



# Co to jest model statystyczny i jak go użyliśmy do p+p @ 158 GeV/c

Krzysztof Piasecki, Tomasz Matulewicz

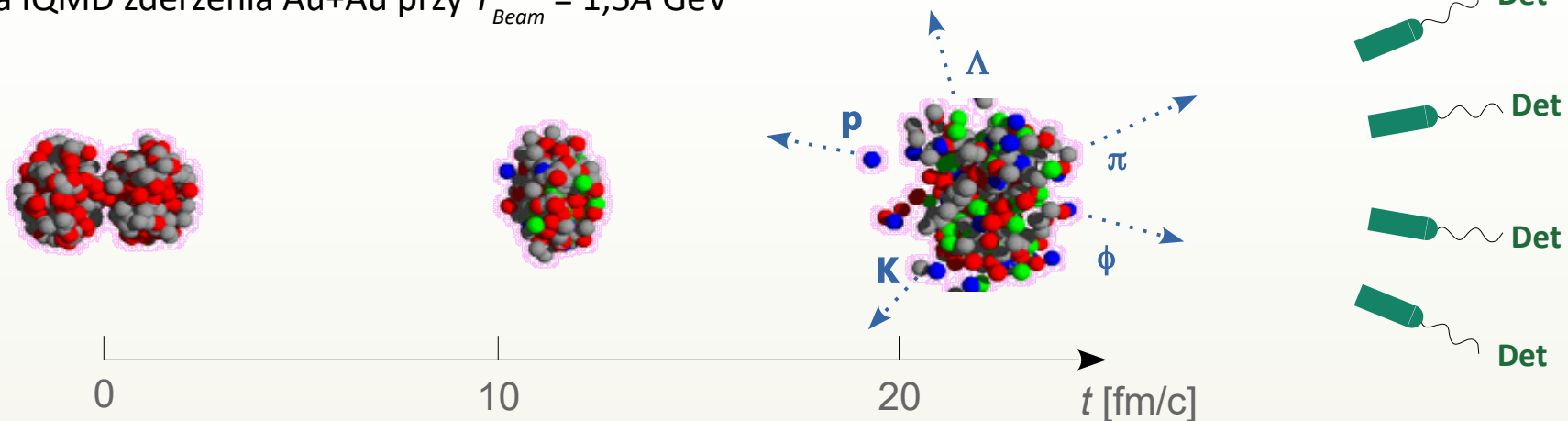
*Zakład Fizyki Jądrowej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski*

- ⊙ Wprowadzenie
- ⊙ Model statystyczny
- ⊙ p+p @ 158 GeV: Kompilacja danych
- ⊙ Analiza statystyczna
- ⊙ Porównania do systematyk
- ⊙ Podsumowanie

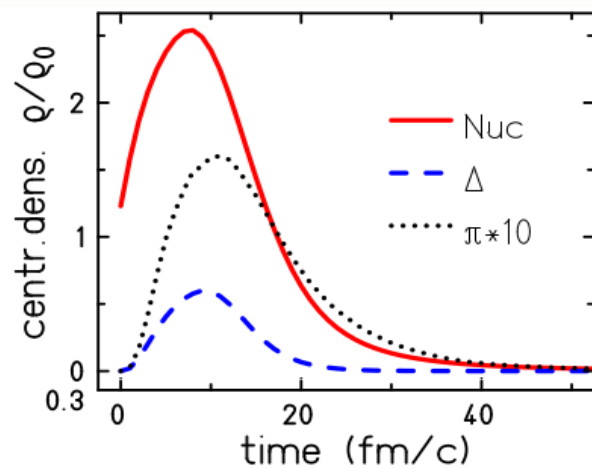
# Relatywistyczne zderzenia jądrowe



Symulacja IQMD zderzenia Au+Au przy  $T_{Beam} = 1,5A$  GeV

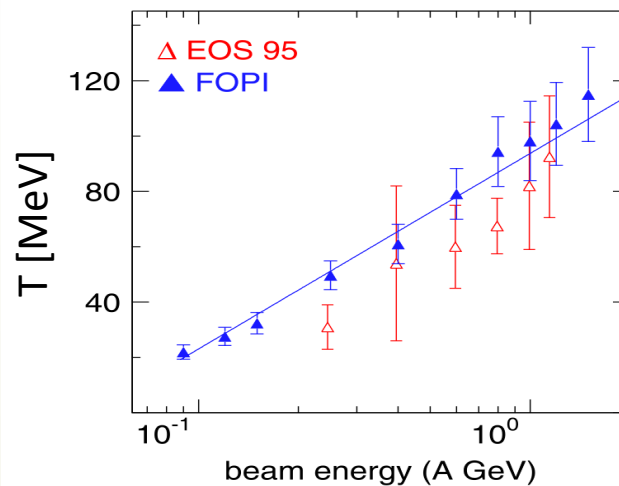


$10 \text{ fm/c} = 3.3 \cdot 10^{-23} \text{ s}$



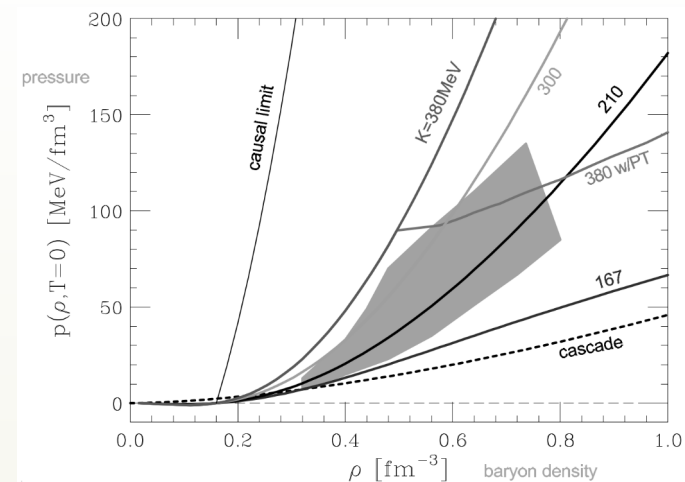
C. Hartnack et al., Phys. Rep. 510, 119 (2012)

$100 \text{ MeV} = 1.2 \cdot 10^{12} \text{ K}$



W. Reisdorf et al., NPA 848, 366 (2010)

$10 \text{ MeV/fm}^3 = 1.6 \cdot 10^{33} \text{ Pa}$



P. Danielewicz, APPol B 33, 45 (2002)



## Wiedza o zderzeniu

### Stan Początkowy

$$B = N + Z, \quad Q = Z$$

$$S = 0, \quad C = 0, \dots$$

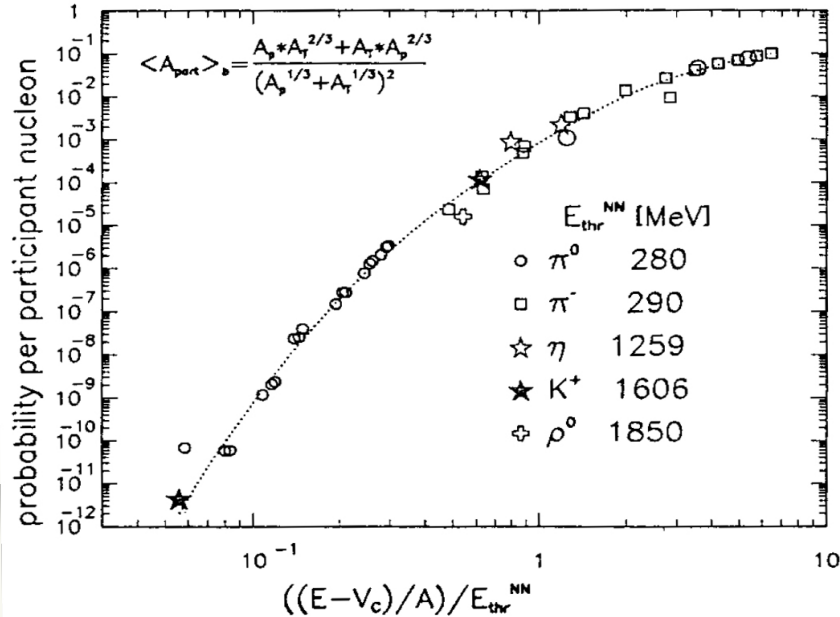
$$E = \sqrt{s}$$

### Stan końcowy

Emisja hadronów

– krotności

– rozkłady  $p/E$ ,  $\vartheta$ ,  $\varphi$ , ...



V. Metag, Prog. Part. Nucl. Phys. 30, 75 (1993)

- ◆ **Y**: Krotność produkcji kilku różnych hadronów na 1 nukleon uczestniczący w zderzeniu.
- ✗ **X**: Energia wiązki na nukleon, w porównaniu do *Energii progowej* na produkcję danego hadronu w kanale NN

### „Systematyka Metaga”

- ⇒ **Krotności hadronów** na 1 nukleon w strefie zderzenia są w przybliżeniu **takie same przez 10 rzędów wielkości**, na skali stosunku *Energii* do *E progowej*.

... i rosną z energią wiązki (jakby sterował 1 parametr ...)

# Model statystyczny

- ❖ **Freeze-out** (wymrożenie) : końcowy etap zderzenia, w którym ustaje produkcja cząstek (za wyjątkiem rozpadów cząstek dłużej żyjących) oraz ich oddziaływania.

Można definiować 2 rodzaje *freeze-outu*:

- ⊖ **Freeze-out chemiczny** : ustaje produkcja cząstek
- ⊖ **Freeze-out termiczny** : ustaje oddziaływanie pomiędzy cząstkami



## MODEL STATYSTYCZNY

- Hipoteza: przed *freeze-out* doszło do **równowagi termodynamicznej**. Zaszły:
  - ⊖ **Równowaga chemiczna** : krotności wszystkich cząstek ustaliły się w równowadze,
  - ⊖ **Równowaga termiczna** : krotności i rozkłady energii emisji stały się równowagowe, (kątowe: izotropia)

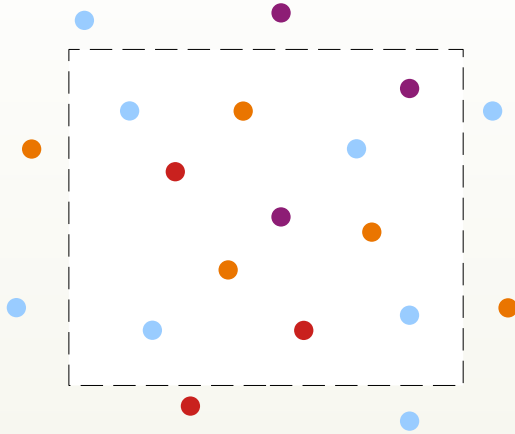
Symulacje: czas zderzenia  $t \sim 10^{-22}$  s, ciśnienie  $p \sim 10^{33}$  Pa      zakładanie osiągnięcia stanu równowagi jest odważne!

- Niektóre modele: parametr efektywny  $\gamma$ , tłumiący krotność hadronów dziwnych w por. do równowagi.
- Pomagają **więzy**:
  - **zasady zachowania**:  
 $E$  (energia) ,  $Q$  (ładunek) ,  $B$  (liczba barionowa) ,  $S$  (dziwność) ,  $C$  (powab) ,  $I_3$  (rzut izospinu)
  - znane **kanały rozpadów** hadronów (i proporcje)

# Układy termodynamiczne



## Układ Wielki Kanoniczny (Grand Canonical Ensemble)



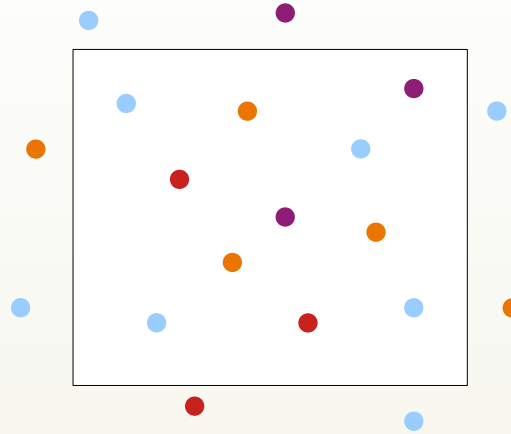
Układ ma otoczenie,  
z którym wymienia cząstki i energię

### Równowaga:

w układzie średnio  $N, E = \text{const.}$   
(może nieco  $\pm$  fluktuować)



## Układ kanoniczny (Canonical Ensemble)



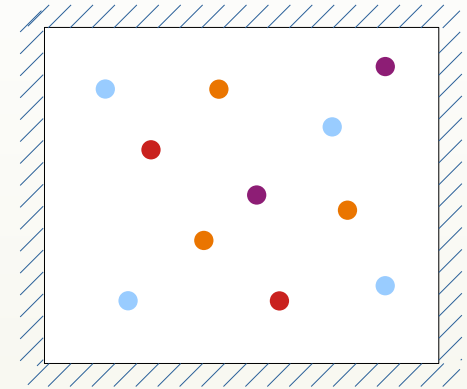
Układ ma otoczenie,  
z którym wymienia tylko energię

### Równowaga:

$E = \text{const}$  średnio  
 $N = \text{const}$  ściśle.



## Układ mikrokanoniczny (Microcanonical Ensemble)



Układ całkowicie izolowany.

### Równowaga:

$N = \text{const}$  ściśle.  
 $E = \text{const}$  ściśle.

- ⊙ Układ 2 zderzających się jąder jest izolowany. Ale:
  - dokładne obliczenia są b. złożone
  - im większe jądra, tym bardziej układy przybliżone „działają dobrze”
- ⊙ Cząstki produkowane rzadko (np. z kwarkiem  $s, c$ ): zasady zachowania  $S, C$  powinny być stosowane ściślej

# Model statystyczny



Od czego zależy **krotność** w modelu statystycznym?

Wzór dla „układu wielkiego kanonicznego” (założymy, że hadron ma jednoznaczną masę) :

krotność

Dostępność poziomów:  
statystyka Fermiego-Diraca / Bosego-Einsteina

koncentracja [fm<sup>-3</sup>] → 
$$n_i = \frac{N_i}{V} = \frac{g_i}{2\pi^2} \cdot \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{\exp\left(\frac{E_i - \mu_i}{T}\right) \pm 1}$$

objętość

$g_i$  : czynnik degeneracji (np. spin, izospin)

energia      temperatura [MeV]

potencjał chemiczny [MeV]

**Eksperyment:**  
lista wyznaczonych krotności

**Model statystyczny**  
w danym ujęciu

**Lista hadronów**  
+ kanałów rozpadów

**FIT**

**Parametry**  
T,  $\mu$ , V (R), ...

**Lista krotności**  
proponowanych p/model

# Rozwinięcia: małe krotkości hadronów dziwnych

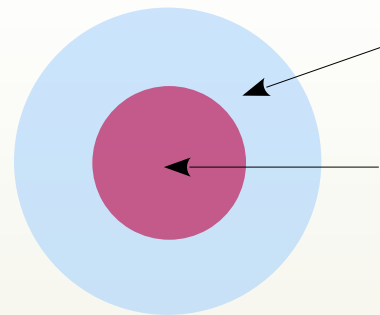
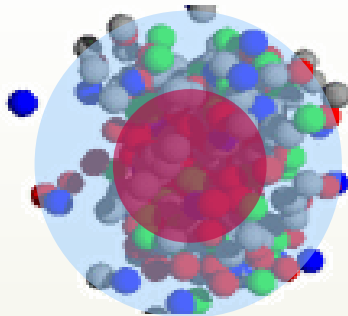


Przy energiach wiązek  $\lesssim$  SPS, małe krotkości hadronów z kwarkiem dziwnym.  
Możliwy **model mieszany**:

[ sektor dziwny ] : układ kanoniczny  
[ hadrony pozostałe ] : układ wielki kanoniczny



Pojawia się możliwość:



$V$  (lub  $R$  w  $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ )

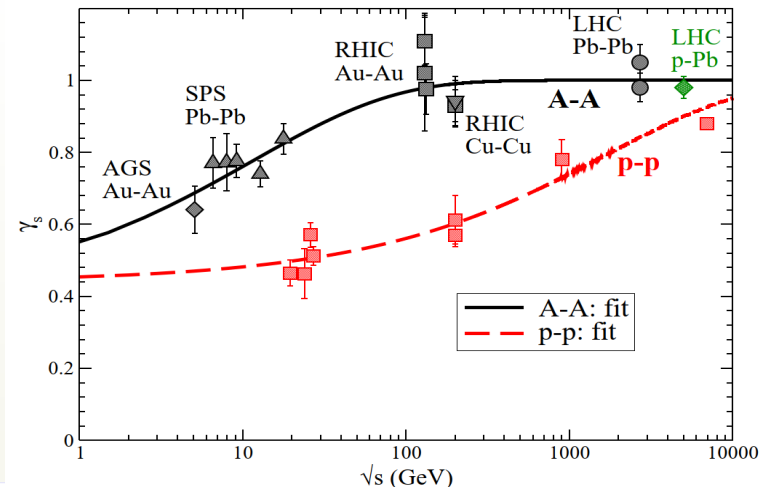
$V_{\text{Strange}}$  (często:  $R_c$ ,  
Canonical  
Radius )



Inne (niezależne) podejście do dziwności  
(F. Becattini *et al.*):

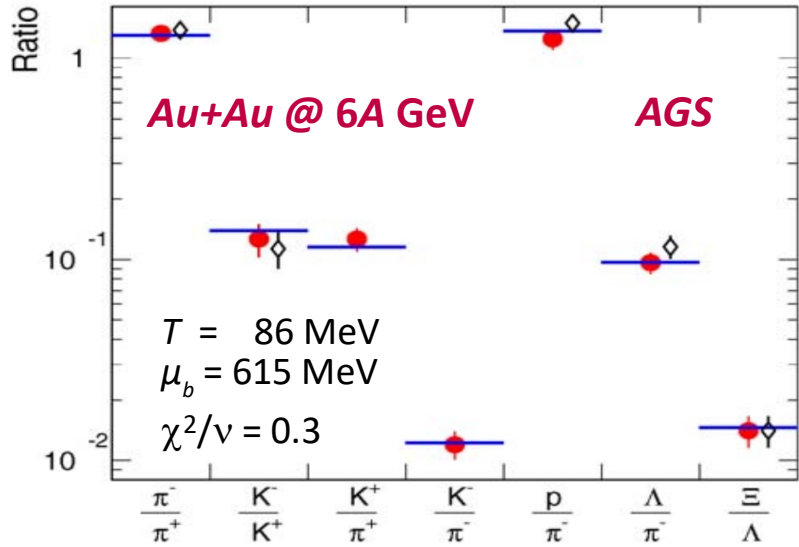
$t_{\text{zderzenia}}$  może być zbyt krótki, aby zaszła równowaga  
(krotkości mniejsze, niż w nasyceniu).

➡ Efektywny **czynniki  $\gamma$**  (undersaturation factor).

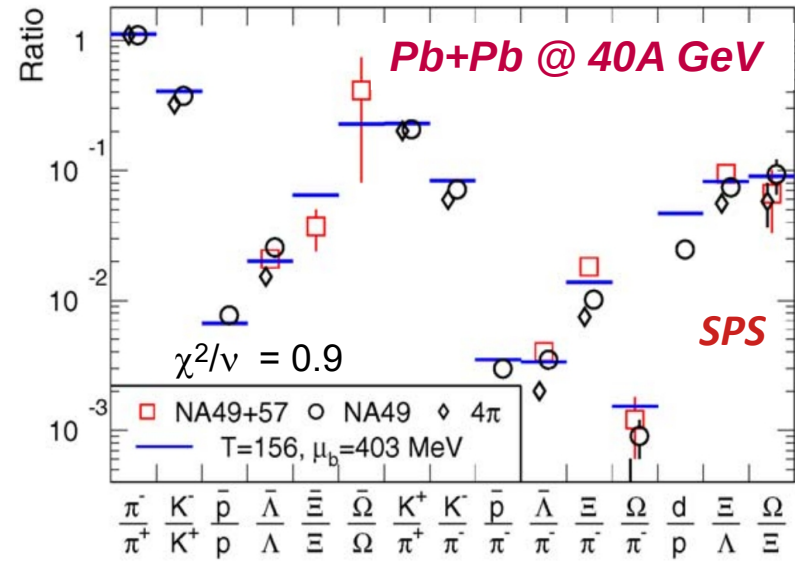


P. Castorina et al.,  
JMP E 25, 1650058 (2016)

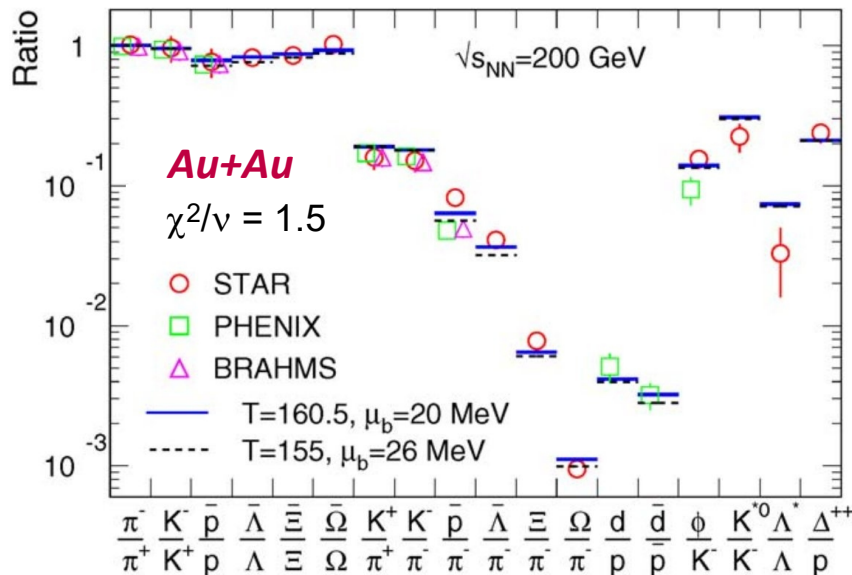
# Model statystyczny: przykłady dopasowań



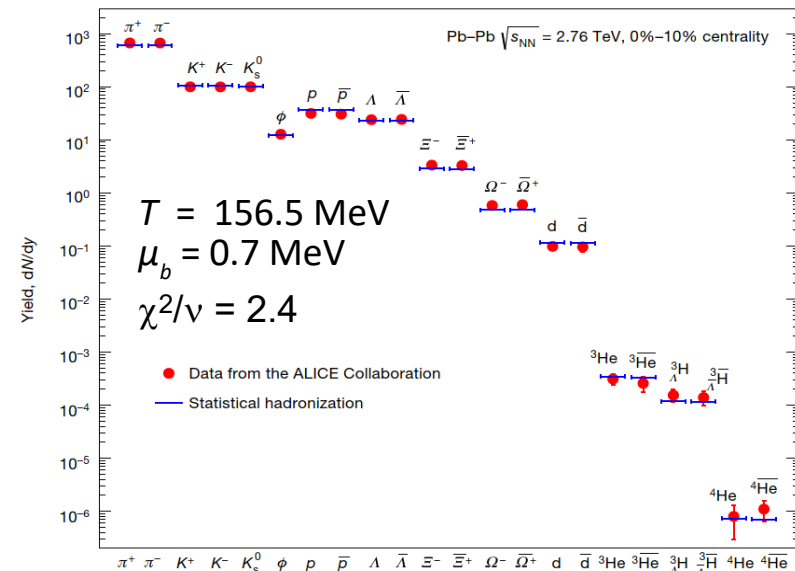
A. Andronic et al., NPA 772, 167 (2006)



A. Andronic et al., NPA 772, 167 (2006)



A. Andronic et al., NPA 772, 167 (2006)

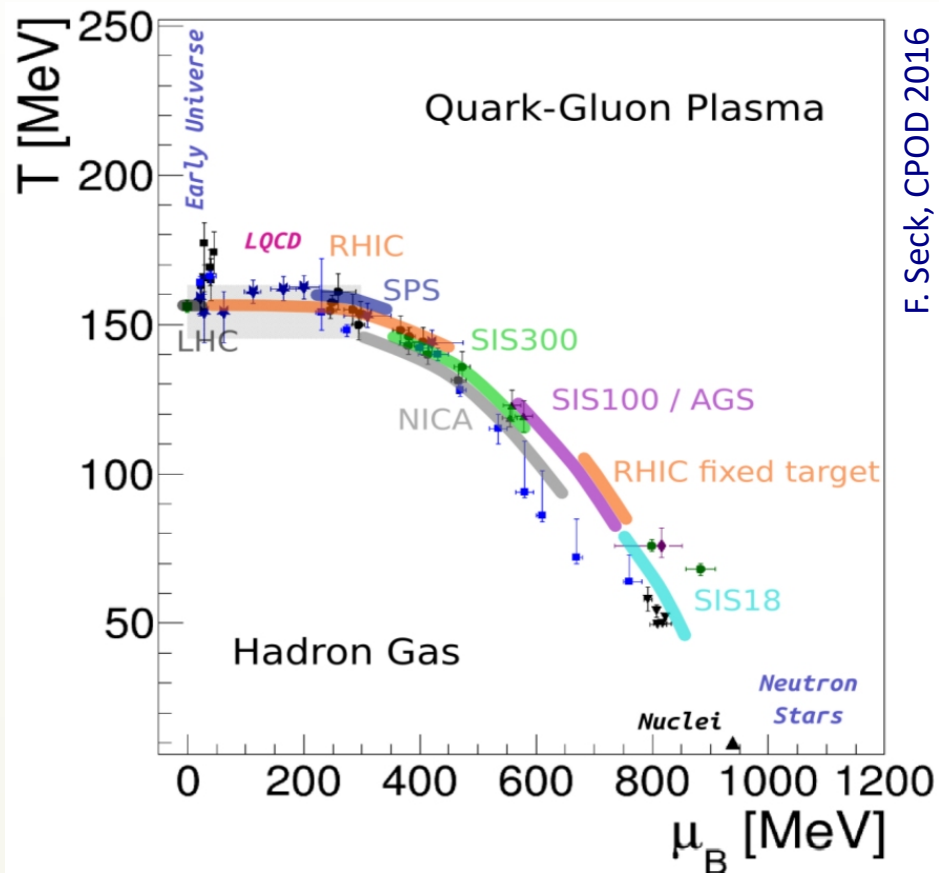


A. Andronic et al., Nature 561, 321 (2018)

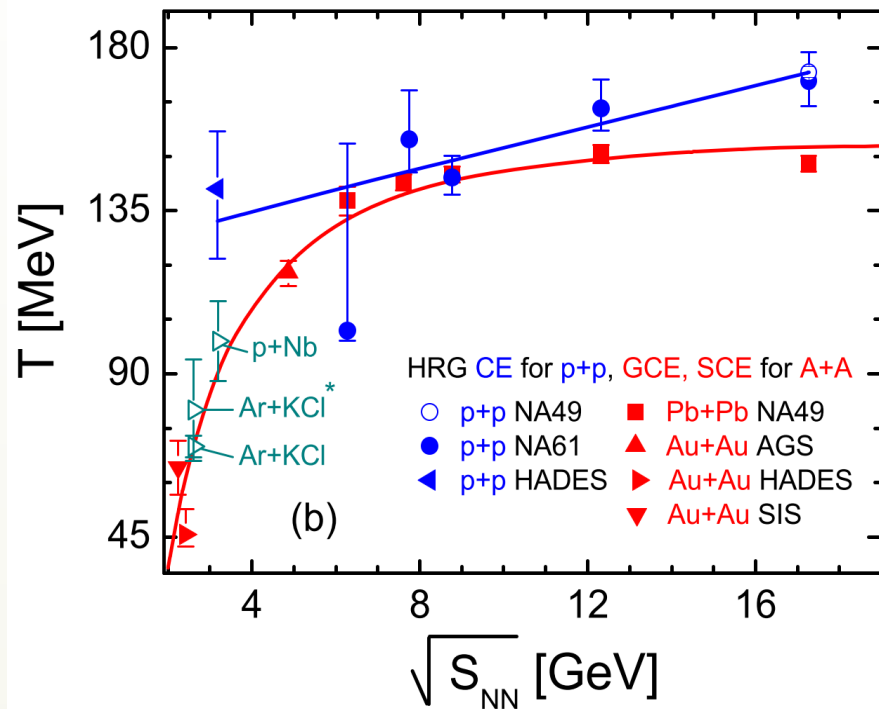


# Diagram fazowy materii jądrowej

➡ **Punkty ( $T, \mu_B$ )** na podstawie krotności hadronów na etapie końcowym zderzeń Au+Au (Pb+Pb) **kreślą wyraźną krzywą.**



➡ Parametry (np.  $T$ ) zależą od rozmiaru układu. Temperatura dla pp wychodzi wyższa, niż dla AuAu.



**Temat nie jest zamknięty, warto badać...**

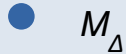
# Szerokość połówkowa rozkładu masy hadronu

Wiele hadronów (np.  $\Delta$ ) cechuje **rozkład masy**.  
Rozkład **Breita-Wignera**:

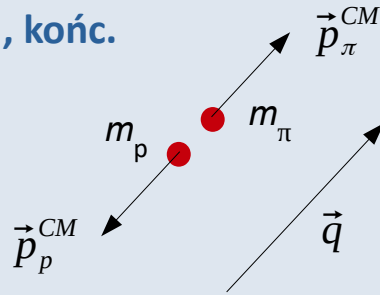
$$f(m) = A \frac{2 m m_0 \Gamma}{(m^2 - m_0^2)^2 + (m_0 \Gamma)^2}$$

- $m_0$  : centroid
- $\Gamma$  : szerokość połówkowa
- $\Gamma = h / \tau$
- $\tau$  : średni czas życia

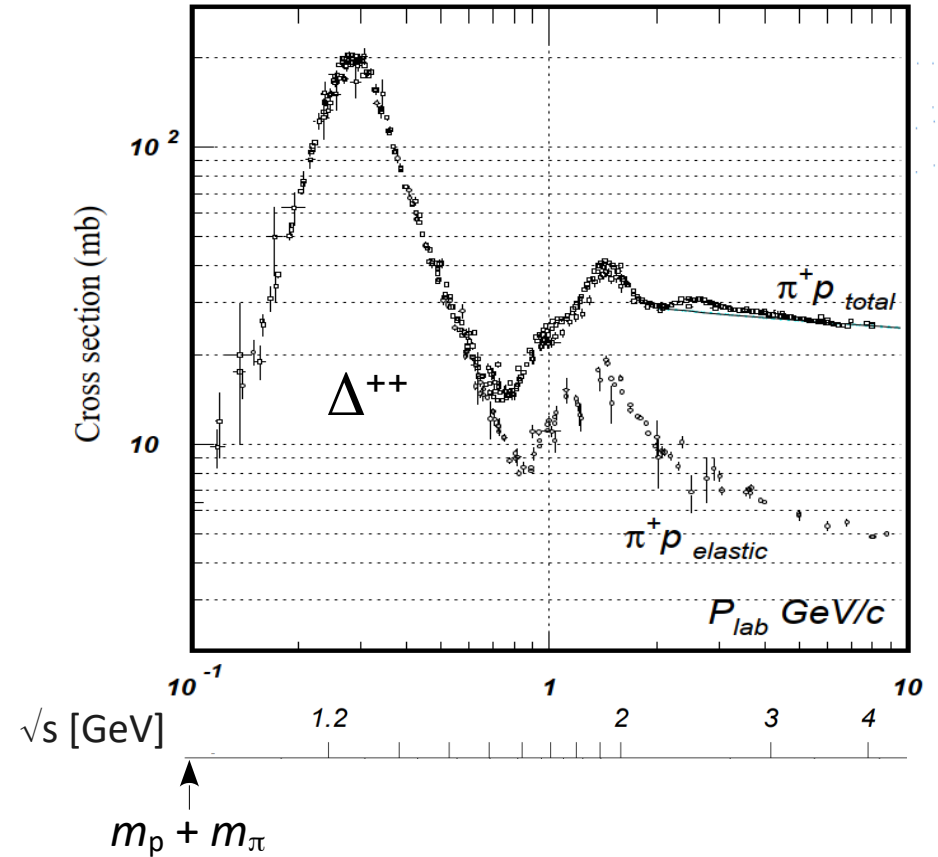
CM, pocz.



CM, końc.



Masa substratu  $\Rightarrow$  masa produktów + pęd



Dokładniej,  $\Gamma(m) \sim (q^2)^{L + \frac{1}{2}}$   
 $L$  : unoszony mom. pędu

$$\Gamma(m) = \Gamma_{PDG} \cdot BR_{PDG} \cdot \left[ \frac{1 - \left( \frac{m_{threshold}}{m} \right)^2}{1 - \left( \frac{m_{threshold}}{m_{PDG}} \right)^2} \right]^{L + \frac{1}{2}}$$



# Postęp analiz statystycznych nad p+p @ 158 GeV

Autorzy	Rok	Liczba danych	NA49				NA61/SHINE			
			Liczba danych / rodzaj źródła				Liczba danych / rodzaj źródła			
			Interpolacja z innych exp.	Nieopublikow. (PhD etc)	Wstępne (Conf. proc.)	Końc.	Interpolacja z innych exp.	Nieopublikow. (PhD etc)	Wstępne (Conf. proc.)	Końc.
Becattini, Manninen, Gaździcki PR C73, 044905	2006	<b>14</b>		6	7	1				
Kraus, Cleymans, Oeschler, Redlich, Wheaton PR C76, 064903	2007	<b>7</b>	7							
Kraus, Cleymans, Oeschler, Redlich PR C79, 014901	2009	<b>8</b>	2		4	2				
Kraus, Cleymans, Oeschler, Redlich PR C81, 024903	2010	<b>14</b>	2	4	5	3				
Vovchenko, Begun, Gorenstein PR C93, 064906	2016	<b>5</b>			4	1				
Begun, Vovchenko, Gorenstein, Stoecker PR C98, 054909	2018	<b>18</b>	2	4	2	10		1	7	
TM, KP JPhys G 48 085004	2021	<b>15</b>			2	6				11
TM, KP PANIC Poster	2021	<b>17</b>			2	6		1	13	



Mamy:

$$P_{49} \pm \Delta P_{49}$$

i

$$P_{61} \pm \Delta P_{61}$$

.

Zwykle:

$$\bar{P} = \sum_i w_i P_i \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad \Delta \bar{P} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}}}$$



**Problem:**

NA61 jest rozbudową NA49. Dominujące  $\Delta P$  są systematyczne  $\Rightarrow$  dane są skorelowane.



**Rozwiązanie:**

Metoda z pracy [M. Schmelling, Phys. Scr. 51, 676 \(1995\)](#).

- Prawidłowy wzór:
- gdzie  $C$  to macierz kowariancji:
- Wyznaczamy  $\chi^2$ :
- $f$  powinno spełniać:

$$\Delta \bar{P} = \sqrt{\sum_i w_i w_j \hat{C}_{ij}}$$

$$\hat{C}(i, j) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & f \cdot \sigma_1 \sigma_2 \\ f \cdot \sigma_1 \sigma_2 & \sigma_2^2 \end{bmatrix}$$

$f$ : współczynnik korelacji, do znalezienia

$$\chi^2(f) = \sum_{i,j=1}^2 (P_i - \bar{P}) \hat{C}_{ij}^{-1} (P_j - \bar{P})$$

$$\frac{\chi^2(f)}{NDF} = 1$$



Hadron	$\pi^-$	$\pi^+$	$K^+$	$K_s^0$	$K^-$	$K^*(892)$	p	p	$\phi$
$f$	0.78	0.91	0.92	0.85	0.99	0.77	0.98	0.86	0.90



**Silne korelacje!**

# SHM analysis of p+p @ 158 GeV



Wykorzystany pakiet **ThermalFist**  . **Lista hadronów:**

- Wszystkie hadrony z PDG (edycja 2020), ale bez zawierających kwarki c, b.
- Lista zawiera fragmenty jądrowe: d, t,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  (i ich antycząstki)



**Rodzaje układów:**

Wszystkie hadrony

**Układ Wielki Kanoniczny** ✘

Hadrony z  $S \neq 0$

**Układ Kanoniczny**

Pozostałe hadrony

**U. Wielki Kanoniczny** ✔

Wszystkie hadrony

**Układ Kanoniczny** ✔

Wszystkie hadrony

**Układ Mikrokanoniczny** ✘



Jak włączenie **zależnej od  $E$  szerokości  $\Gamma$  rozkładu masy** zmienia wyniki?

✔ / ✘



Poprzednie prace: **wykluczenie  $\phi$**  silnie poprawia jakość. Czy to obserwujemy?

✔ / ✘



**Promień kanoniczny ( $R_c$ ) przywiązany** do promienia całości ( $R$ ) ?

✔ / ✘



Analiza opublikowana w: **TM, KP, J.Phys. G 48, 085006 (2021)** ✨

Aktualizacja po danych  $\Xi/\Xi(1530)$ ,  $K_s^0$ : zostanie opisana w publikacji konf. PANIC 2021 ...

## ❖ Zależna od energii szerokość $\Gamma$ rozkładu masy BW:

- Minimalne polepszenie  $\chi^2/\nu$
- Temperatura  $\nearrow$  o 8 MeV. Potencjał  $\mu_B \nearrow$  o 10 MeV.

## ❖ Scenariusz I [mieszany]: Hadrony z kwarkiem s ( $\bar{s}$ ): Ukł. Kanoniczny. Pozostałe: Ukł. Wielki Kanoniczny

**$V_{\text{Strange}} = V$**

$\chi^2/\nu = 11$

$T = 169.9 \pm 2.8 \text{ MeV}$   
 $\mu_B = 245.7 \pm 3.8 \text{ MeV}$   
 $\gamma_S = 0.454 \pm 0.009$   
 $R = 1.46 \pm 0.07 \text{ fm}$



**Wariant bazowy**

$\chi^2/\nu = 3.4$

$T = 173.6 \pm 2.7 \text{ MeV}$   
 $\mu_B = 245.3 \pm 3.9 \text{ MeV}$   
 $\gamma_S = 0.418 \pm 0.010$   
 $R = 1.35 \pm 0.06 \text{ fm}$   
 $R_C = 1.70 \pm 0.09 \text{ fm}$



**Wykluczenie  $\phi$**

$\chi^2/\nu = 2.0$

$T = 179.9 \pm 3.0 \text{ MeV}$   
 $\mu_B = 252.7 \pm 4.4 \text{ MeV}$   
 $\gamma_S = 0.90 \pm 0.10$   
 $R = 1.21 \pm 0.06 \text{ fm}$   
 $R_C = 1.21 \pm 0.06 \text{ fm}$

**Konkluzje  
tego  
scenariusza:**

- Wszystkie dopasowania dają  $\chi^2/\nu > 1$ .
- Zrównanie  $V_{\text{Strange}} = V$  pogarsza  $\chi^2$ .
- W wariacie bazowym dostaje się  $R_C > R$  (nieoczekiwane).
- Wykluczenie mezonu  $\phi$  daje  $R_C = R$  i lepsza  $\chi^2$ , ale niewystarczająco.

# Wyniki analizy statystycznej



## Scenariusz 2:

Układ Kanoniczny dla wszystkich hadronów

$$V_{\text{Strange}} = V$$

$$\chi^2/\nu = 9.3$$

$$T = 177.9 \pm 3.1 \text{ MeV}$$

$$\gamma_s = 0.423 \pm 0.008$$

$$R = 1.36 \pm 0.07 \text{ fm}$$

### Wariant bazowy

$$\chi^2/\nu = 9.9$$

$$T = 177.3 \pm 3.2 \text{ MeV}$$

$$\gamma_s = 0.424 \pm 0.009$$

$$R = 1.37 \pm 0.07 \text{ fm}$$

$$R_c = 1.38 \pm 0.07 \text{ fm}$$

### Wykluczenie $\phi$

$$\chi^2/\nu = 2.0$$

$$T = 184.5 \pm 3.1 \text{ MeV}$$

$$\gamma_s = 0.504 \pm 0.011$$

$$R = 1.22 \pm 0.06 \text{ fm}$$

$$R_c = 1.20 \pm 0.06 \text{ fm}$$

**Konkluzje  
tego  
scenariusza:**

- Wszystkie dopasowania dają  $\chi^2/\nu > 1$ .
- W wariacie "swobodne  $V_{\text{Strange}}$ " oba promienie wychodzą zgodne.
- Nic dziwnego, że wariant " $V_{\text{Strange}} = V$ " daje te same wyniki.
- Wykluczenie mezonów  $\phi$  daje  $R_c = R$  i polepsza  $\chi^2/\nu \rightarrow 2$ . Inne warianty:  $\chi^2/\nu \approx 10$ .

**Ogólne:**



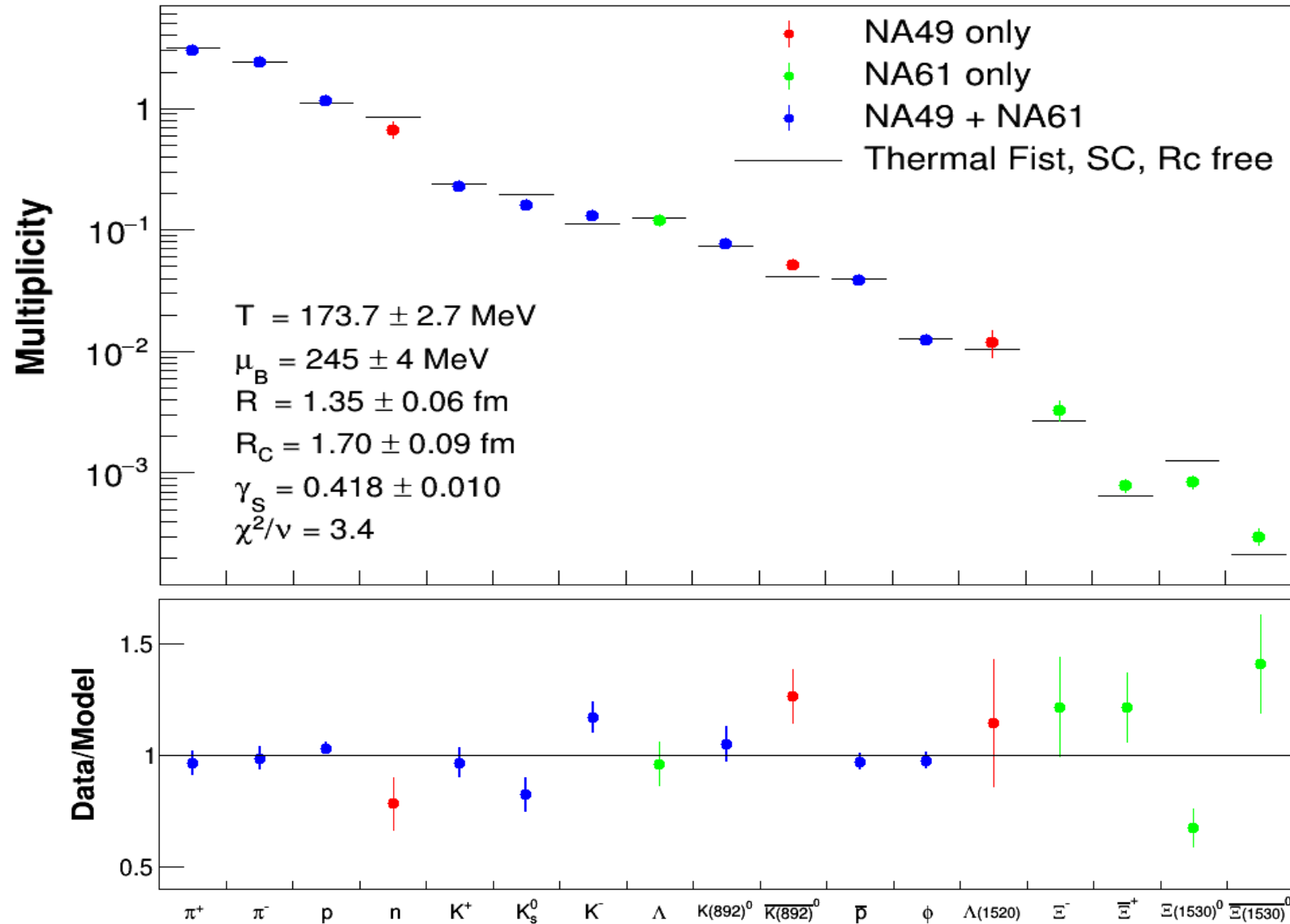
Albo układ mieszany, ale dostajemy  $R_c > R \rightarrow \chi^2/\nu = 3.4$   
Albo układ kanoniczny, ale wykluczamy  $\phi$   $\rightarrow \chi^2/\nu = 2.0$

**Reasumując:**

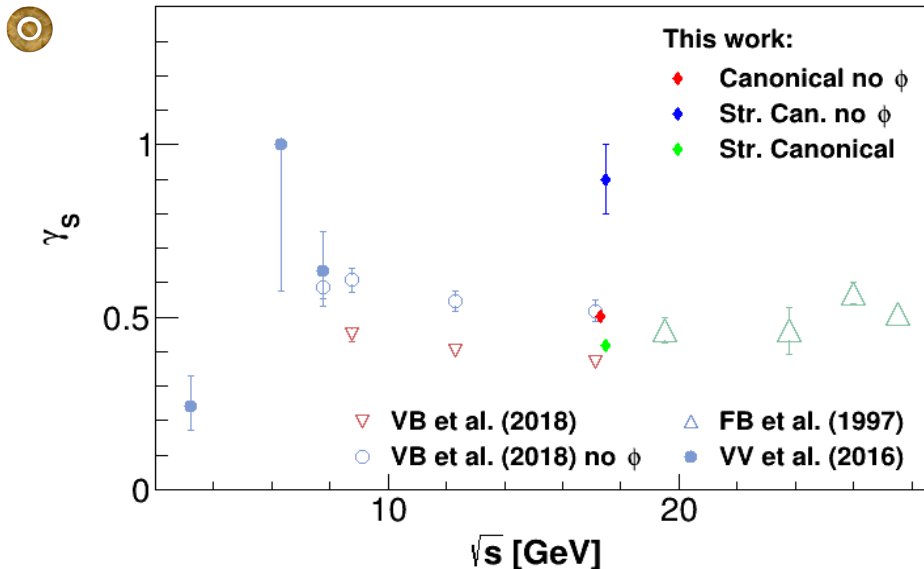
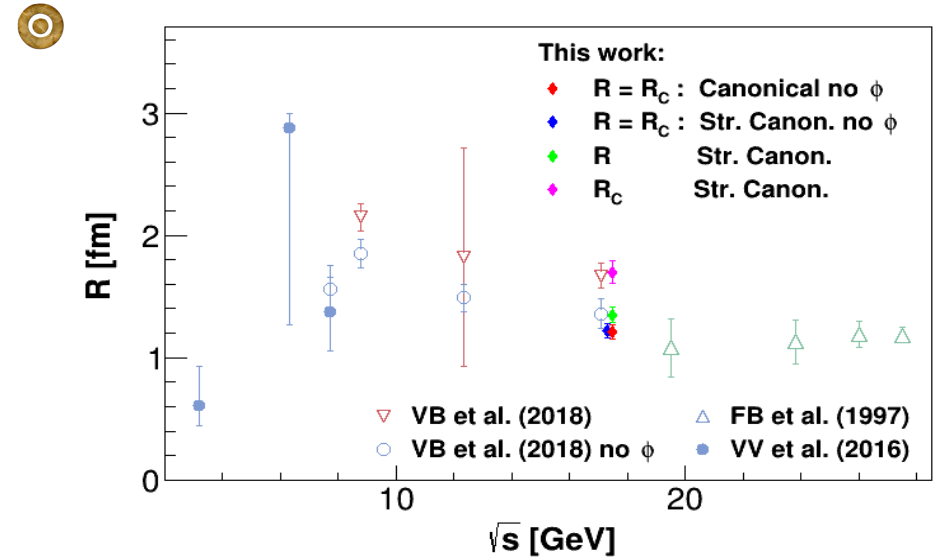
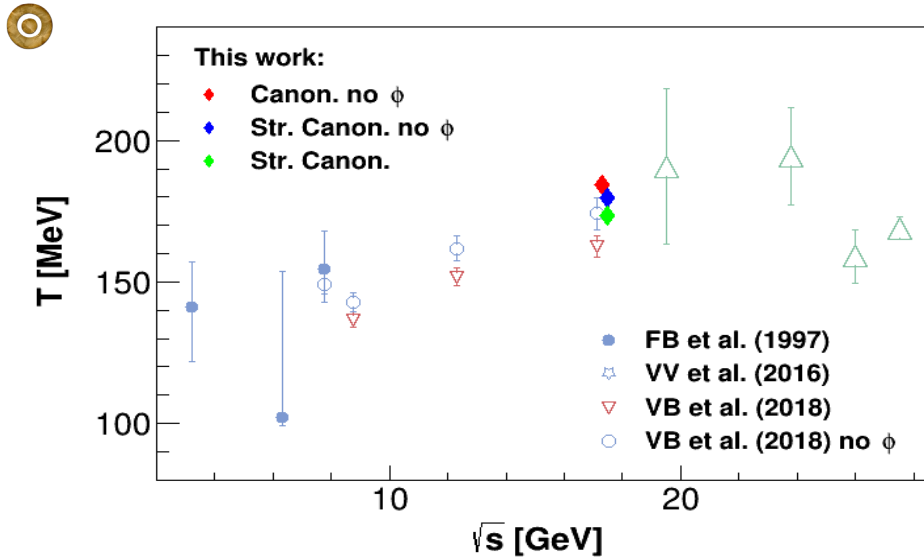
Brak 100% dobrego modelu. Bez wykluczania danych,  $\sim$  **tylko scenariusz mieszany.**



# Dopasowanie vs dane (scenariusz mieszany)



# Porównanie do systematyk



## Konkluzje:

- Większość wyników: zgodna z systematyką, ale precyzyjniejsze.
- Wyjątek: w scenariuszu "mieszany bez  $\phi$ "  $\gamma_s \nearrow$ . Ten wzrost kompensuje  $\searrow R_c$ .
- Temperatura: 8 MeV wzrost w por. do V. Begun et al. '2018 (uwzględnienie  $\Gamma$  zależnej od energii)

# Przewidywanie krotności (scenariusz mieszany)



## Krotności zmierzone

Hadron	Krotność exp.	Model statyst.
Mezony		
$\pi^+$	$3.04 \pm 0.17$	3.32
$\pi^-$	$2.40 \pm 0.13$	2.43
$K^+$	$0.229 \pm 0.015$	0.224
$K^-$	$0.131 \pm 0.007$	0.112
$K_s^0$	$0.164 \pm 0.018$	0.197
$\overline{K^*(892)^0}$	$0.0766 \pm 0.006$	0.0733
$K^*(892)^0$	$0.0523 \pm 0.0048$	0.0411
$\phi$	$0.0125 \pm 0.0005$	0.0128
Bariony		
$\overline{p}$	$1.159 \pm 0.033$	1.123
$p$	$0.0388 \pm 0.0012$	0.399
$n$	$0.67 \pm 0.1$	0.856
$\overline{\Lambda}$	$0.120 \pm 0.012$	0.125
$\Xi^-$	$(3.30 \pm 0.61) \cdot 10^{-3}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$
$\overline{\Xi}^+$	$(7.9 \pm 1.0) \cdot 10^{-4}$	$6.5 \cdot 10^{-4}$
$\Lambda^*(1520)$	$0.120 \pm 0.003$	0.0105
$\Xi(1530)$	$(8.43 \pm 1.08) \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^{-4}$
$\overline{\Xi}(1530)$	$(2.99 \pm 0.47) \cdot 10^{-4}$	$2.12 \cdot 10^{-4}$



## Przewidywanie krotności niezmiernych

Hadron	Model stat.
Mezony	
$\pi^0$	3.15
$\eta$	0.297
$\rho^0(770)$	0.317
$D^0$	$1.92 \cdot 10^{-3}$
$\overline{D^0}$	$1.45 \cdot 10^{-3}$
$D^+$	$8.62 \cdot 10^{-4}$
$D^-$	$5.51 \cdot 10^{-4}$
$D_s$	$3.71 \cdot 10^{-4}$
$J/\psi$	$2.0 \cdot 10^{-6}$
Bariony	
$\Delta^{++}$	0.300
$\Delta^0$	0.198
$\overline{\Lambda}$	0.012
$\Sigma(1385)^+$	0.0188
$\Omega$	$5.3 \cdot 10^{-5}$
$\overline{\Omega}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$
$n$	0.0520
$d$	0.0249
$\overline{d}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$



*zaproszenie  
do  
kolejnych  
analiz*



# Scenariusz mieszany. Czy $R_c$ może przewyższyć $R$ ?

## 📌 Dostępne analizy femtoskopowe dla zderzeń p+p.

### 📍 Zderzenia pp @ $\sqrt{s} = 27.4$ GeV

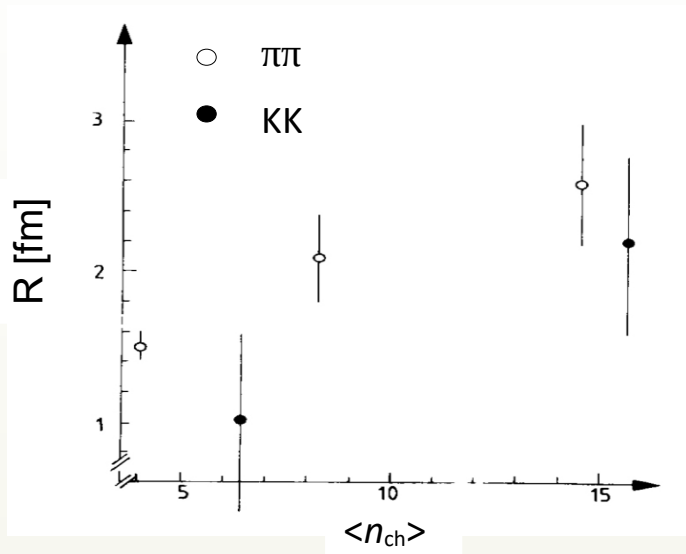
M. Aguilar-Benitez et al. (NA27 Collaboration), Z. Phys. C54, 21 (1992)

Dla par  $\pi^\pm \pi^\pm$ ,  $R = 1.71 \pm 0.04$  fm

Dla par  $K^\pm K^\pm$ ,  $R = 1.87 \pm 0.33$  fm

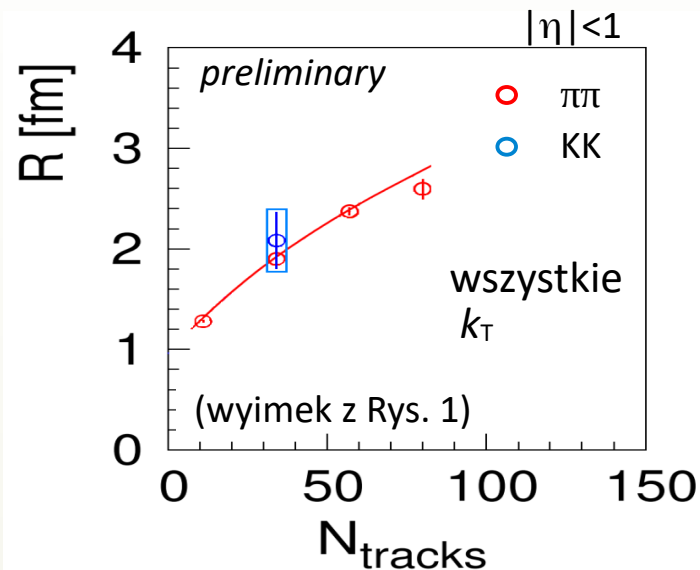
### 📍 Zderzenia pp @ $\sqrt{s} = 63$ GeV

T. Åkesson et al. (AFS Collaboration), PL 155B, 128 (1985)



### 📍 Zderzenia pp @ $\sqrt{s} = 900$ GeV

S.M. Dogra (CMS Collaboration), NP A931, 1061 (2014)



Dane niekonkluzywne. Hipoteza śmiała, ale niewykluczona. **Nowa analiza ?**




# Podsumowanie

 Krotności hadronów emitowanych ze zderzeń **p+p @ 158 GeV/c** zmierzone przez NA49 i NA61.  
 ujednolicony zestaw krotności wybrany pod bardziej rygorystycznymi warunkami.

◆ **Model statystyczny** dostępny dzięki pakietowi **Thermal-FIST** (v. 1.3).  
Rezonanse: uwzględnienie **zależnej od  $E$  szerokości  $\Gamma$  rozkładu masy Breita-Wignera**.


◆ Rozważone dwa scenariusze:


- **[SC]** Hadrony z otwartą dziwnością: **układ kanoniczny**. Pozostałe: **u. wielki kanoniczny**.
- **[CE]** **Układ kanoniczny** dla wszystkich hadronów

-  ➤ Podejścia z więzem  $R_c = R$  nieprawdopodobne:  $\chi^2/\nu \approx 10$
- Podejście CE nieprawdopodobne:  $\chi^2/\nu \approx 10$
- **Wykluczenie mezonów  $\phi$** :  $\chi^2/\nu \approx 2$  (wątpliwy krok...)
- **Podejście mieszane**:  $\chi^2/\nu \approx 3.4$

... lecz  $R_c > R$  ( $R \approx 1.35 \pm 0.06$  fm i  $R_c \approx 1.7 \pm 0.1$  fm).

 **Przewidywania szeregu krotności niezmiernych dotąd cząstek**

 Reasumując: Temperatura  $\approx 174 - 185$  MeV.  $\mu_B \approx 250$  MeV.  $\gamma_S \approx 0.4 .. 0.5$  (or 0.9).  
Promień  $\approx 1.2 - 1.35$  fm, Tam, gdzie się stosuje,  $R_c \approx 1.7$  fm.

 Sugerujemy **analizę dalszych hadronów** i badania **femtoskopowe par hadronów dziwnych**.

***Backup slides***

# Status of experimental yields from NA49



Status ~ year 2010. Statistics: 4.8M events. Yields shown in Table:

Particle	Yield	Syst. Error	Comment	Ref.
$\pi^+$	3.02		Collaboration Paper. Yields: no errors given	C. Alt et al, EPJ C45, 343 (2006)
$\pi^-$	2.36		Collaboration Paper. Yields: no errors given	C. Alt et al, EPJ C45, 343 (2006)
$K^+$	0.227		Collaboration Paper. Yields: no errors given	T. Anticic et al, EPJ C68, 1 (2010)
$K^-$	1.3		Collaboration Paper. Yields: no errors given	T. Anticic et al, EPJ C68, 1 (2010)
$p$	1.162	0.035	Collaboration Paper	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)
$\bar{p}$	0.039	0.001	Collaboration Paper	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)
$K^*(892)^0$	0.0741	0.0069	Collaboration Paper	T. Anticic et al, PR C84, 064909 (2011)
$\overline{K^*(892)^0}$	0.0523	0.0048	Collaboration Paper	T. Anticic et al, PR C84, 064909 (2011)
$\phi$	0.012	0.0015	Collaboration Paper	S. Afanasiev et al, PL B491, 59 (2000)
$K_s^0$	0.18	0.04	Preliminary (Conf. Proceedings)	F. Sikler et al, NP A661, 45c (1999)
$\Lambda^*(1520)$	0.12	0.003	Preliminary (Conf. Proceedings)	R. Barton et al, J.Phys. G27, 367 (2001)
$n$	0.665	0.067	Only dN/dx <sub>F</sub> given in paper	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)
$\Lambda$	0.0031	0.0003	Preliminary, Unpublished	<a href="https://edms.cern.ch/ui/file/1075059/4/na49_compil_20130801.pdf">edms.cern.ch/ui/file/1075059/4/na49_compil_20130801.pdf</a>
$\bar{\Lambda}$	0.00092	9E-05	Preliminary, Unpublished	<a href="https://edms.cern.ch/ui/file/1075059/4/na49_compil_20130801.pdf">edms.cern.ch/ui/file/1075059/4/na49_compil_20130801.pdf</a>
$\Sigma^-$	0.116	0.011	Preliminary, Unpublished	D. Barna, Ph.D. 2002 Budapest
$\Sigma^+$	0.014	0.007	Preliminary, Unpublished	D. Barna, Ph.D. 2002 Budapest
$\Omega^-$	0.00026	0.00013	Preliminary, Unpublished	D. Barna, Ph.D. 2002 Budapest
$\bar{\Omega}^+$	0.00016	0.00009	Preliminary, Unpublished	D. Barna, Ph.D. 2002 Budapest

# Recent decade: yields from NA61/SHINE



NA61 status ~ year 2021. Statistics: ~60M events. Yields shown in Table:

Particle	Yield	Stat, Syst Errors	Comment	Ref.
$\pi^+$	3.110	$\pm 0.03 \pm 0.26$	Collaboration Paper	A.Aduszkiewicz et al, EPJ C77, 617 (2017)
$\pi^-$	2.404	$\pm 0.034 \pm 0.18$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C77, 617 (2017)
$K^+$	0.234	$\pm 0.014 \pm 0.017$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C77, 617 (2017)
$K_s^0$	0.162	$\pm 0.001 \pm 0.015$	arXiv	arXiv:2106.07535
$K^-$	0.132	$\pm 0.011 \pm 0.009$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C77, 617 (2017)
$p$	1.154	$\pm 0.010 \pm 0.04$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C77, 617 (2017)
$\bar{p}$	0.0402	$\pm 0.002 \pm 0.003$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C77, 617 (2017)
$\Lambda$	0.120	$\pm 0.006 \pm 0.010$	Collaboration Paper	A.A. et al, EPJ C76, 198 (2016)
$K^*(892)^0$	0.07844	$(\pm 0.38 \pm 6.0) 10^{-3}$	Collaboration Paper, Recent	A.A. et al, EPJ C80, 460 (2020)
$\phi$	0.01256	$(\pm 0.33 \pm 0.32) 10^{-3}$	Collaboration Paper, Recent	A.A. et al, EPJ C80, 199 (2020)
$\Xi^-$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$(\pm 0.1 \pm 0.6) 10^{-3}$	Collaboration Paper, Recent	A.A. et al, EPJ C80, 833 (2020)
$\bar{\Xi}^+$	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$(\pm 0.2 \pm 1.0) 10^{-4}$	Collaboration Paper, Recent	A.A. et al, EPJ C80, 833 (2020)
$\Xi^0(1530)$	$8.43 \cdot 10^{-4}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$	Collab. Pap. Accepted for Pub.	arXiv:2105.09144
$\bar{\Xi}^0(1530)$	$2.99 \cdot 10^{-4}$	$0.47 \cdot 10^{-4}$	Collab. Pap. Accepted for Pub.	arXiv:2105.09144



# Unified dataset of NA49 $\oplus$ NA61 yields



Combined results. 14 final data with published errors were included  
+ 2 points from Conf. Proceedings + 1 recent arXiv.

For hadrons where two Collaborations found data, the result is the weighted average.

Particle	Yield	Combined Error	NA49 ref.	NA61/SHINE Ref.
$\pi^+$	3.11	0.26		A. Aduszkiewicz et al. EPJ C77, 671 (2017)
$\pi^-$	2.4	0.18		A.A. et al. EPJ C77, 671 (2017)
$K^+$	0.234	0.022		A.A. et al. EPJ C77, 671 (2017)
$K^-$	0.132	0.014		A.A. et al. EPJ C77, 671 (2017)
$K^*(892)^0$	0.0766	0.0045	T. Anticic et al, PR C84, 064909 (2011)	A.A. et al. EPJ C80, 460 (2020)
$\overline{K^*(892)^0}$	0.0523	0.0048	T. Anticic et al, PR C84, 064909 (2011)	
$\phi$	0.0125	$4 \cdot 10^{-4}$	S. Afanasiev et al, PL B491, 59 (2000)	A.A. et al. EPJ C80, 99 (2020)
$p$	1.159	0.024	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)	A.A. et al. EPJ C77, 671 (2017)
$\overline{p}$	0.0388	0.0012	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)	A.A. et al. EPJ C77, 671 (2017)
$n$	0.67	0.1	T. Anticic et al, EPJ C65, 9 (2010)	
$\Lambda$	0.12	0.012		A.A. et al. EPJ C76, 198 (2016)
$\Xi^-$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$6.1 \cdot 10^{-4}$		A.A. et al. EPJ C80, 833 (2020)
$\Xi^+$	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$		A.A. et al. EPJ C80, 833 (2020)
$\Xi^0(1530)$	$8.43 \cdot 10^{-4}$	$1.08 \cdot 10^{-4}$		arXiv:2105.09144, accepted for pub.
$\overline{\Xi^0(1530)}$	$2.99 \cdot 10^{-4}$	$0.47 \cdot 10^{-4}$		ArXiv:2105.09144, accepted for pub.
$K^0_s$	0.164	0.015	F. Sikler et al, NP A661, 45c (1999)	arXiv:2106.07535
$\Lambda^*(1520)$	0.12	0.003	R. Barton et al, J.Phys. G27, 367 (2001)	