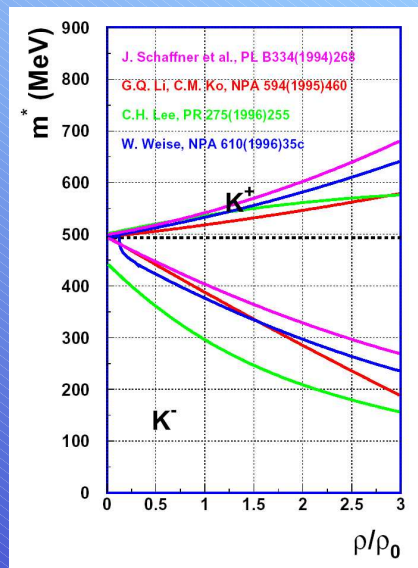
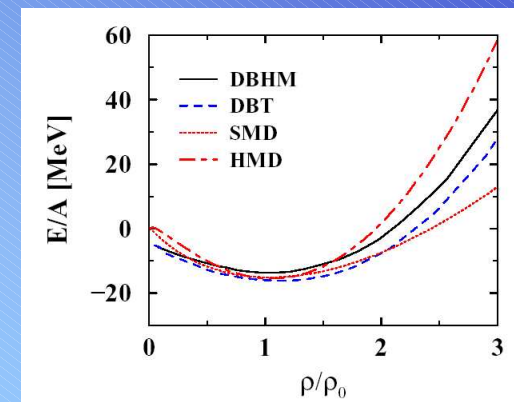


# Dziwny stan materii (jądrowej)

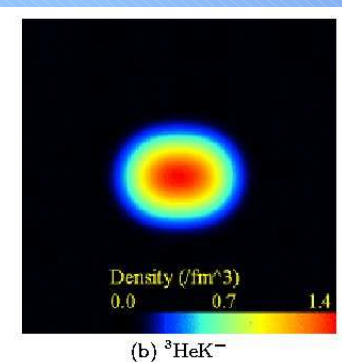
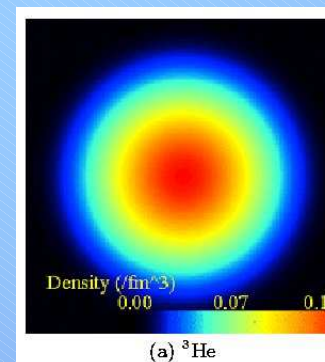
Wyniki i nowe kierunki badań współpracy FOPI

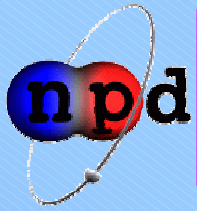
## 1. Równanie stanu materii jądrowej



## 2. Modyfikacje kaonów w gęstej materii

## 3. Klastry kaonowe Supergęsta materia Nadprzewodnictwo kolorowe



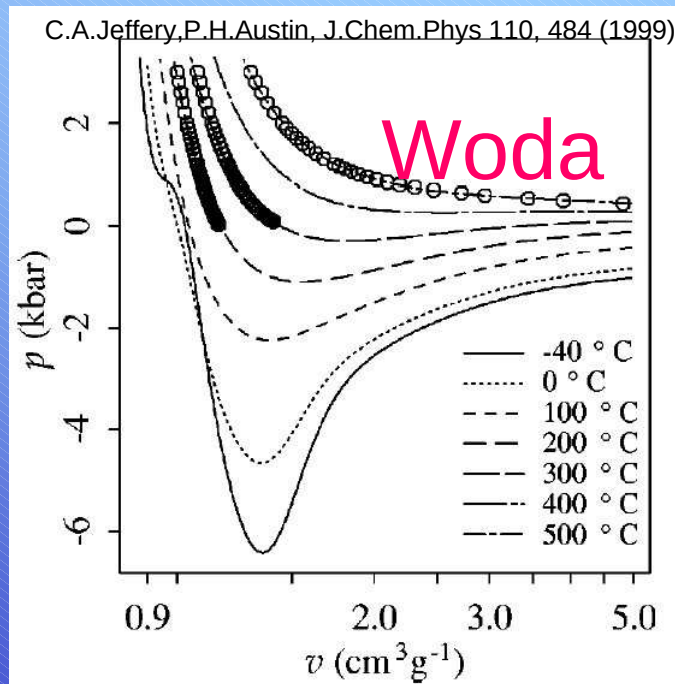


# Równanie stanu



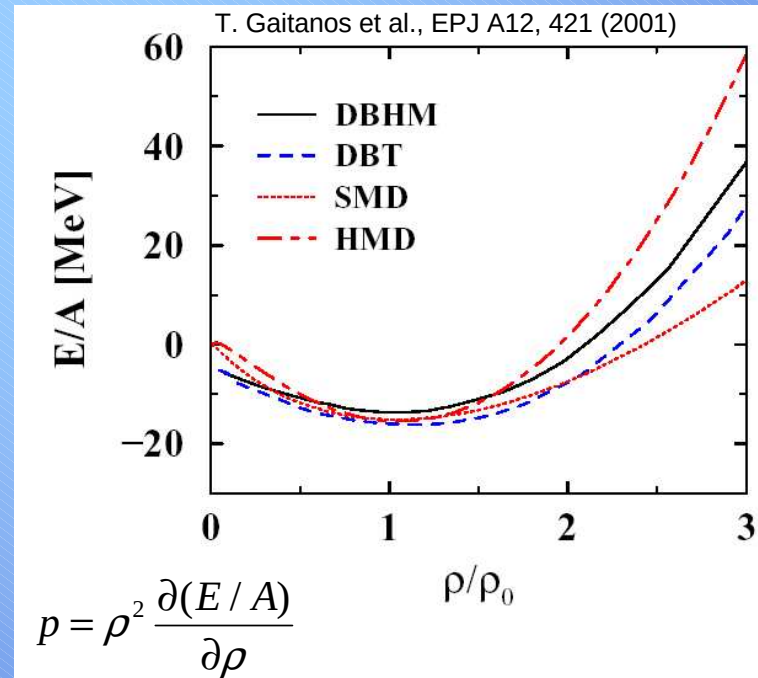
Gaz doskonały :  
 $pV = NRT$

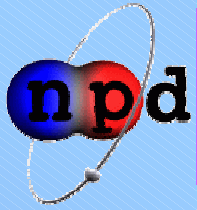
Siły jądrowe – np. pot. Yukawy, Skyrm'a  
Pierwsze przybliżenie  
– zależność kwadratowa



Siły przyciągające  
= ujemne ciśnienia

$$E / A = \kappa \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2$$





# Zderzenia ciężkich jonów

Częściowe wymieszanie

Zgęszczenie

Produkcja cząstek (hadronów):

rezonansów ( $\Delta, N^*$ )

$\pi, \eta, \rho, \omega$

cząstek dziwnych ( $K, \Lambda, \Sigma, \dots$ )

Wymrożenie chemiczne

Rozprężenie

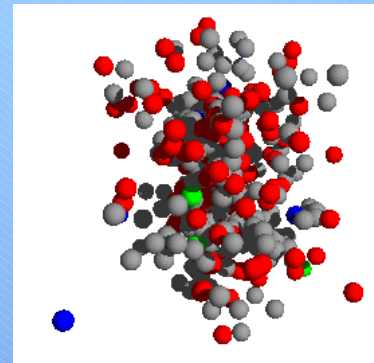
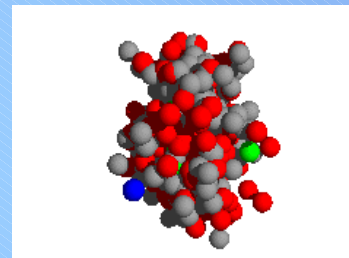
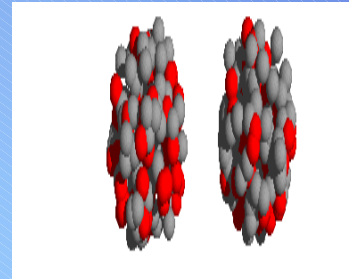
Wymrożenie termiczne

$\kappa = 200\text{--}300 \text{ MeV}$

Au+Au @ 2GeV /nukleon

$\beta = 0.9$

$\gamma = 2\text{--}3$



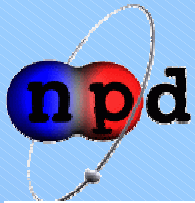
Czas



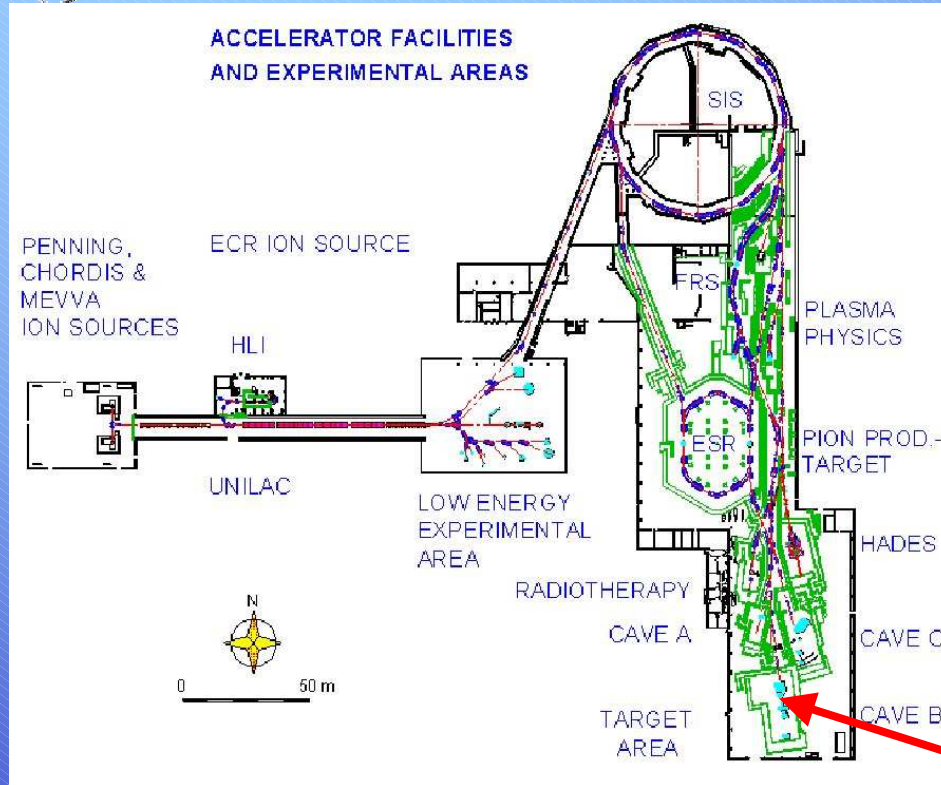
$\sim 10 \text{ fm}/c$

$\sim 10^{-22} \text{ s}$





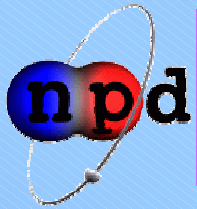
# FOPI @ GSI



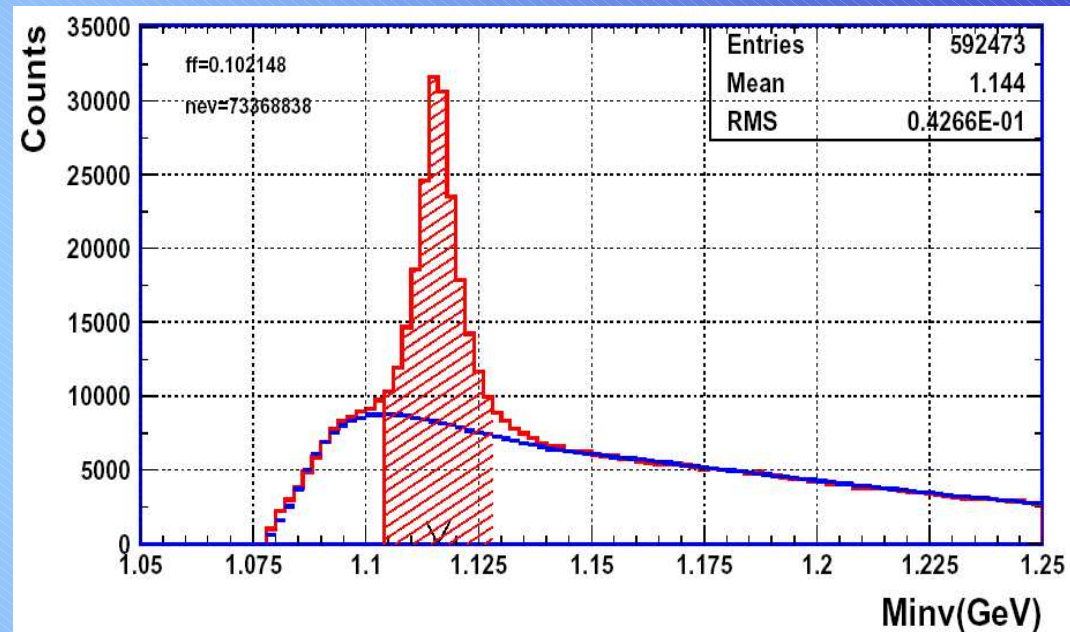
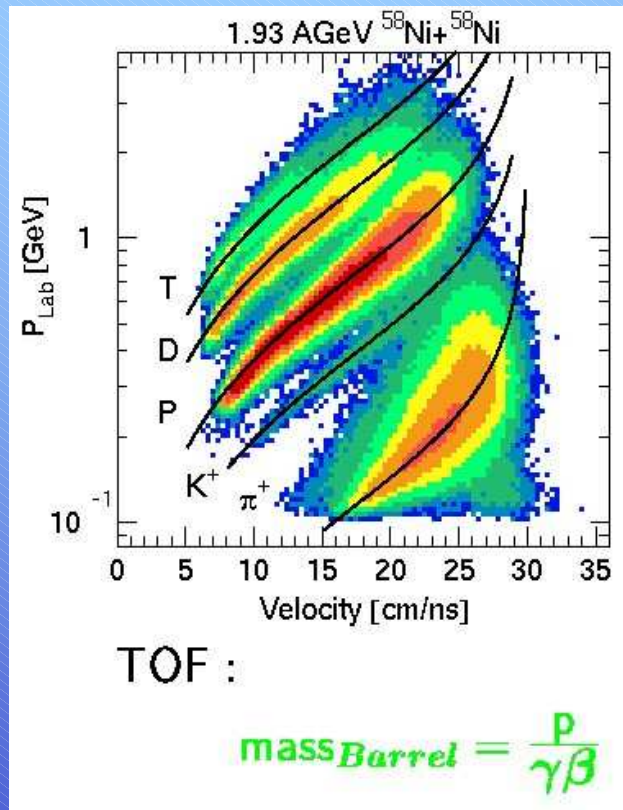
**Wiązki** C,...,Au, p,  $\pi$   
**Energie** 100 MeV - 3.5 GeV/A

IPNE Bucharest, Romania  
 ITEP Moscow, Russia  
 CRIP/KFKI Budapest, Hungary  
 Kurchatov Institute Moscow, Russia  
 LPC Clermont-Ferrand, France  
 Korea University, Seoul, Korea  
 GSI Darmstadt, Germany  
 IReS Strasbourg, France  
 FZ Rossendorf, Germany  
 Univ. of Heidelberg, Germany  
 Univ. of Warsaw, Poland  
 RBI Zagreb, Croatia

Rejestracja naładowanych produktów reakcji  
 Duża akceptancja geometryczna



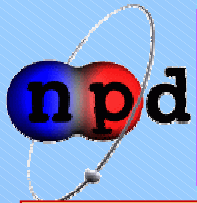
# Identyfikacja produktów reakcji



$$M_{\text{inv}} = \sqrt{(E_p + E_\pi)^2 - (\vec{p}_p + \vec{p}_\pi)^2}$$

$\pi$  kilkanaście na zderzenie  
K kilka na  $10^2$  zderzen

$\Lambda \rightarrow \pi^- p$  (64%) ,  $c\tau=7.9\text{cm}$   
 $K_s^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$  (69%) ,  $c\tau=2.6\text{cm}$



# Kaony

$$K^+(u\bar{s}) \quad \overline{K}^-(\bar{u}s)$$

$$K^0(d\bar{s}) \quad \overline{K}^0(\bar{d}s)$$

$$K_S^0 \text{ (sym.)} \quad K_L^0 \text{ (antysym.)}$$

Masa                      497 MeV

495 MeV

cτ                        3.7 m

2.7 cm

15.5 m

## Produkcja:

wprost:

$$pp \rightarrow pK^+\Lambda, \quad E_{\text{thr}} = 1.6 \text{ GeV}$$

$$pn \rightarrow pnK^+K^-, \quad E_{\text{thr}} = 2.5 \text{ GeV}$$

2stopniowa:

$$NN \rightarrow NN\pi,$$

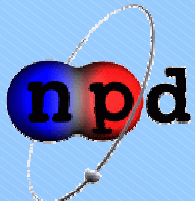
$$\pi N \rightarrow YK$$

$$NN \rightarrow N\Delta, \Delta \rightarrow \pi N,$$

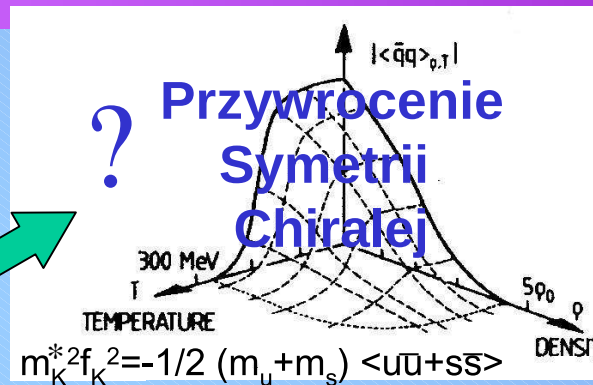
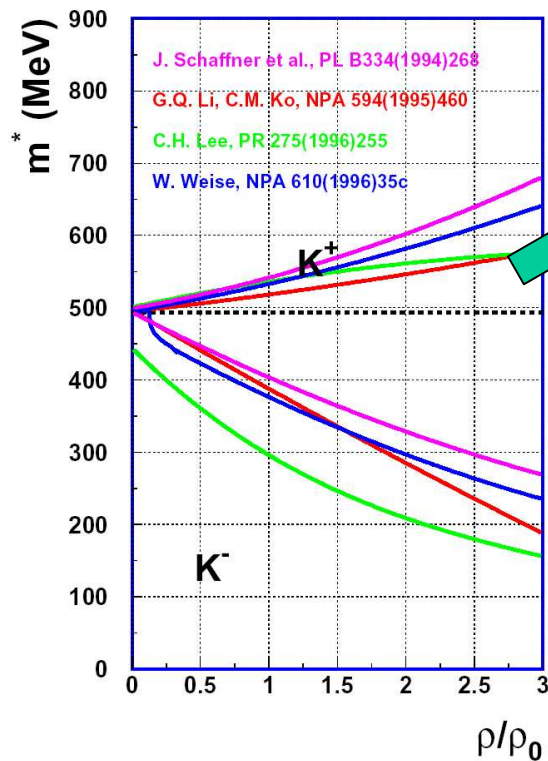
$$\pi N \rightarrow YK$$

$$\Delta N \rightarrow NYK$$





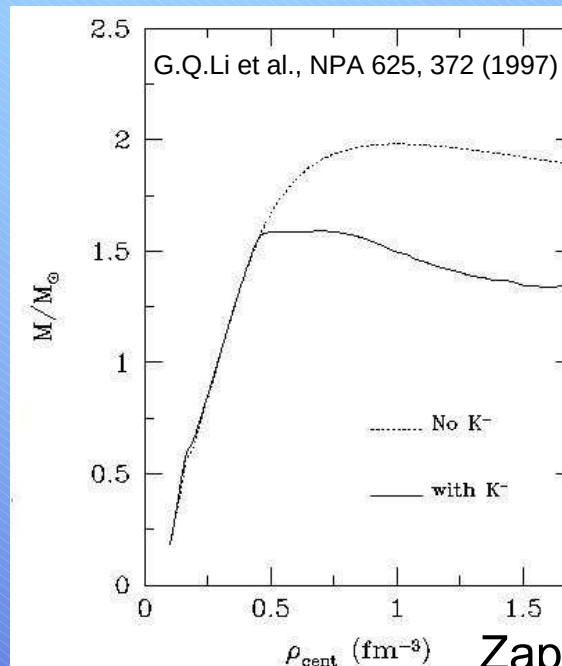
# Kaony w materii jądrowej



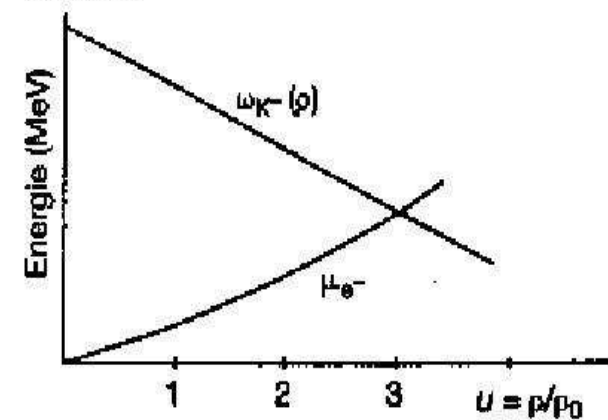
$$n \leftrightarrow p e^- \bar{\nu}$$

$$K^- \bar{\nu} \leftarrow e^-$$

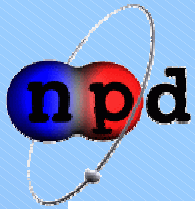
Kondensat kaonowy



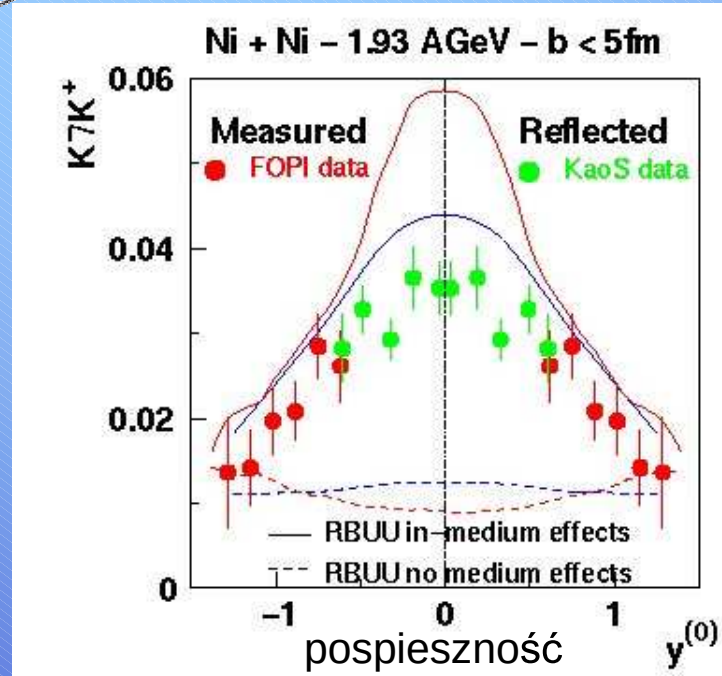
500 MeV G.E. Brown, Phys. Bl. 53, 671 (1997)



Zapadanie się gwiazd neutronowych

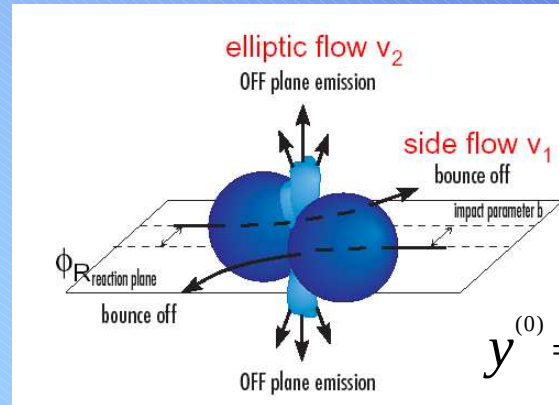


# Potwierdzenie eksperymentalne

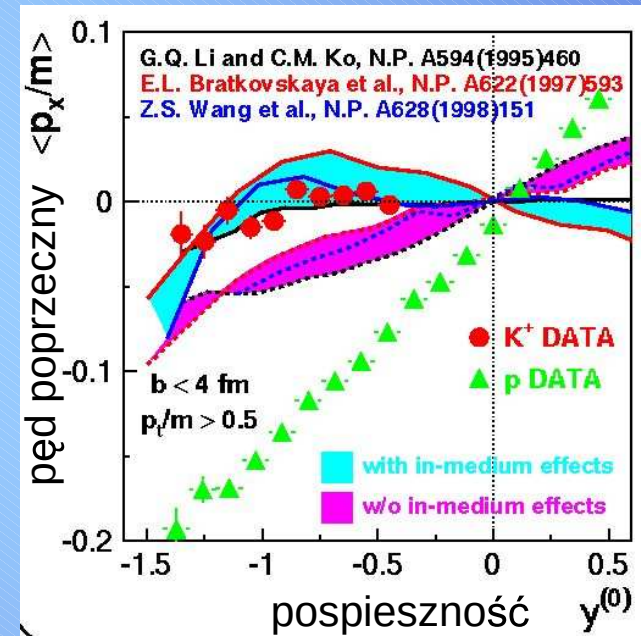


K-/K+ w przestrzeni fazowej  
Pływ boczny K+  
 $\sigma_{K^+,K^-}$  : AA względem pp  
„Squeeze-out” K+

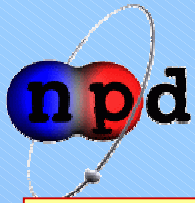
...



$$y^{(0)} = \frac{\frac{1}{2} \ln((E + p_z)/(E - p_z))}{y_{CM}} - 1$$





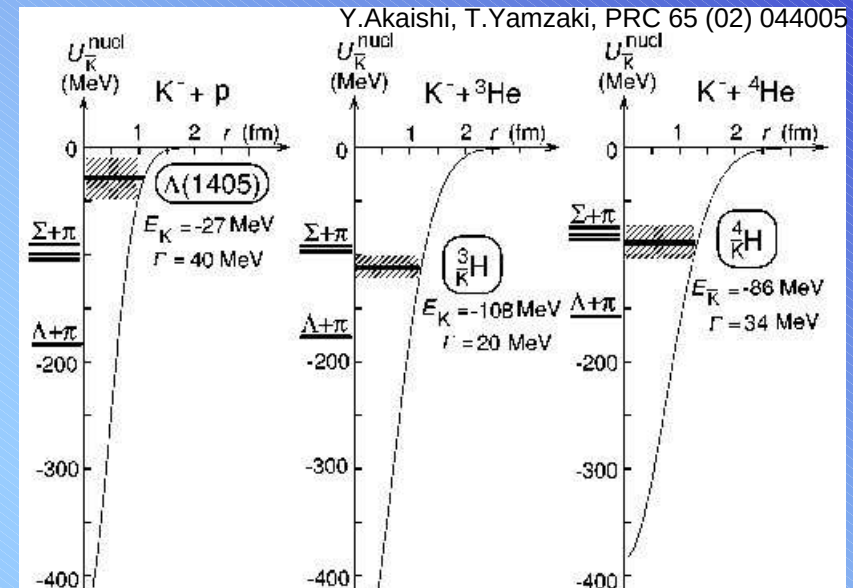
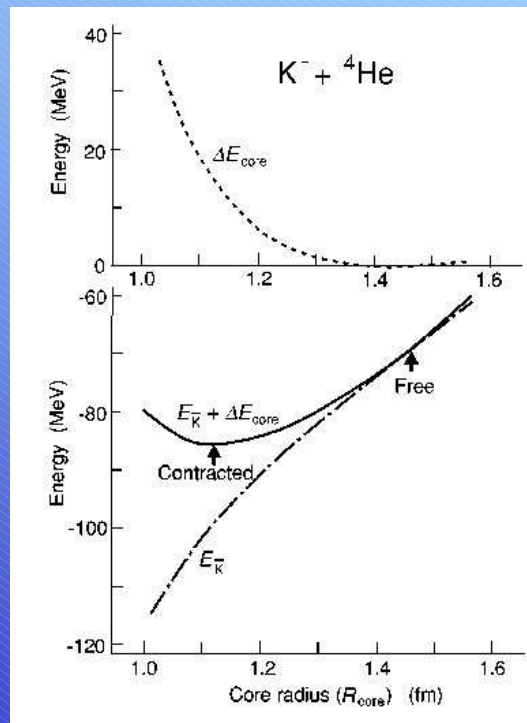


# Oddziaływanie K-jądro

**Potencjał K-N:**  $A \cdot e^{-\frac{r}{B}}$   
(rozpraszanie KN, wodór „kaonowy”)

**Sumowanie po nukleonach**

**Minimalizacja  $E_K + E_{\text{core}}$**

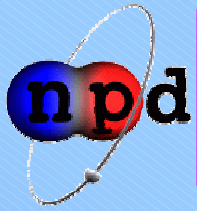


**Stany silnie związane : 100 MeV**

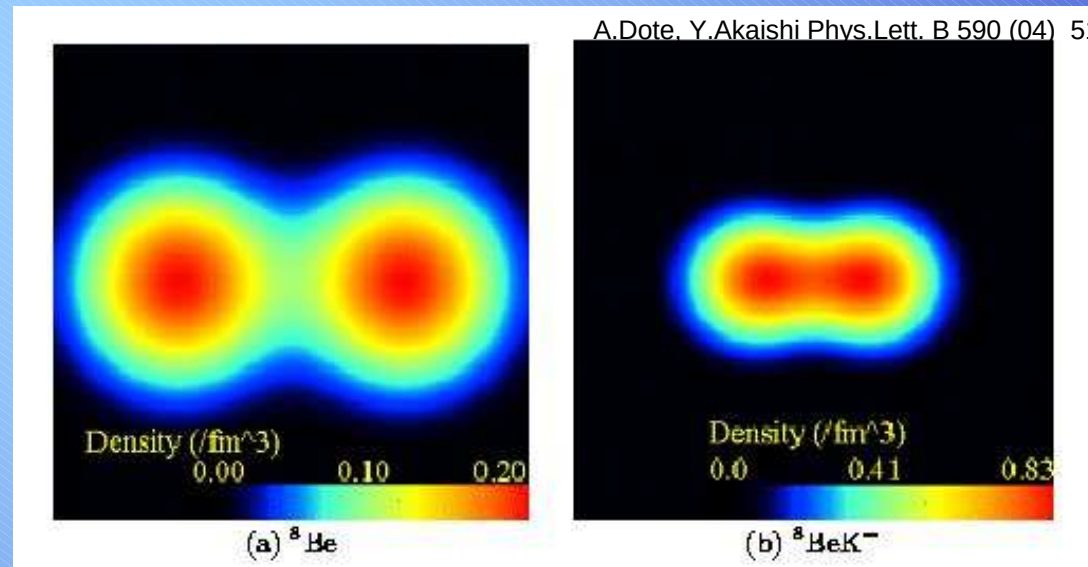
**Wąskie : 20 MeV**

**Podobne do stanów „jądrowych pionowych”**

**„Naturalne” ściśnięcie**



# Nadprzewodnictwo kolorowe

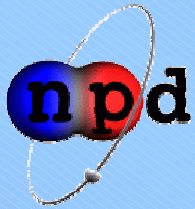


Materia w stanie podstawowym i gęstości co najmniej  $5\rho_0$   
Kwarki są kwazi swobodne

Dominują oddziaływania przyciągające z wymianą  
pojedynczego gluonu

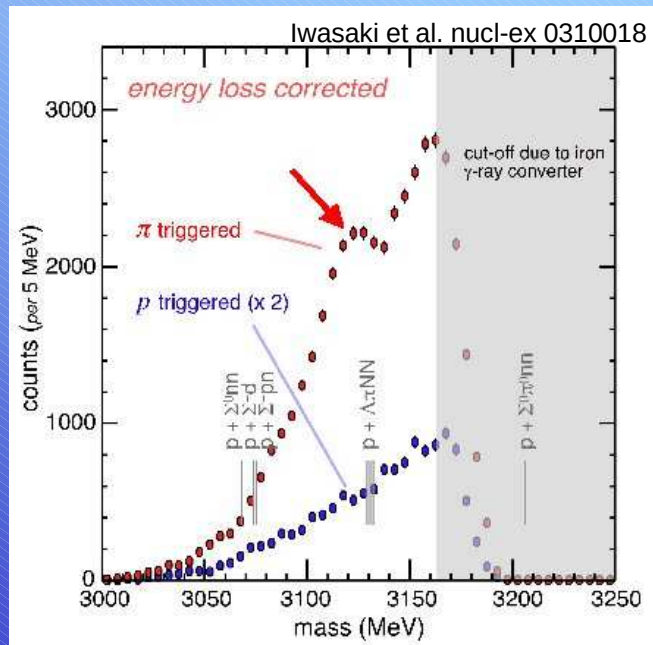
Warunki do powstania nadprzewodnictwa (kolorowego)

Ważne konsekwencje dla ewolucji gwiazd

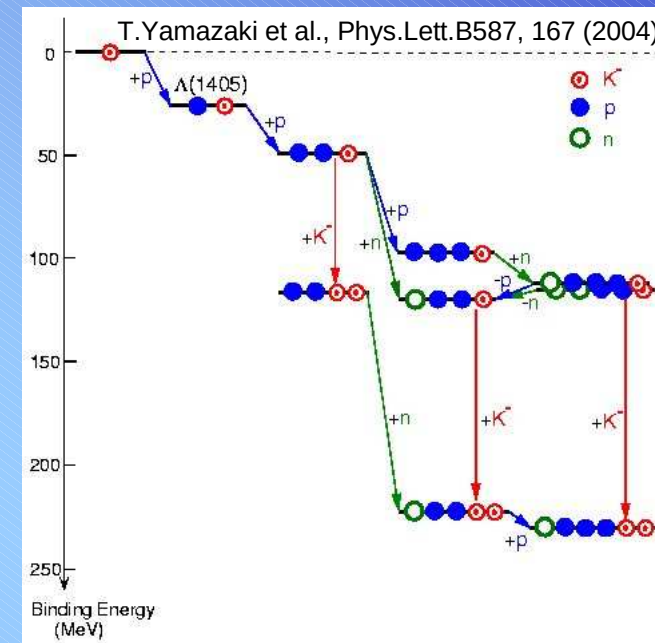


# Potwierdzenie eksperymentalne

- Różne kanały produkcji:  
( $K^-$  zatrzymany, n)  
( $K^-$ , n wybity)  
( $K^-$ ,  $\pi^-$ ) poprzez pośredni stan  $\Lambda$

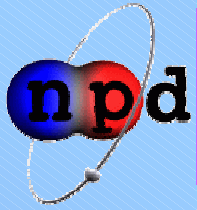


$^4\text{He}$  ( $K^-$  stopped, n) ppn $K^-$



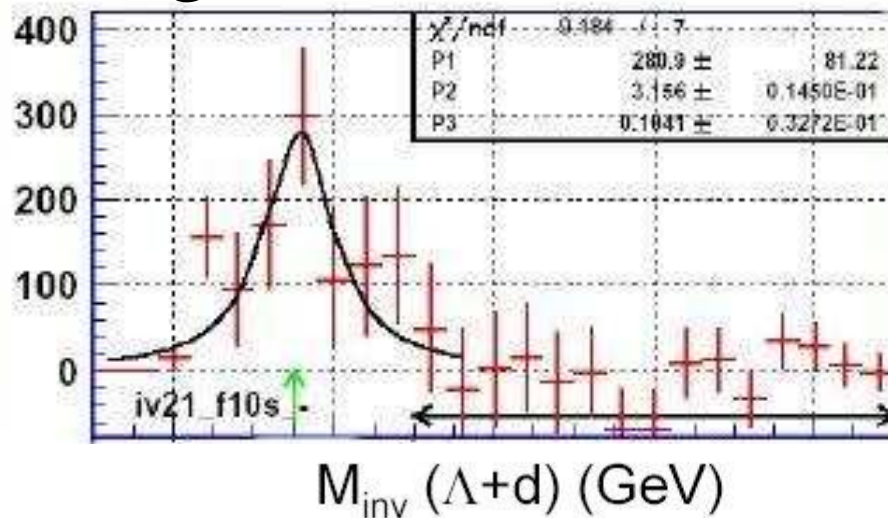
- Pozostałość po reakcji jądrowej
- Identyfikacja poprzez masę niezmienniczą :  
 $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ ,  $K^-ppn \rightarrow \Lambda d$ ,  
 $K^-ppp \rightarrow \Lambda pp$ ,  $K^-ppnn \rightarrow \Lambda t$ ,  
...





# Klastry kaonowe w FOPI

Ni+Ni @ 1.93 AGeV



**K<sup>-</sup>ppn**

**Masa ~3137 MeV**

**E<sub>K</sub> ~170 MeV**

**Γ <20 MeV**

**τ ~10 fm/c**

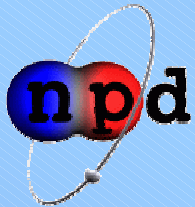
**K<sup>-</sup>ppn → Λd**

•Proponowane eksperymenty:

**Al+Al @ 2 AGeV**

**p+d @ 4.6 GeV → K<sup>-</sup>pp + K<sup>0</sup> + p (brakująca masa)**

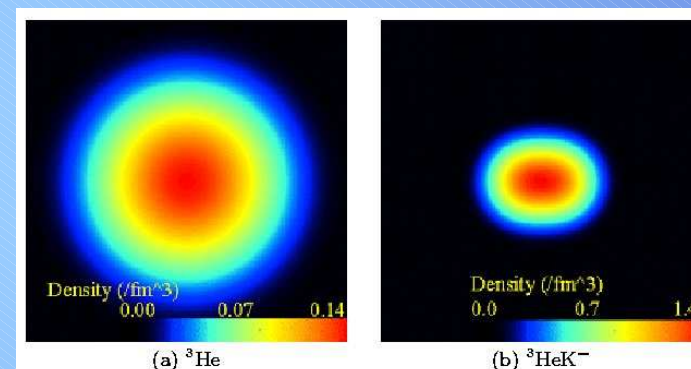
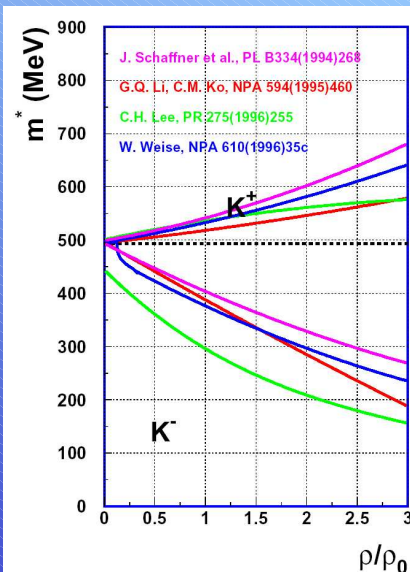
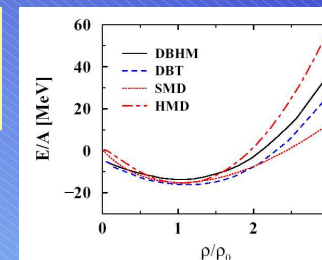
**p+Al @ 4.6 GeV**



# Podsumowanie

Zderzenia ciężkich jonów pozwalają na  
wytworzenie i badanie gorącej i gęstej materii jądrowej

Cząstki dziwne zmieniają własności  
w gęstej materii



Obecność dziwności modyfikuje  
właściwości materii

Czy istnieją superciężkie klastry kaonowe ?  
Jakie jeszcze przejścia fazowe pozostają nieodkryte ?