

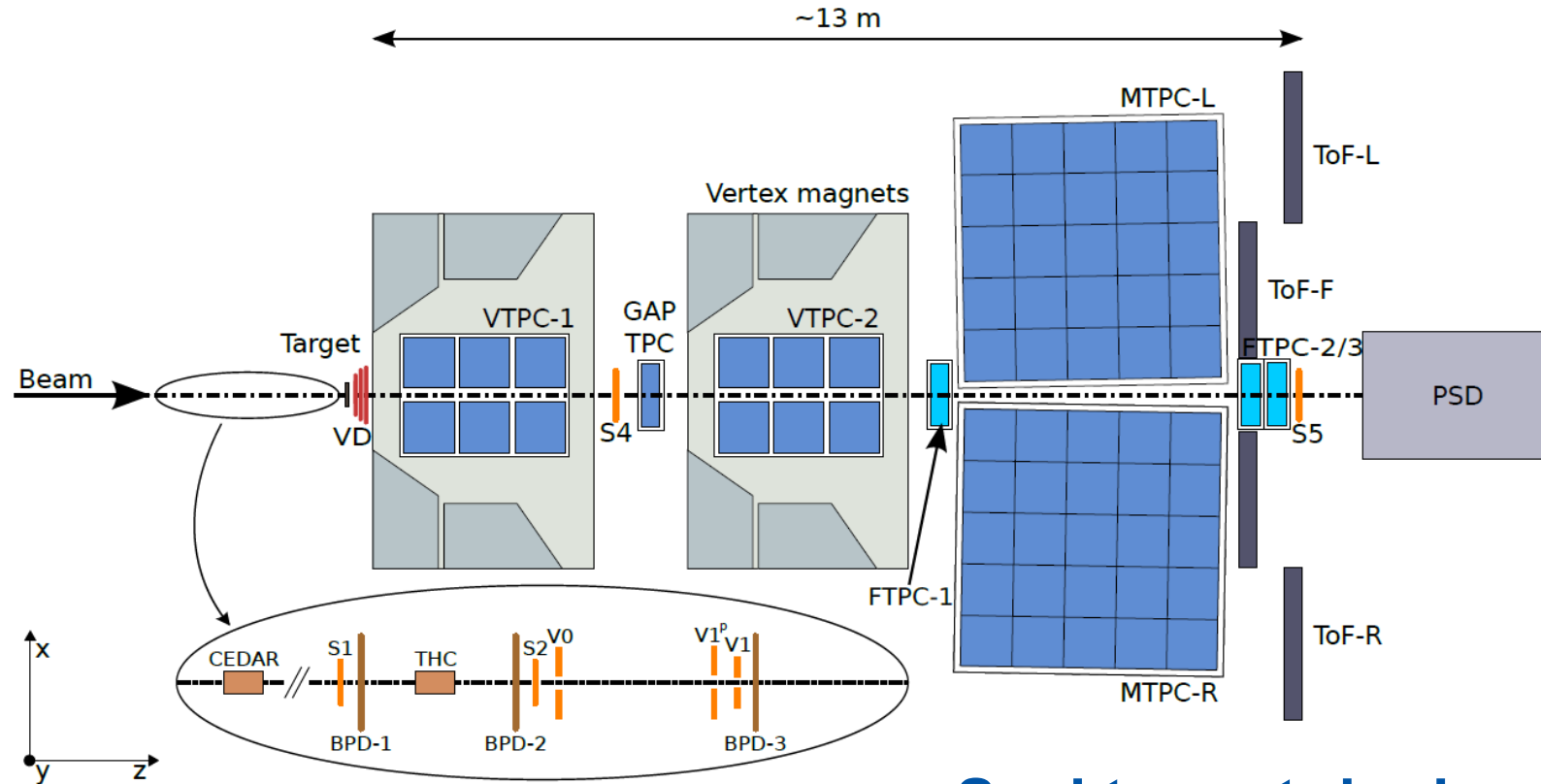


Badanie relatywistycznych zderzeń  
hadronów i jonów przy wykorzystaniu  
detektora NA61/SHINE działającego  
przy akceleratorze SPS w CERN

Szymon Puławski  
for NA61/SHINE

- **Wprowadzenie**
- **Badania przejścia fazowego (onset of deconfinement)**
- **Onset of fireball**
- **Produkcja dziwności w zderzeniach p+p:**
  - Produkcja  $\Lambda$
  - Produkcja  $\Xi$
  - Poszukiwanie pentakwarków
  - $K^*(892)^0$
- **NA61/SHINE 2020+**
- **Podsumowanie**

## Eksperyment ze stacjonarną tarczą ulokowany przy akceleratorze SPS w CERN

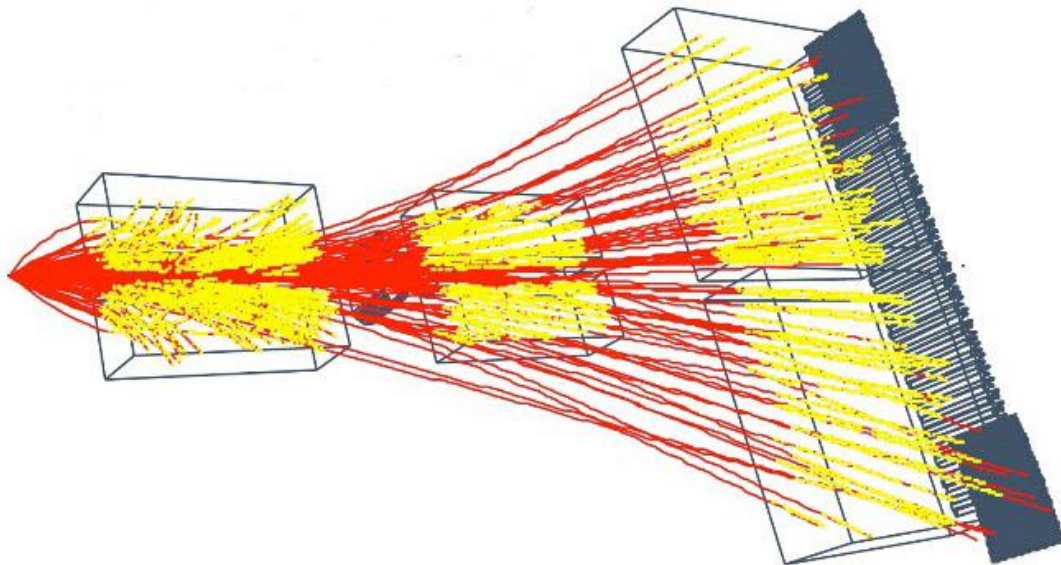


Wiązki:

- Ciężkie jony (Be, Ar, Xe, Pb)  
 $p_{\text{beam}} = 13A - 150A \text{ GeV}/c$
- Hadrony ( $\pi$ , K, p)  
 $p_{\text{beam}} = 13 - 400 \text{ GeV}/c$
- $\sqrt{s_{NN}} = 5.1 - 16.8 (27.4) \text{ GeV}$

**Spektrometr hadronów o dużej akceptacji** –  
 pokrycie całej pozytywnej hemisfery, pomiar od  $p_T = 0$

## Eksperyment ze stacjonarną tarczą ulokowany przy akceleratorze SPS w CERN



- Duża akceptacja  $\approx 50\%$  produkowanych cząstek
- Wysoka rozdzielczość pędowa:  

$$\sigma(p)/p^2 \approx 10^{-4} \text{ (GeV/c)}^{-1} \text{ (at full B=9 T m)}$$
- Identyfikacja cząstek w oparciu o straty energii ( $dE/dx$ ) i czas przelotu (tof)  

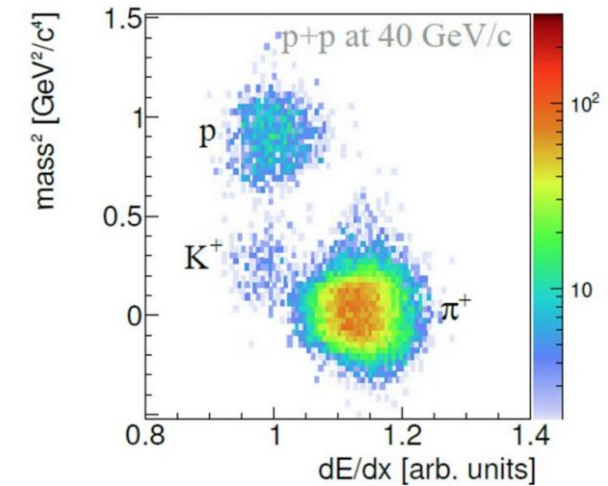
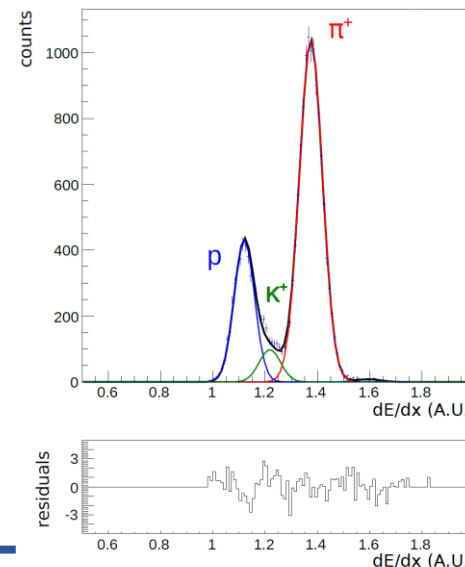
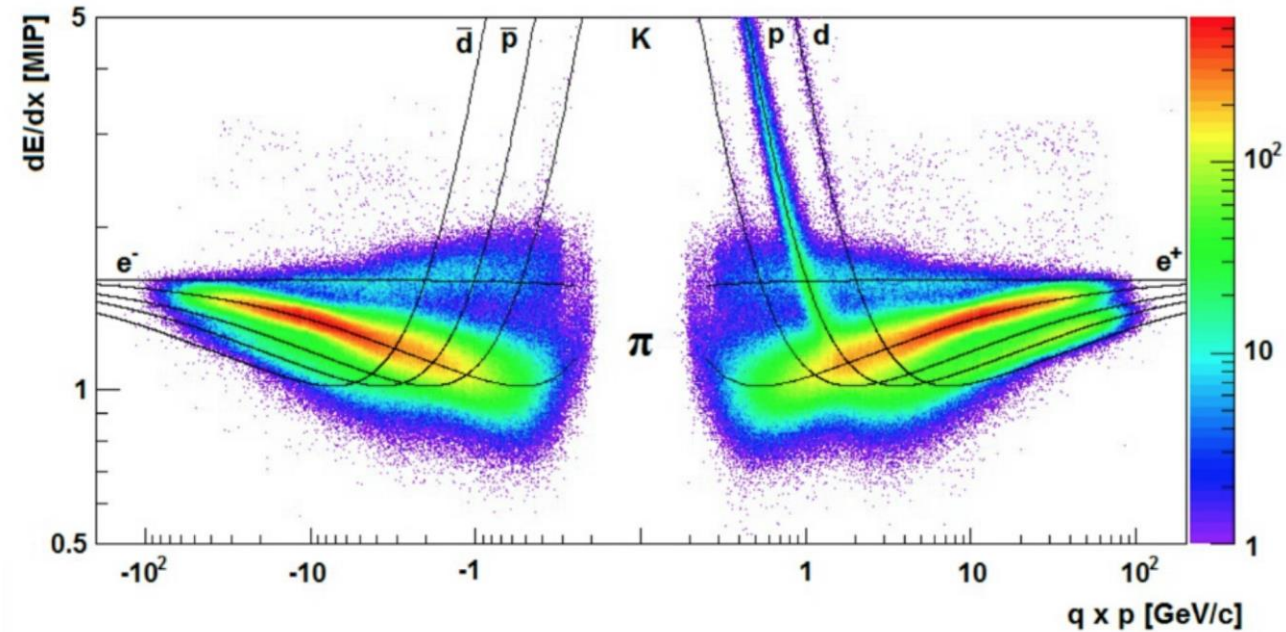
$$\sigma(dE/dx)/\langle dE/dx \rangle \approx 0.04; \sigma(m_{inv}) \approx 5 \text{ MeV}$$

$$\text{ToF-L/R: } \sigma(t) \approx 60 \text{ ps}; \text{ ToF} - F : \sigma(t) \approx 120 \text{ ps}$$
- Wysoka wydajność detektora: 95%

# NA61/SHINE – identyfikacja naładowanych cząstek

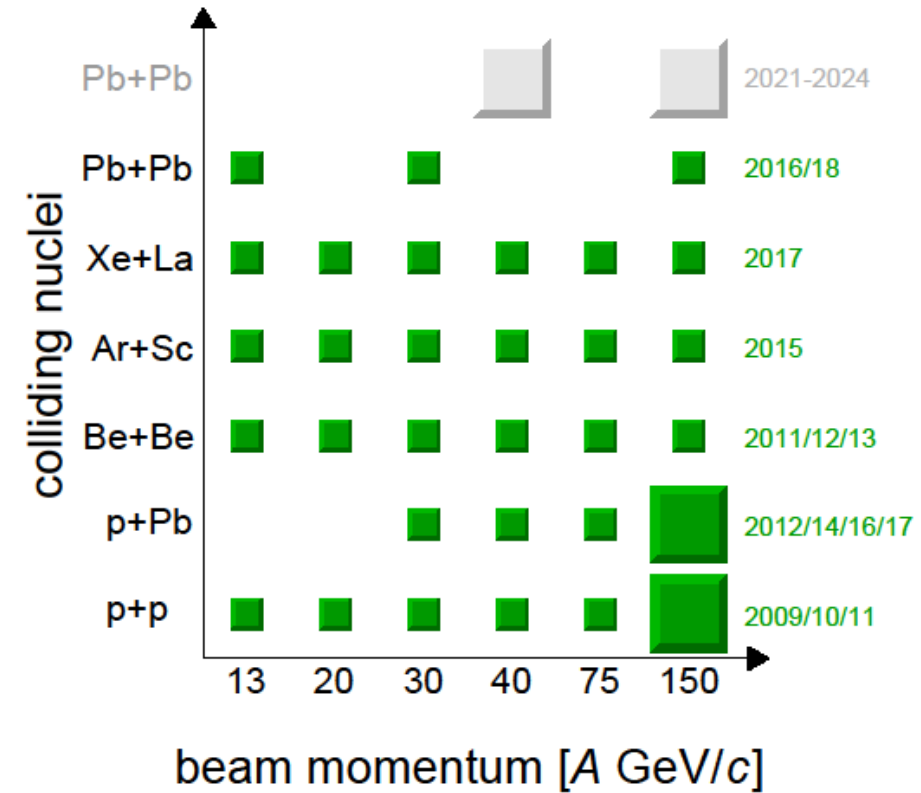
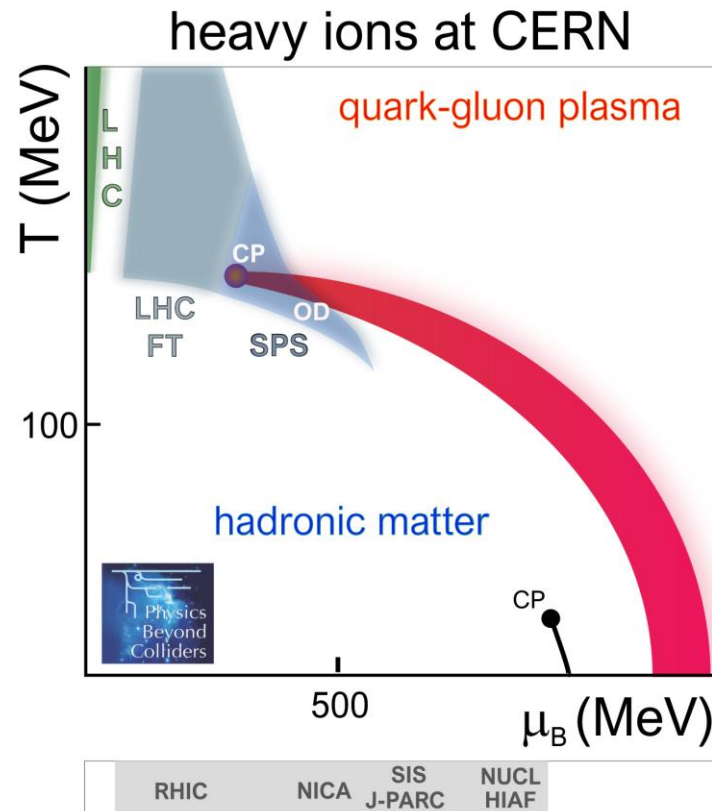
Ostateczne wyniki przedstawiają pierwotne cząstki produkowane w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych. Wyniki uwzględniają geometryczną akceptację detektora, wydajność rekonstrukcji oraz rozpady słabe i wtórne oddziaływania.

- **Analiza  $h^-$**  bazuje na fakcie, iż większość negatywnie naładowanych cząstek stanowią mezony  $\pi^-$ . Udział innych cząstek jest uwzględniany w oparciu o modele Monte-Carlo.
- **Analiza  $dE/dx$**  wykorzystuje pomiar strat energii w TPC do identyfikacji cząstek.
- **Metoda tof- $dE/dx$**  określa ilość  $\pi$ , K, p na podstawie pomiaru strat energii i czasu przelotu cząstek.

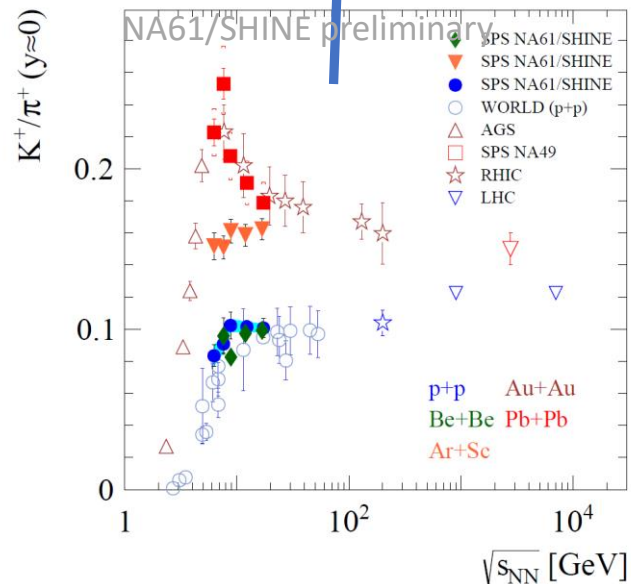
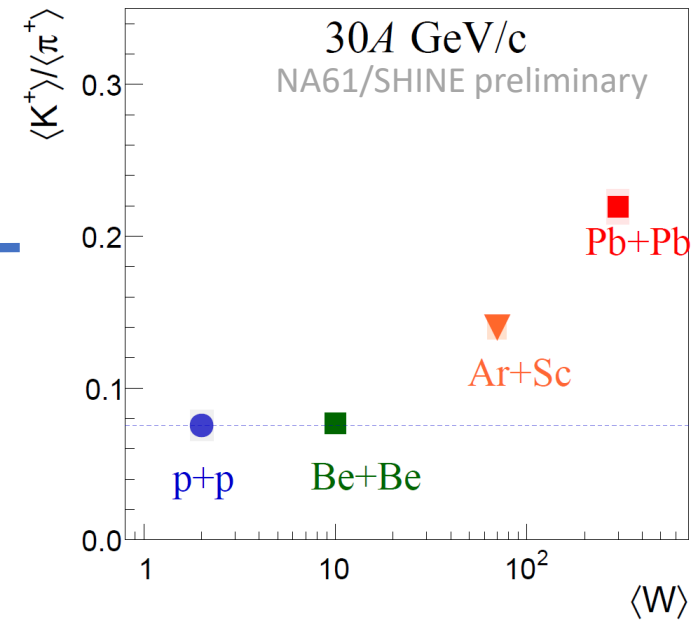
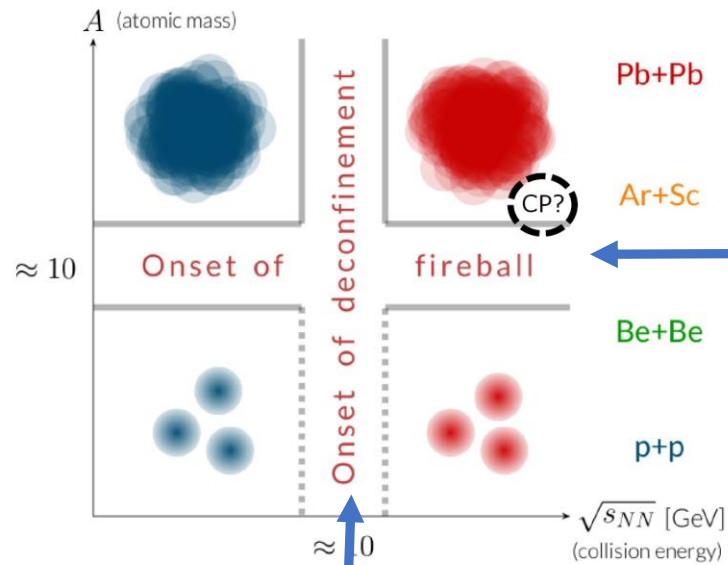


# NA61/SHINE 2-wymiarowy skan

W celu badania przejścia fazowego silnie oddziałującej materii NA61/SHINE przeprowadziło skan 2D dla różnych energii i systemów.



# Unikalność wyników ciężkojonowego programu NA61/SHINE



## Unikalne dane NA61/SHINE:

- Onset of deconfinement
- Onset of fireball
- ...

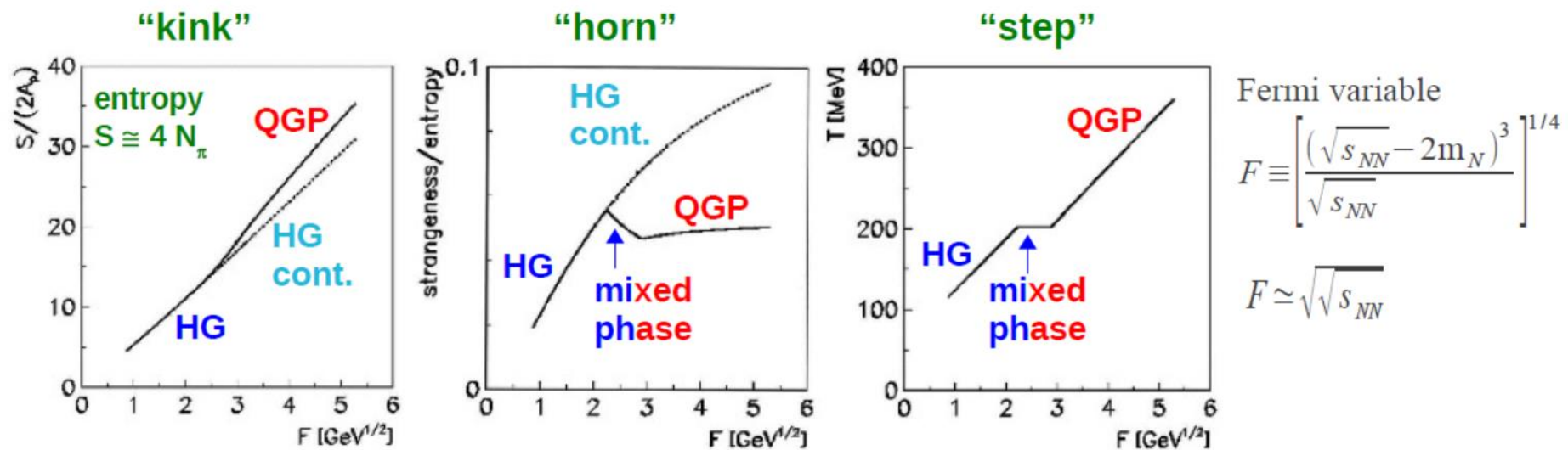




## Badanie przejścia fazowego: produkcja cząstek



# Statistical Model of the Early Stage (SMES)



Przejście fazowe 1-szego rodzaju z gazu hadronowego (HG) do plazmy kwarkowo-gluonowej pomiędzy energiami AGS i SPS  $\sqrt{s_{NN}} \approx 7 \text{ GeV}$

Ilość stopni swobody wzrasta przy przejściu HG → QGP

Całkowita entropia i całkowita dziwność są zachowane przed i po hadronizacji (nie mogą maleć przy przejściu QGP → HG)

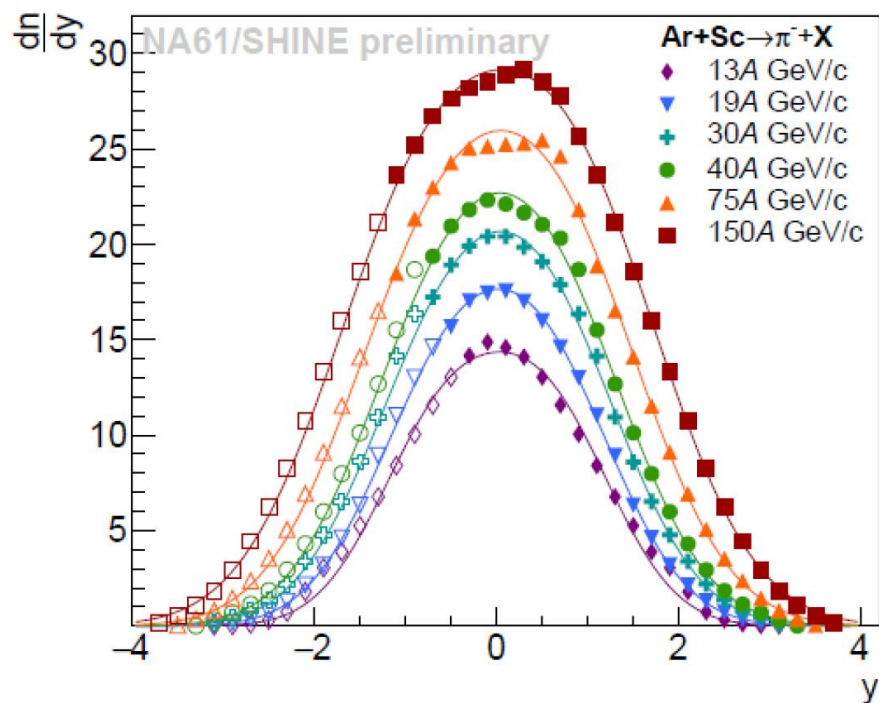
Masa cząstek dziwnych maleje przy przejściu HG → QGP ( $m_{\Lambda, K, \dots} > m_s$ )

Stała temperatura i ciśnienie w fazie mieszanej

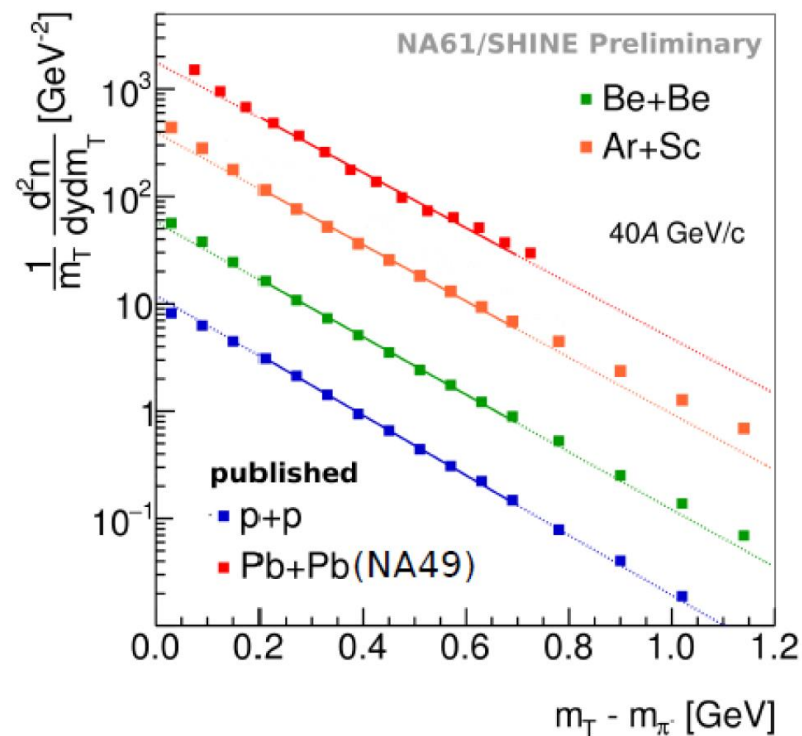
# Przejście fazowe: kink

Rozkłady  $\pi^-$  zmierzone w dużej akceptacji:  
pokrycie całej pozytywnej hemisfery, pomiar od  $p_T = 0$ .

Collision energy dependence



System size dependence



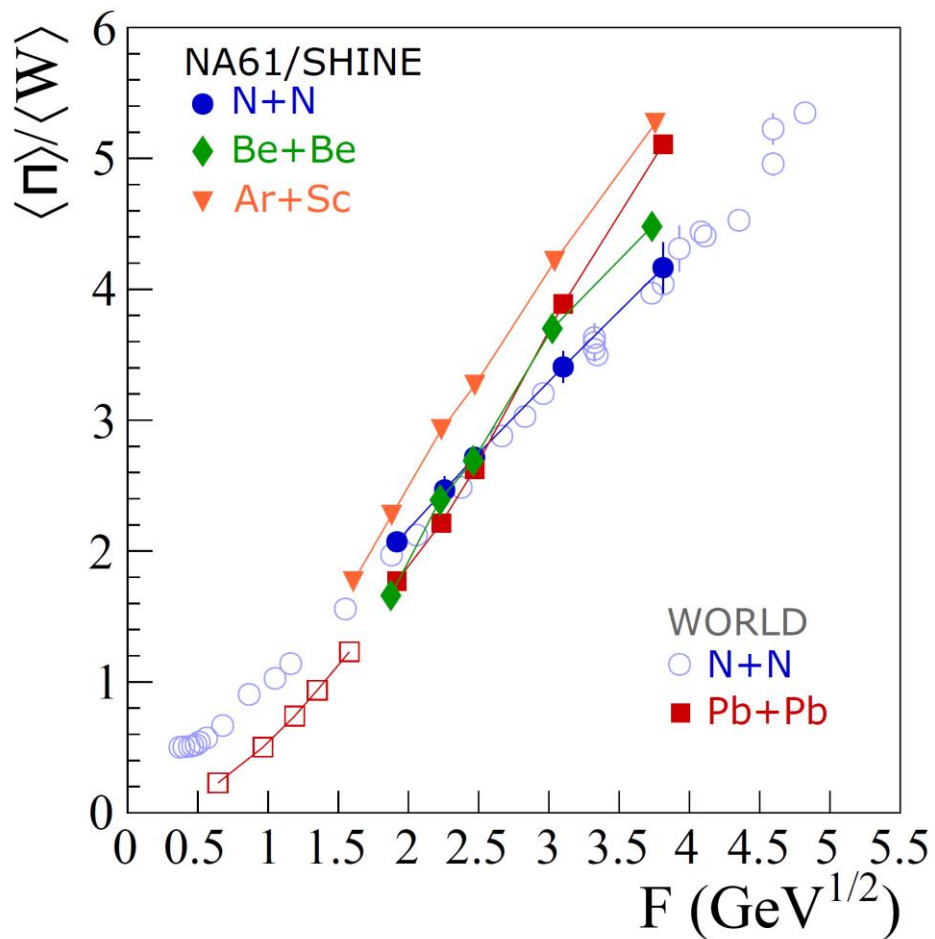
Rozkłady  
pośpieszności  
 $\approx$  funkcja Gaussa,  
niezależnie od  
energii zderzenia  
i rozmiaru systemu

Duża akceptacja  
pozwała wyznaczyć  
krotności  $4\pi$

Rozkłady  $m_T$  w p+p  
są eksponencjalne,  
w cięższych  
systemach  
odbiegają od funkcji  
eksponencjalnej

# Przejście fazowe: kink

Model statystyczny uwzględniający przejście fazowe (SMES) przewiduje wzrost nachylenia  $\langle \pi \rangle / \langle W \rangle$  – **KINK** – przy przejściu fazowym do QGP ze względu na większą liczbę stopni swobody niż w HG.



**Krotność  $\langle \pi \rangle$  w energiach SPS wzrasta szybciej w centralnych zderzeniach Pb+Pb niż w p+p (kink). Obie zależności przecinają się przy energii 40A GeV**

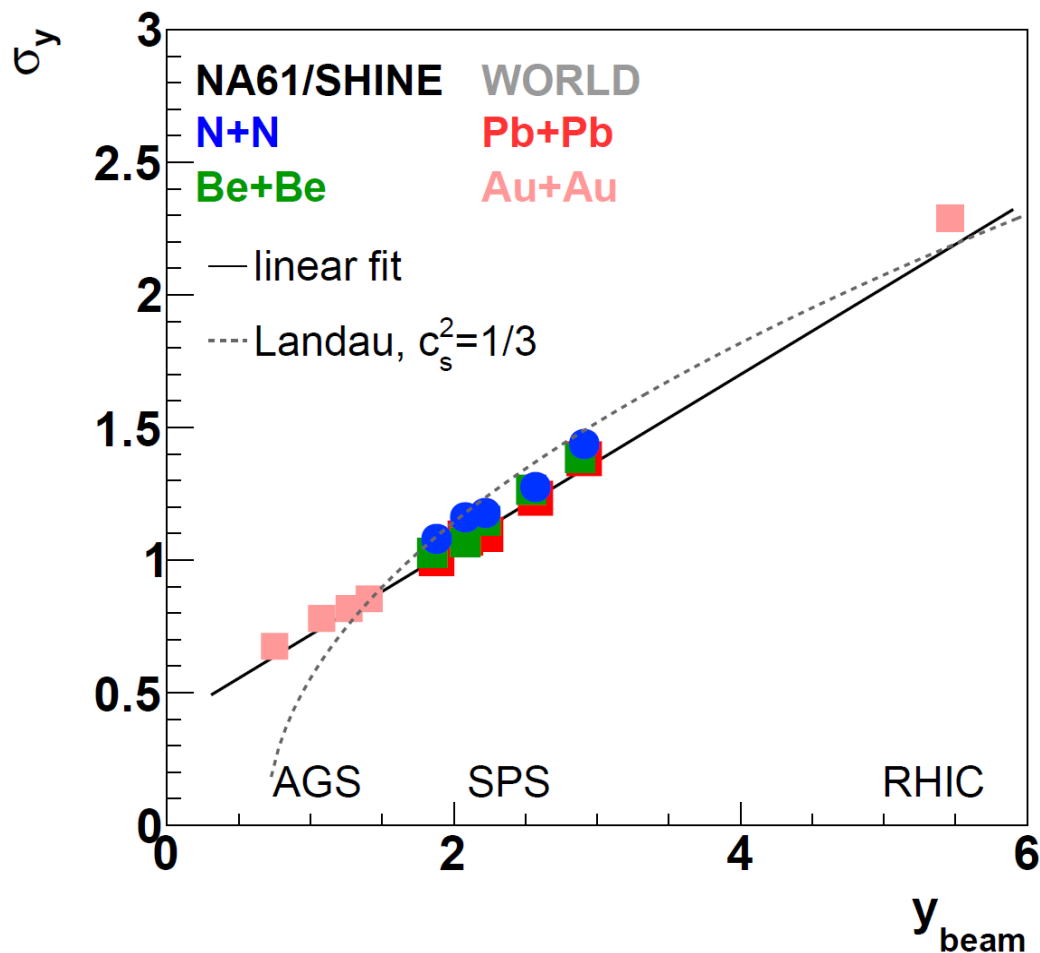
**W niskich energiach SPS, Be+Be zachowuje się podobnie do Pb+Pb; stosunek  $\langle \pi \rangle / \langle W \rangle$  w zderzeniach Be+Be przy 150A GeV zbliża się do p+p**

**Nachylenie w zderzeniach Ar+Sc jest zbliżone do obserwowanego w Pb+Pb, ale wartość jest systematycznie większa**

# Przejście fazowe: dale

Hydrodynamiczny model Landau przewiduje zależność szerokości rozkładu pośpieszności od energii zderzenia:

$$\sigma_y^2(\pi^-) = \frac{8}{3} \frac{c_s^2}{1 - c_s^4} \ln \left( \frac{\sqrt{s_{NN}}}{2m_p} \right)$$



**Zależność modelowa zbliżona do zmierzonej zależności w funkcji pośpieszności wiązki**

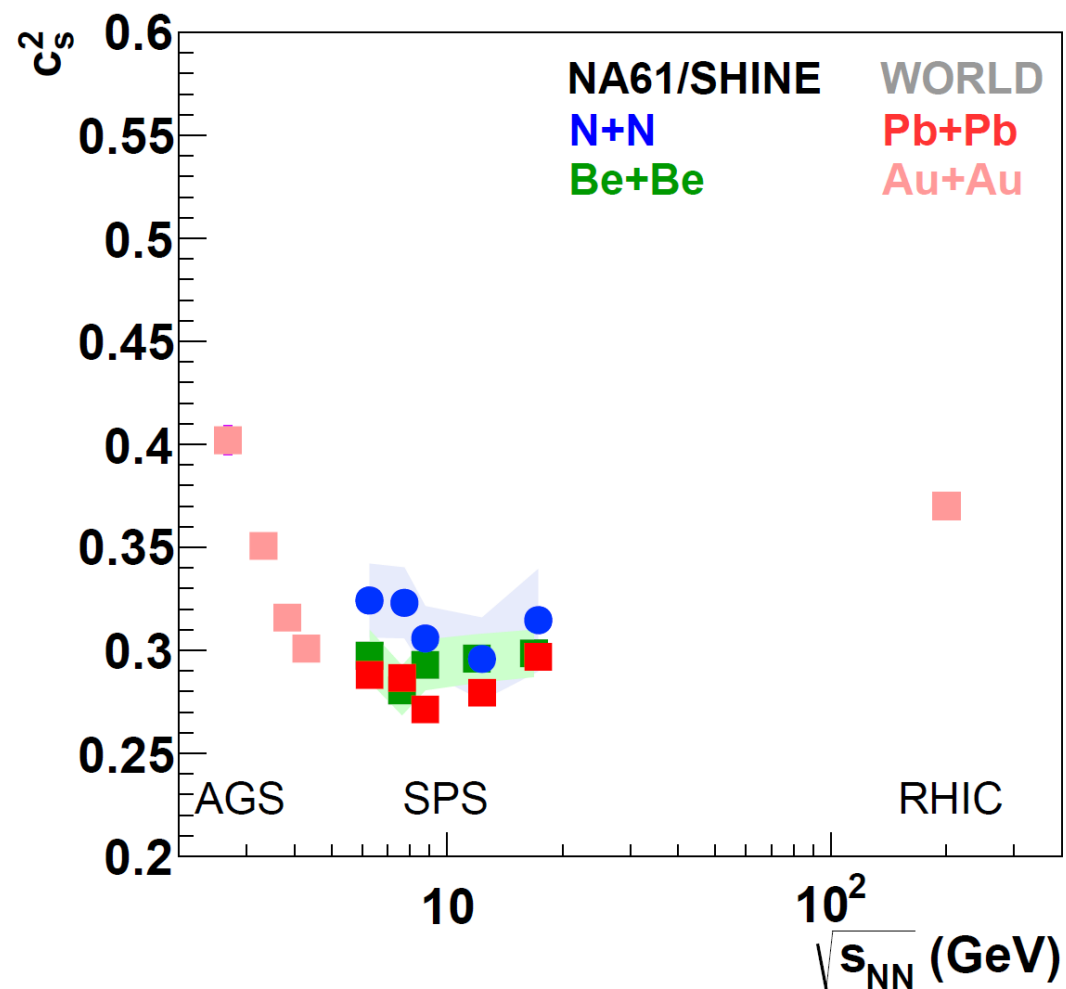
**Liniowy wzrost w funkcji  $y_{\text{beam}}$  lepiej opisuje pomiary**

**Zmierzone wartości  $\sigma_y$  są właściwie niezależne od badanej reakcji w przedziale energii SPS**

# Przejście fazowe: dale

Hydrodynamiczny model Landau przewiduje zależność szerokości rozkładu pośpieszności od energii zderzenia:

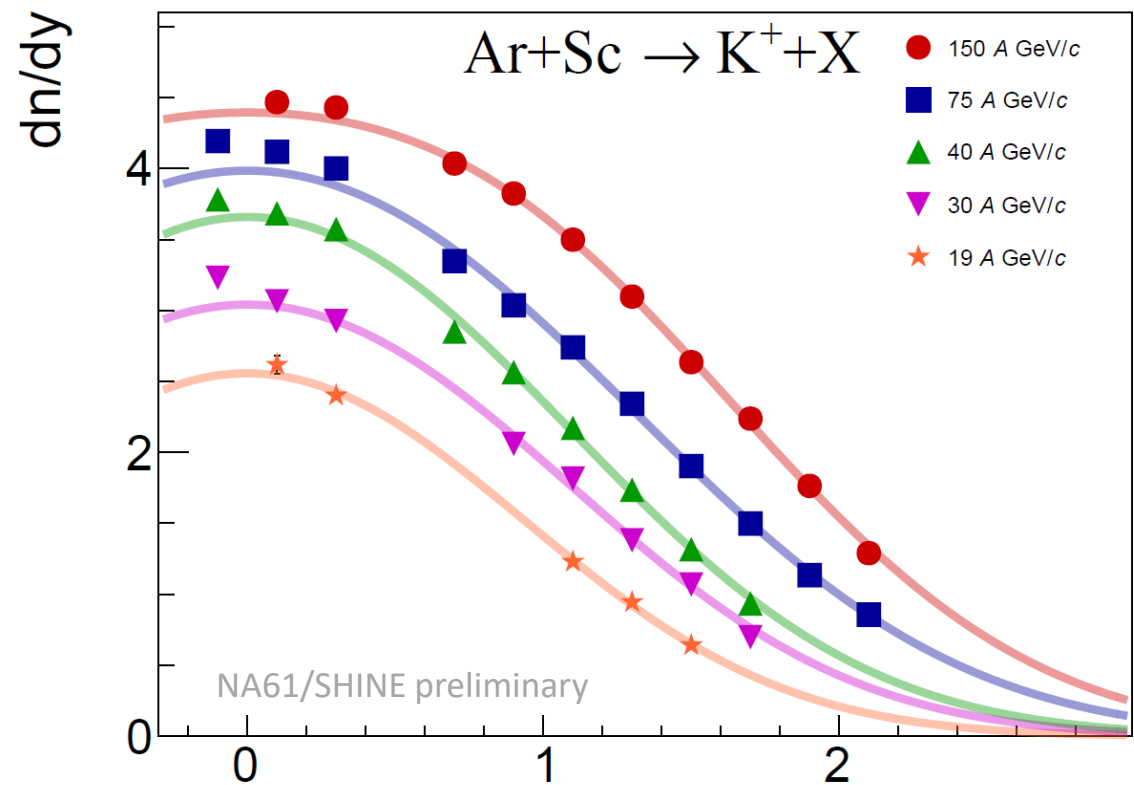
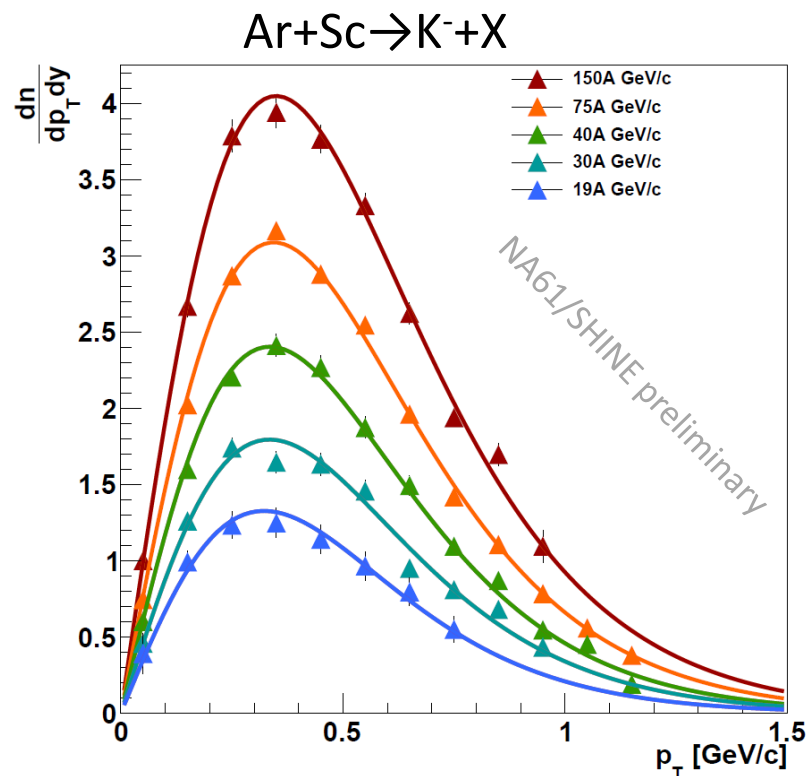
$$\sigma_y^2(\pi^-) = \frac{8}{3} \frac{c_s^2}{1 - c_s^4} \ln \left( \frac{\sqrt{s_{NN}}}{2m_p} \right)$$



**Wyniki pomiarów zderzeń p+p oraz Be+Be ze względu na ograniczoną akceptację energetyczną nie pozwalają jednoznacznie określić minimum**

**Dane z centralnych zderzeń Pb+Pb wykazują wyraźne minimum około  $\sqrt{s_{NN}} = 10$  GeV, które jest zgodne z energią przejścia fazowego**

## Rozkłady 2D kaonów produkowanych w centralnych (0-10%) zderzeniach Ar+Sc



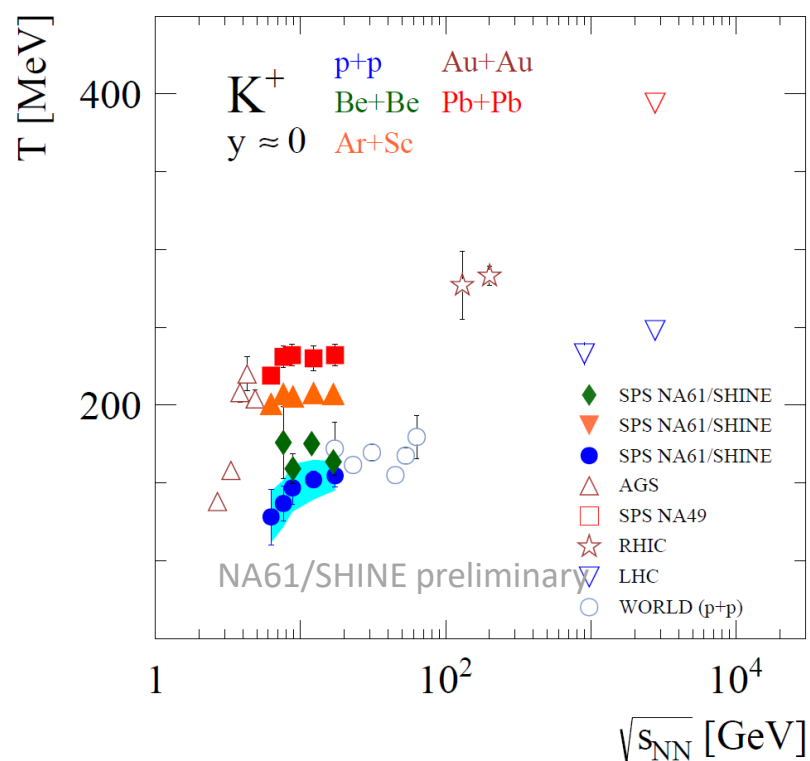
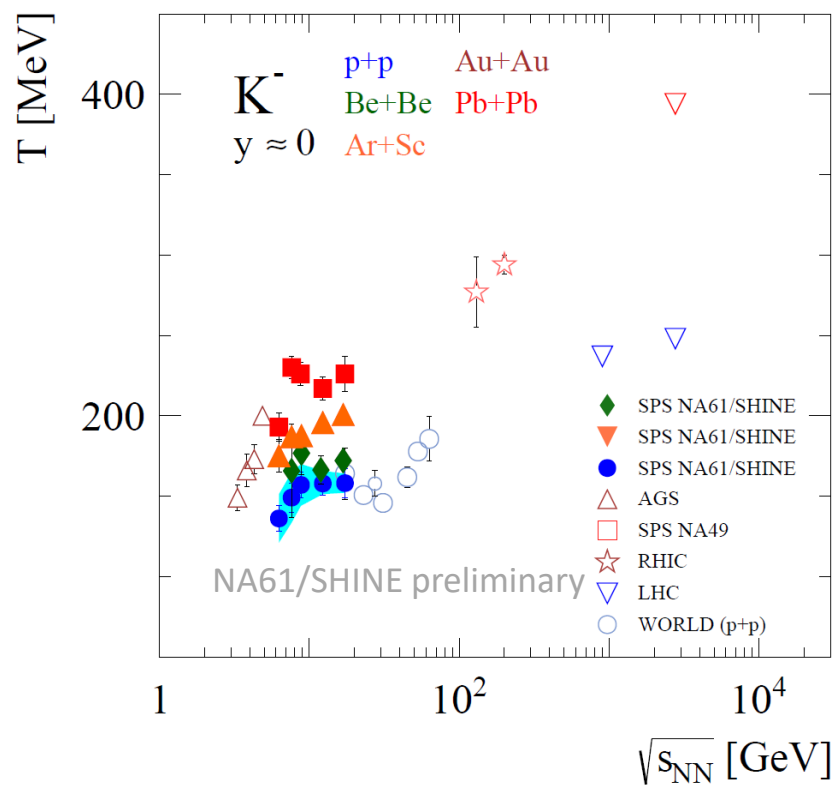
Rozkłady pędu transversalnego  $p_T$  K<sup>±</sup> zostały dopasowane z użyciem funkcji:

$$\frac{d^2 n}{dp_T dy} = \frac{S p_T}{T^2 + T m_K} \exp\left(-\frac{\sqrt{p_T^2 + m_K^2} - m_K}{T}\right)$$



# Przejście fazowe: step

Obszar Plateau – **STEP** – odwrotnego parametru nachylenia rozkładów pędu transwersalnego  $T$  jest obserwowany w zderzeniach Pb+Pb w zakresie energii SPS. Takie zachowanie jest przewidywane dla przejścia fazowego ze względu na mieszanie się faz HG oraz QGP (SMES).



**Kształt zależności energetycznej obserwowany w zderzeniach p+p, Be+Be oraz Pb+Pb jest zbliżony**

**Parametr  $T$  w zderzeniach Be+Be jest większy niż w zderzeniach p+p**

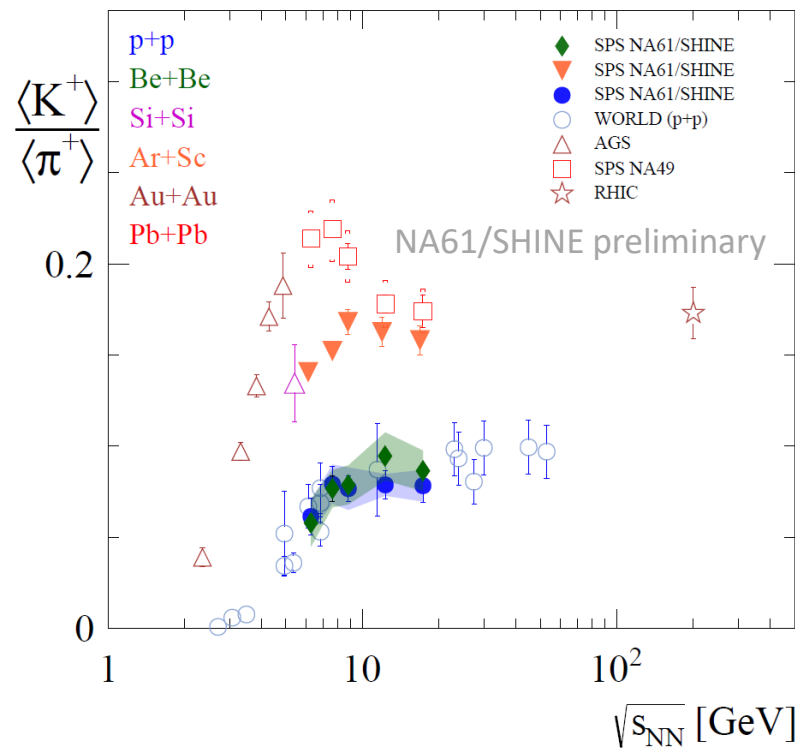
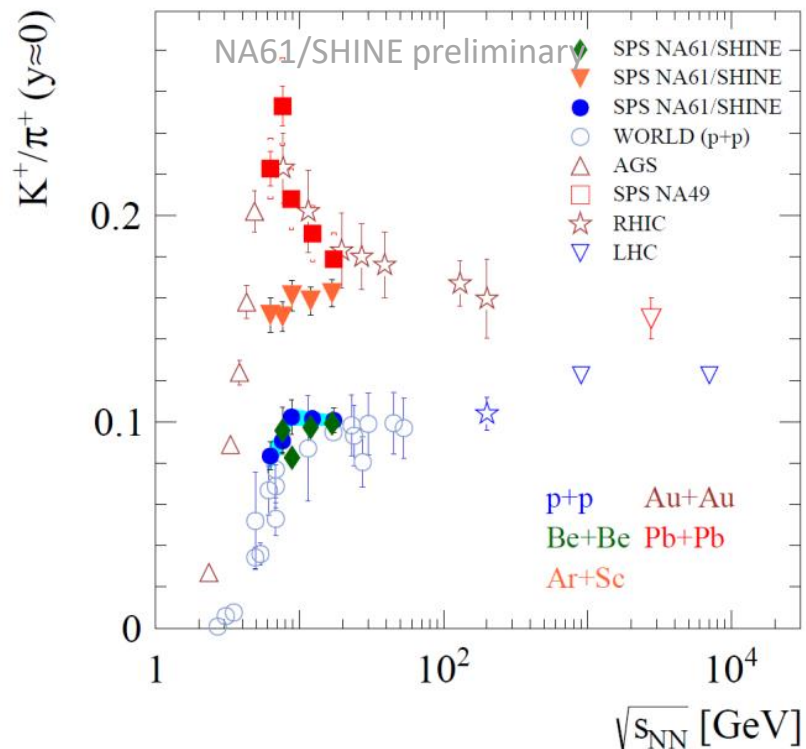
**Wyniki Ar+Sc są pomiędzy p+p/Be+Be and Pb+Pb**

p+p: NA61/SHINE Eur.Phys.J.C 77 (2017) 10, 671; Be+Be: NA61/SHINE arXiv:2010.01864; Pb+Pb:



# Przejście fazowe: horn

Gwałtowne zmiany  $K^+/\pi^+$  – HORN – obserwowane są dla zderzeń Pb+Pb w zakresie energii SPS. Zostało to przewidziane (SMES) jako sygnatura przejścia fazowego.



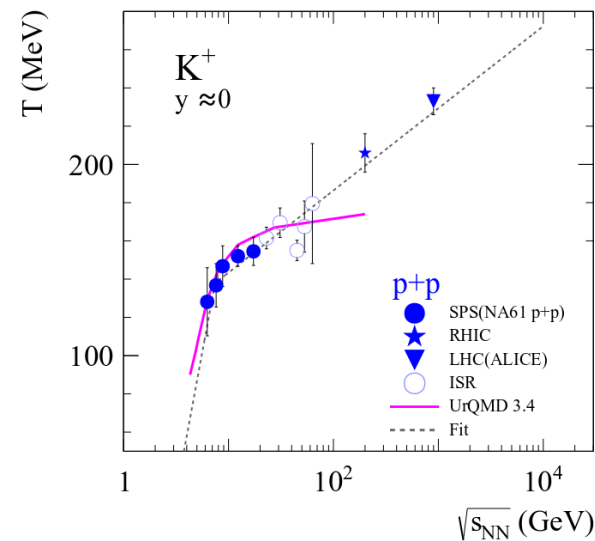
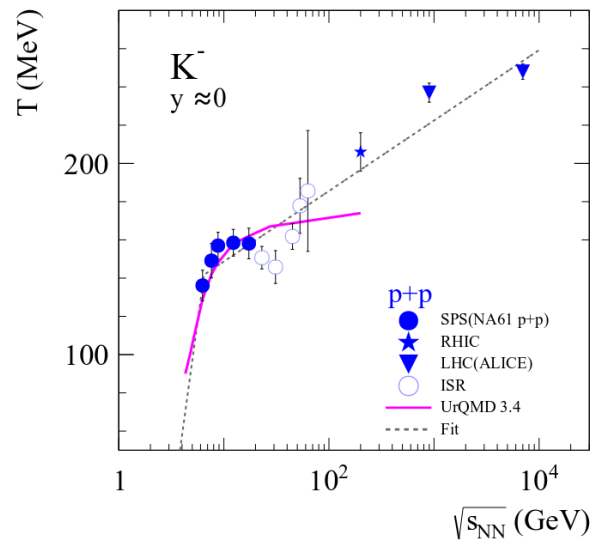
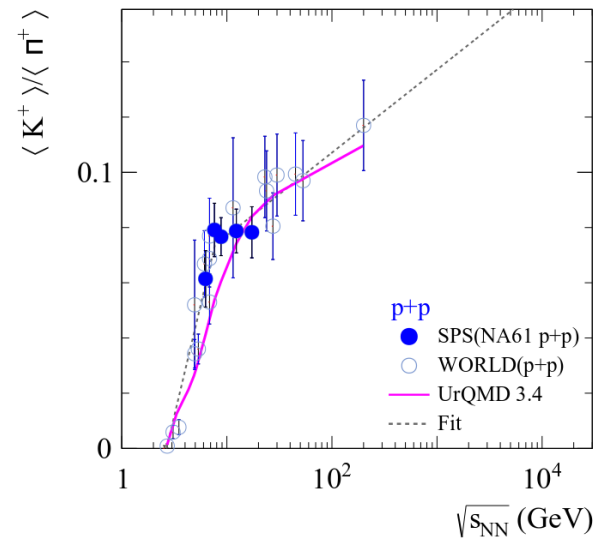
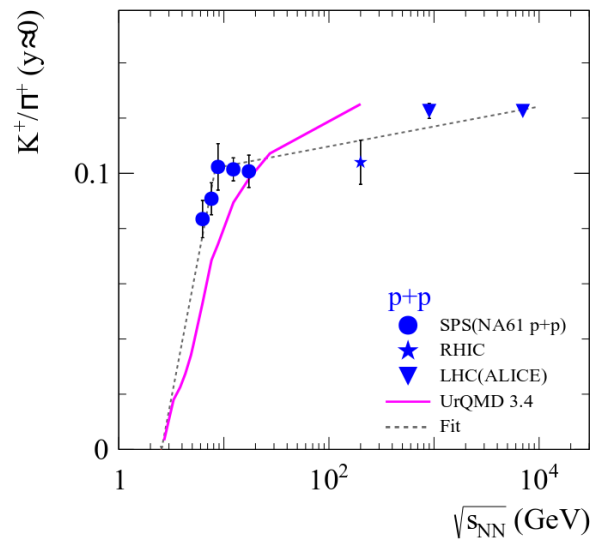
**Plateau widoczne dla zderzeń p+p**

Be+Be zbliżone do p+p

**Stosunek w Ar+Sc jest wyższy niż w p+p, ale kształt zależności energetycznej jest podobny do p+p**

**(brak struktury horn)**

# Przejście fazowe: dane p+p



Tempo wzrostu  $K^+/\pi^+$  oraz parametru  $T$  zmienia się gwałtownie w zderzeniach p+p przy energiach SPS

Dopasowana energia gwałtownej zmiany zależności wynosi  $\approx 7$  GeV i jest zbliżona do energii przejścia fazowego  $\approx 8$  GeV

Model UrQMD nie opisuje danych

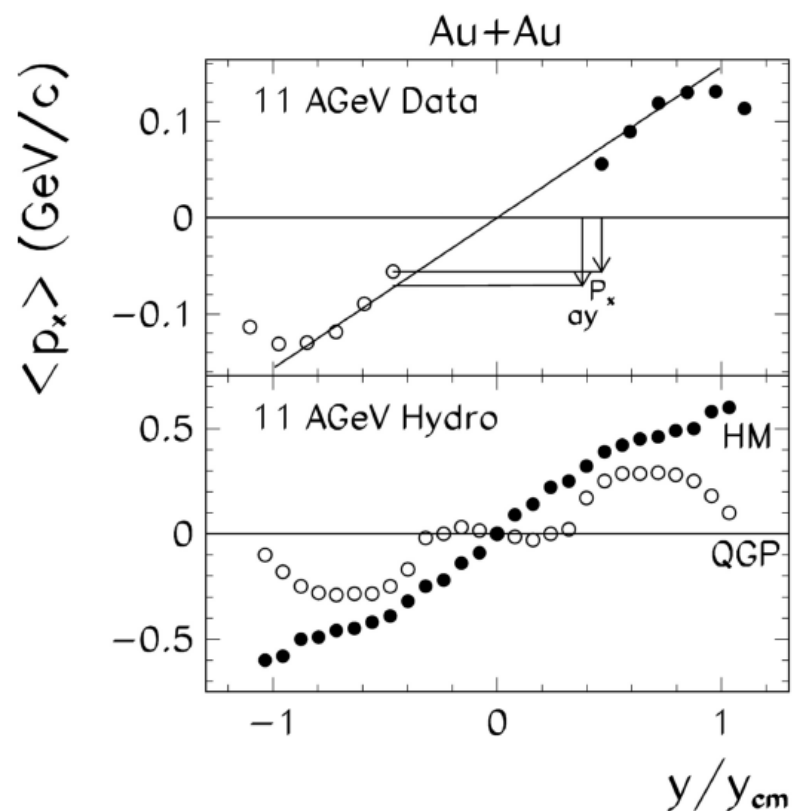


# Przejście fazowe: Pływ

# Pływ i przejście fazowe

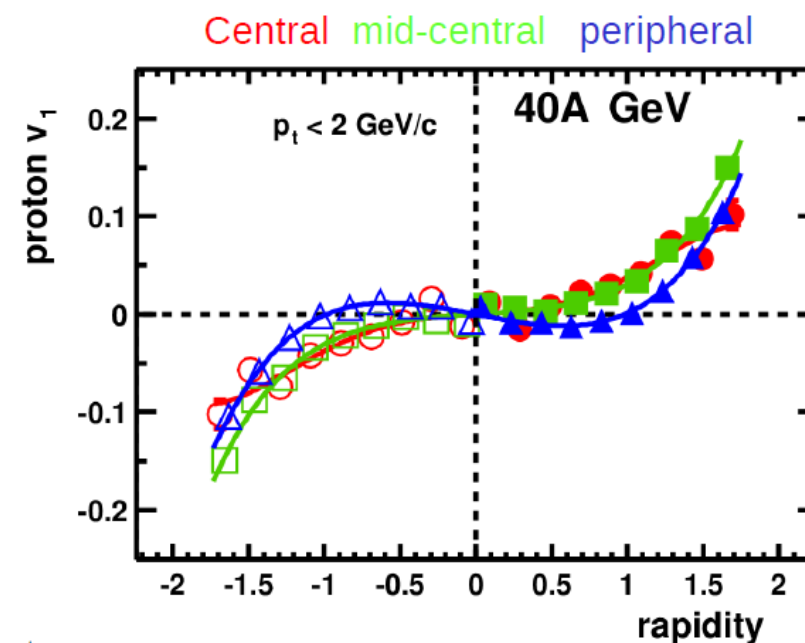
Zakłada się, że pływ jest wrażliwy na przejście fazowe pierwszego rzędu (miękkie równanie stanu EOS). Oczekuje się niemonotonicznego zachowania (dodatnie->ujemne->dodanie) pływu protonów  $dv_1/dy$  w funkcji energii wiązki – „załamanie pływu protonów”.

## Predictions of hydrodynamical model:



$$v_1 = \left\langle \frac{p_x}{p_T} \right\rangle$$

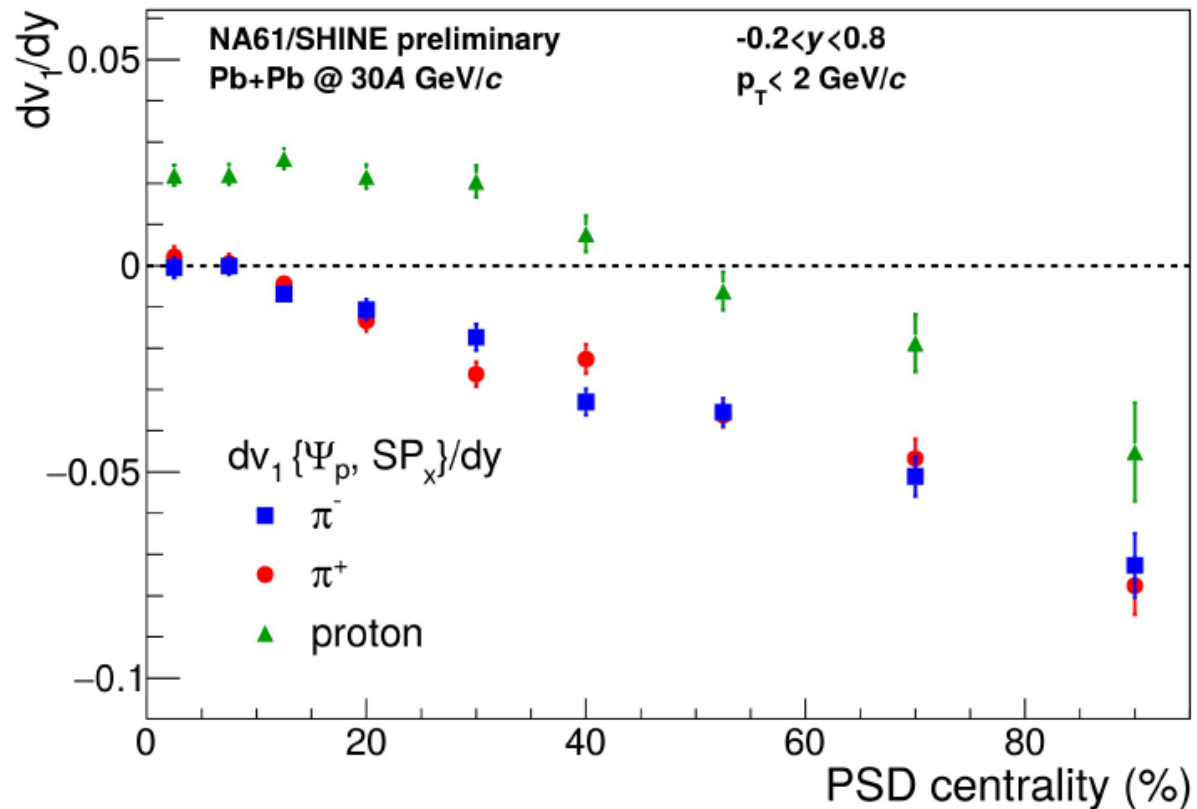
## Directed flow measured by NA49 at middle SPS energy (“anti-flow” of protons at mid-rapidity):



# Zależność $dv_1/dy$ od centralności w Pb+Pb przy $\sqrt{s_{NN}} = 7.6$ GeV

NA61/SHINE jako eksperyment ze stacjonarną tarczą → śledzenie oraz identyfikacja cząstek w szerokim zakresie prędkości.

Współczynniki pływu są mierzone relatywnie do płaszczyzny spektatorów uzyskanej dzięki **Projectile Spectator Detector** (PSD) → unikalne dla NA61/SHINE.

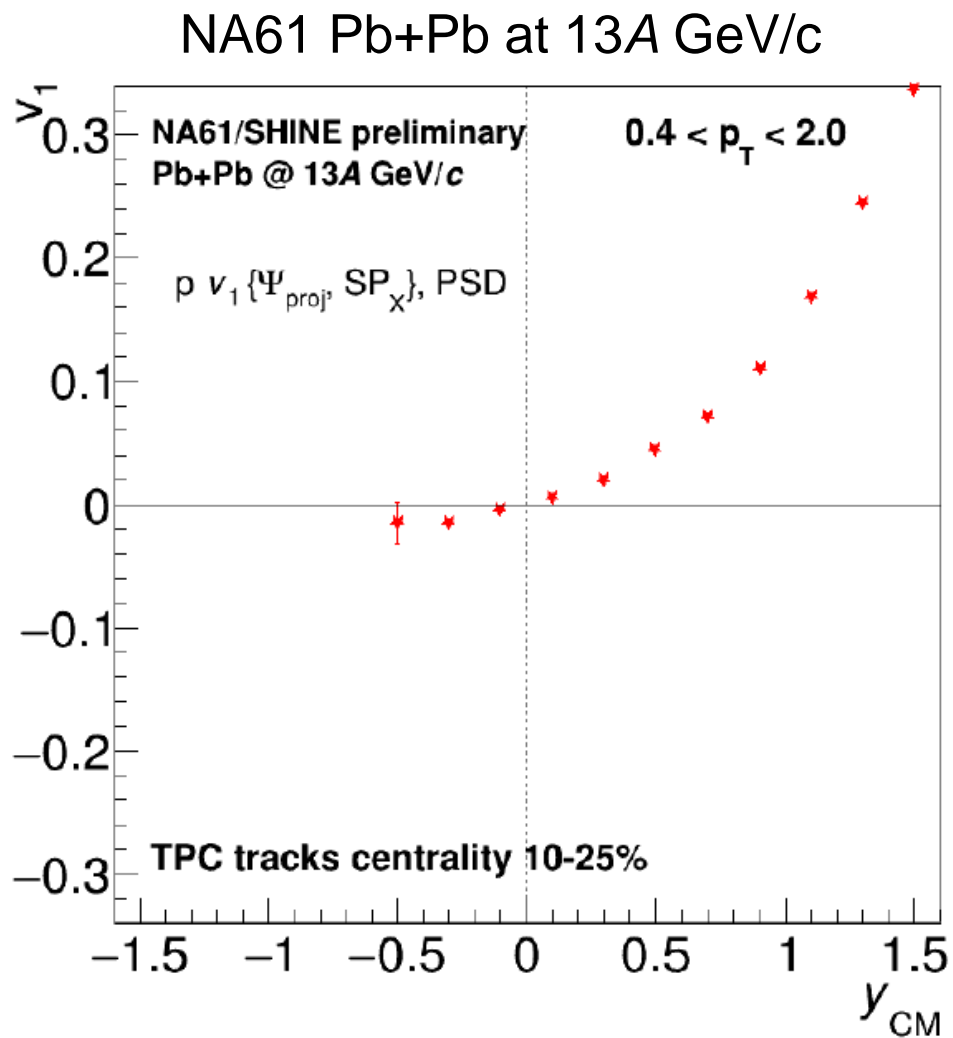


**W przedziale centralnej prędkości ( $-0.2 < y < 0.8$ )**

**- Nachylenie pionów  $v_1$  jest ujemne niezależnie od centralności**

**- Nachylenie protonów  $v_1$  zmienia znak przy centralności 50%**

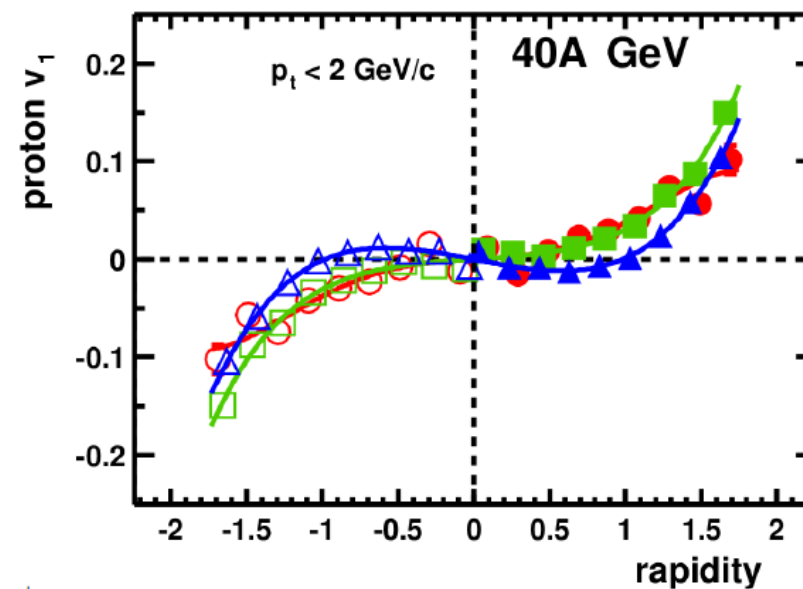
# Pływ protonów vs pospieszność



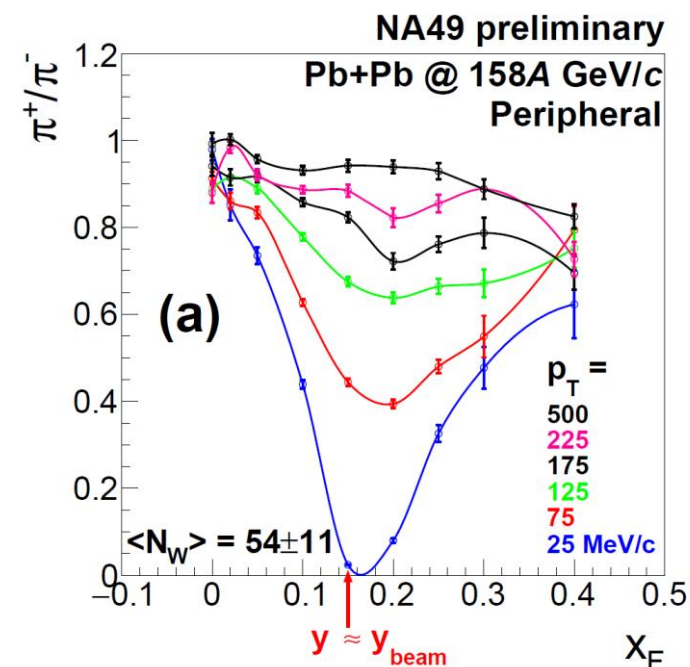
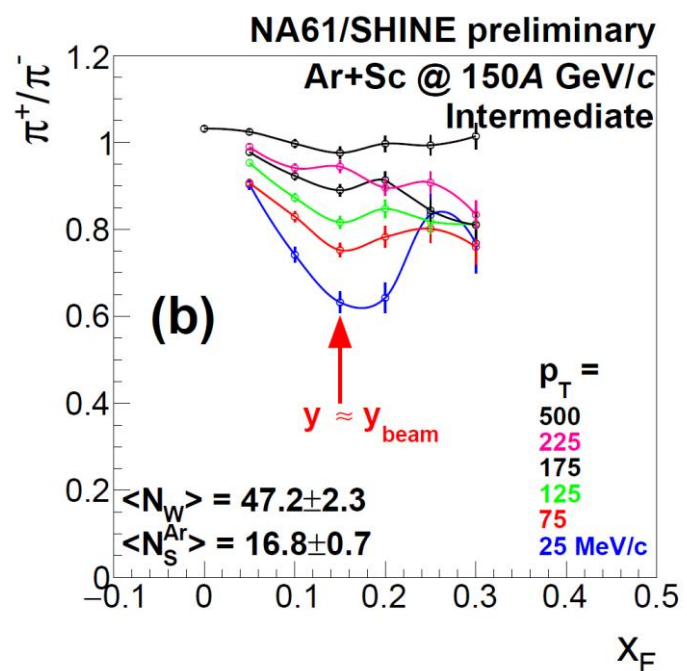
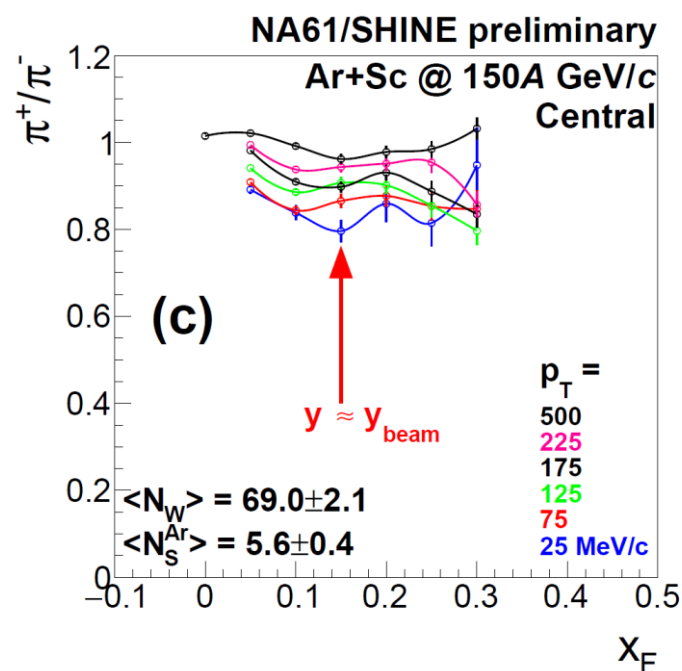
**Brak oznak załamania się pływu w zderzeniach Pb+Pb przy 13A GeV/c**

**Directed flow measured by NA49 at middle SPS energy (“anti-flow” of protons at mid-rapidity):**

Central mid-central peripheral



# Efekty elektromagnetyczne indukowane przez „widzów” zderzenia



Odpychanie elektromagnetyczne  $\pi^+$  oraz przyciąganie  $\pi^-$  jest silniejsze dla pionów dla prędkości bliskich prędkości „tzw. widzów” (wiązki) i niskich  $p_T$

## Pierwsze obserwacje efektów elektromagnetycznych w lekkich systemach w SPS

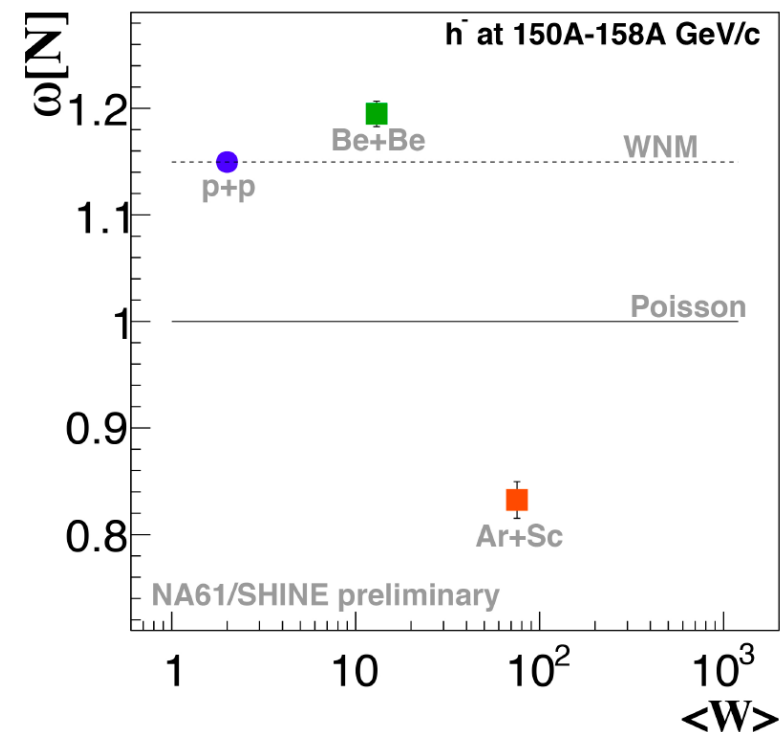
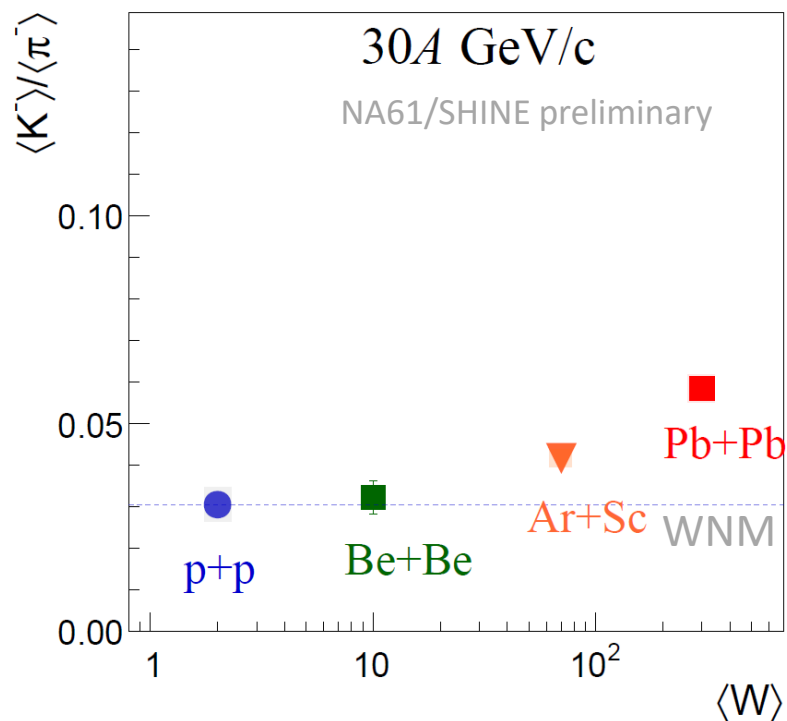
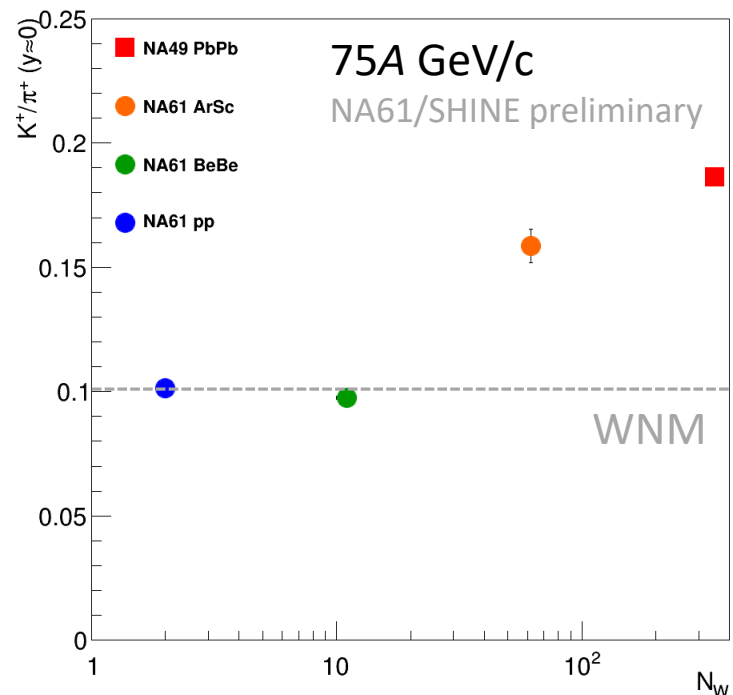
Podobny efekt widoczny dla pośrednich centralności zderzeń w Ar+Sc (NA61/SHINE) i peryferyjnych zderzeń z reakcji Pb+Pb (NA49)





## Onset of fireball

# Onset of fireball: zależność od rozmiaru systemu



## Różnice w rezultatach

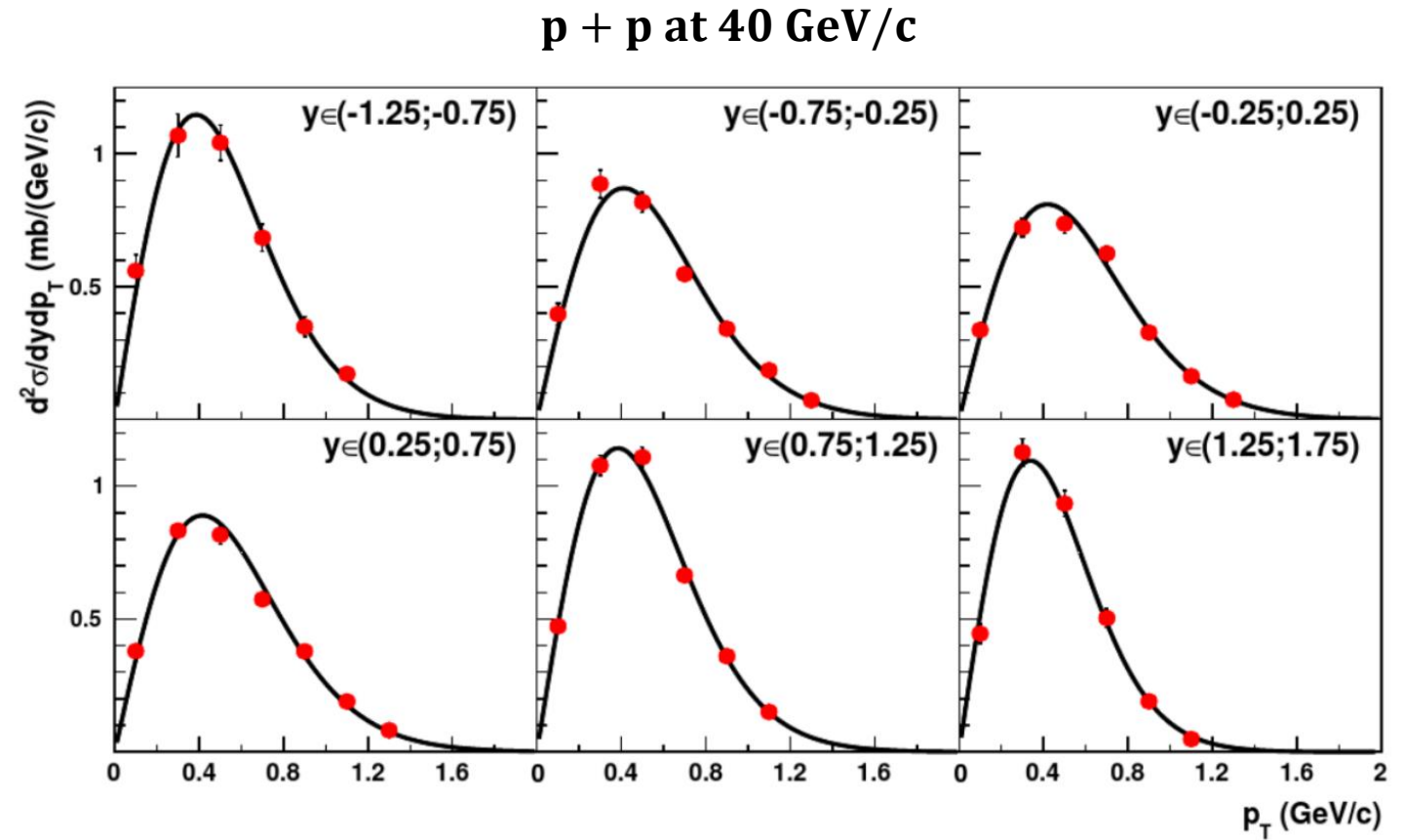
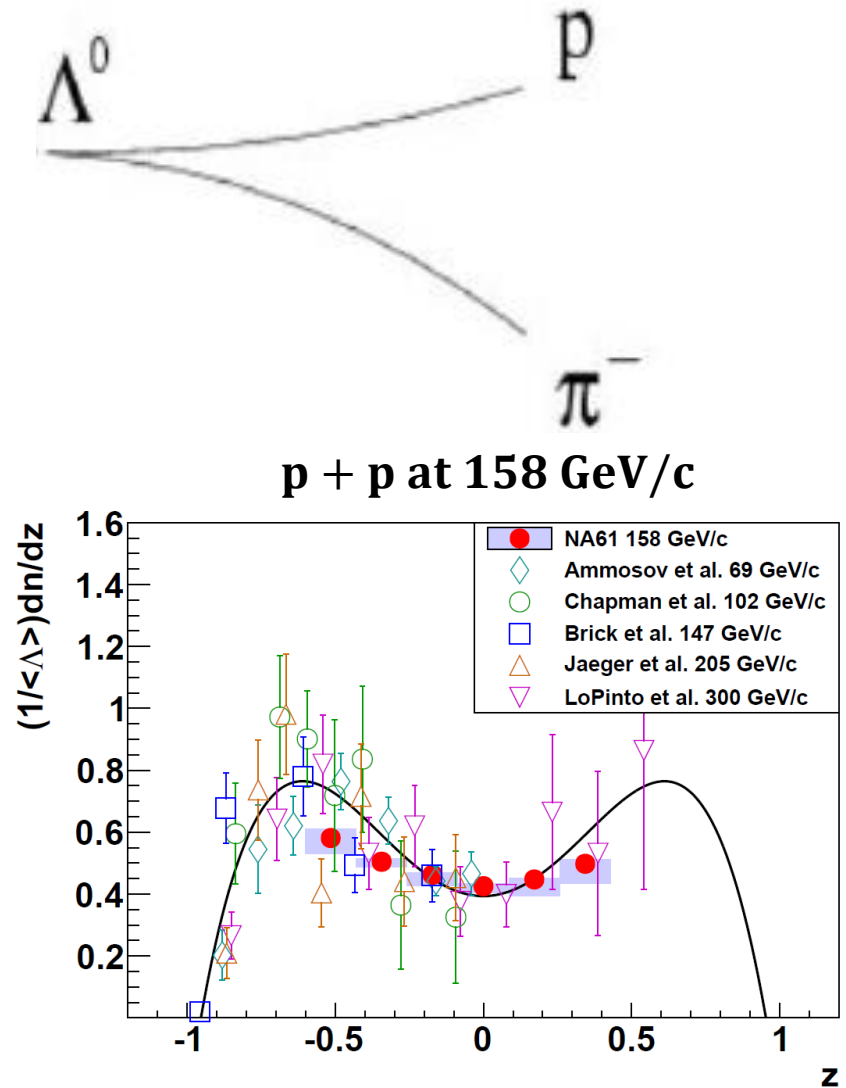
$p+p \approx Be+Be$  oraz  $Ar+Sc, Pb+Pb$

- p+p data are corrected for experimental biases, systematic uncertainty  $\sim 0.1$  [ EPJ.C76:635]
- 0-1% Be+Be data is uncorrected, experimental bias is  $\sim 10-15\%$
- 0-0.2% Ar+Sc data is uncorrected, experimental bias is  $\sim 5-7\%$

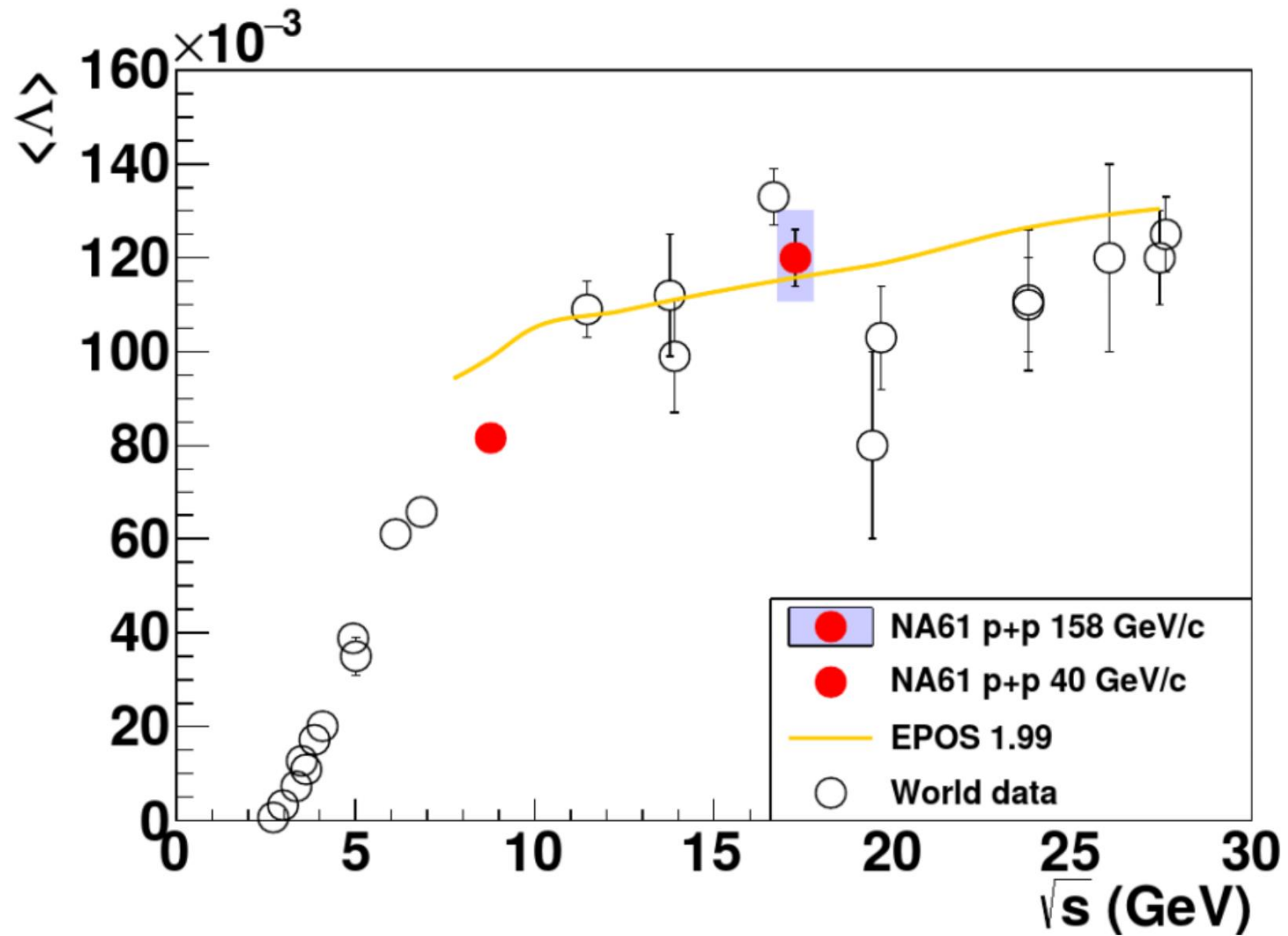


# Produkcja dziwności w zderzeniach p+p: produkcja $\Lambda$

# Produkcja $\Lambda$ w nieelastycznych zderzeniach p+p



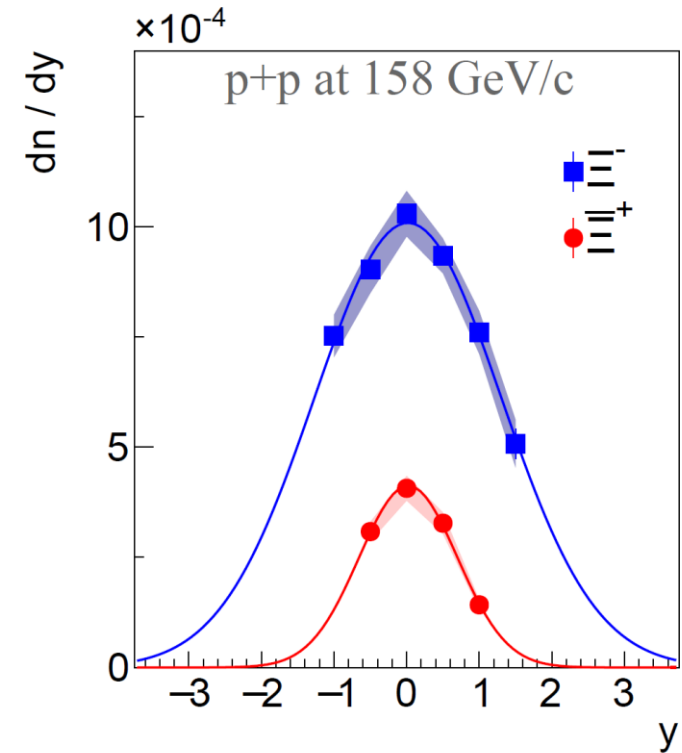
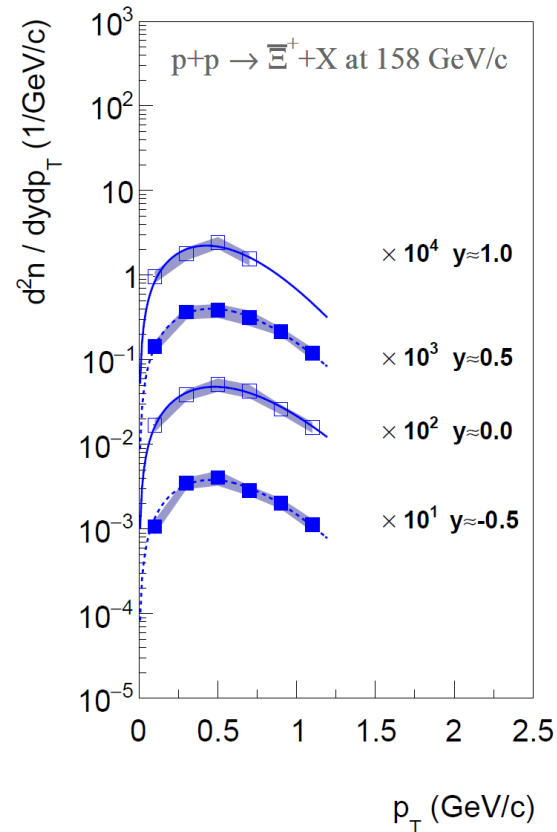
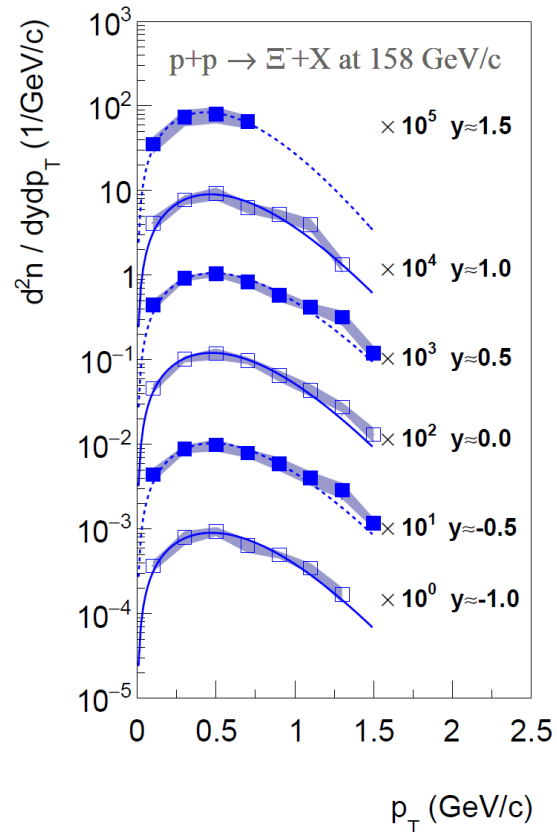
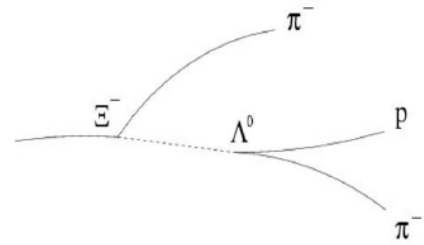
# Produkcja $\Lambda$ w nieelastycznych zderzeniach p+p





Produkcja dziwności w zderzeniach p+p przy energii 158 GeV/c:  
produkcja  $\Xi$

# Produkcja $\Xi$ w nieelastycznych zderzeniach p+p przy energii 158 GeV/c

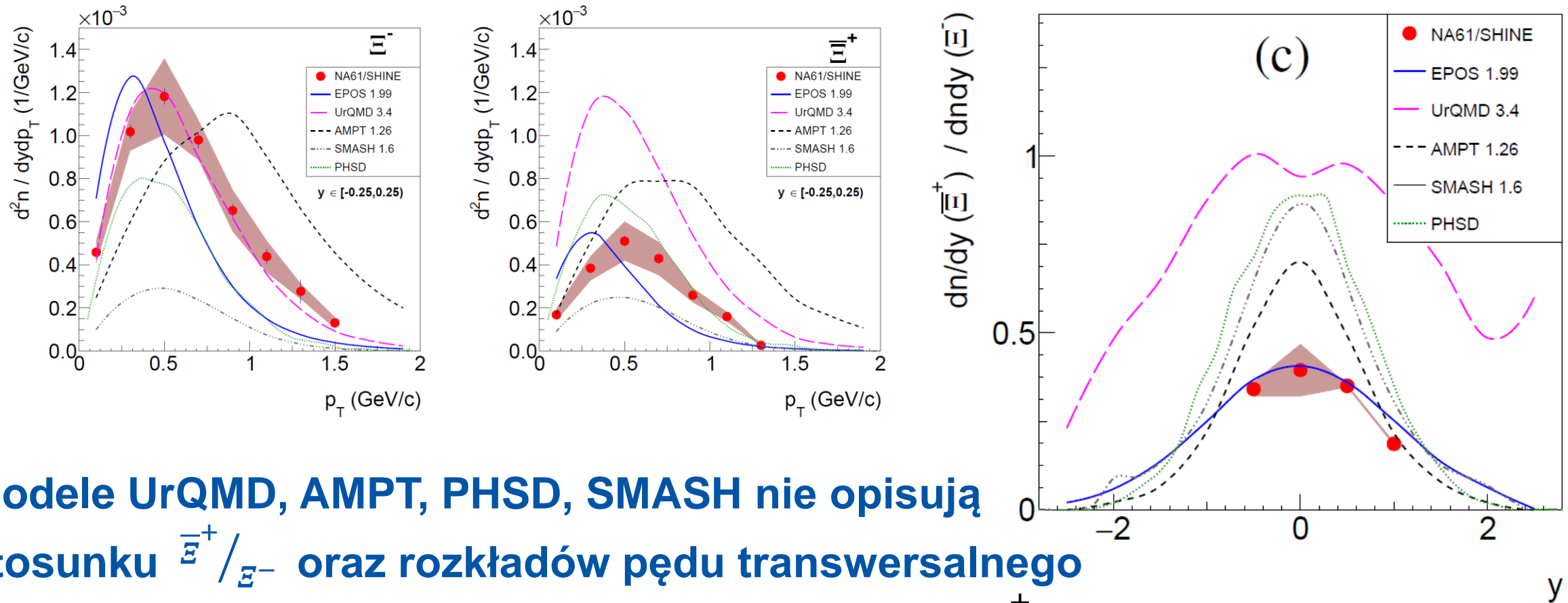


$$\langle \Xi^- \rangle = (3.3 \pm 0.1 \pm 0.6) \times 10^{-3}$$

$$\langle \Xi^+ \rangle = (7.9 \pm 0.2 \pm 1.0) \times 10^{-4}$$



# Produkcja $\Xi$ w nieelastycznych zderzeniach p+p przy energii 158 GeV/c



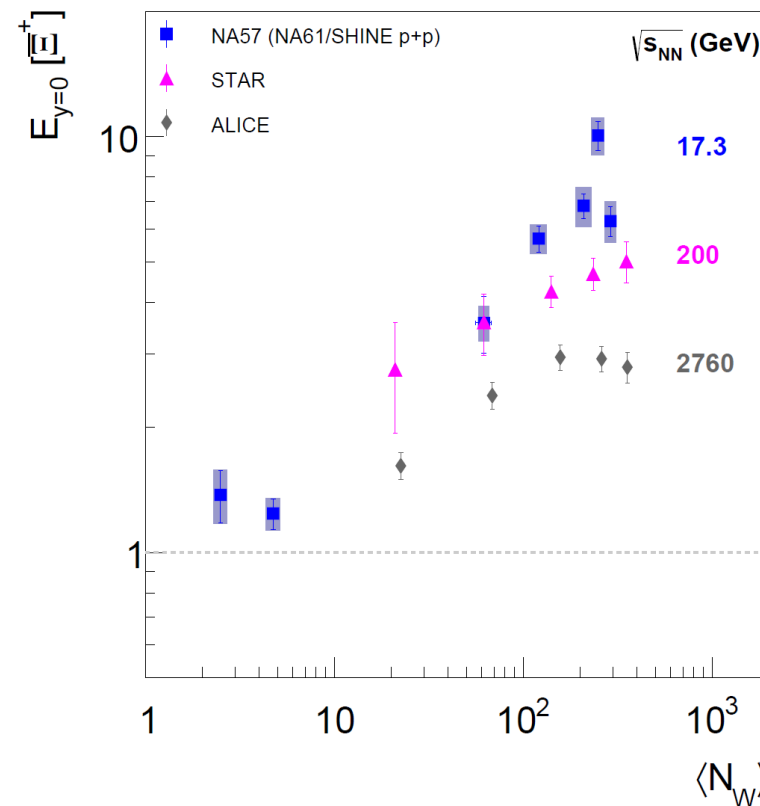
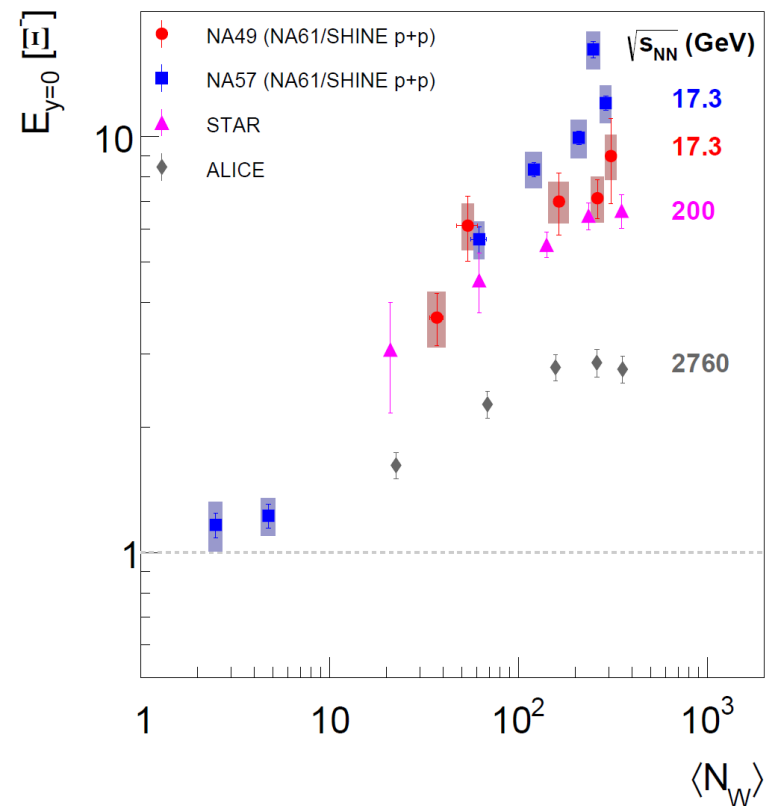
**Modele UrQMD, AMPT, PHSD, SMASH nie opisują stosunku  $\frac{\Xi^+}{\Xi^-}$  oraz rozkładów pędu transversalnego**

**Model EPOS opisuje rozkłady prędkości dla  $\Xi^+$ ,  $\Xi^-$  oraz ich stosunki, natomiast nie opisuje rozkładu widm pędu poprzecznego**

# Produkcja $\Xi$ - enhancement factor

Przewidywane wzmocnienie produkcji dziwności w zderzeniach jądro-jądro w stosunku do reakcji proton-proton zostało uznane za sygnaturę przejścia fazowego

$$E = \frac{2}{\langle N_W \rangle} \frac{dn/dy(A+A)}{dn/dy(p+p)},$$



**Enhancement factor przy energiach SPS wzrasta od 3.5 w C+C do 9 w centralnych Pb+Pb**

**Dane z eksperymentu STAR wykazują nieco mniejsze wzmocnienie, natomiast wzmocnienie obserwowane przez eksperyment ALICE jest znacząco niższe**

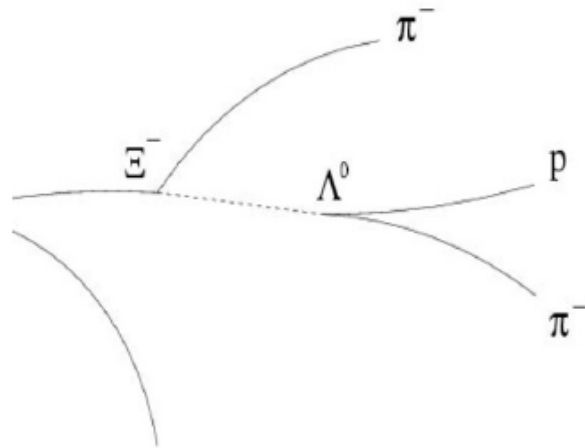


Produkcja dziwności w zderzeniach p+p przy energii 158 GeV/c:  
Poszukiwanie pentakwarków  $\Xi^{--}$  (1860)

# Poszukiwanie pentakwarków $\Xi^{--}(1860)$ w NA61/SHINE - motywacja

## Pomiar $\Xi^{--}(1860)$ eksperymentu NA49

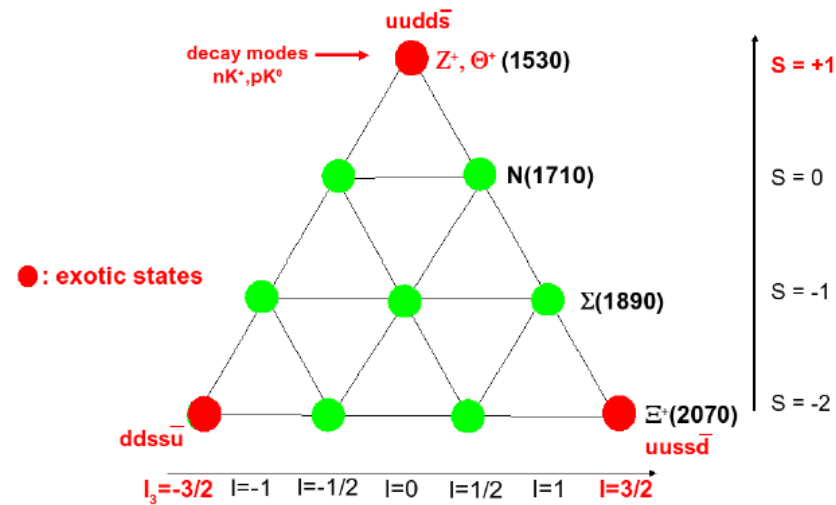
(NA49, PRL 92, 042003, 2004)



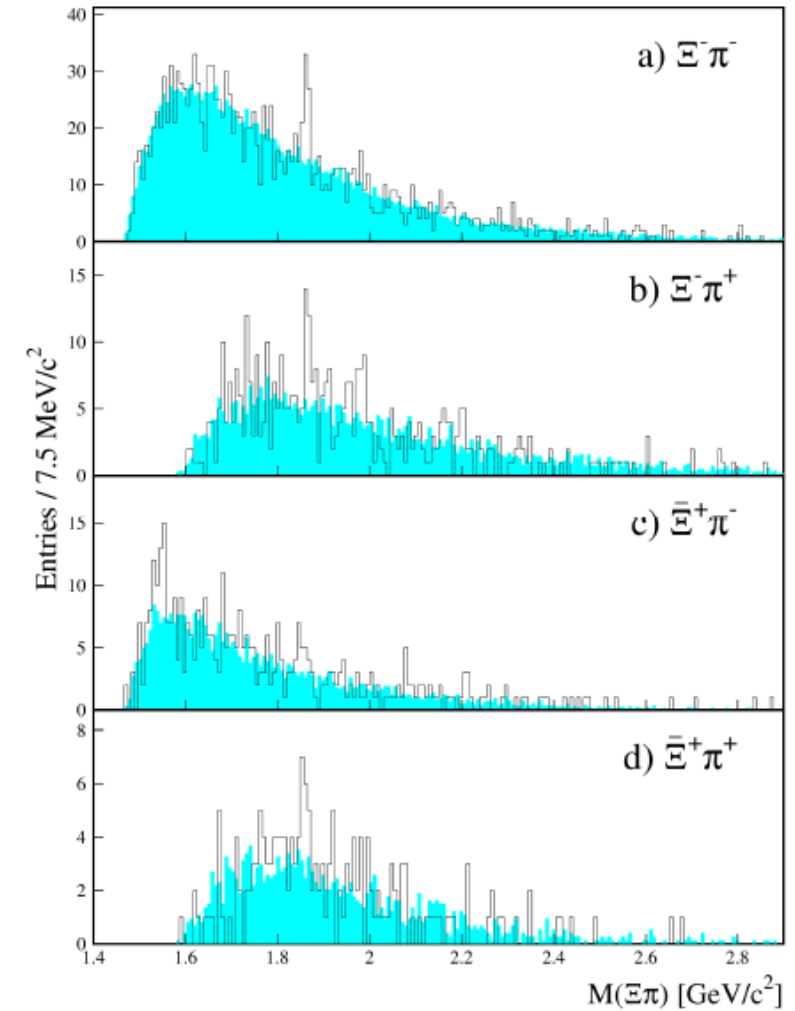
### Anti-decuplet of baryons ( $J^P=1/2^+$ )

predicted in chiral soliton model

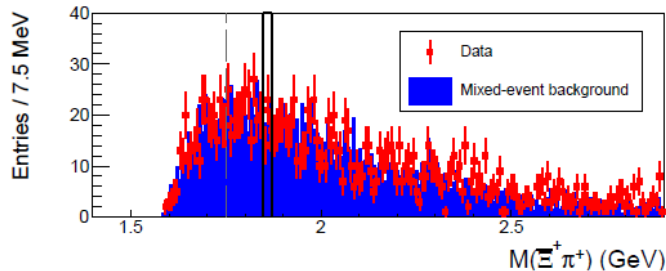
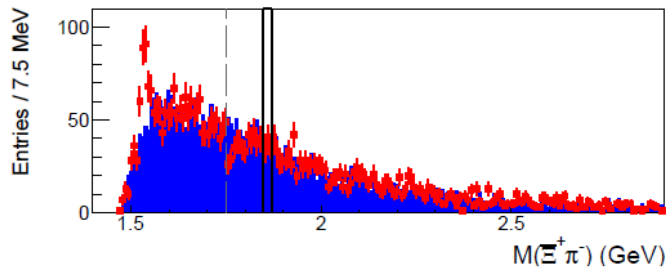
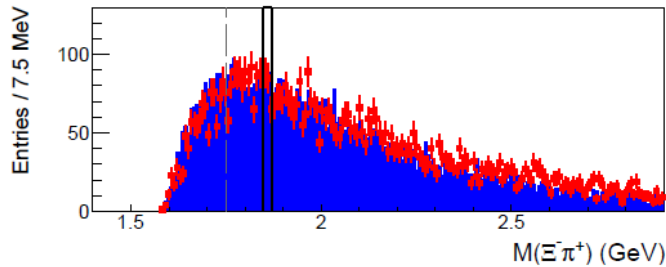
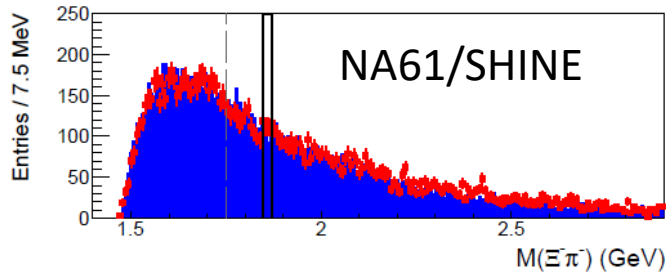
Diakonov, Petrov, Polyakov, ZP A359, 305, 1997



NA49  
p+p at 158 GeV/c



# Poszukiwanie pentakwarków $\Xi^{--}(1860)$ w NA61/SHINE

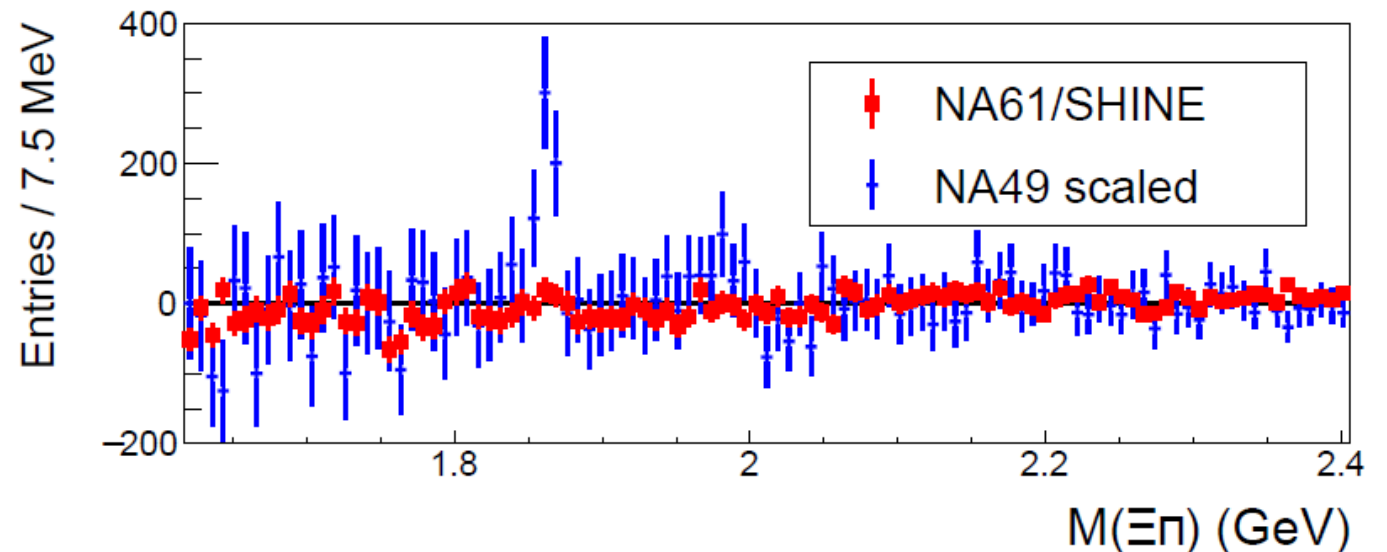


## NA49: NA49, PRL 92, 042003, 2004

- 6M zdarzeń
- Rezonans o masie  $1.862 \pm 0.002 \text{ GeV}/c^2$
- Szerokość poniżej rozdzielczości detektora
- Sygnał oszacowany na poziomie 4.0 sigma.

## NA61/SHINE:

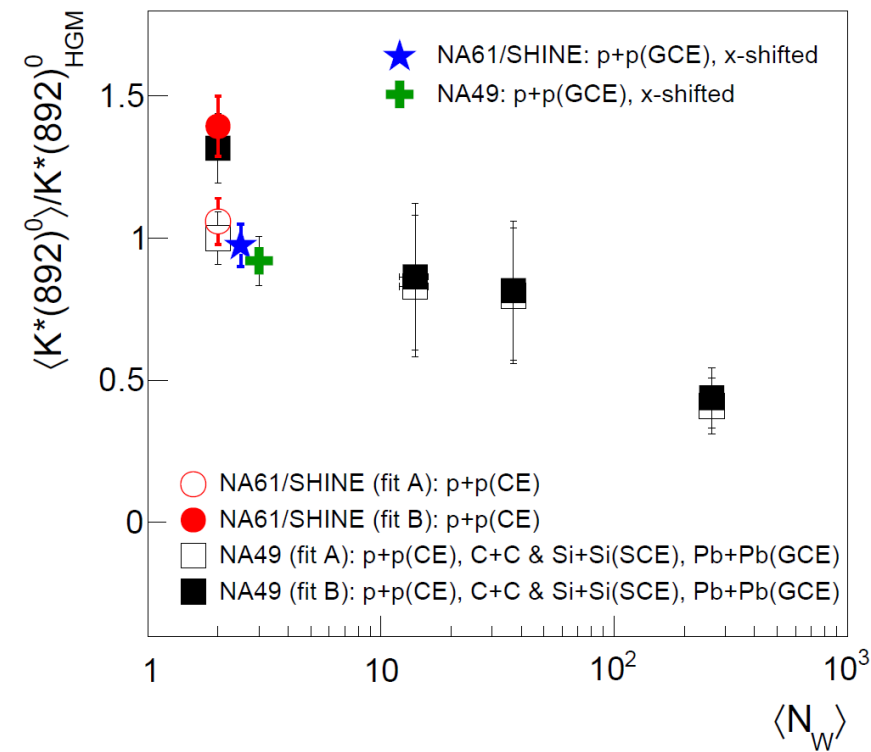
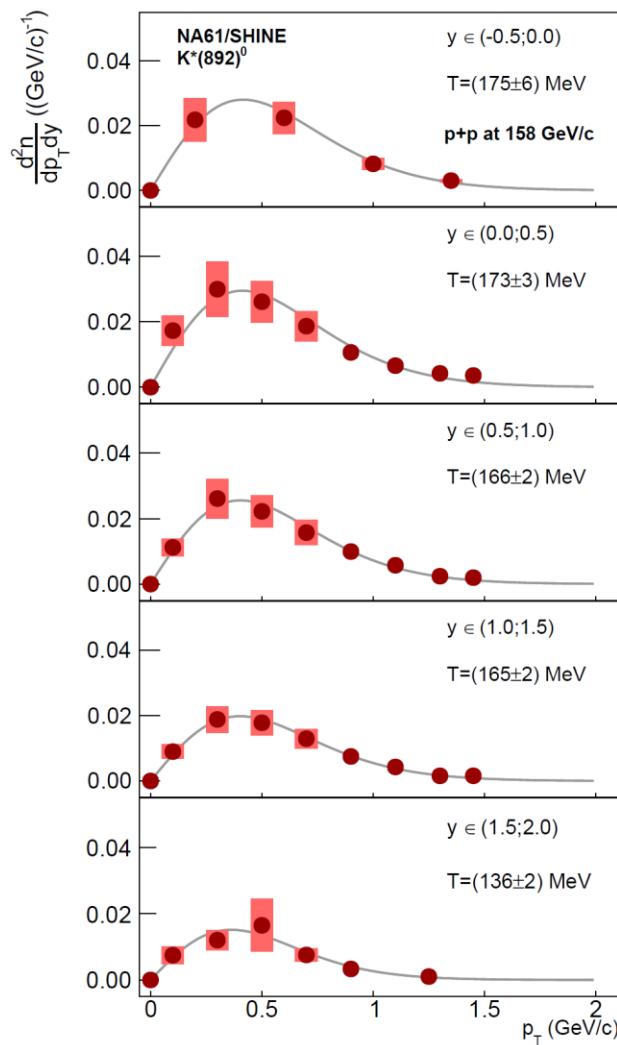
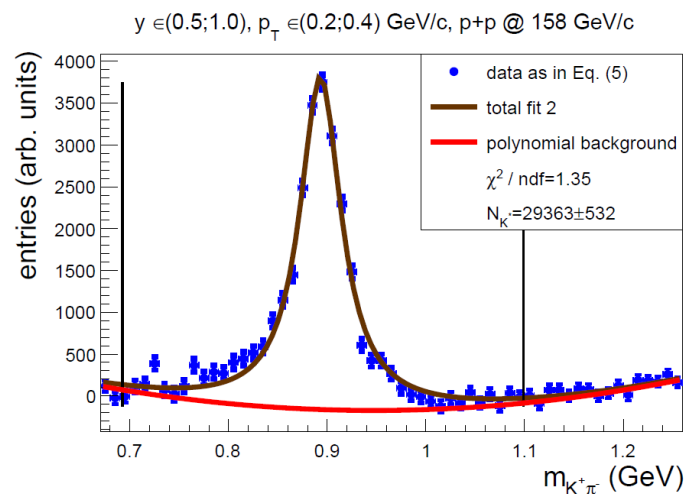
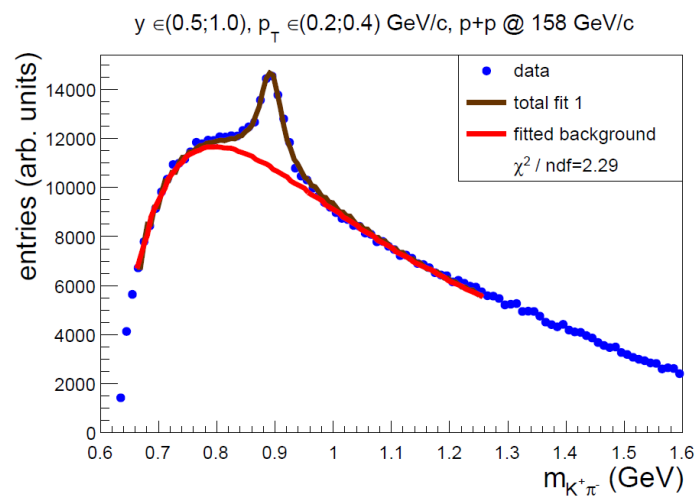
- 26M zdarzeń
- Podobna analiza w tym samym systemie jak w NA49
- **Brak sygnału  $\Xi^{--}(1860)$**
- **Dobrze widzialne  $\Xi(1530)$**





# Produkcja dziwności w zderzeniach p+p: $K^*(892)^0$

# Produkcja $K^*(892)^0$ w nieelastycznych zderzeniach p+p



HRG by F.Becattini et al. (PR C73, 044905, 2006)

- Fit B; uses "standard"  $\gamma$ s; for p+p  $\Xi$  and  $\Omega$  baryons excluded from fit
- Fit A:  $\gamma$ s replaced  $\langle s\bar{s} \rangle$ ; for p+p  $\phi$  meson excluded from fit

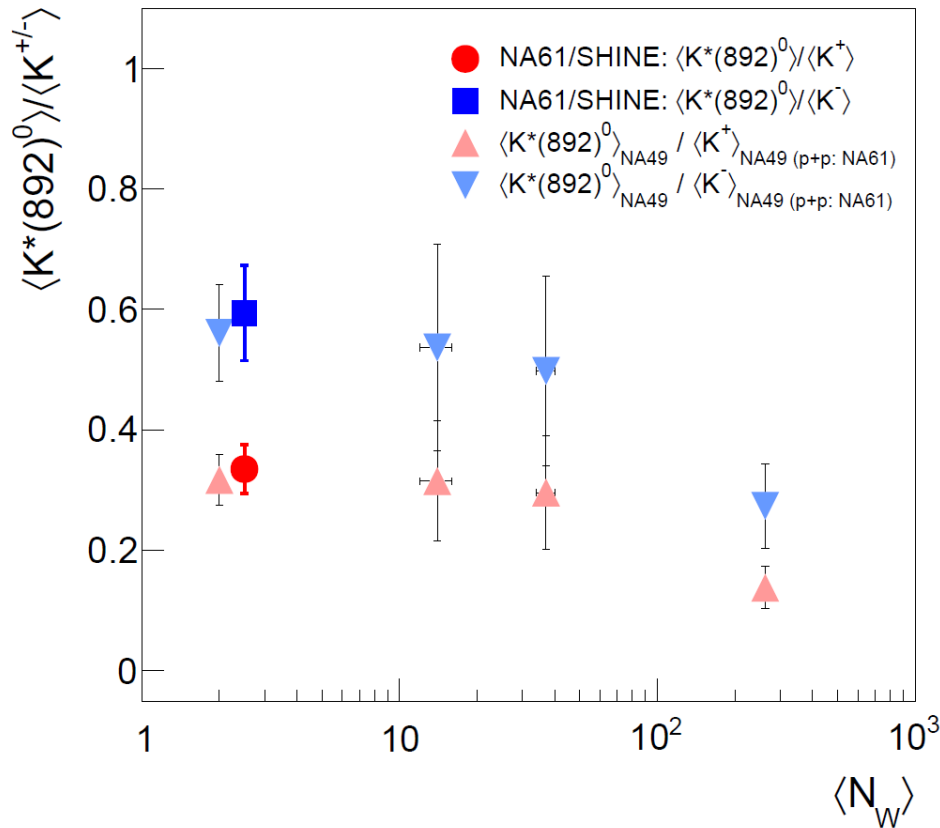
HRG by V.Begun et al. (arXiv:1805.01901)

p+p: GCE with meson  $\phi$  included

## HRG opisuje $K^*(892)^0$ produkowane w zderzeniach p+p



# Stosunek $K^*(892)^0$ do $K^\pm$ przy $158A$ GeV/c



$$\frac{K^*}{K}(\text{kinetic}) = \frac{K^*}{K}(\text{chemical}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

use Pb+Pb or Au+Au ratio

use p+p ratio

## Czasy chemicznego i kinetycznego wymrażania ( $\Delta t$ ):

- 5.3 fm/c for  $K^*(892)^0/K^+$
- 4.6 fm/c for  $K^*(892)^0/K^-$

NA61/SHINE  $K^{+/-}$  (p+p): EPJC 77, 671, 2017  
 NA49  $K^*$ : PR C84, 064909, 2011  
 NA49  $K^{+/-}$  (p+p): EPJC 68, 1, 2010  
 NA49  $K^{+/-}$  (C+C, Si+Si): PRL 94, 052301, 2005  
 NA49  $K^{+/-}$  (Pb+Pb): PR C66, 054902, 2002 →  
 rescaled from 5% to 23.5% most central

**$\Delta t$  dla SPS >  $\Delta t$  dla RHIC** ( $3.5 \pm 1$  fm/c, STAR, PR C71, 064902, 2005) sugeruje, że:

- Efekty regeneracji odgrywają znaczącą rolę w przypadku wyższych energii
- Regeneracja może wystąpić również w SPS → otrzymane  **$\Delta t$  jest dolną granicą czasu pomiędzy wymrażaniami**



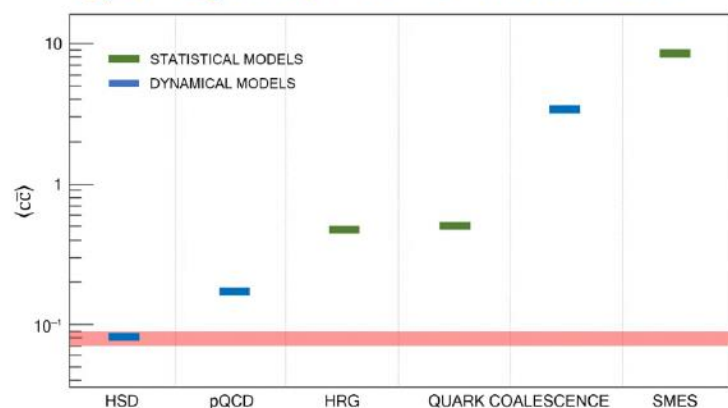
NA61/SHINE 2020+

# Program NA61/SHINE na lata 2021-2024

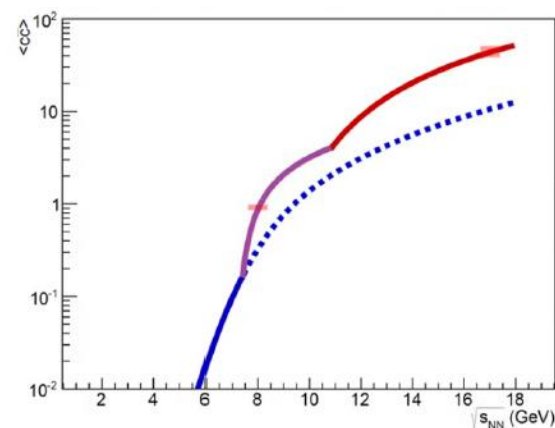
- **Jaki jest mechanizm produkcji powabu?**
- **Jak przejście fazowe wpływa na produkcję powabu?**
- **Jak powstawanie plazmy kwarkowo-gluonowej wpływa na produkcję  $J/\psi$ ?**

Aby odpowiedzieć na te pytania trzeba **znać ilość par kwarków powabnych**,  $\langle c\bar{c} \rangle$ , produkowanych w zderzeniach A+A. Do tej pory **nie udało się uzyskać danych eksperymentalnych** i tylko **NA61/SHINE** może przeprowadzić taki pomiar w najbliższej przyszłości.

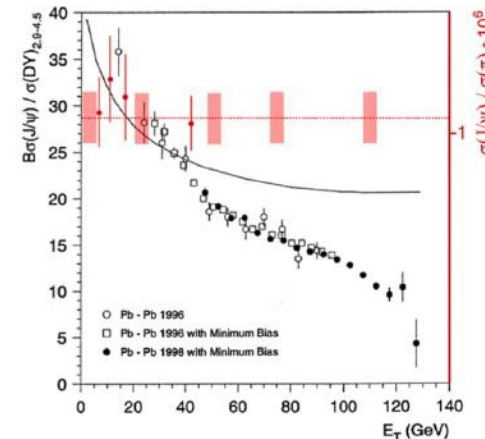
$\langle c\bar{c} \rangle$  and models



$\langle c\bar{c} \rangle$  and onset of deconfinement



$\langle c\bar{c} \rangle$ ,  $\langle J/\psi \rangle$  and QGP

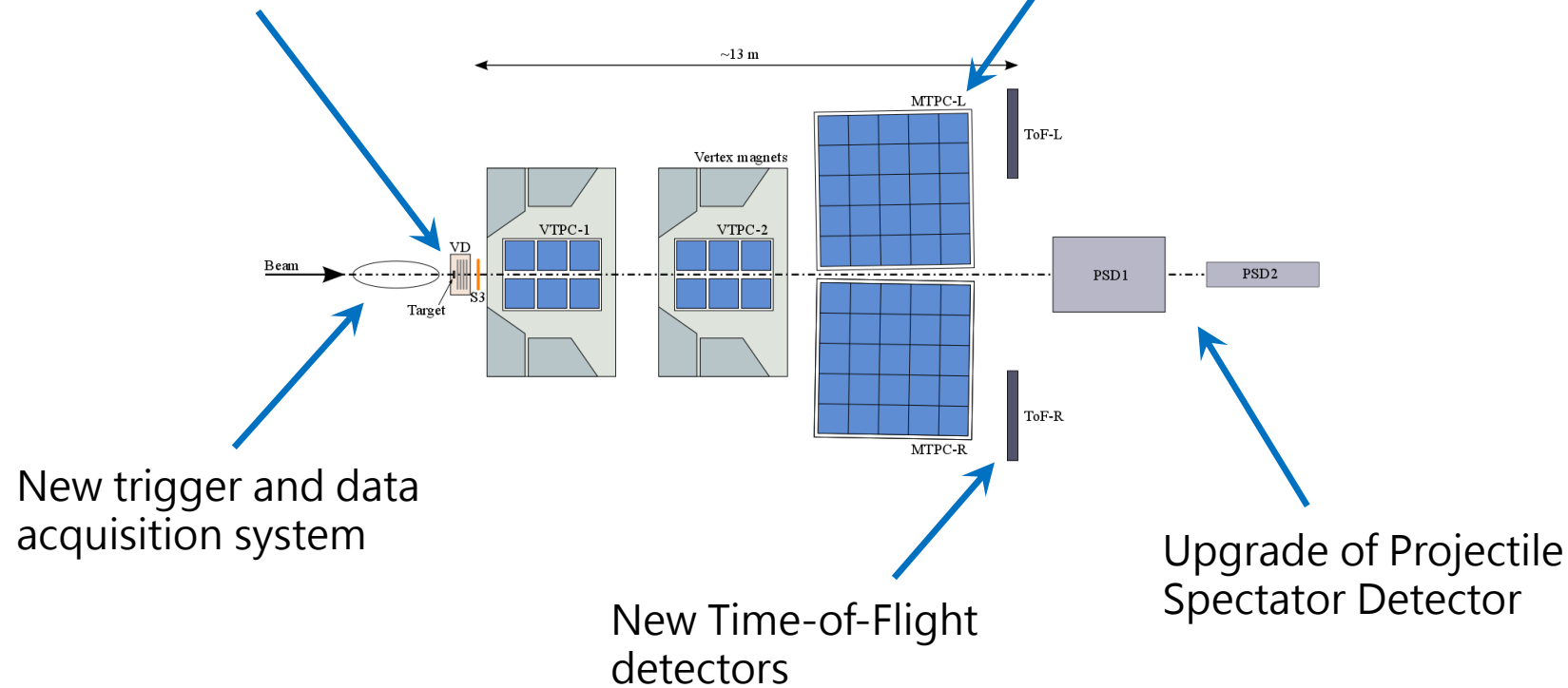


**Przewidywana rozdzielczość NA61/SHINE jest wystarczająca by odpowiedzieć na zadane pytania.**

# Upgrade detektora podczas LS2

Construction of Vertex Detector (VD)  
for  $D^0$ ,  $\bar{D}^0$  decay reconstruction

Replacement of the TPC  
read-out electronics  
to increase data rate to 1 kHz



# Podsumowanie

- 2D skan w rozmiarze systemu i energii zderzenia został zakończony w 2017 roku danymi Xe+La
- Dane p+p, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La oraz Pb+Pb są analizowane
- Struktura horn jest niewidoczna w zderzeniach Ar+Sc
- Ciekawa zależność zmiennych od rozmiaru zderzanego systemu:  
(p+p  $\approx$  Be+Be)  $\neq$  (Ar+Sc  $\neq$  Pb+Pb)
- Brak sygnału pentakwarków  $\Xi^{--}(1860)$  w zderzeniach p+p
- Rozszerzenie programu NA61/SHINE o pomiary produkcji powabu w latach 2021-2024



BACKUP

# Critical point: Strongly intensive measures $\Delta$ and $\Sigma$

$$\Delta[P_T, N] = \frac{1}{\omega[p_T]\langle N \rangle} [\langle N \rangle \omega[P_T] - \langle P_T \rangle \omega[N]] \quad P_T = \sum_{i=1}^N p_{Ti}$$

$$\Sigma[P_T, N] = \frac{1}{\omega[p_T]\langle N \rangle} [\langle N \rangle \omega[P_T] + \langle P_T \rangle \omega[N] - 2(\langle P_T N \rangle - \langle P_T \rangle \langle N \rangle)]$$

$$\omega[P_T] = \frac{\langle P_T^2 \rangle - \langle P_T \rangle^2}{\langle P_T \rangle}$$

$$\omega[p_T] = \frac{\overline{p_T^2} - \overline{p_T}^2}{\overline{p_T}}$$

$$\omega[N] = \frac{\langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2}{\langle N \rangle}$$

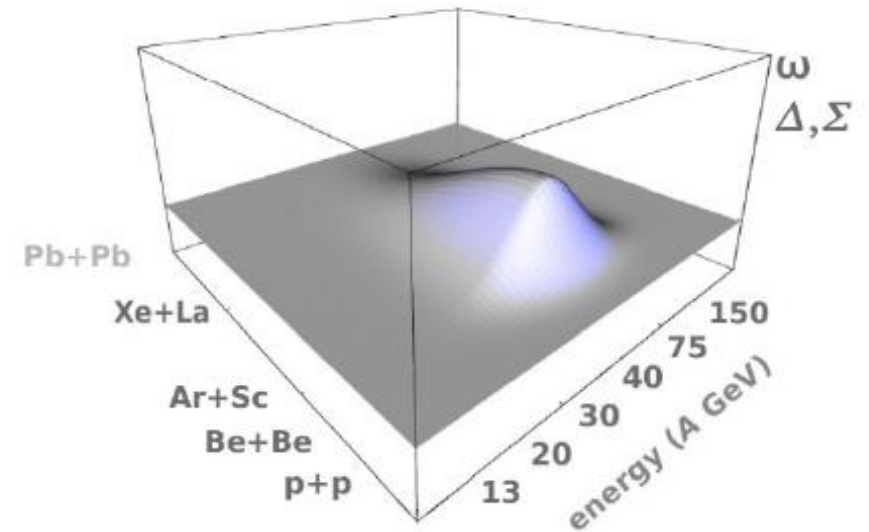
$\Delta = \Sigma = 0$  for  
no fluctuations

$\Delta = \Sigma = 1$  for  
Independent  
Particle Model

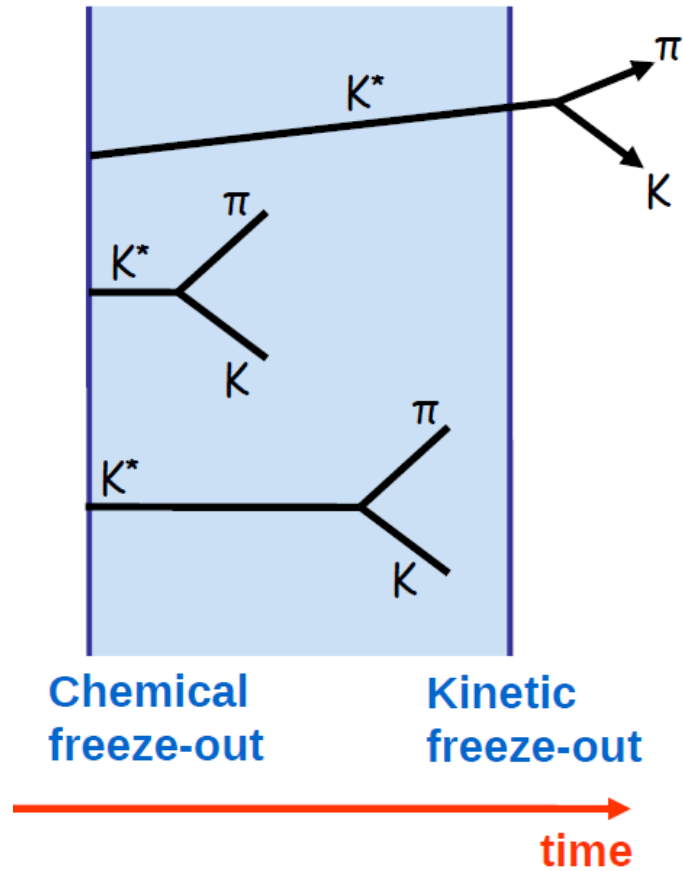
- $\Delta[P_T, N]$  uses only first two moments:  
 $\langle N \rangle, \langle P_T \rangle, \langle P_T^2 \rangle, \langle N^2 \rangle$
- $\Sigma[P_T, N]$  uses also correlation term:  
 $\langle P_T N \rangle - \langle P_T \rangle \langle N \rangle$

thus  $\Delta$  and  $\Sigma$  can be sensitive to several physics effects in different ways

Expected: non-monotonic behavior of CP signatures



# Motivation of $K^*$ measurement



The picture assumes that conditions at chemical freeze-out of p+p and Pb+Pb are the same

$K^*$  lifetime ( $\approx 4 \text{ fm}/c$ ) comparable with time between freeze-outs  $\rightarrow$

Some **resonances may decay inside fireball**; momenta of their decay products can be modified due to elastic scatterings  $\rightarrow$  problems with experimental reconstruction of resonance via invariant mass  $\rightarrow$

## Suppression of observed $K^*$ yield

Assuming no regeneration processes (Fig.) time between freeze-outs can be determined from (STAR, PR C71, 064902, 2005):

$$\frac{K^*}{K}(\text{kinetic}) = \frac{K^*}{K}(\text{chemical}) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

use Pb+Pb or Au+Au ratio

use p+p ratio

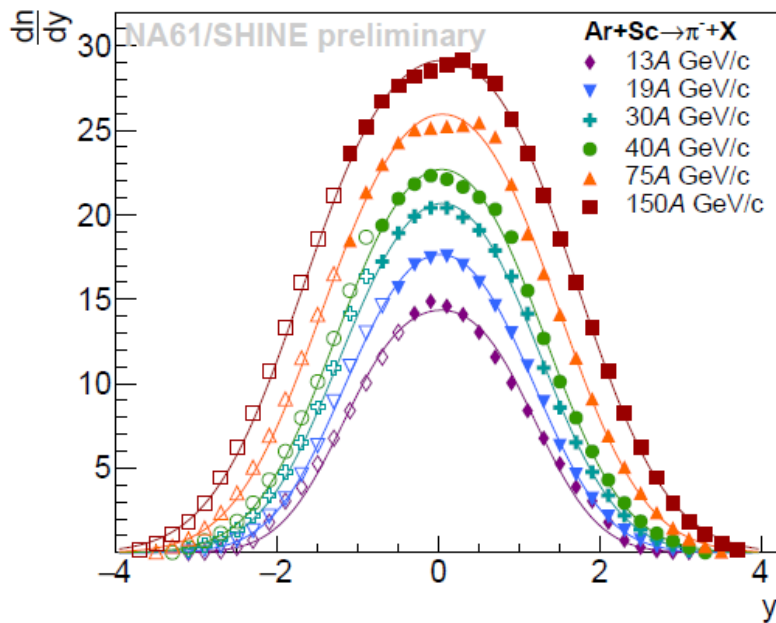
$\Delta t$  – time between kinetic and chemical freeze-outs  
 $\tau$  –  $K^*(892)^0$  lifetime = 4.17 fm/c; PDG, PR D98, 030001, 2018



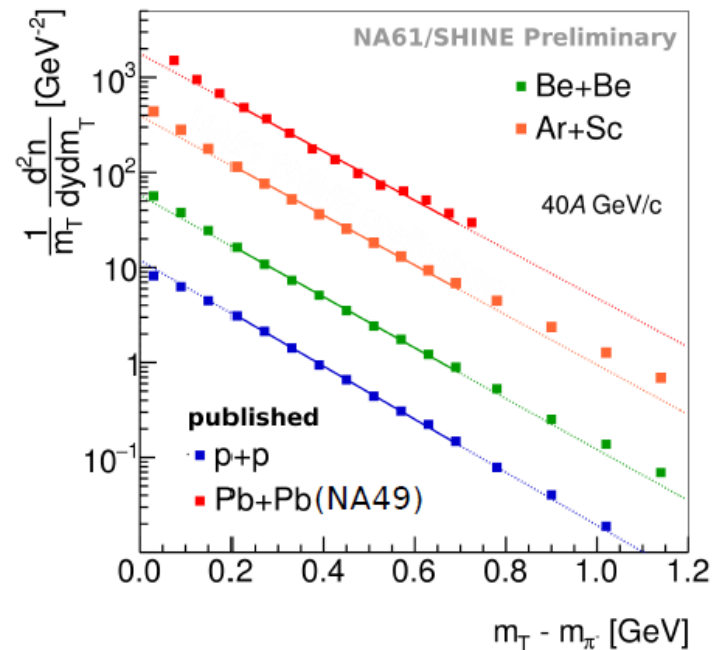
# $\pi^-$ spectra from 2D-scan

$\pi^-$  spectra measured in large acceptance:  $p_T$  down to 0, in full forward hemisphere

Collision energy dependence

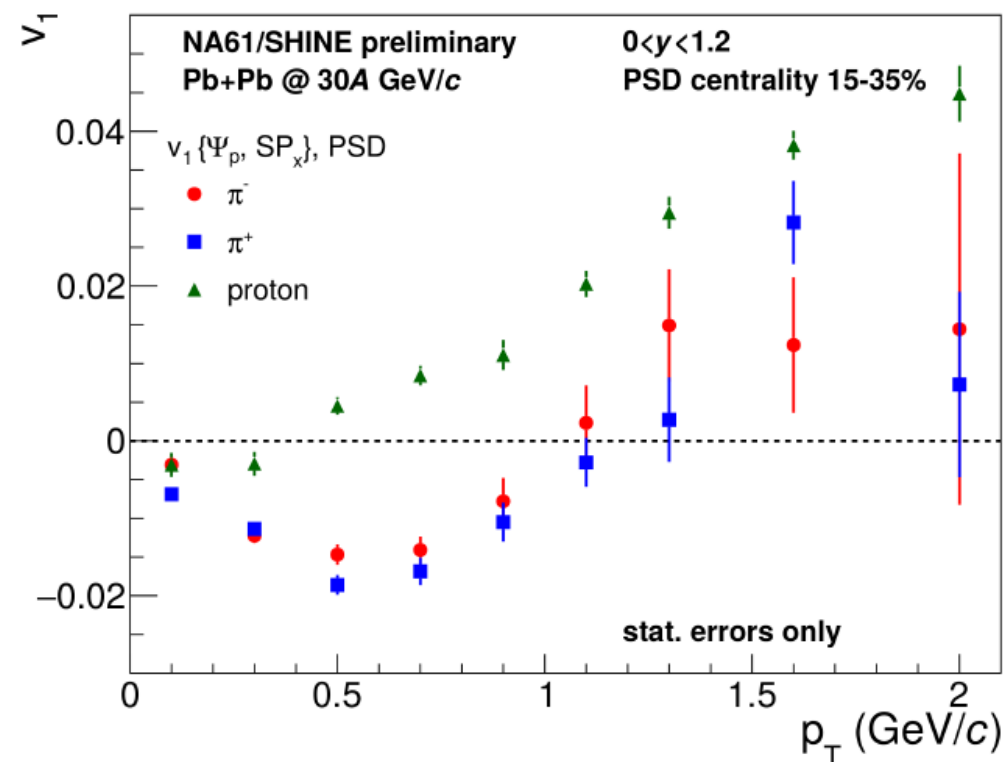
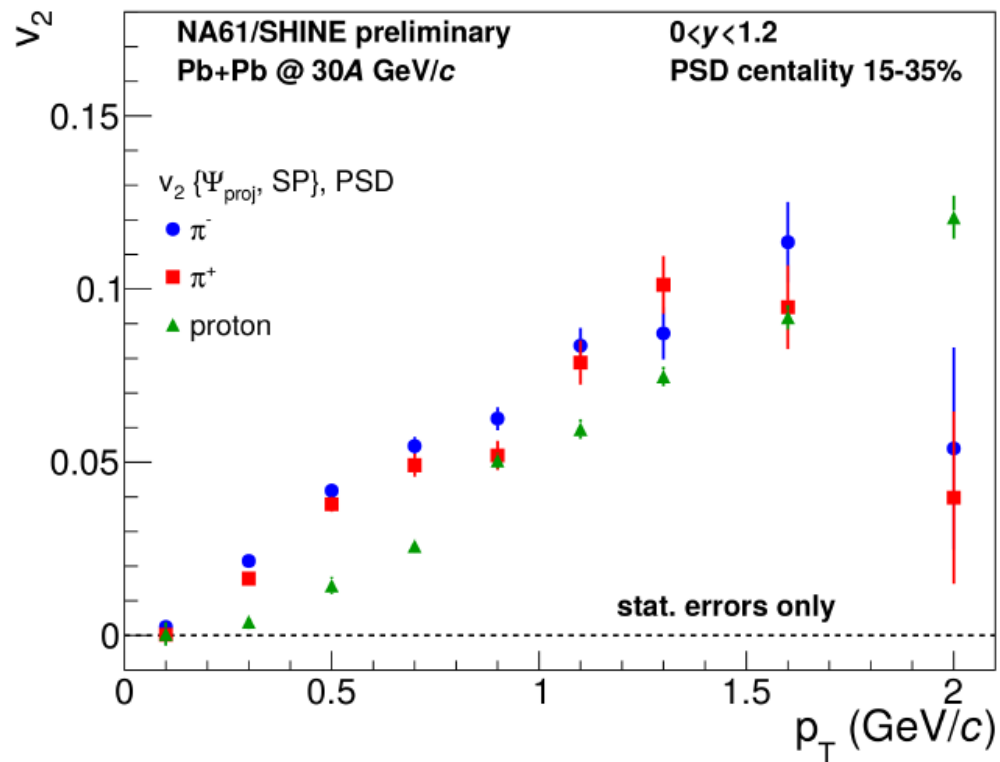


System size dependence



- Rapidity spectra  $\approx$  gaussian, independently of collision energy and system size
- Large acceptance allows to obtain  $4\pi$  multiplicity (Eur.Phys.J. C74 (2014) no.3, 2794)
- $m_T$  spectra in p+p are exponential, in larger systems (central collisions) deviate from the exponential shape

# Particle type dependence of elliptic and directed flow



Clear mass hierarchy of  $v_2$  - radial flow

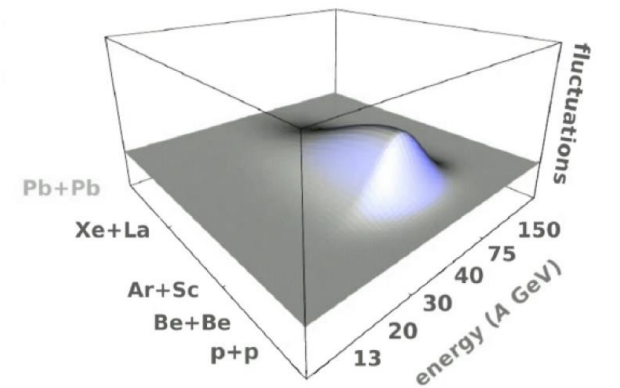
Difference between  $v_2$  for  $\pi^+$  and  $\pi^-$  is small

Significant mass dependence of  $v_1$

Difference between  $v_1$  for  $\pi^+$  and  $\pi^-$  is sensitive to electromagnetic effects.

## Search for critical point

Expected: non-monotonic behavior of CP signatures



# Critical point: Proton intermittency as signal of CP

Second order phase transition  $\rightarrow$  scale invariance  $\rightarrow$  characteristic dependence of fluctuations on size  $\delta$  of subdivision intervals of momentum space  $\Delta$

$M = \Delta/\delta$  – numer of intervals

$$F_2(M) = \frac{\left\langle \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^{M^2} n_m (n_m - 1) \right\rangle}{\left\langle \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^{M^2} n_m \right\rangle^2}$$

where:

$n_m$  – particle number in bin  $i$ ,

$\langle \dots \rangle$  - averaging over events

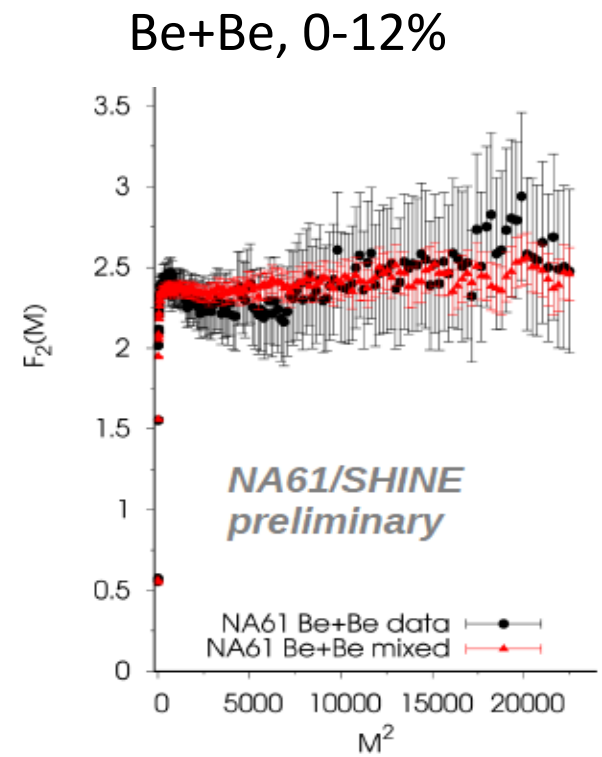
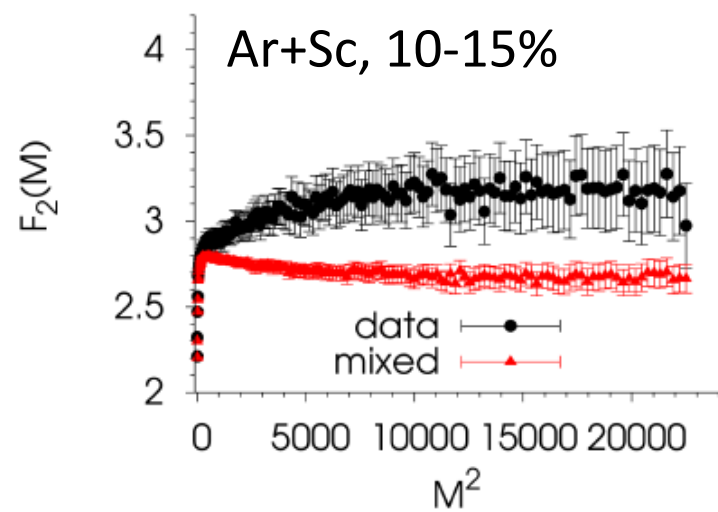
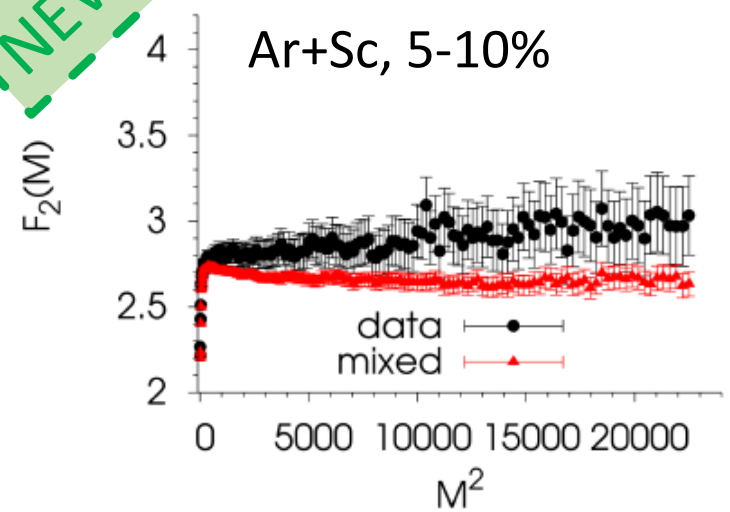
at critical point power law dependence is expected

$$F_2(M) = F_2(\Delta) M^{\varphi_2}$$

# Critical point: Proton intermittency in Ar+Sc and Be+Be at 150A GeV/c

NEW

NA61/SHINE preliminary



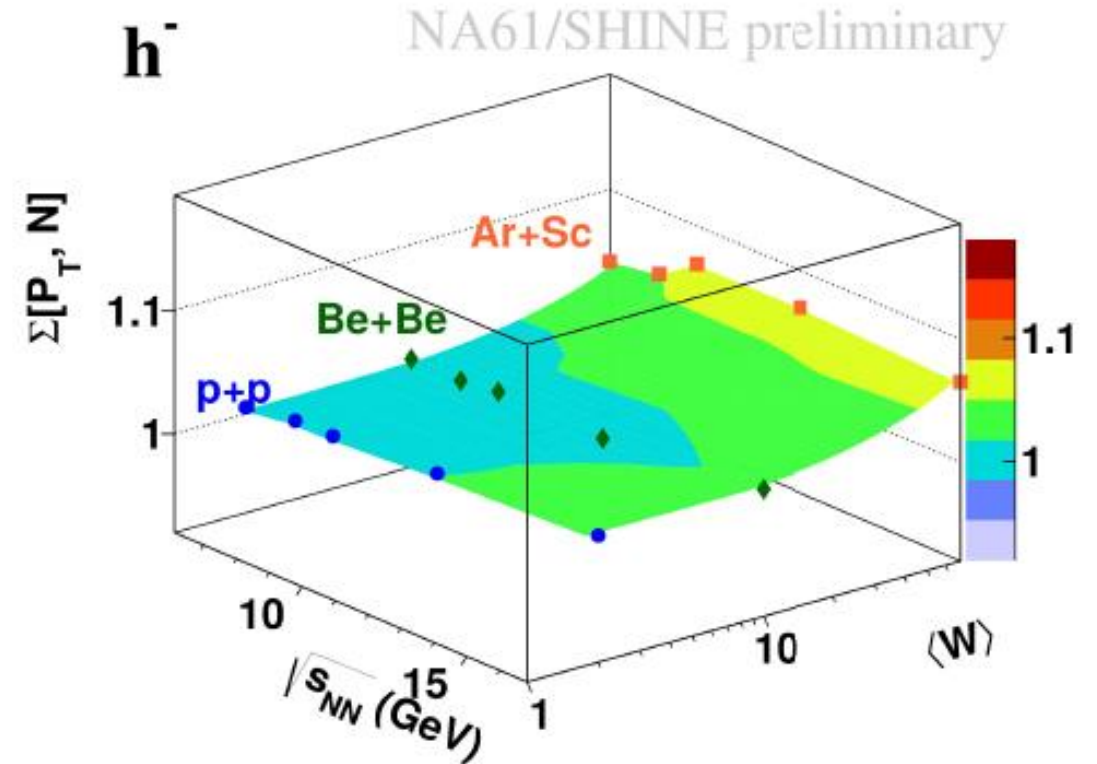
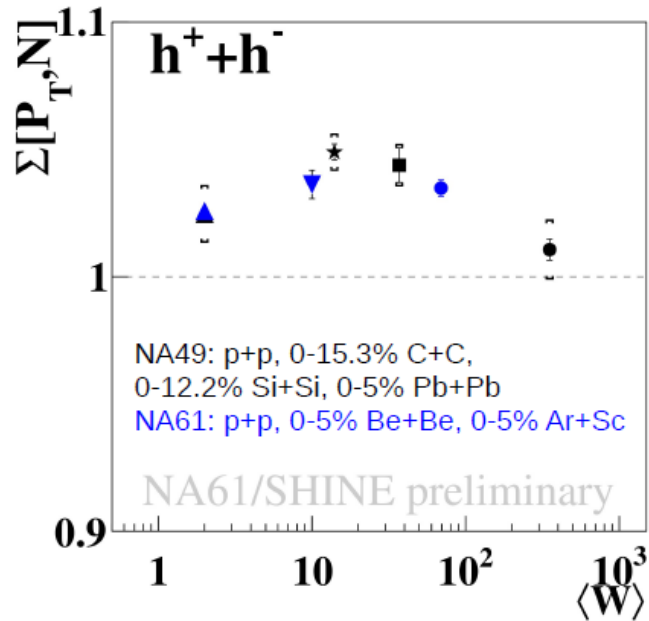
$M^2$  – numbers of bins in  $(p_x, p_y)$  space

$F_2(M^2)$  moment are higher in data than in mixed events in Ar+Sc collisions - detailed investigation of significance of this result is in progress

No signal visible in Be+Be.

# Critical point: Strongly intensive measures $\Sigma[P_T, N]$

Comparison to NA49 A+A at 158A GeV/c  
within NA49 two different acceptances



**System size dependence of  $\Sigma[P_T, N]$  at 150/158A GeV/c: NA49 and NA61/SHINE points show consistent trends**

**So far there are no prominent structures which could be related to critical point**

Eur.Phys.J. C77 (2017) no.2, 59,  
CERN-SPSC-2018-029