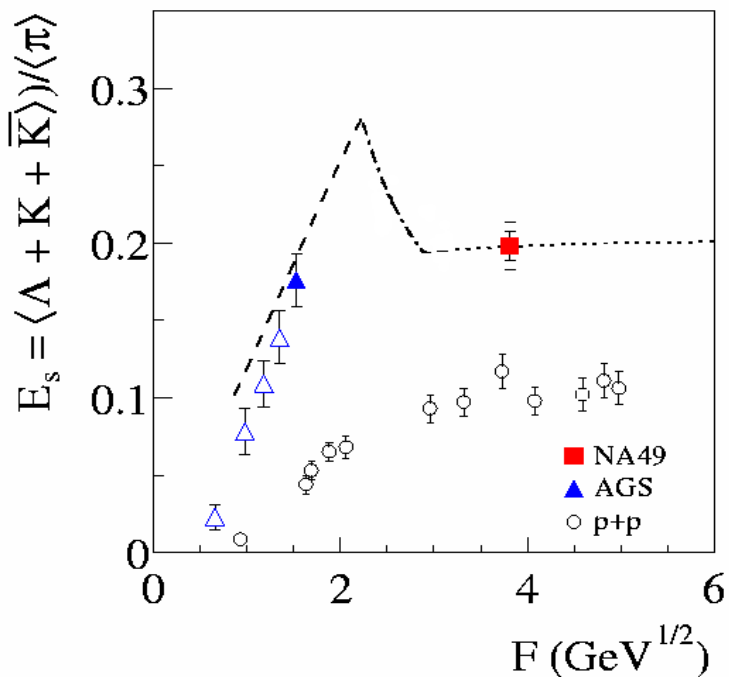


“step”



Do przewidywań SMES założono przejście fazowe dla energii w środku masy = 7 GeV

Te “dziwne” kształty ⇐ w związku z inną liczbą stopni swobody w QGP i w gazie hadronowym



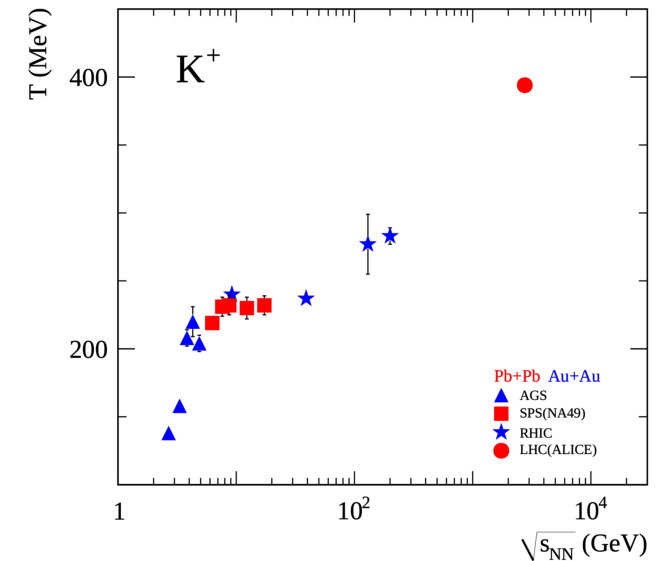
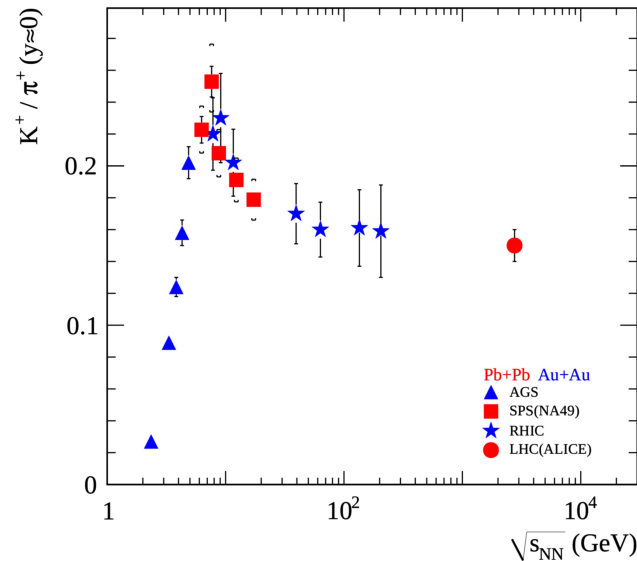
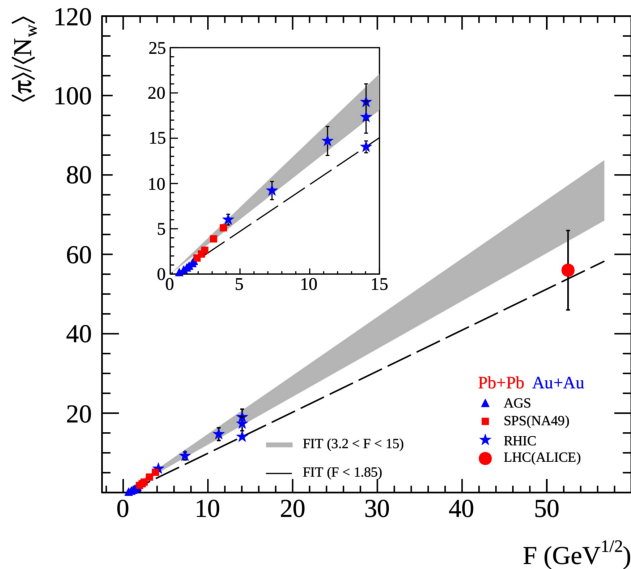
$$\text{Zmienna Fermiego } F \equiv \left[\frac{(\sqrt{s_{NN}} - 2m_N)^3}{\sqrt{s_{NN}}} \right]^{1/4}$$

A_p – liczba nukleonów z jednego jądra

NA49: stosunek produkcji cząstek zaw. kwark **s** i **antys do pionów** w funkcji energii zderzenia
kilkanaście lat temu → zaraz po pojawieniu się modelu SMES (model jest predykcją – b. rzadkie w fizyce) ⇒ dane + SMES = motywacja do rozszerzenia programu NA49 na niższe energie

Granica na przejście do QGP znaleziona w NA49 (Alt et al., PR C77, 024903 (2008))

Eksperyment STAR (przy RHIC) potwierdza wyniki NA49
a eksperyment ALICE (przy LHC) potwierdza interpretację



Kink: zwiększona entropia

Piony mierzą entropię stanu wczesnego. W modelu SMES (APP B30, 2705 (1999)):

$$\langle \pi \rangle / N_w \sim (ndf)^{1/4}$$

Zmiana nachylenia w okolicy 30A GeV; brak zmiany nachylenia dla p+p

$$\langle \pi \rangle = 1.5 (\langle \pi^+ \rangle + \langle \pi^- \rangle) \quad F \simeq \sqrt{\sqrt{s_{NN}}}$$

Horn: zmniejszenie mas nośników dziwności

(wzrost \rightarrow saturacja) i stosunku dziwność do entropii (zejście w dół)

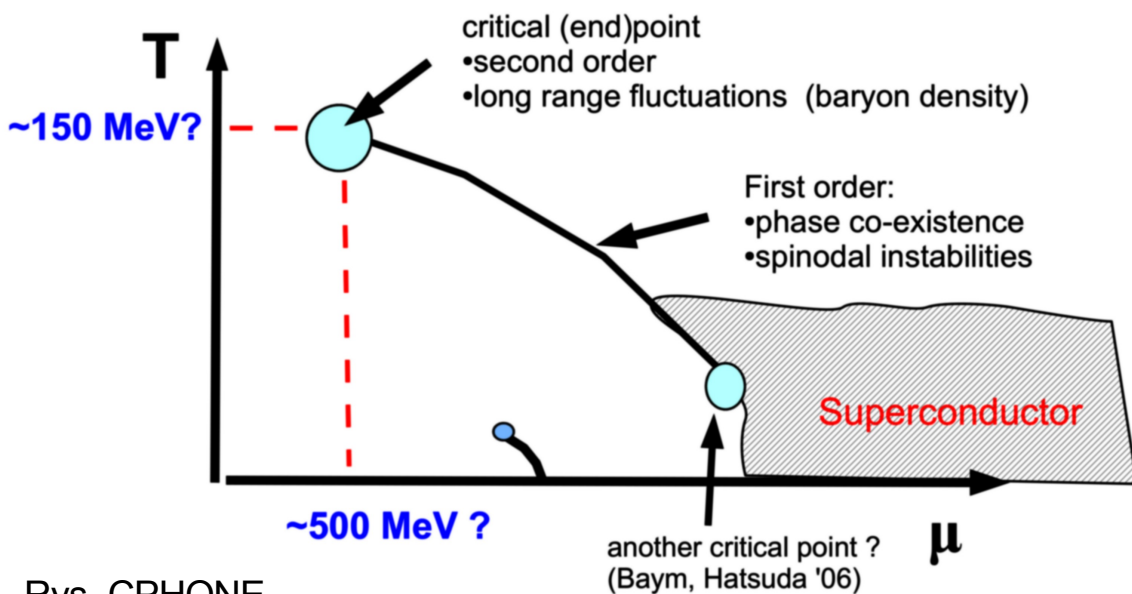
Ostre maksimum obserwowane przy 30A GeV (nie obserwowane dla p+p);

Step: stałe T oraz p w fazie mieszanej

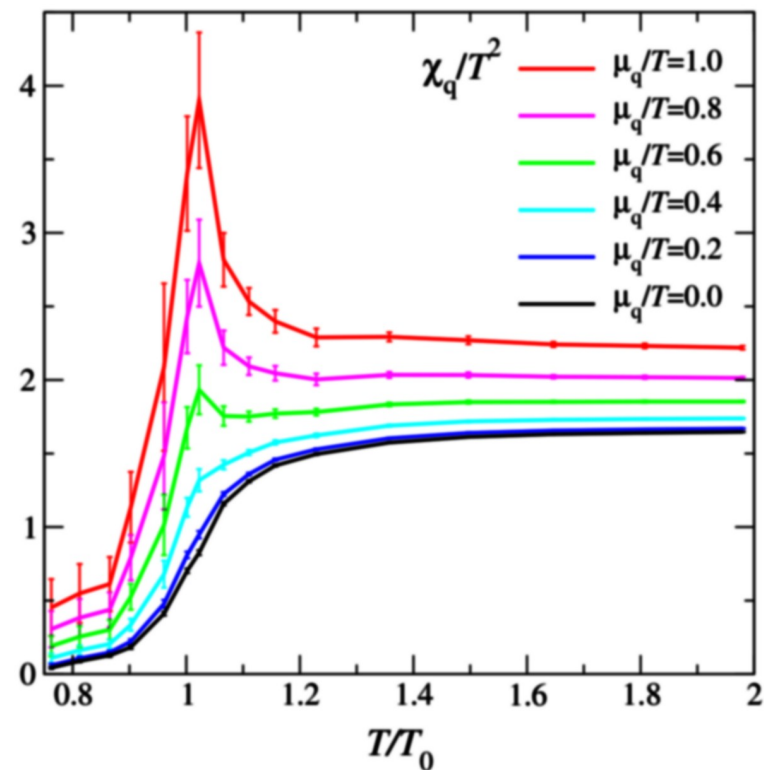
Odwrotny parametr nachylenia w rozkładzie m_T :

silny wzrost przy AGS, plateau dla SPS, wzrost dla wysokich energii RHIC

W okolicy punktu krytycznego: długo-zasięgowe fluktuacje w gęstości barionowej



Rys. CPHONE,
 GSI, VII 2007



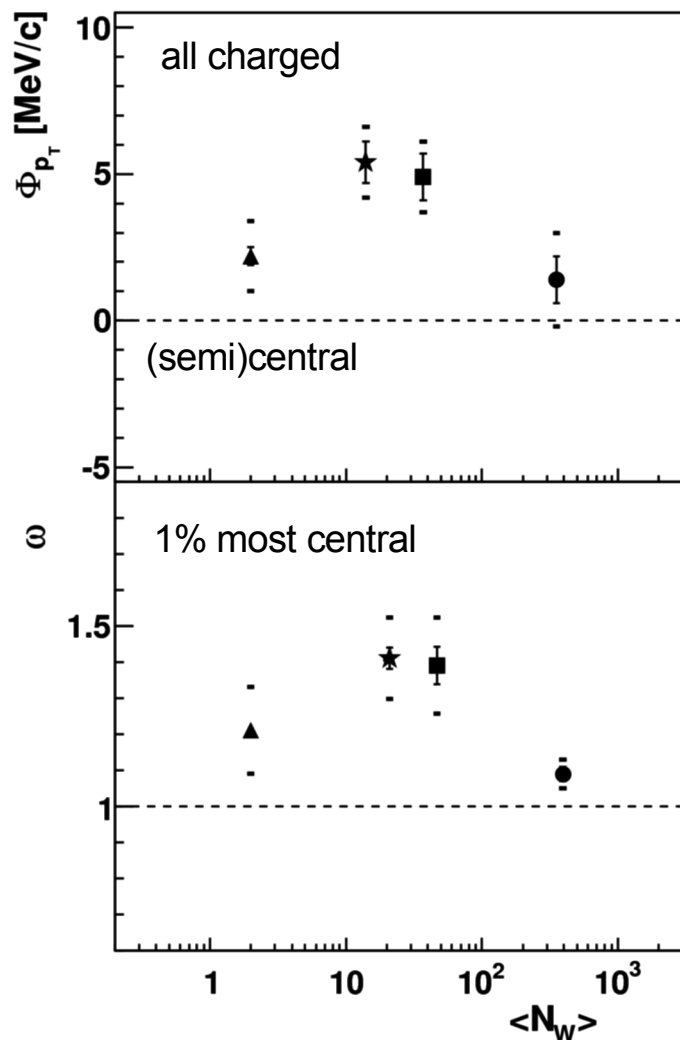
podatność kwarkowa: $\chi_q \equiv \partial n_q / \partial \mu_q$,
 T_0 – temperatura krytyczna przejścia QGP – gaz hadronowy obliczona teoret. dla $\mu_q = 0$. ($\mu_B = 3\mu_q$)

Obliczenia teoretyczne (na tzw. sieciach) potwierdzają ten obrazek. Na rys. (prawy) χ_q/T^2 mają maksima powyżej pewnych wartości μ_q . Jest to znak tego, że fluktuacje w gęstości barionowej rosną w miarę zbliżania się do punktu krytycznego w płaszczyźnie (μ, T)

Rys. C. R. Allton, Phys. Rev. D68 (2003), 014507

Zależność od rozmiaru systemu
(p+p, C+C, Si+Si oraz Pb+Pb)
fluktuacji średniego p_T oraz
krotności przy energii 158A GeV

Zależność od energii
fluktuacji średniego p_T oraz
krotności dla centralnych Pb+Pb

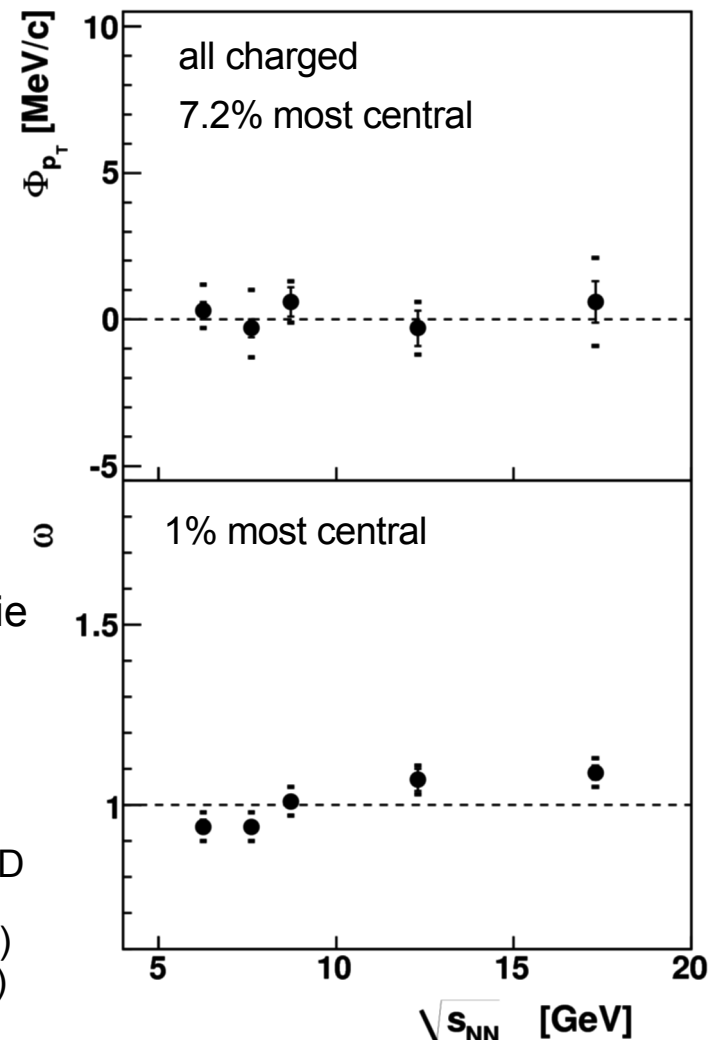


● **Maksimum Φ_{p_T} oraz ω dla C+C oraz Si+Si przy 158A GeV**

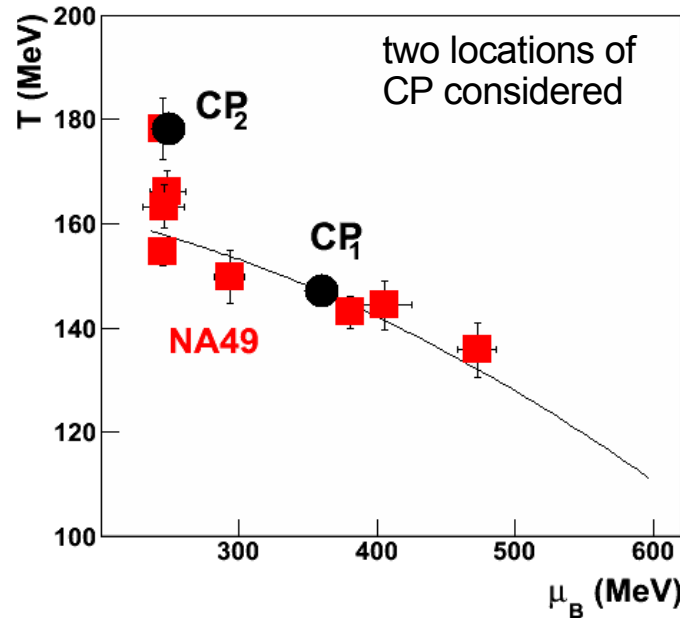
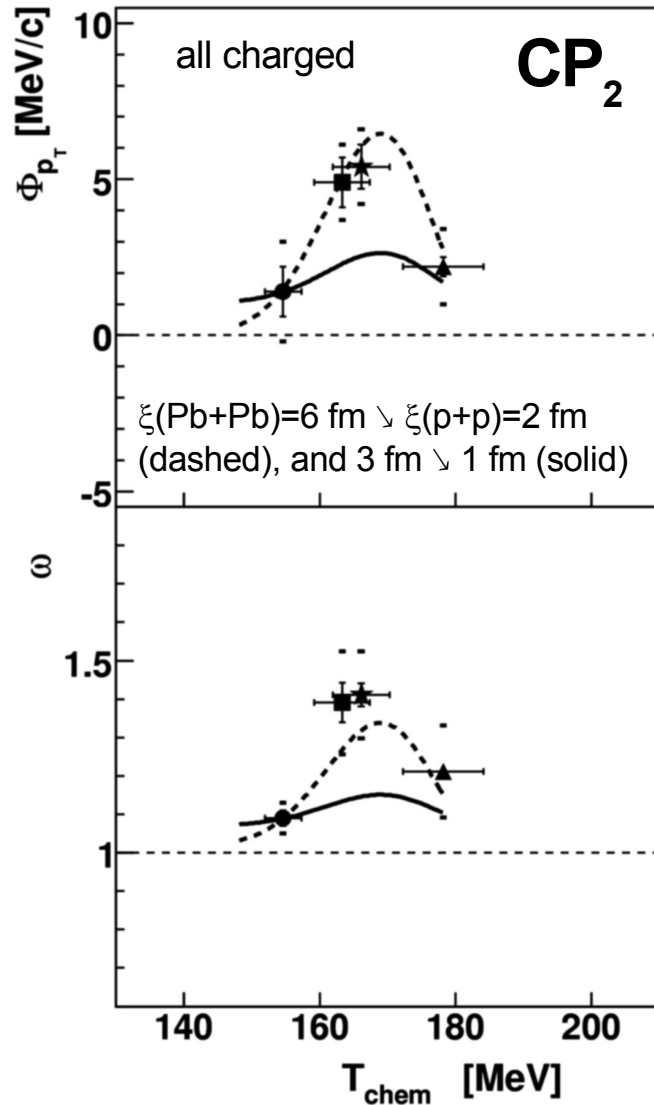
● **Brak znaczącej zależności od energii**

Przedni obszar pośpieszności, ograniczona akceptacja w kącie azymutalnym

górny lewy: PR **C70**, 034902, 2004
dolny lewy: p+p – PR **C75**, 064904 (2007); Pb+Pb – PR **C78**, 034914 (2008); C+C, Si+Si - B. Lungwitz, PhD thesis
górny prawy: PR **C79**, 044904 (2009)
dolny prawy: PR **C78**, 034914 (2008)



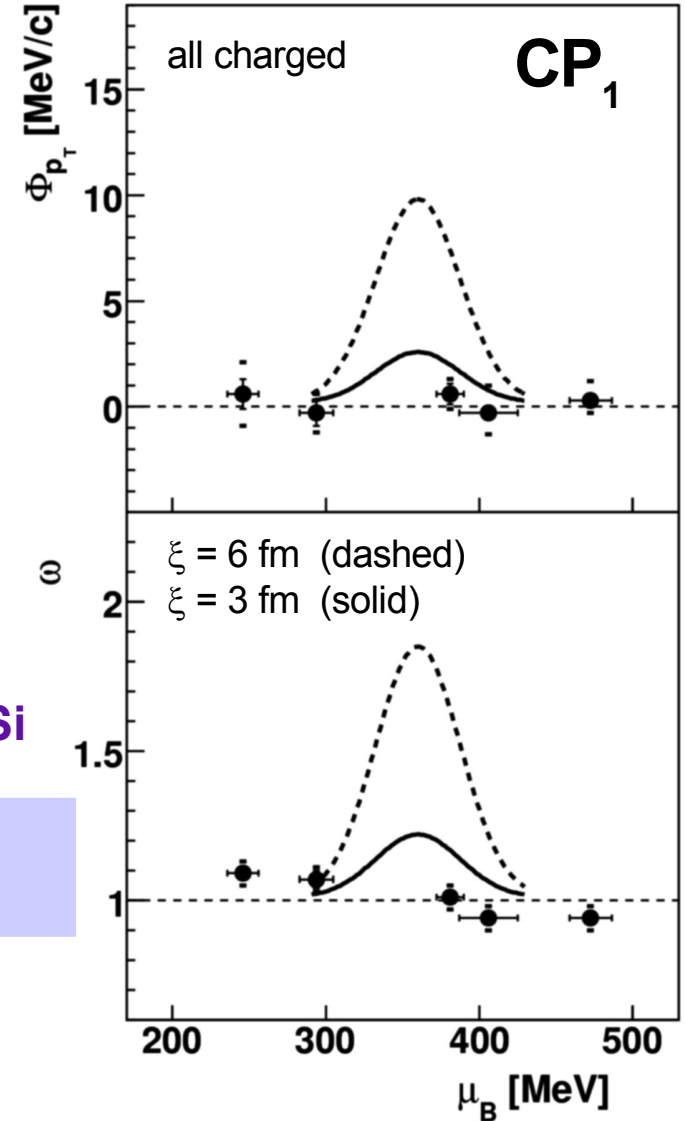
Fluktuacje średniego p_T i krotności: zależność od współrzędnych diagramu fazowego



Maksimum Φ_{p_T} oraz ω
obserwowane dla C+C i Si+Si

Wyniki zgodne z
przewidywaniami CP₂

Grebieszkow et al. Nucl. Phys. **A830**,
547C-550C (2009)



Zależność od rozmiaru systemu przy 158A GeV

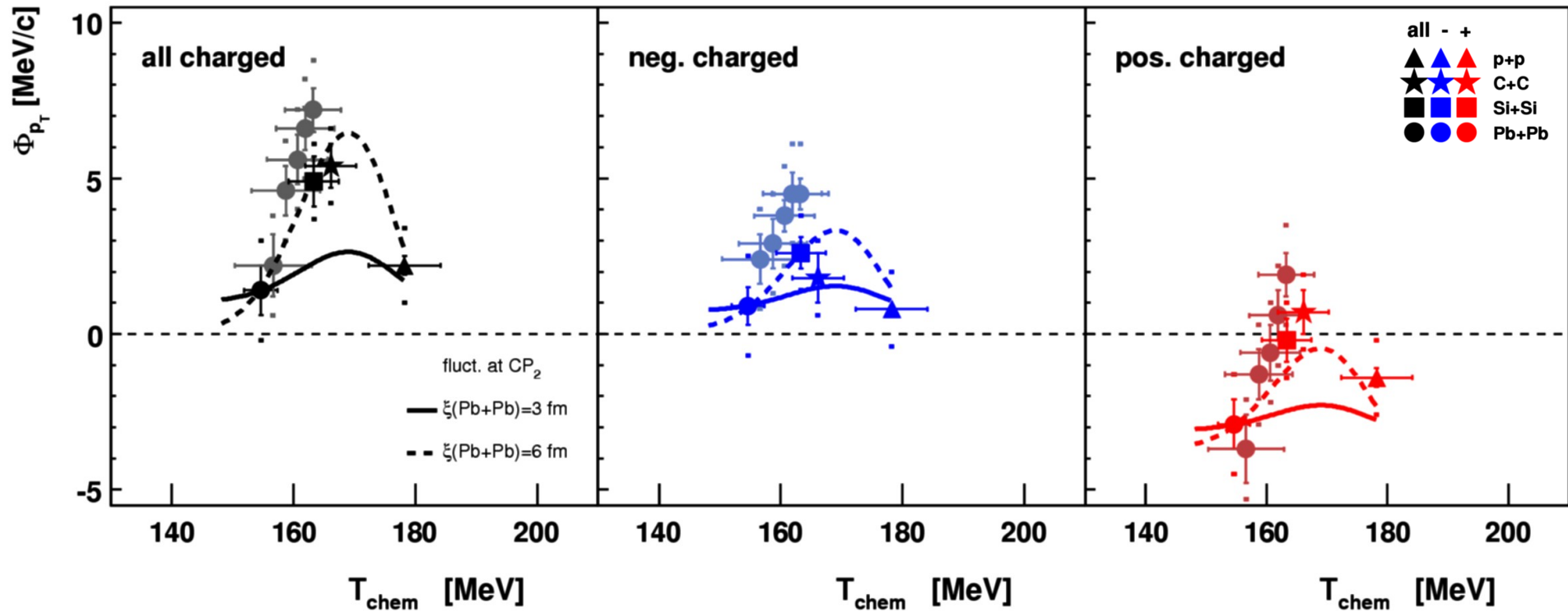
→ Fluktuacje w średnim p_T (PRC70, 034902, 2004))

Położenie CP_2 :

$$\mu_B(CP_2) \cong 250 \text{ MeV} = \mu_B(A+A)$$

przy 158A GeV)

$$T(CP_2) = 178 \text{ MeV} = T_{\text{chem}}(p+p)$$



Przewidywania w CP_2 (krzywe) znormalizowane tak, żeby odtwarzać wartość Φ_{p_T} dla najbardziej centralnych zderzeń Pb+Pb

→ Maksimum Φ_{p_T} obserwowane dla C+C i Si+Si oraz peryferycznych Pb+Pb

→ Wzrost ~ nawet dwa razy większy dla wszystkich naład. niż dla ujemnie naład. (zgodne z przewidywaniami dla CP)

Dane zgodne z przewidywaniami CP_2

Zależność od rozmiaru systemu przy 158A GeV

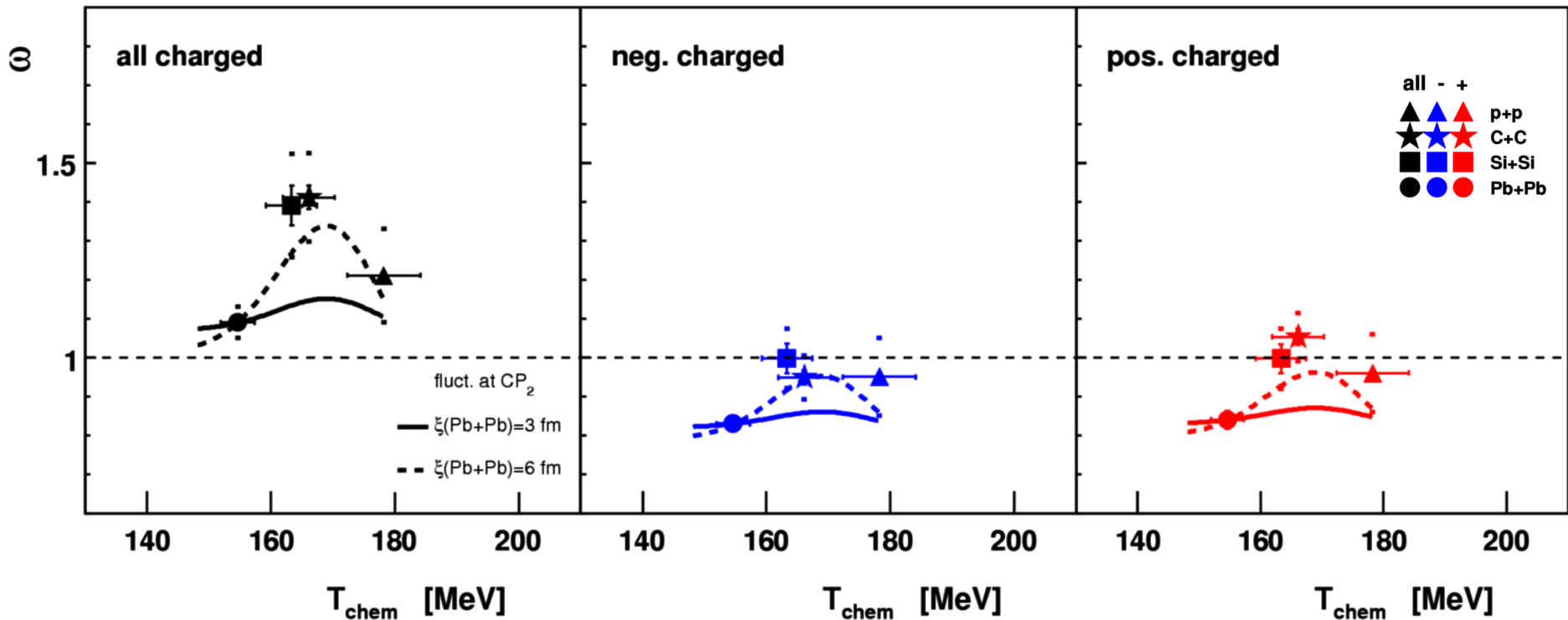
→ Fluktuacje krotności

(p+p - PRC75, 064904 (2007); Pb+Pb - PRC78, 034914 (2008);
C+C, Si+Si - B. Lungwitz, PhD thesis)

Położenie CP_2 :

$\mu_B(CP_2) \cong 250 \text{ MeV} = \mu_B(A+A)$
przy 158A GeV)

$T(CP_2) = 178 \text{ MeV} = T_{chem}(p+p)$



Przewidywania w CP_2 (krzywe) znormalizowane tak, żeby odtwarzać wartość ω dla centralnych zderzeń Pb+Pb

→ Maksimum Φ_{PT} obserwowane dla C+C i Si+Si

→ Wzrost ~ dwa razy większy dla wszystkich naładowanych niż dla ujemnie naład. (zgodne z przewidywaniami dla CP)

Dane zgodne z przewidywaniami CP_2

Wniosek z analiz fluktuacji w średnim pędzie poprzecznym i krotności:

Niemonotoniczna zależność w funkcji T_{chem} z maksimum dla lżejszych systemów Si+Si, C+C, peryferyczne Pb+Pb przy najwyższej energii SPS

Uwaga: to maksimum w C+C/Si+Si *nie* oznacza że założony punkt krytyczny jest dla tych lekkich systemów (C+C, Si+Si); założyliśmy go tam gdzie jest wymrożenie chem. dla zderzeń p+p przy najwyższej energii SPS ale teoretyczna magnituda fluktuacji w tym punkcie jest obniżona ze względu na mniejszą długość korelacji ξ (parametr modelu) w lżejszych systemach; w ogólności założono wzrost ξ ze wzrostem A

Jeśli traktujemy te wyniki jako potencjalną sygnaturę punktu krytycznego to powinien być on położony przy $T \approx 178$ MeV i $\mu_B \approx 250$ MeV

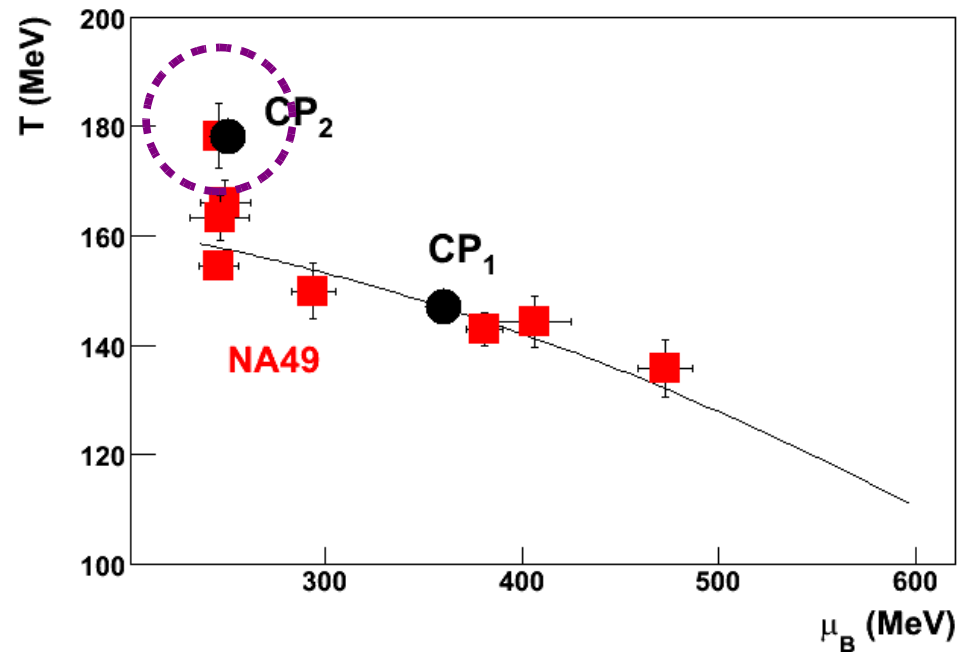
Co dalej?

Plany w NA61/SHINE

(szukanie punktu krytycznego)

Strategia: skaning energetyczny z lekkimi jonami

Możliwy rezultat: maksimum fluktuacji (“*hill of fluctuations*”)



Intermitencja

Intermitencja – migotanie, lokalne “zgęstki”, miara fluktuacji gęstości, analog krytycznej opalescencji. NA49 bada intermitencję w pędzie poprzecznym par pionów o niskich masach ($\pi^+\pi^-$ tzw. di-piony) oraz w protonach i porównuje wyniki z modelem zakładającym fluktuacje w punkcie krytycznym. Szczegóły w Antoniou et al. Nucl. Phys. **A761**, 149 (2005), Anticic et al., PR **C81**, 064907 (2010)

2D momenty faktorialne w pędzie poprzecznym:

$$F_p(M) = \frac{\langle \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^{M^2} n_i (n_i - 1) \dots (n_i - p + 1) \rangle}{\langle \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^{M^2} n_i \rangle^p}$$

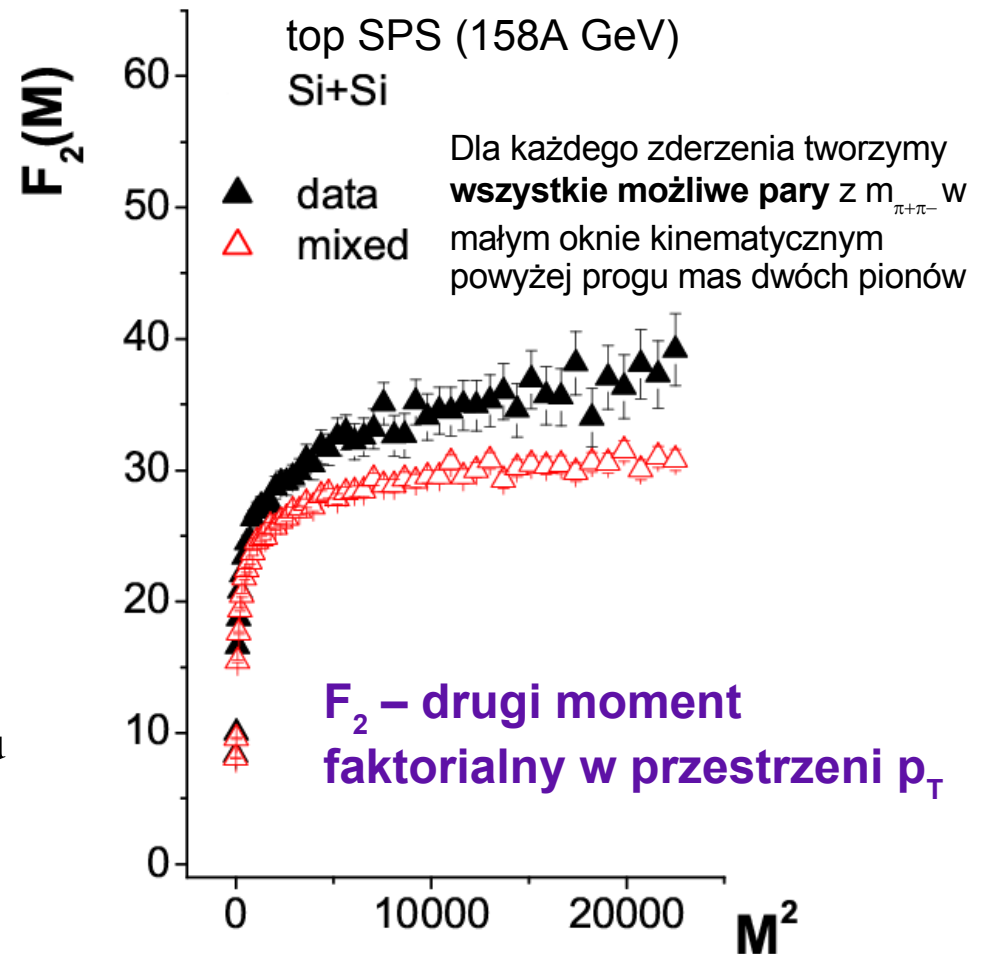
M^2 - liczba komórek w przestrzeni p_T di-pionów

$$p_{T,\pi\pi} = p_{T,\pi^+} + p_{T,\pi^-}$$

n_i - liczba zrekonstr. di-pionów w i -tej komórce

$\Delta F_2(M)$ - drugi moment faktorialny po odcięciu kombinatorycznego tła (przy użyciu mieszanych)

oczekujemy: $\Delta F_2 \sim (M^2)^{\phi_2}$



Plany NA61/SHINE:

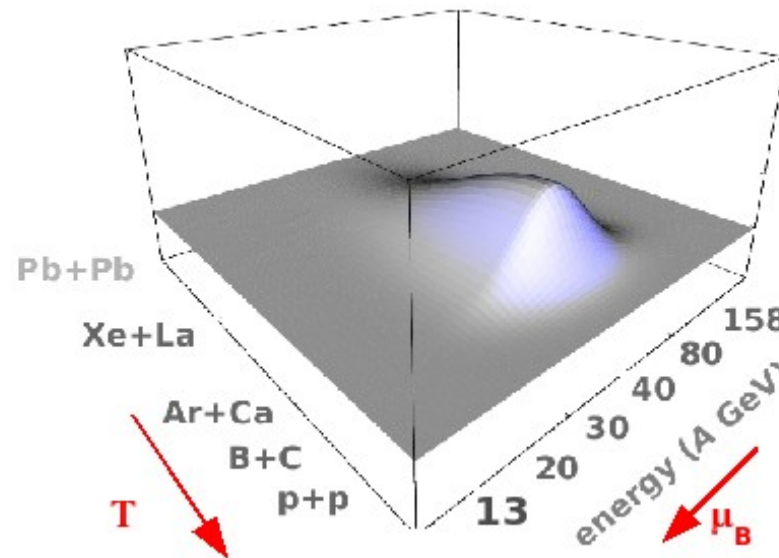
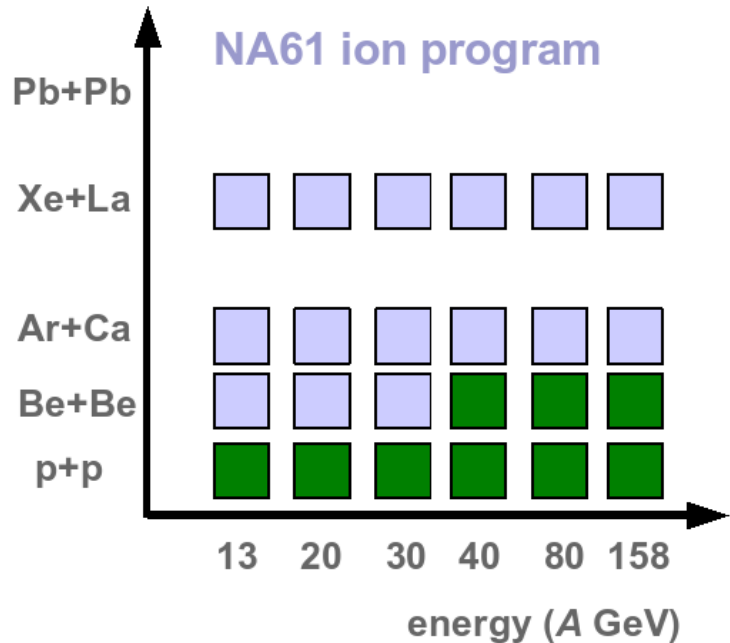
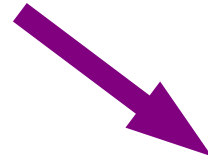
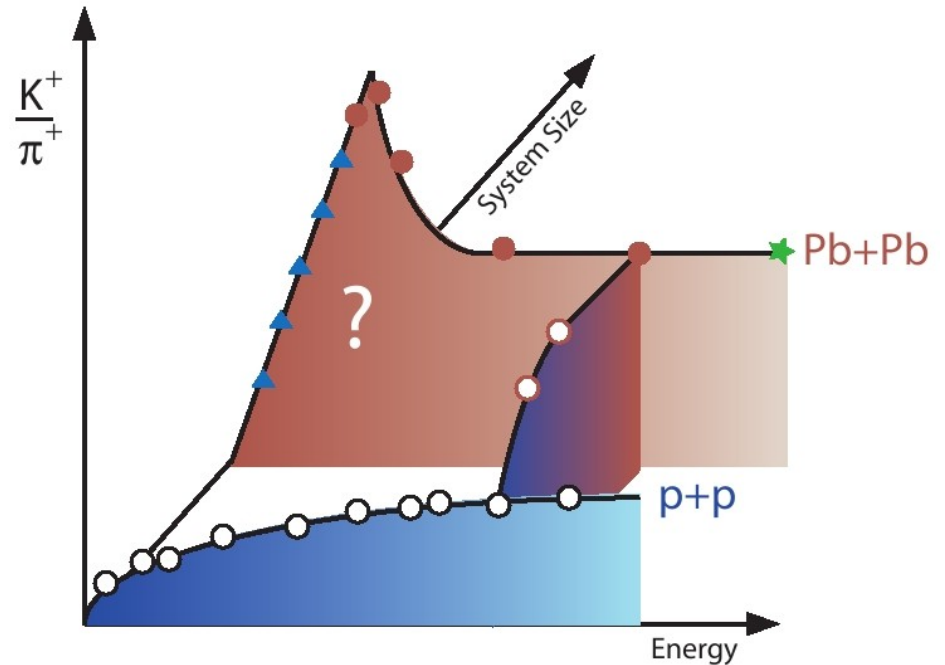
1. Uwolnienie

dla jakich lżejszych niż Pb+Pb systemów mamy już sygnatury (kink, horn, step, etc.)

a dla jakich jeszcze nie?

2. Punkt krytyczny

poszukiwanie wzmocnienia sygnału (różne obserwable)



sygnał CP:
 ω , Φ_{pT} ,
intermitencja,
etc.

Inne eksperymenty (przy FAIR, JINR, RHIC, LHC)

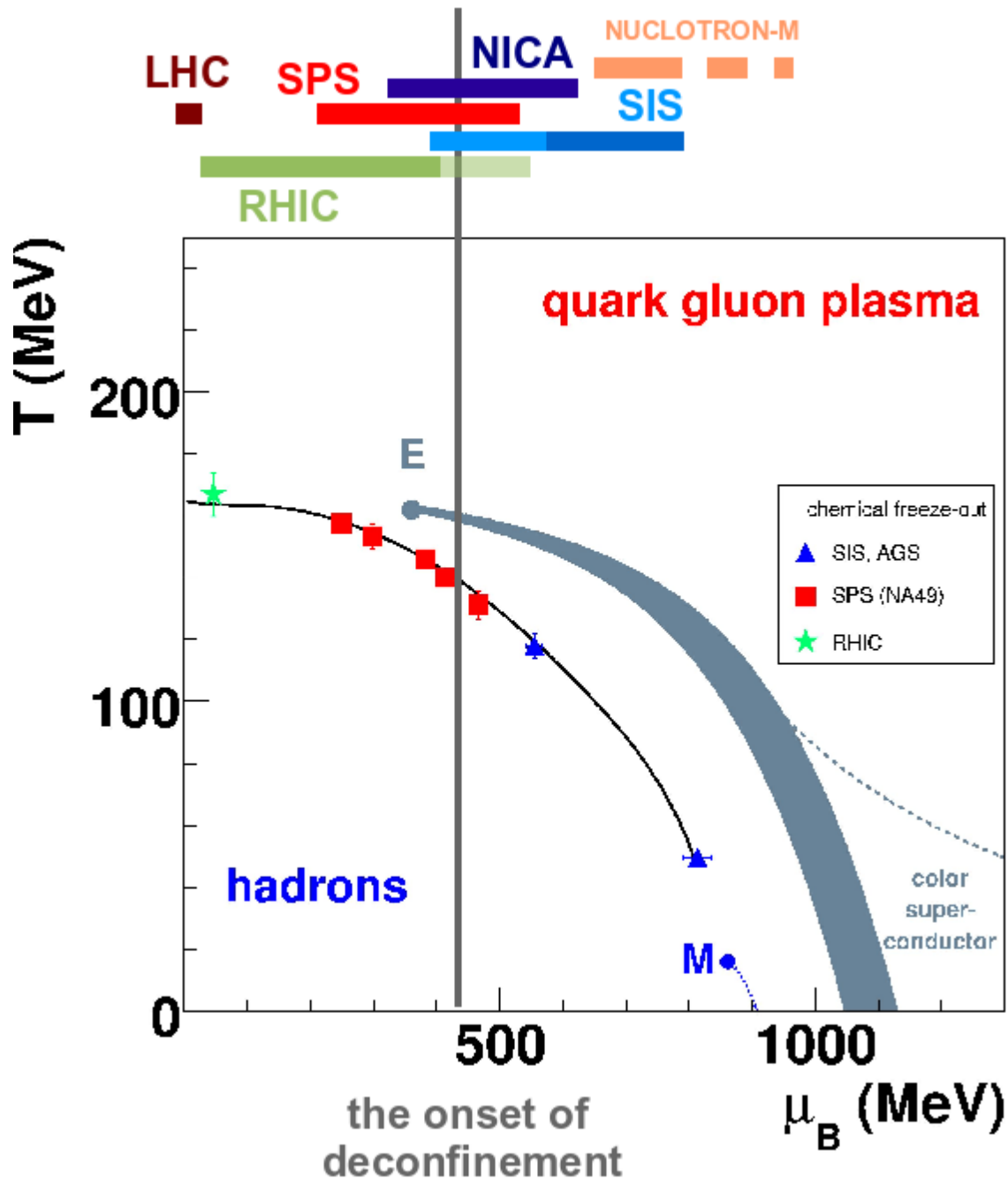
Facility	SPS	RHIC	NUCLOTRON-M	NICA	SIS-100/300	LHC
Laboratory	CERN Geneva	BNL Brookhaven	JINR Dubna	JINR Dubna	FAIR GSI Darmstadt	CERN Geneva
Experiment	NA61/SHINE	STAR PHENIX	BM@N	MPD	HADES + CBM CBM	ALICE ATLAS CMS
Start of data taking	2009(11)	2010	2015	2017	2017/18 (2019/20)	2009
cms energy [GeV/(N+N)]	5.1 – 17.3	7.7 (5?) – 200	< ~ 3.5	4 – 11	2.3 – ~4.5 ~4.5 – ~8.5	up to 5500 14000 (p+p)
Physics	CP & OD	CP & OD	HDM	OD & HDM	HDM, OD & CP	PDM

CP – critical point

OD – onset of deconfinement, mixed phase, 1st order phase transition

HDM – hadrons in dense matter

PDM – properties of deconfined matter



Plany na świecie dotyczące poszukiwania m.in. przejścia fazowego oraz CP (plany dot. zakresu energii – stan na rok 2012)

CERN SPS (NA61)
 BNL RHIC (STAR, PHENIX)
 JINR NICA (MPD)
 GSI FAIR SIS-100/300
 (HADES+CBM, CBM)
 JINR NUCLOTRON-M
 (BM@N)

2009(11) ↗

2010 ↗

2017 ↗

2017(19) ↗

2009 ↗

2015 ↗