ZDERZENIA RELATYWISTYCZNYCH JĄDER

[przegląd:problemów,wybranych wyników,perspektyw]

Podział (umowny!) zderzeń jądrowych –według zakresu energii:

- Niskie (poniżej progu produkcji pionów)
- Średnie (poniżej progu produkcji cząstek dziwnych)
- Wysokie (rzędu 1 - 10 GeV na nukleon pocisku;obfita produkcja pionów;produkcja antybarionów).
- Bardzo wysokie (duże krotności w stanie końcowym;obfita produkcja cząstek z kwarkami s , c,..)

Opisy modelowo-teoretyczne :

- Reakcje „wprost" i przez „jądro złożone"
- Kaskada wewnątrz-jądrowa
- Procesy wielo-etapowe;kaskada hadronowa;Superpozycja N-N,czy/i efekty kolektywne?
- Materia **gorąca ,gęsta** --- ewolucja czasowo przestrzenna--- Możliwe procesy **jakościowo** odmienne od znanych przy niższych energiach.

Co znamy,mierzymy i...czego chcemy się dowiedziec ?

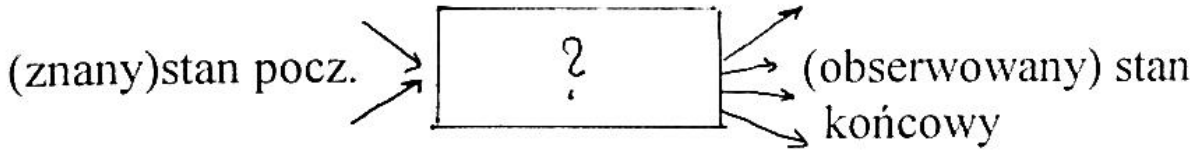
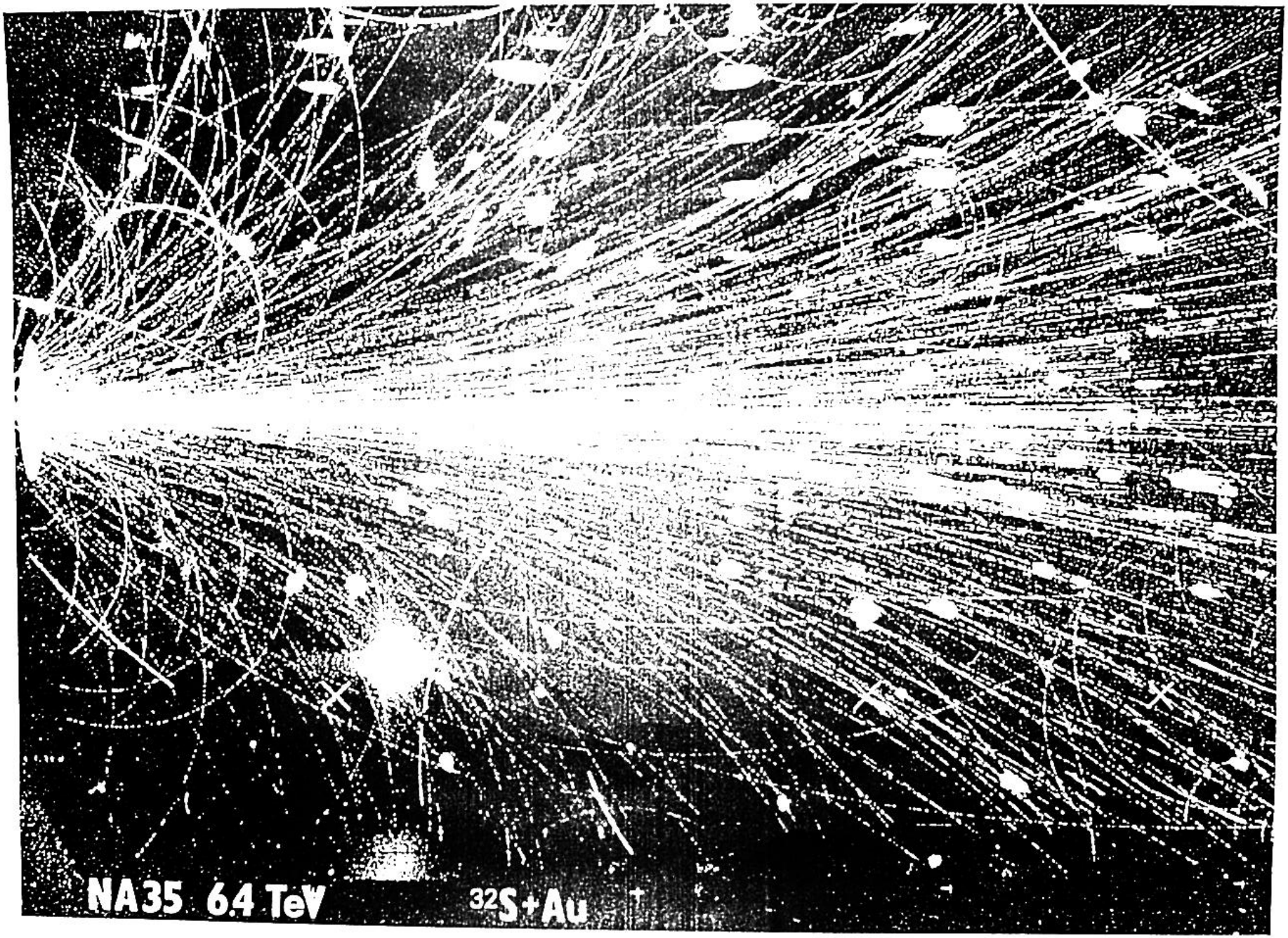
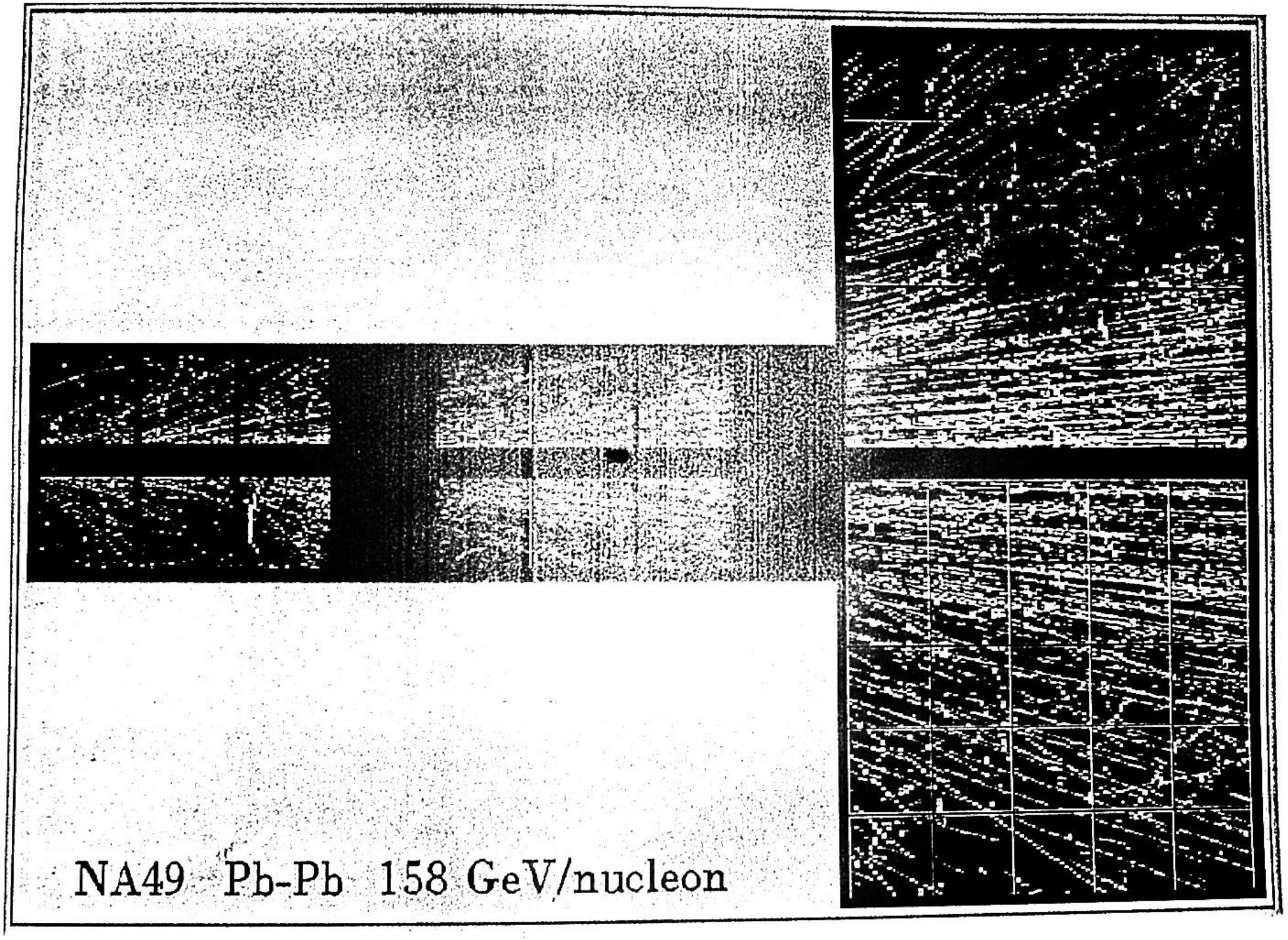


Fig. 1 (zdjęcie z komory strumieniowej)

Fig. 2 (rekonstrukcja z komory TPC)



Zdjęcie z komory strimerowej eksperymentu NA35



NA49 Pb-Pb 158 GeV/nucleon

POCISKI –ENERGIE –REALIZACJA ZDERZEŃ

(coraz cięższe jądra,coraz wyższe energie)

Przypomnienie :
Tarcza stacjonarna : $\sqrt{s_{NN}} = \sqrt{2m(E_o + m)}$ $\sim$ (prop. do $E_o^{1/2}$)

Wiązki przeciwbieżne: $\sqrt{s_{NN}} = 2\,E_o$

Fig.3 (diagram dostępnych i planowanych energii)

.....

DETEKCJA –MOŻLIWOŚCI i .... PROBLEMY

Ideał (nieosiągalny w praktyce!) :

Rejestracja produktów produktów w pełnym kącie bryłowym

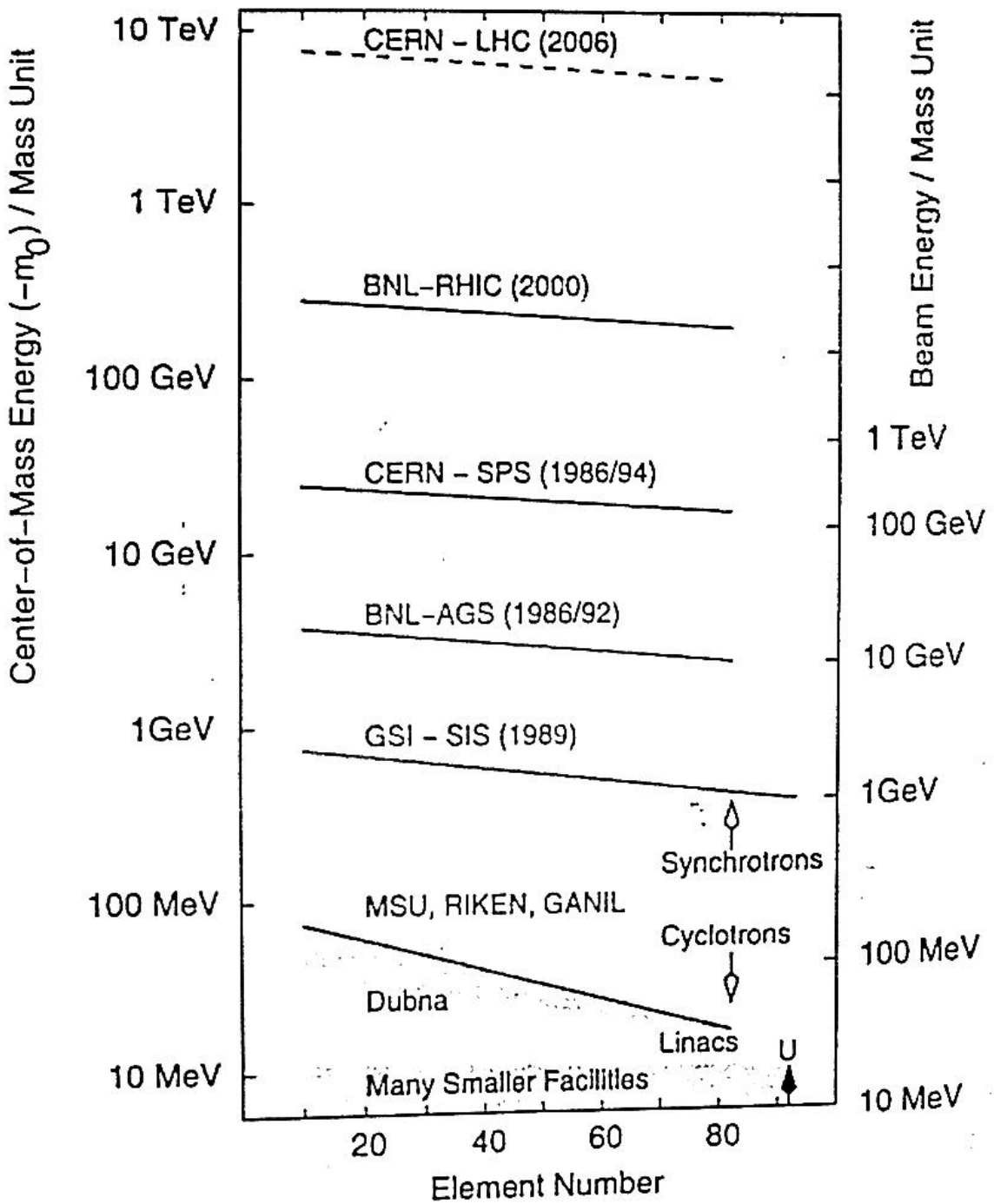
Identyfikacja emitowanych cząstek (poprzez pomiar pędu, dE/dx (straty energii na jednostkę drogi), ewentualnie także czasu przelotu (TOF))....dla cząstek naładowanych.

Identyfikacja cząstek neutralnych (π^o, Λ , K^o...), przez pomiar pędów i geometrii produktów rozpadu.

W rzeczywistości : **akceptancja** jest nieuchronnie ograniczona : musi być poznana (symulacje M.C.) i uwzględniona w analizie wyników.

Uwaga: bardzo potrzebna jest możliwość selekcji „on-line" zderzeń o różnym stopniu **centralności** (zakresie parametru zderzenia) -celem określania liczby „partycypantów" i „spektatorów" , **Fig.4** (schemat geometrii zderzenia)

Fig. 5 (układ det. w eksp-cie NA 49 w CERN)


10 TeV
1 TeV
100 GeV
10 GeV
1GeV
100 MeV
10 MeV
Center-of-Mass Energy (-m0) / Mass Unit
Beam Energy / Mass Unit
CERN - LHC (2006)
BNL-RHIC (2000)
CERN - SPS (1986/94)
BNL-AGS (1986/92)
GSI - SIS (1989)
Synchrotrons
MSU, RIKEN, GANIL
Cyclotrons
Dubna
Linacs
U
Many Smaller Facilities
20
40
60
80
Element Number

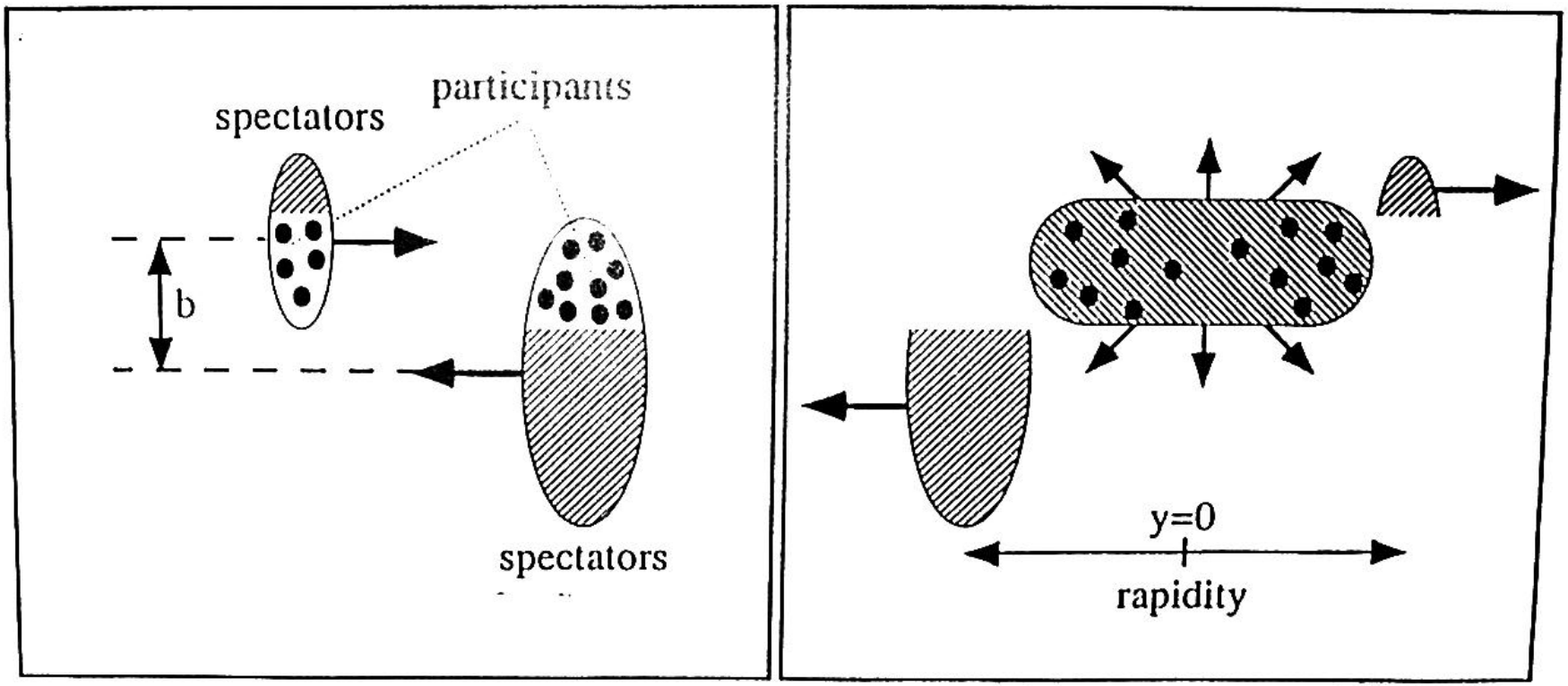


Fig. 2.3

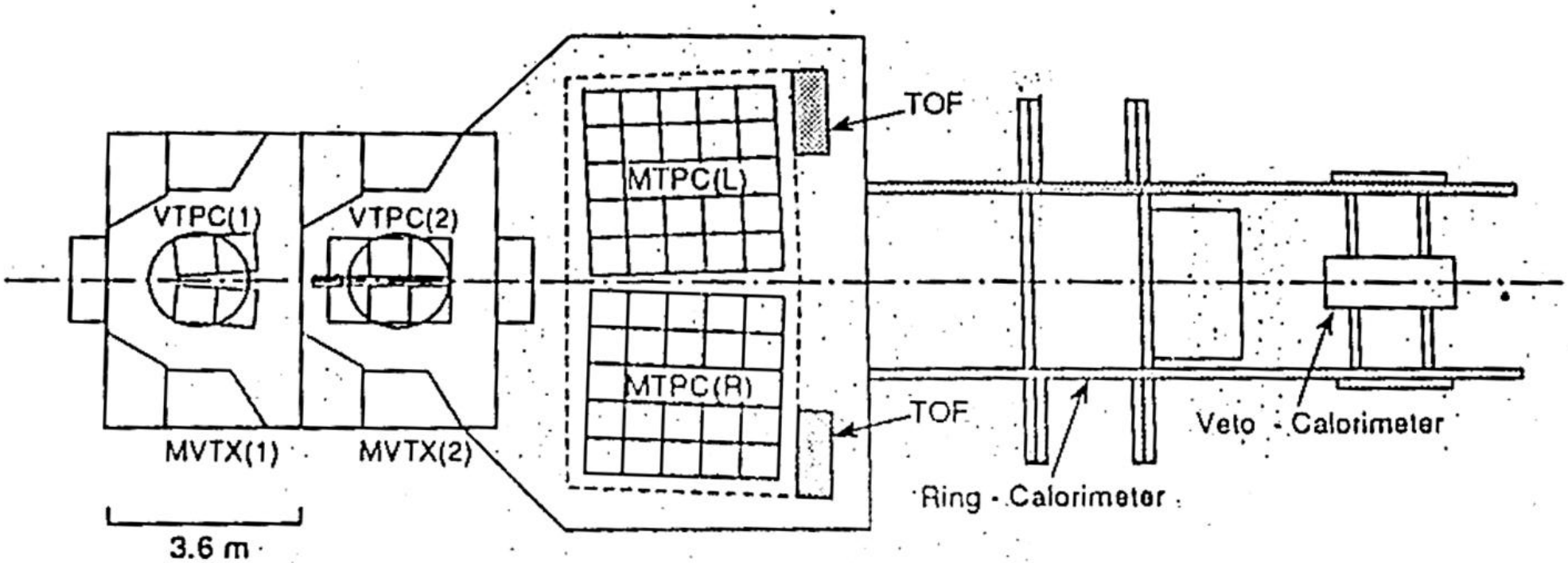


Figure 1: NA49 experimental setup. The beam is entering from the left hitting a target outside the picture.

CZEGO CHCEMY SIĘ DOWIEDZIEĆ ?
CO ZAOBSERWOWAĆ?

(przewidywania fenomenologiczno-teoretyczne)

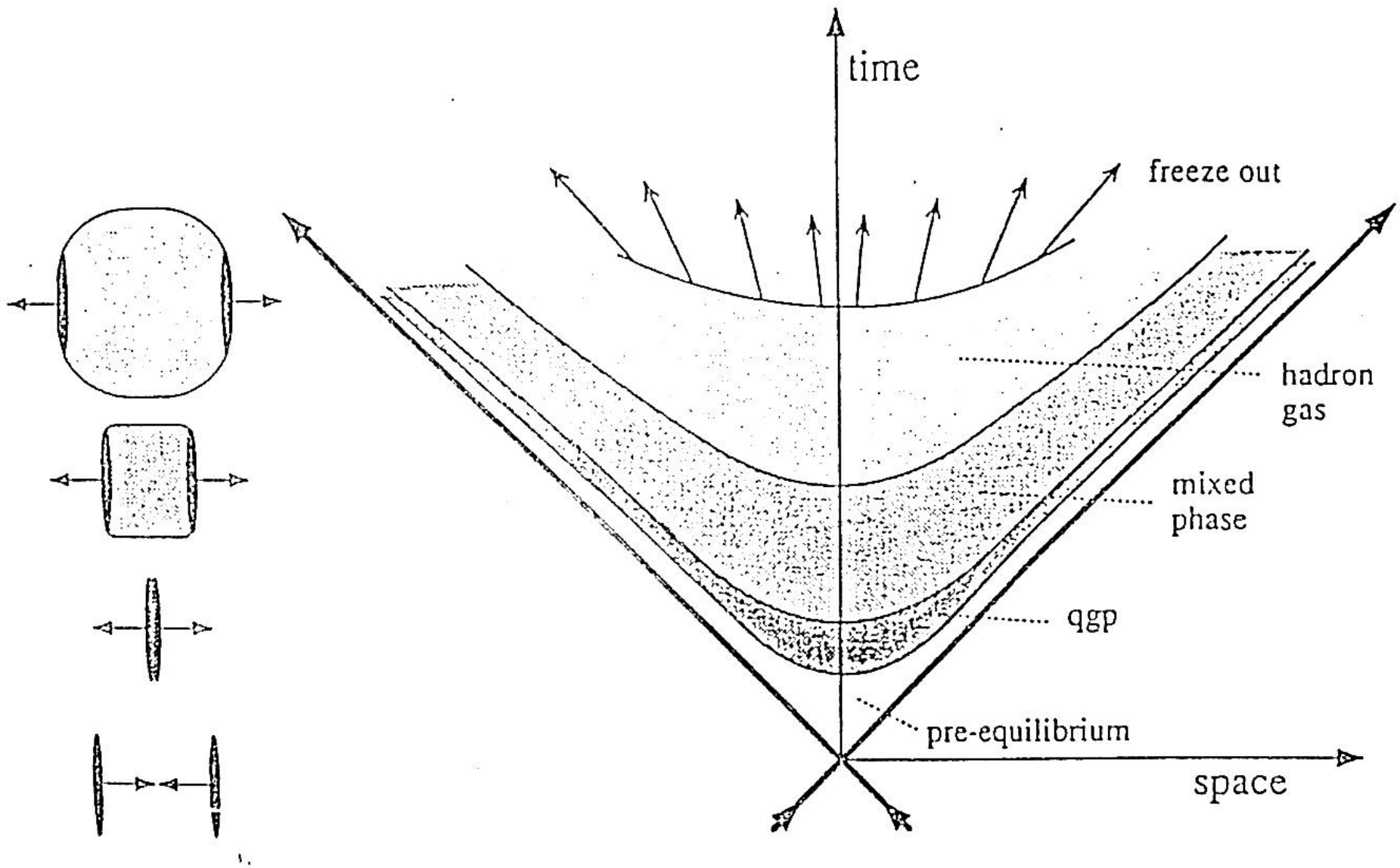
Intuicja: w wysoko-energetycznym zderzeniu jąder (zwłaszcza ciężkich i średnio ciężkich)materia jądrowa tuż po zderzeniu jest **gęsta,gorąca,** i obejmuje **znaczny obszar.**

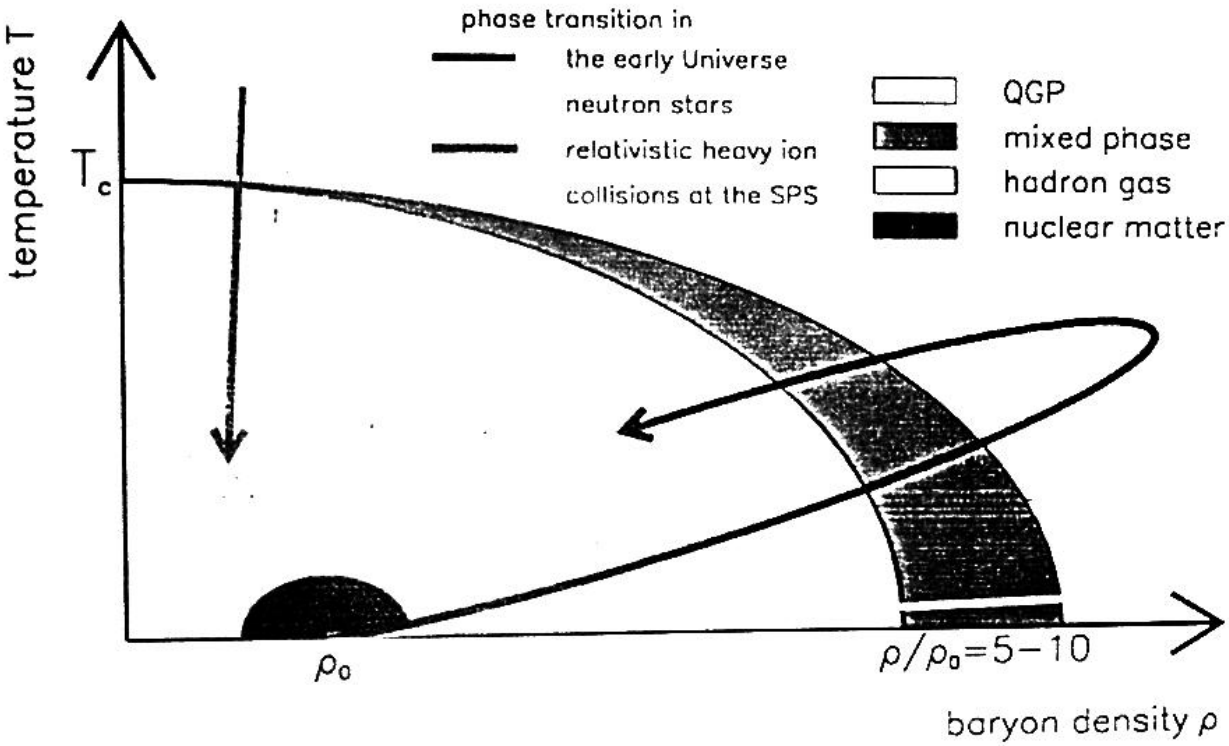
Schemat możliwego przebiegu **ewolucji układu w czasie i przestrzeni, Fig.6**

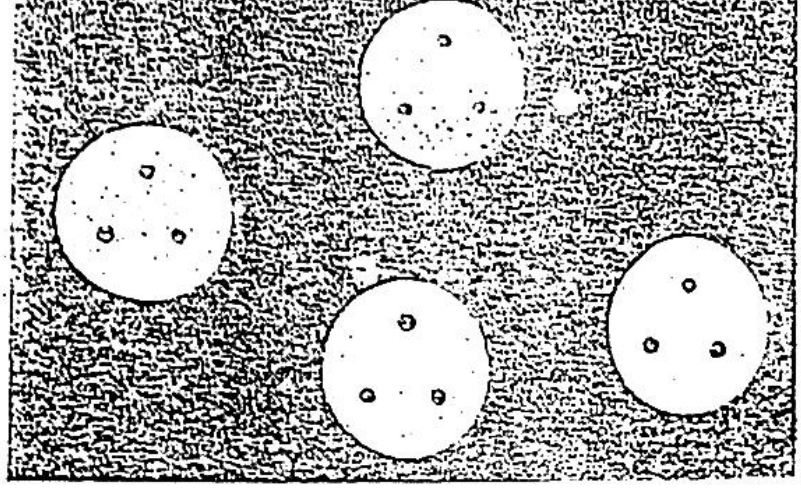
Przypomnienie/analogia : w klasycznej termodynamice znajomość równania stanu umożliwia przewidywanie możliwości i warunków **przejścia fazowego** (parametry krytyczne!).W przypadku materii jądrowej,przy wykorzystaniu QCD (chromodynamika kwantowa) można przewidywać **trajektorie fazowe ukadu** – w przestrzeni charakterystyk : ε (gęstość) i T (temperatura) oraz możliwość **przejścia fazowego** do stanu **QGP** (Plazma kwarkowo-gluonowa). **Fig.7** (diagram fazowy);**Fig.8** (schematyczne przedstawienie realizacji przejścia od materii hadronowej do QGP).

Podsumowanie: jeżeli układ zderzających się jąder osiągnie dostateczną gęstość,temperaturę i jest wystarczająco rozciągły (aby możliwe było osiągnięcie/zbliżenie do stanu równowagi termicznej),to oczekujemy przejścia fazowego do stanu QGP (na krótko,ponieważ ekspansja i stygnięcie „wyprowadzą" układ z QGP ;w rezultacie obserwujemy tylko produkty końcowe i z analizy stanu końcowego staramy się poznać wcześniejsze „losy" badanego układu).

Fig. 6

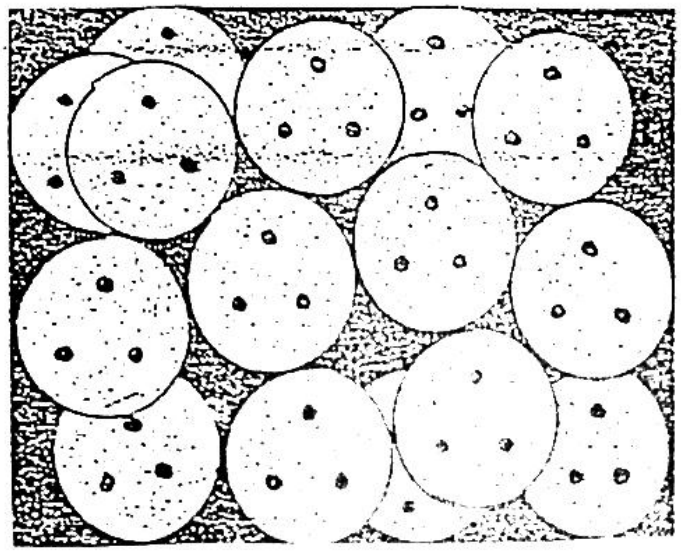

time
freeze out
hadron gas
mixed phase
qgp
pre-equilibrium
space


phase transition in
the early Universe
neutron stars
relativistic heavy ion
collisions at the SPS
QGP
mixed phase
hadron gas
nuclear matter
temperature T
T_c
ρ_0
$\rho/\rho_0=5-10$
baryon density ρ



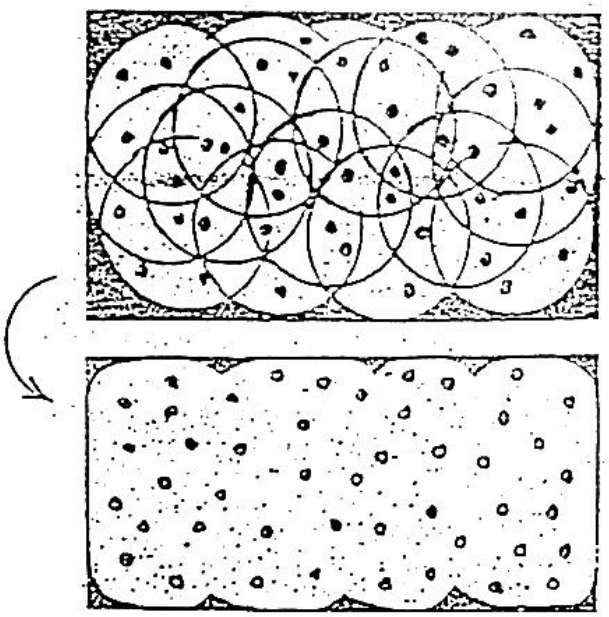
Gaz nukleonowy

$\epsilon < \epsilon_o$



Materia jądrowa.

$\epsilon = \epsilon_o = 0.16\, GeV/fm^3$



Plazma kwarkowo-gluonowa

$\epsilon \geq (15 - 20)\, \epsilon_o$

Poglądowy schemat przejścia fazowego w materii jądrowej

PYTANIE EKSPERYMENTALNE: CZY W BADANYCH OBECNIE ZDERZENIACH RELAT-CH JĄDER SPEŁNIONE SĄ WARUNKI PRZEJŚCIA DO QGP ?

Dla uzyskania odpowiedzi należy umieć mierzyć: rozmiary,gęstość,temperaturę źródeł cząstek,obserwowanych w stanie końcowym;uwaga: takie pomiary dotyczą (przy obecnie dostępnych energiach) nie pojedynczych zderzeń,lecz ich grup,celem uzyskania znaczących statystycznie wyników.

ROZMIARY.Metoda HBT (Hanbury-Brown-Twiss) wykorzystuje pomiar interferencji w emisji par identycznych cząstek. **Fig.9** (przykład i wyniki wykorzystania metody HBT)
Wynik:rozmiary źródeł emitujących cząstki są znaczne : (kilka fm).

GĘSTOŚĆ (ε).Wykorzystanie rozkładów pośpieszności (rapidity) .**Fig.10** (schematyczne przedstawienie rozkładu y). Model Bjorkena: gęstość jest proporcjonalna do dN/dy w pobliżu wartości y układu CM (środka masy).Dokładność niewielka (niepewność współczynnika proporcjonalności!),ale wystarczająca dla oszacowania gęstości (energii) źródła. Wynik: przy energiach obecnie dostępnych w CERN gęstość gęstość w zderzeniu jąder średnio i b. ciężkich wynosi (1 - 2) GeV/fm^3 [Por.:dla materii jądrowej w stanie podst. gęstość wynosi ok.0,16 GeV/ fm^3]

TEMPERATURA (T).Wykorzystanie rozkładów pędu poprzecznego (p_t) produktów. (por. : analogia do rozkładu energii cząsteczek gazu ,gdzie temp. gazu jest parametrem).

Fig. 9.

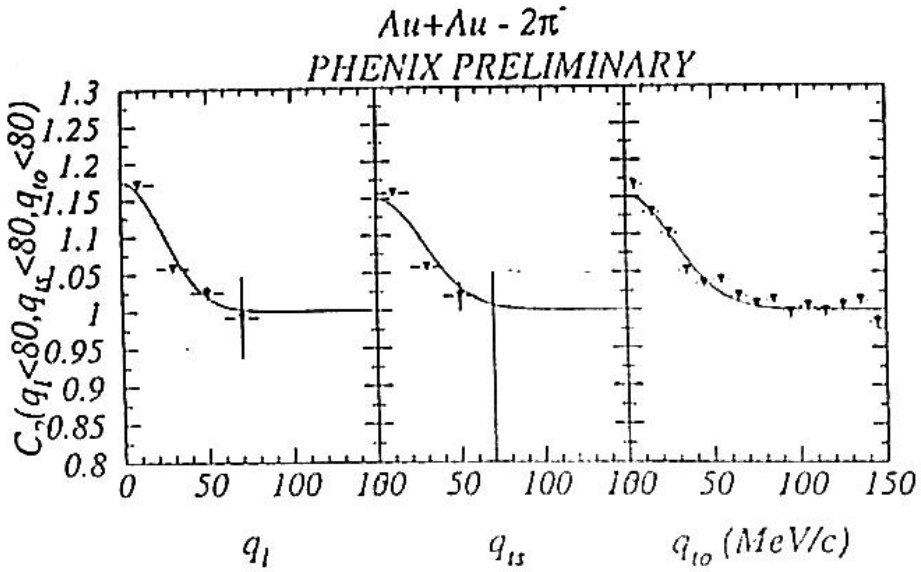


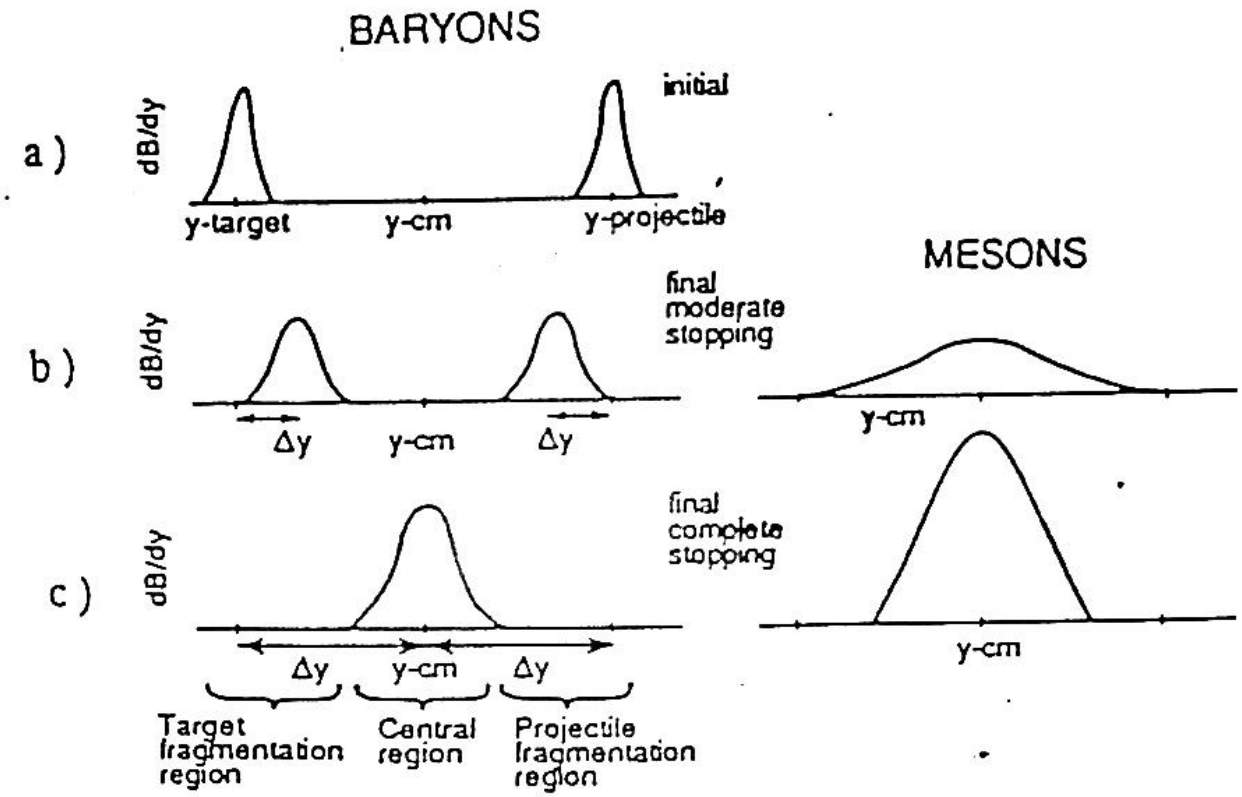
Figure 7. Correlation function for π^- pairs from the EMC analysis. The one-dimensional projections of the three-dimensional correlation function are averaged over the lowest 80 MeV/c in the other momentum differences. The fits are performed over the full phase space; the curves in the projections are averaged in the same manner as the data.

Table 2

Data Set	R_{Tout} (fm)	R_{Tside} (fm)	R_{Long} (fm)	λ
EMC $\pi^+\pi^+$	4.4 ± 0.2	5.1 ± 0.6	5.9 ± 0.4	$0.27 \pm .02$
TOF $\pi^+\pi^+$	6.2 ± 0.5	7.9 ± 1.1	4.0 ± 1.2	$0.49 \pm .05$
EMC $\pi^-\pi^-$	5.1 ± 0.2	5.0 ± 0.6	5.9 ± 0.4	$0.30 \pm .02$
TOF $\pi^-\pi^-$	5.5 ± 0.5	5.8 ± 1.5	6.7 ± 0.9	$0.49 \pm .06$

Results of the Bertsch-Pratt fits to the identical pion pairs in the EMC and TOF analyses. Only statistical errors are shown; current systematic uncertainties are < 1 fm.

Fig. 10



Baryon rapidity distributions (a) for the initial stage, (b) under the assumption that nuclei are
c) full stopping scenario.

Najprostsza parametryzacja:

$$\frac{1}{p_t} \cdot \frac{dN}{dp_t} = \text{const} \cdot \exp(-p_t/T)$$

→w skali logarytmicznej:

$$\ln\left(\frac{1}{p_t} \cdot \frac{dN}{dp_t}\right) = \text{Const.} - \frac{1}{T} \cdot p_t$$

(stąd:parametr „T" często nazywany „inverse slope")
Uwaga: przyjęcie powyższej parametryzacji zakłada,że układ jest w równowadze termicznej…)

Fig.11 ,12,13,14 (wybrane dane o wartościach pędu poprz. zależności od energii zderzenia,mas emitowanych cząstek zakresu pośpieszności ,centralności.

Wniosek: temperatura źródeł jest wysoka (por. dla reakcji jądrowych jądrowych zakresie niskich energii temp.jest rzędu (10 -20) MeV)

Podsumowanie: Warunki realizacji przejścia fazowego do stanu QGP (gęstości,temperatury,rozmiary źródeł) są spełnione **z nadmiarem** już przy energiach dostępnych w CERN.

→ Dwa kierunki dalszych działań eksperymentalnych:

a) znacznie wyższe energie (por. dyskusja sygnałów QGP)
b) niższe energie (aby znaleźć warunki „krytyczne").

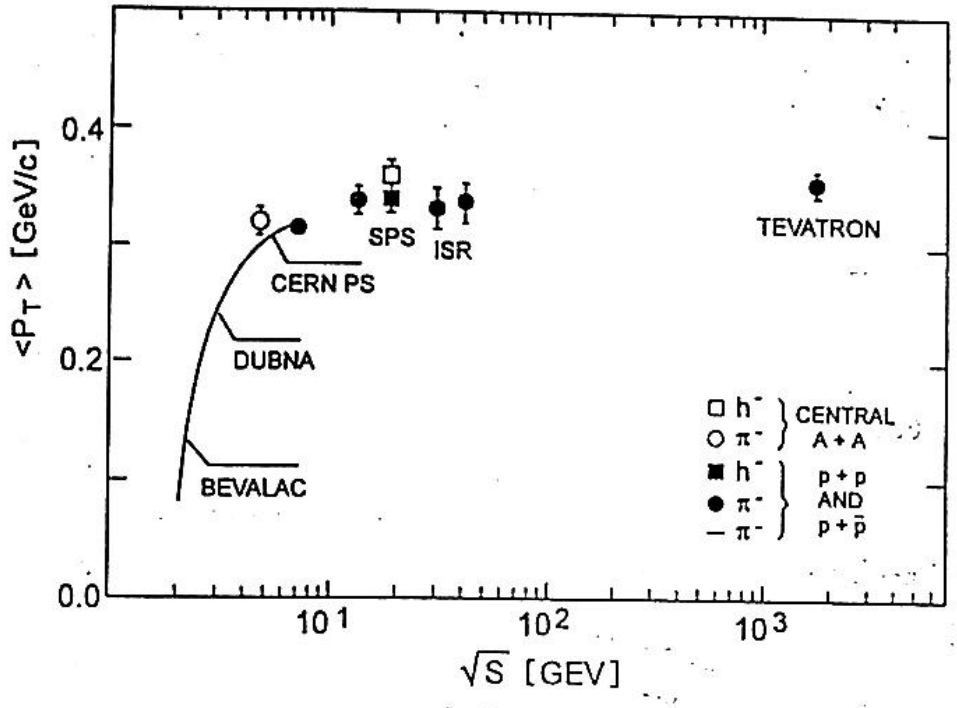


Figure 2. Average transverse momenta of negatively charged hadrons and pions in $p+p$, $(p+\bar{p})$and $A+A$ collisions as function of the total c.m. energy per incident nucleon pair.

p.108c

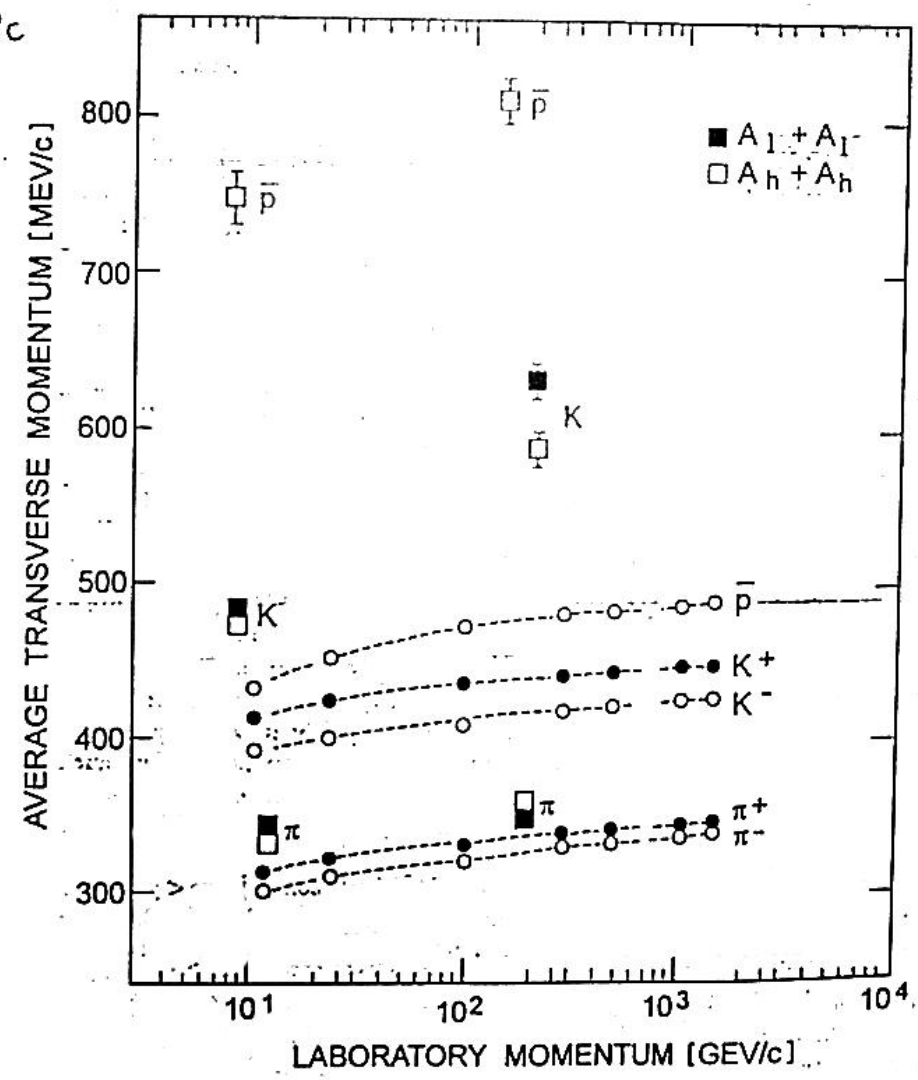


Figure 3. Average transverse momenta of pions, kaons and antiprotons in $p+p$ and $A+A$. collisions as function of the total c.m. energy per incident nucleon pair.

Fig 12

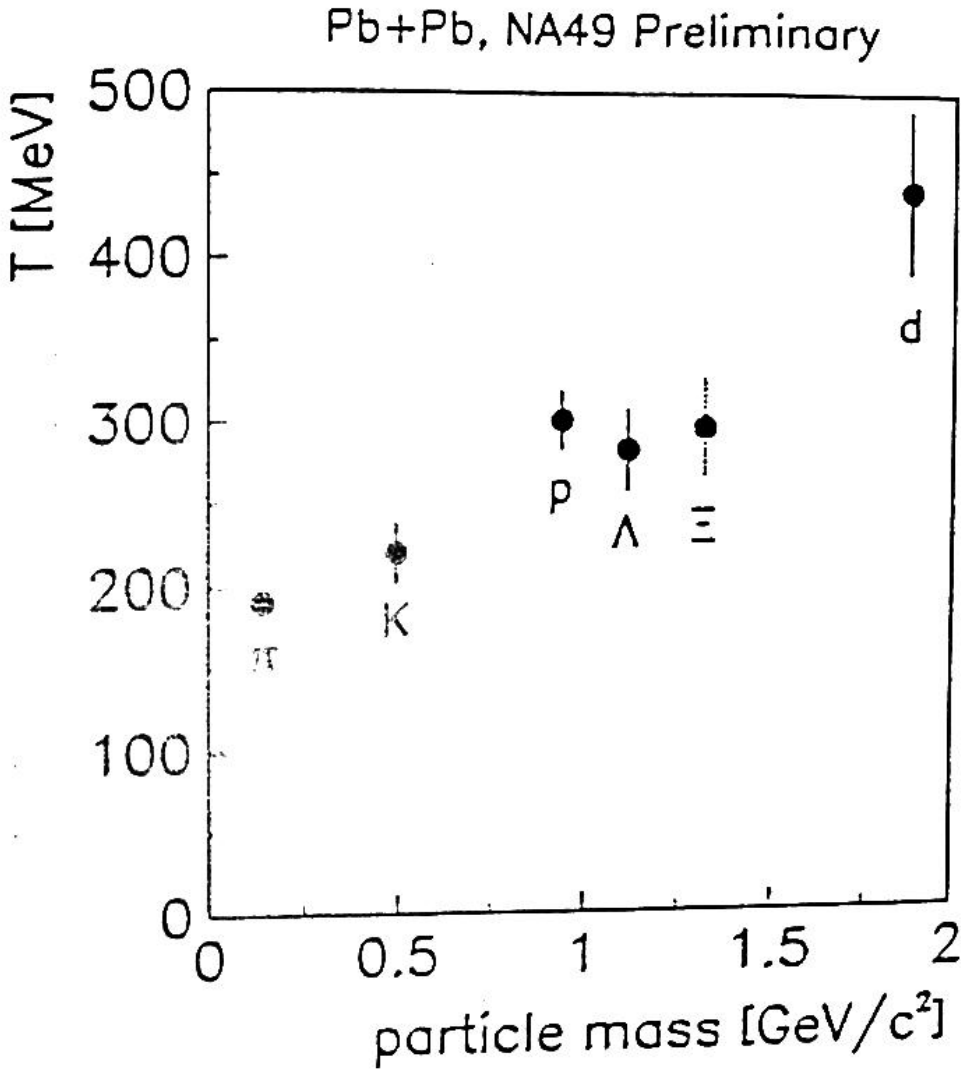


Figure 4: Inverse slope parameters ('temperature') for various hadrons

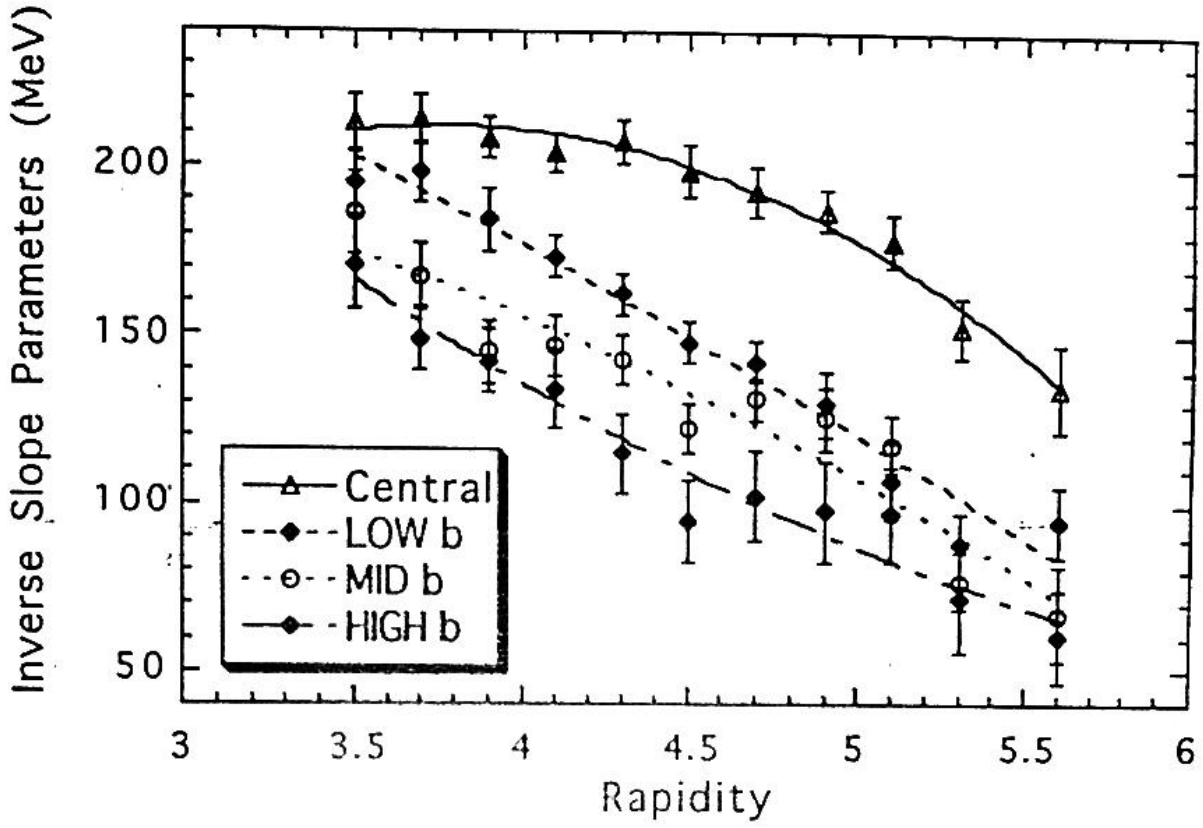


Figure 12: Inverse slope parameters for positive minus negative hadrons for all four centrality data sets. The curves are simple second-order polynomial fits to each data set.

Fig 13

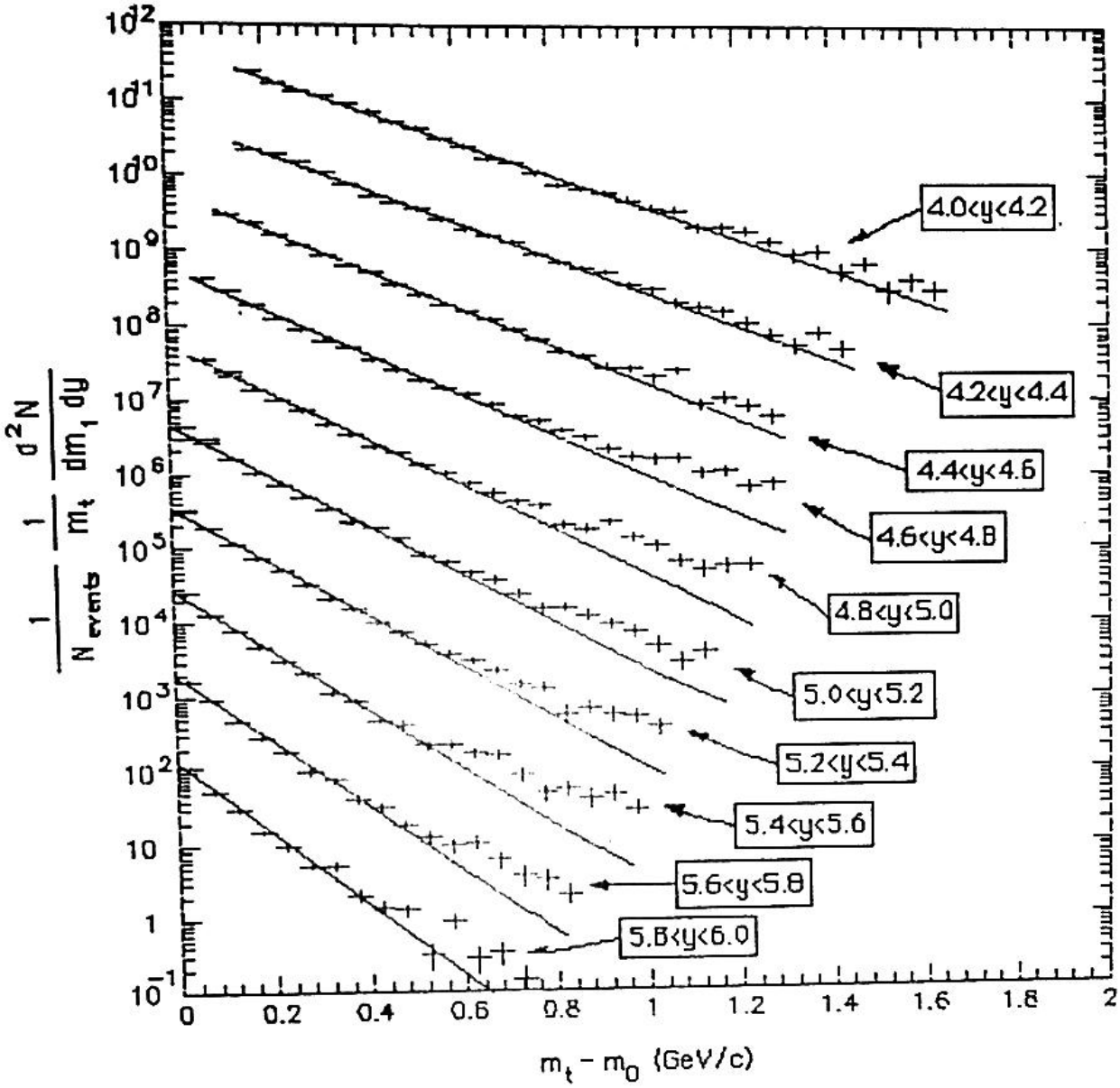


Figure 3: Transverse mass distributions for negative hadrons from central S+Au collisions in various 0.2 unit wide rapidity bins. Each curve has been multiplied by successive factors of 10 for added visibility. The solid lines are exponential fits to the data shown.

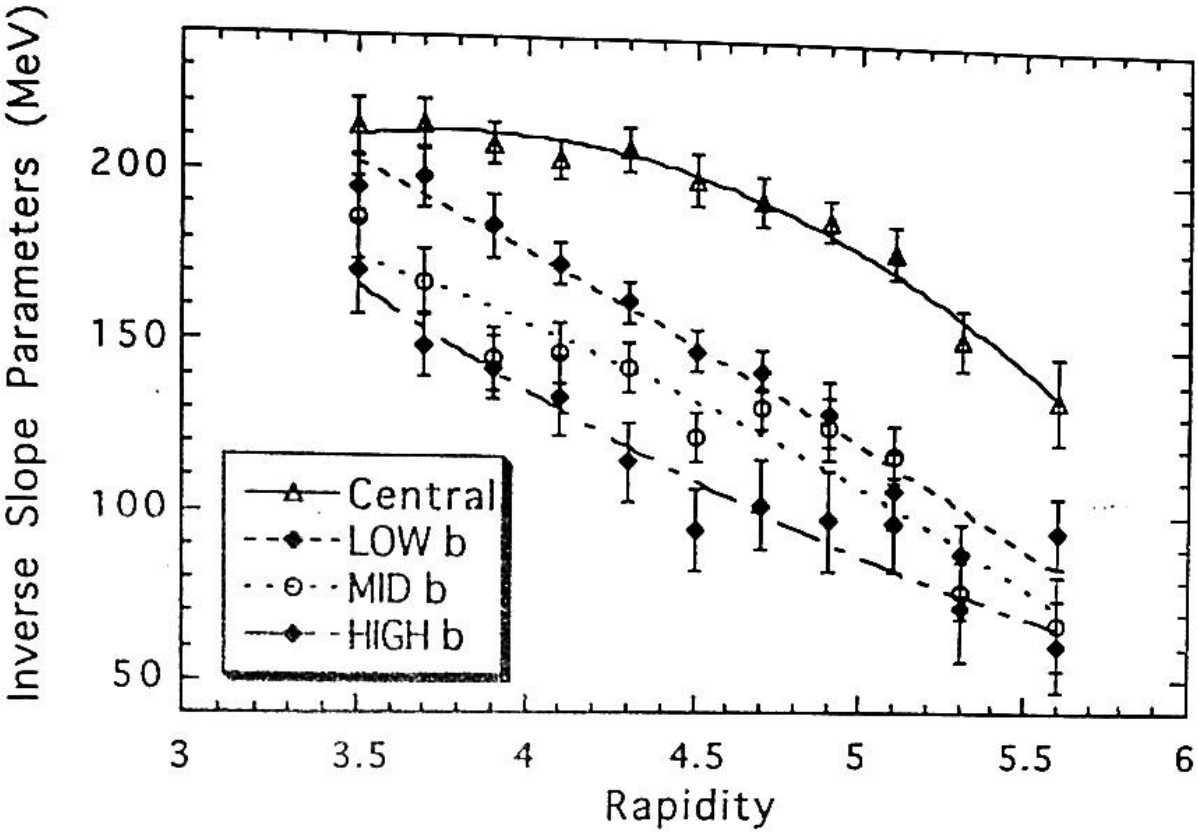


Figure 12: Inverse slope parameters for positive minus negative hadrons for all four centrality data sets. The curves are simple second-order polynomial fits to each data set.

SYGNATURY (SYGNAŁY) QGP

Jeżeli układ przeszedł przez stan QGP – to „ślady" tego procesu mogą być odnalezione w charakterystykach i składzie produktów .

Fig.15 (lista wybranych sygnałów QGP)

Uwaga: Żaden z sygnałów nie stanowi **dowodu** ,lecz są to ważne „poszlaki" (por. sensacje prasowe z początku 2000r.!)

Do najczęściej (i najwcześniej) dyskutowanych sygnatur należą: wzrost produkcji dziwności i…tłumienie produkcji J/ψ

Argumenty…(skład kwarkowy tych cząstek;hadronizacja w otoczeniu ogromnej liczby i gęstości kwarków)

Przykłady danych o wzroście produkcji cząstek dziwnych i antybarionów (w tym: dziwnych) **Fig.**16,**Fig.**17.

Ważna sugestia,dotycząca zależności produkcji dziwności od energii: **Fig.18** (być może energia „krytyczna" dla QGP jest znacznie niższa niż wcześniej sądzono…).

→ „ku niższym energiom" …

Warto badać zderzenia o b.wysokiej krotności (umożliwiającej wyznaczanie gęstości,temperatury i składu produktów (także cząstek z ciężkimi kwarkami!) w pojedynczych zderzeniach jądrowych

→ „ku znacznie wyższym energiom" (RHIC –już są wstępne dane), LHC – po 2008r.(?).

Uwaga końcowa: powyżej omówiono tylko **wybrane** elementy obszernej dziedziny. pominięto m.i.: badania porównawcze zderzeń N –N, hadron-jadro, jądro-jądro (rola gęstego środowiska w procesach jądrowych…),badanie fluktuacji **nie**statystycznych w produkcji czastek i….wiele innych.

(zainteresowanych-zapraszamy do Pawilonu (pok.12 i 9),gdzie można porozmawiać z członkami zespołu,zajmującego się fizyką zderzeń relatywistycznych jąder)

- J/ψ $(c\bar{c})$ SPS
- „termiczne" fotony i dileptony SPS
- jet quenching RHIC
- pływ (flow) radialny i eliptyczny SPS RHIC
- stosunki produkcji hadronów
- (w tym: **dziwnych ,multi-** i

  antydziwnych) SPS RHIC
- nadmiar emisji par leptonów

  o małej masie ($m_{\mu\mu}$) SPS

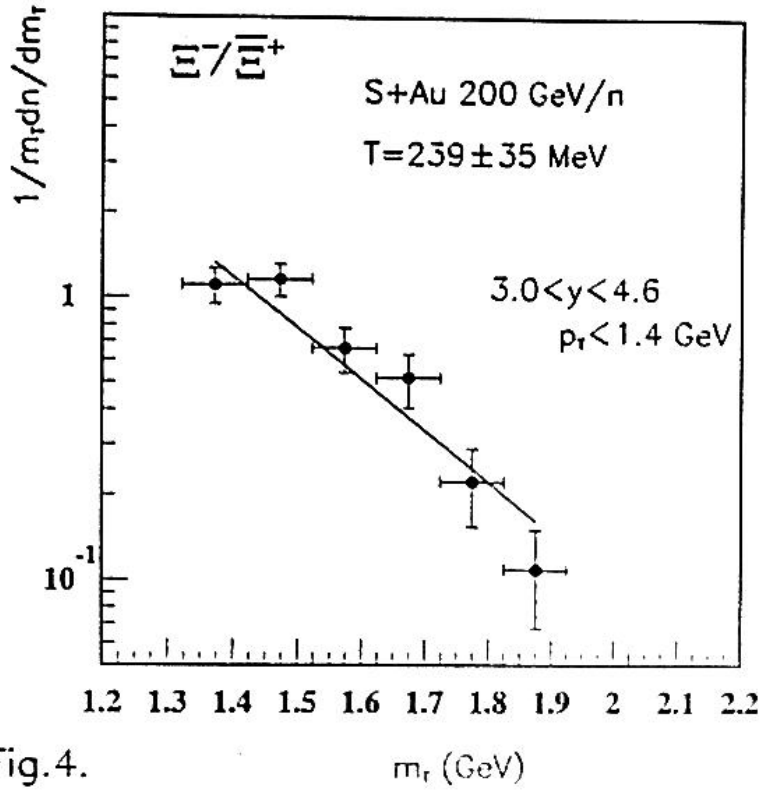


Fig.4.

Figure 1. Transverse mass distribution of Ξ's. The line corresponds to the formula for the exponential shape of m_T distribution.

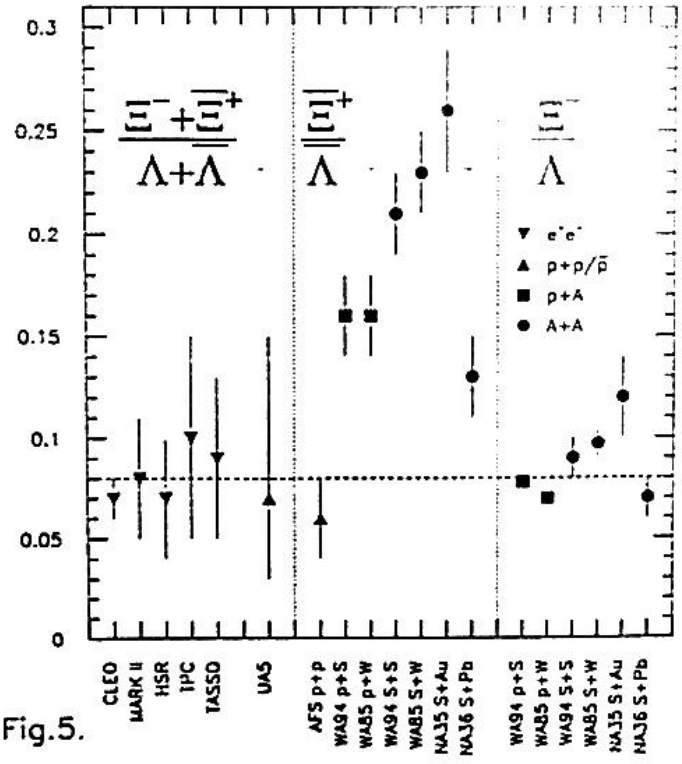


Fig.5.

Figure 2. Comparision of Ξ^-/Λ and $\bar{\Xi}^+/\bar{\Lambda}$ obtained in different p-p, $p-\bar{p}$, e^+-e^- and A-A collisions.

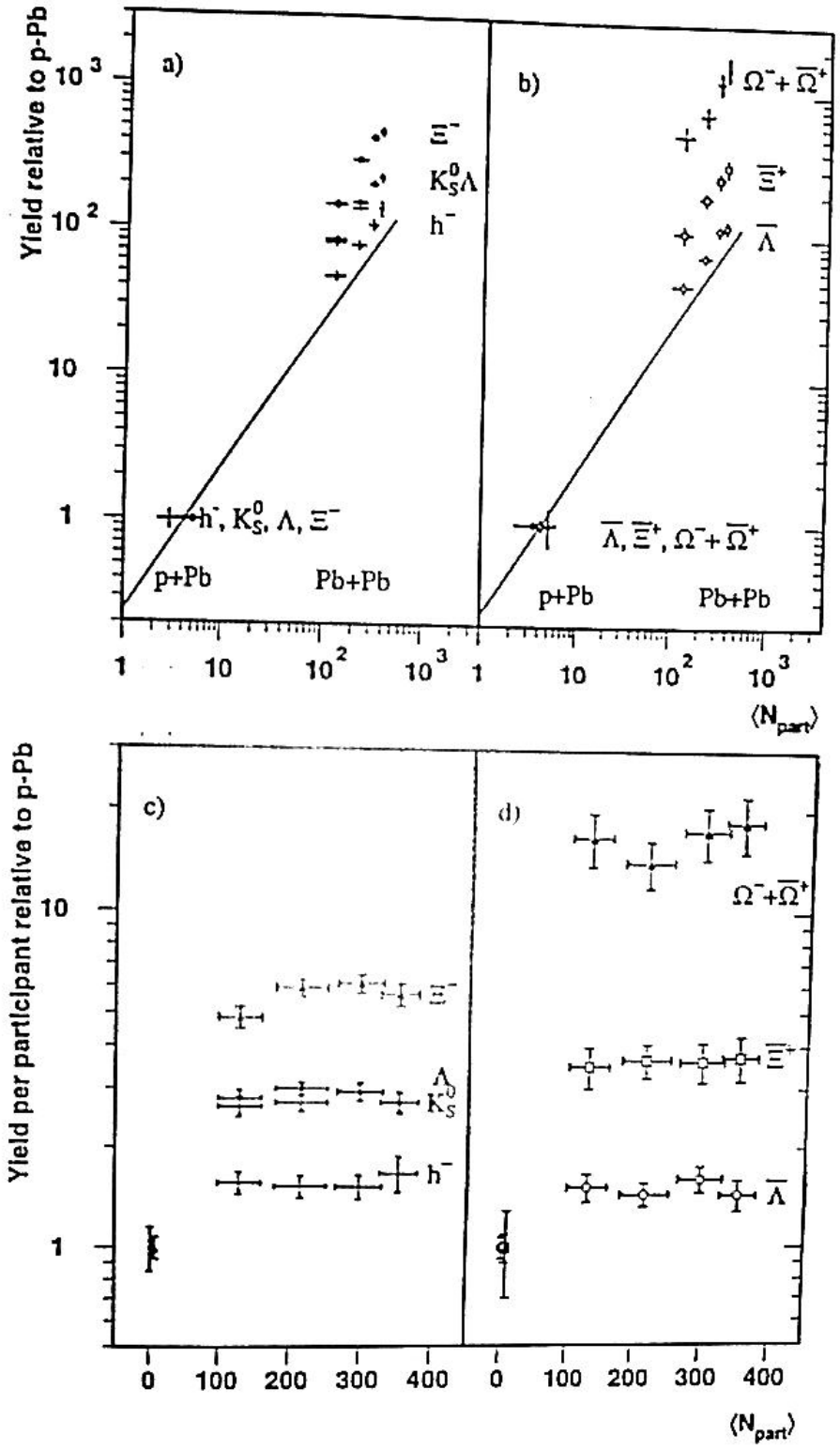
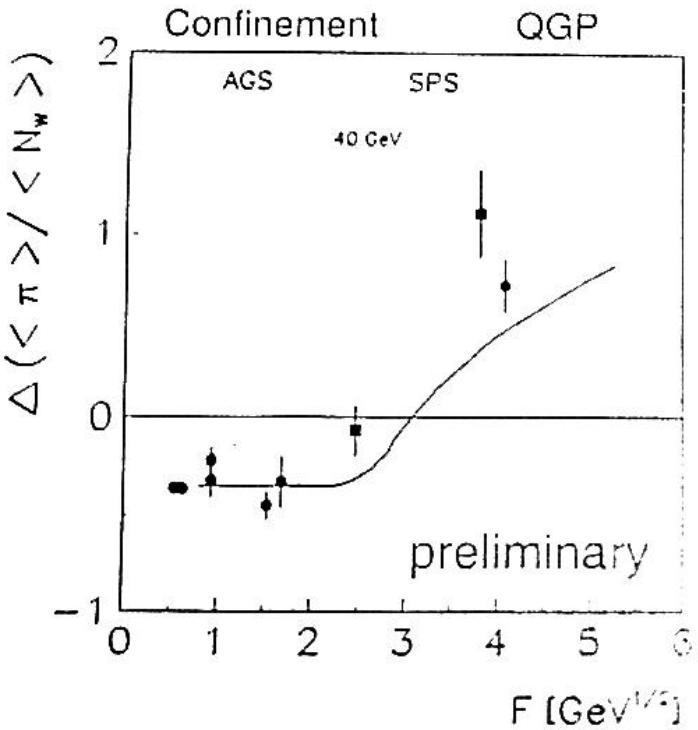
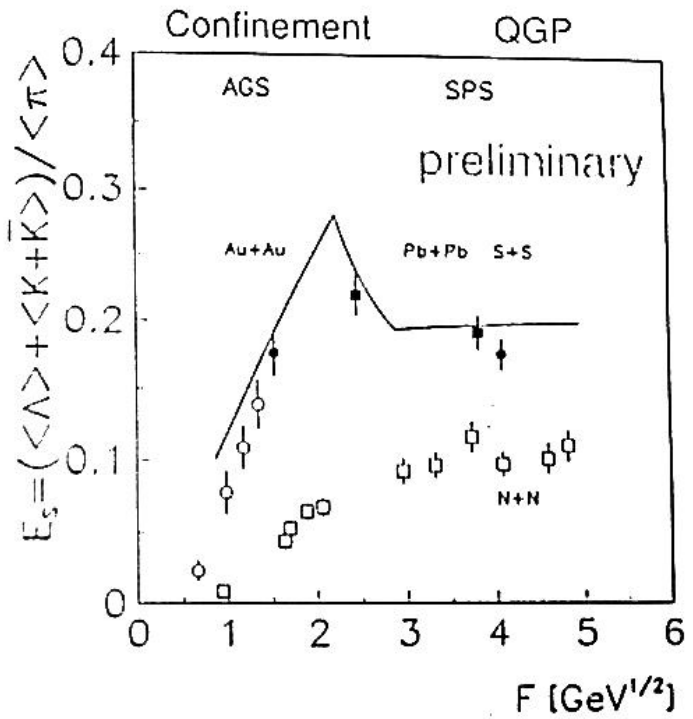


Figure 3: Yields, expressed in units of yields observed in p-Pb collisions, as a function of the number of participants for a) h^-, K^0_S, Λ and Ξ^-; b) $\overline{\Lambda}$, $\overline{\Xi}^+$ and $\Omega^- + \overline{\Omega}^+$. The solid line represents a function through the p-Pb point proportional to the number of participants $\langle N_{part} \rangle$. The corresponding yields per participant are shown in c) and d). The proton points are juxtaposed on the horizontal scale.

Statistical Model of the Early Stage





M. Gaździcki, M.I. Gorenstein, Acta Phys. Pol. B30 (1999) 2705

- Assuming statistical production of entropy and strangeness
- Includes phase transition close to 40 *A*GeV