

Produkcja cząstek w zderzeniach proton-jądro i jądro-jądro przy energii wiązki $\sim 200A$ MeV



Tomasz Matulewicz
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytet Warszawski
współpraca TAPS

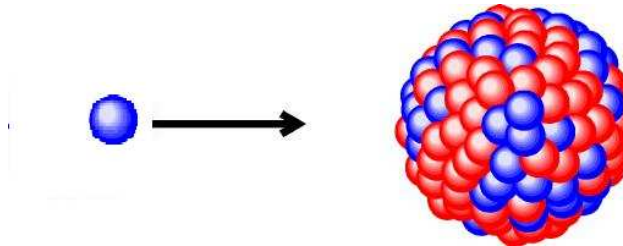


(GANIL-Gießen-Groningen-GSI-Rež-Valencia)

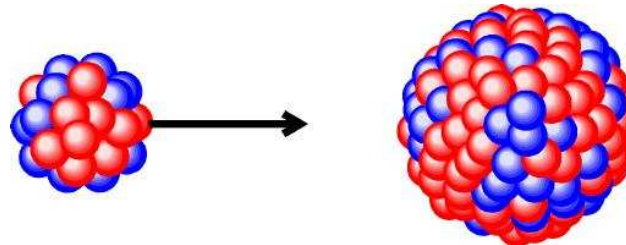
Seminarium ZFJA 10 października 2003

Produkcja cząstek przy $\sim 200A$ MeV

- Wprowadzenie



- 190 MeV $p+A$: *przypadek prosty*

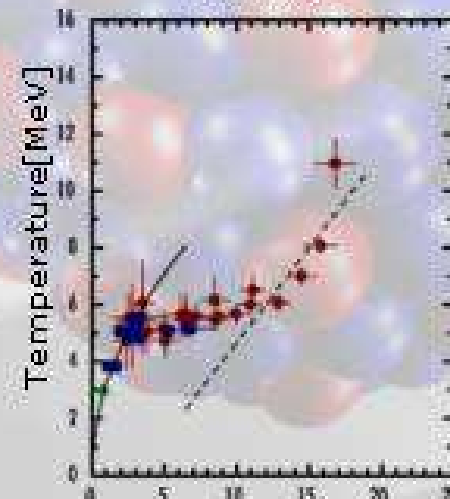
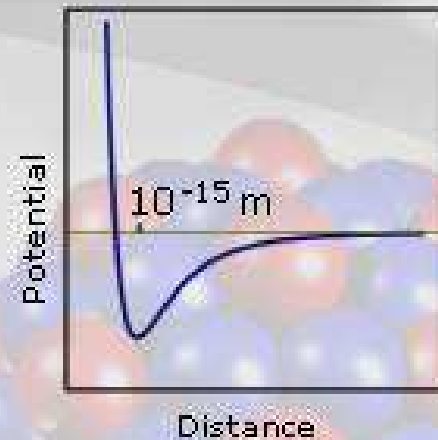
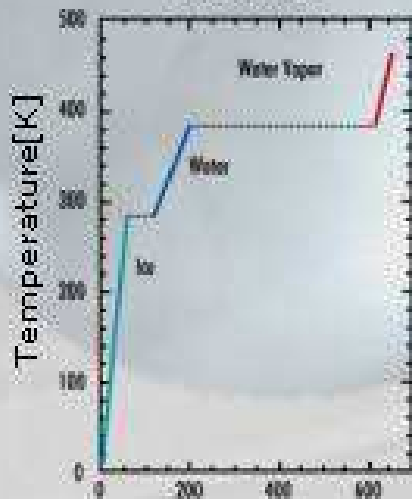
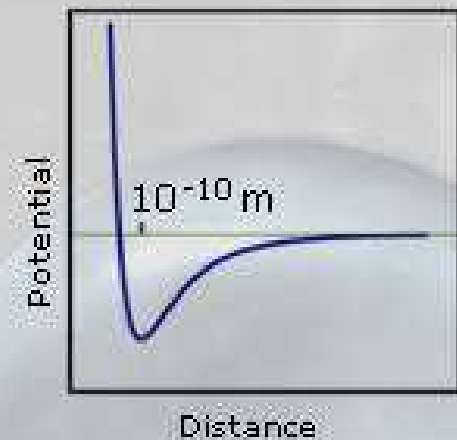


- 180A MeV $Ar+Ca$: *przypadek złożony*
- Wnioski



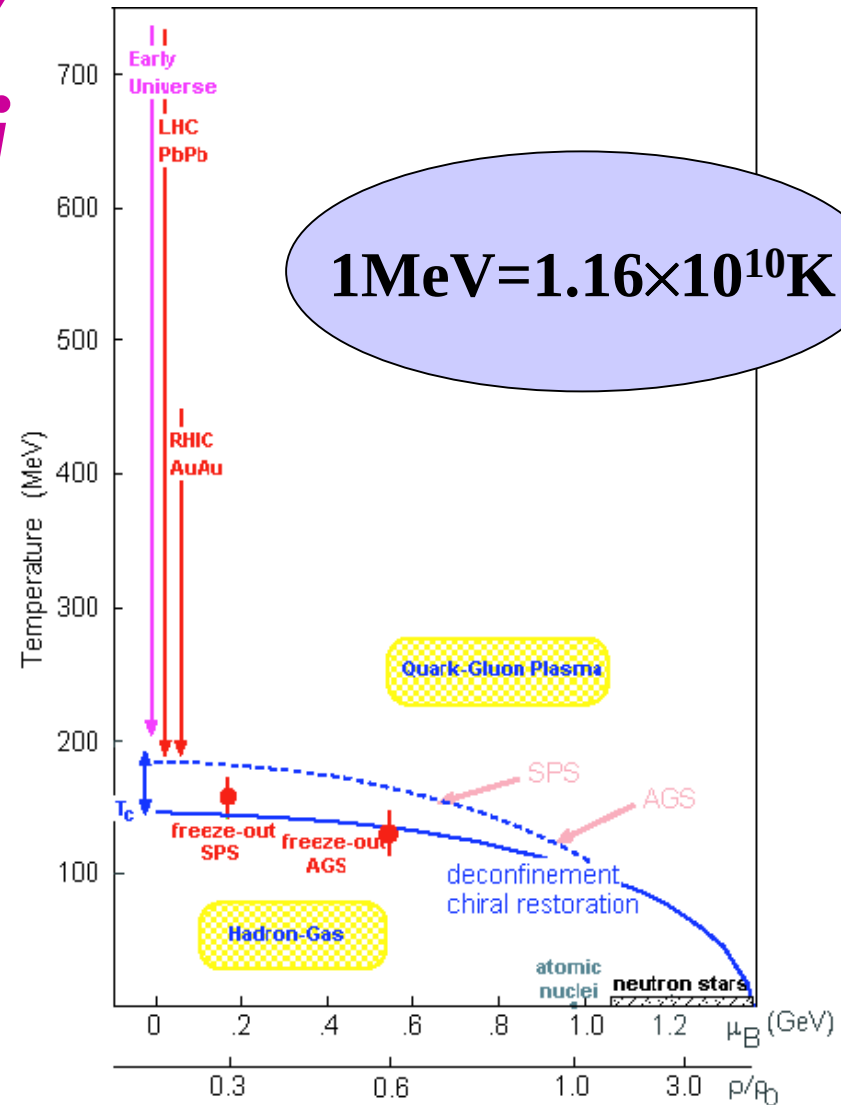
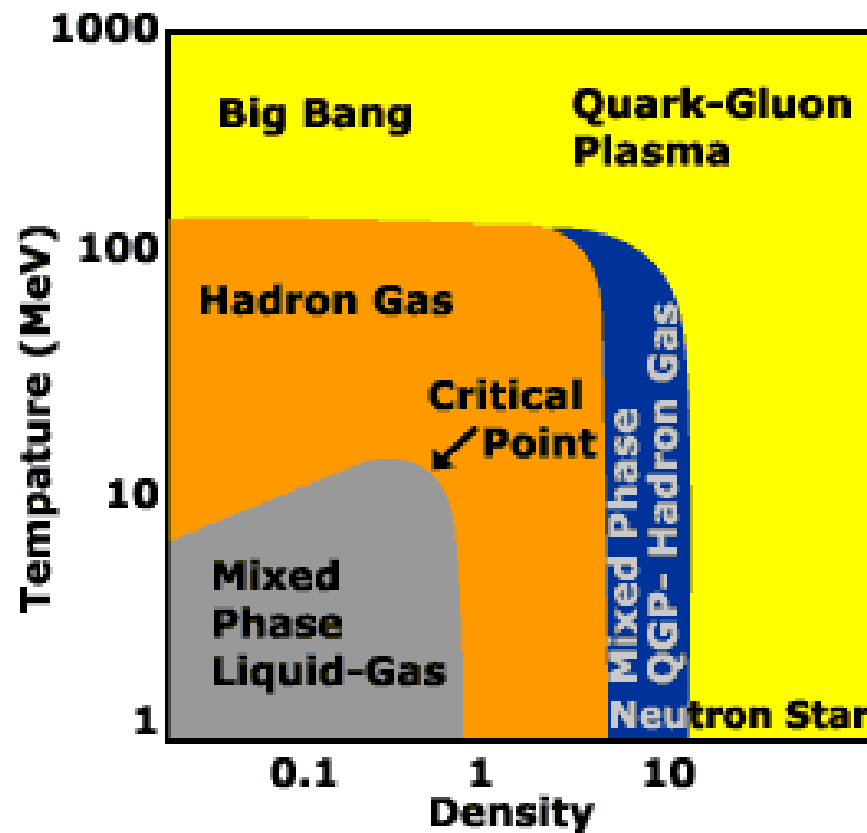
- Diagram fazowy materii jądrowej
- Podprogowa produkcja cząstek
- Fotony jako sonda do badania ewolucji stanu materii
- Narzędzie: spektrometr TAPS

The Phases of Nuclear Matter

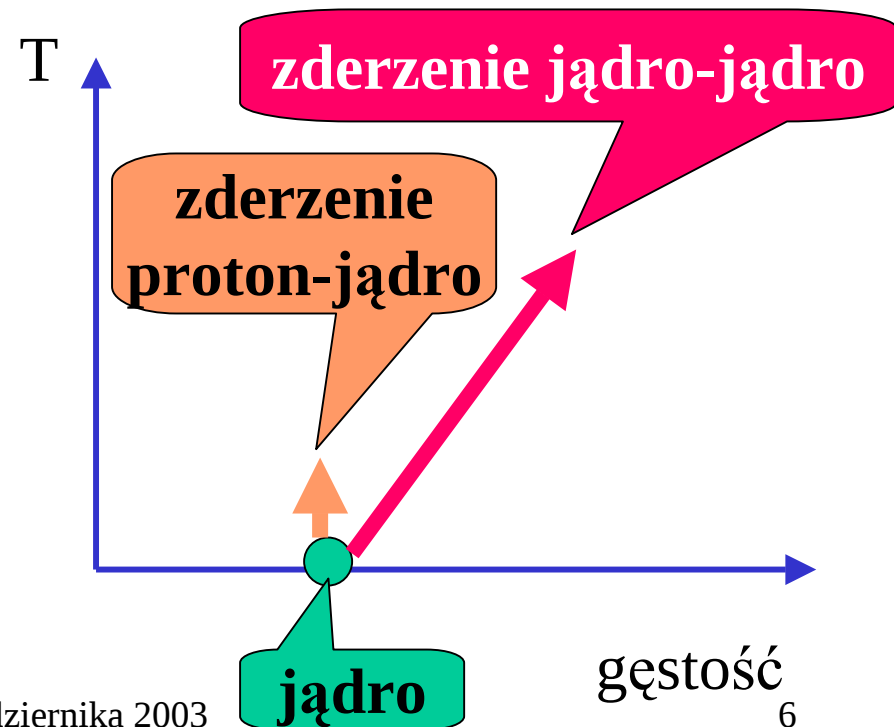
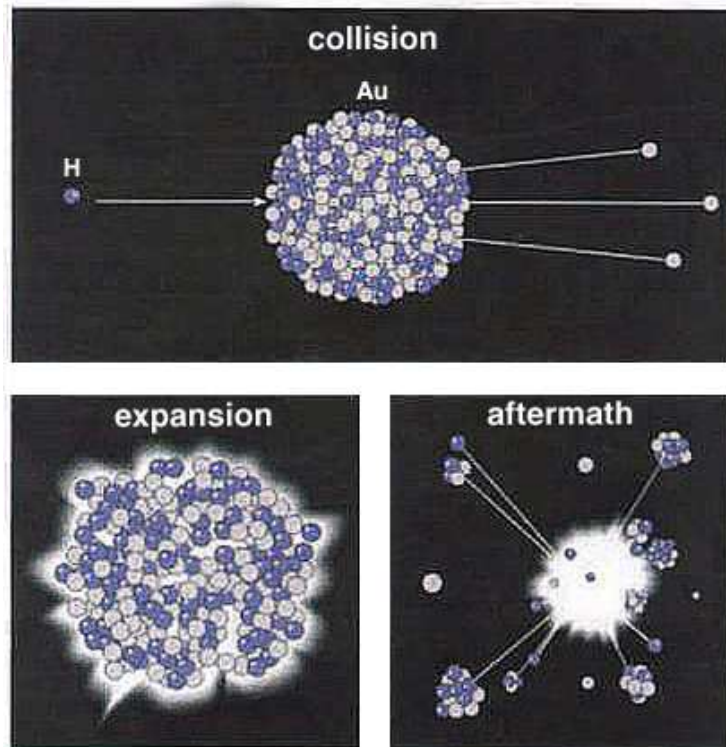
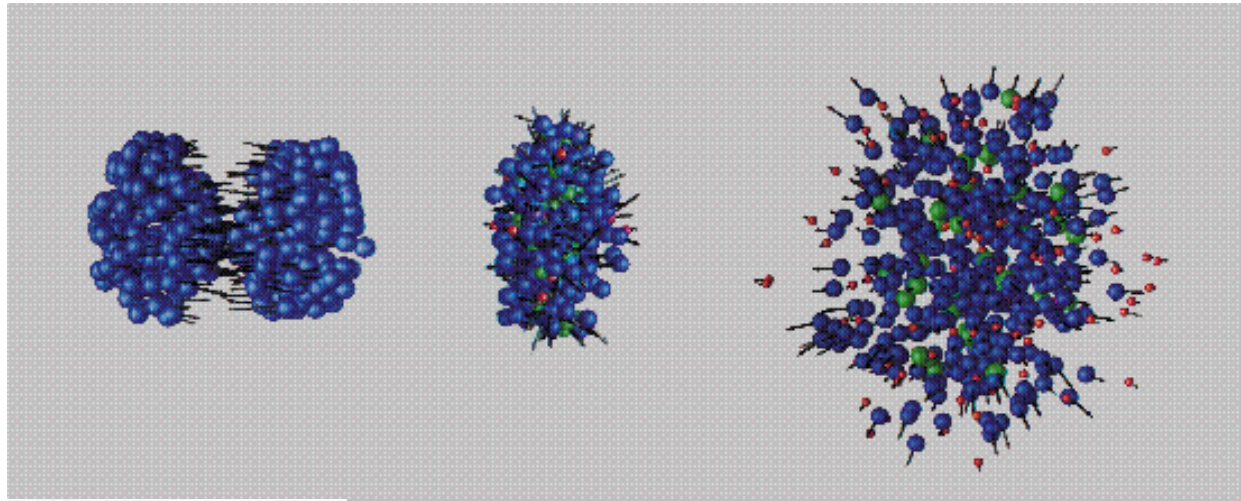


30 10
25

Diagram fazowy materii jądrowej



Proton-jądro VS jądro-jądro

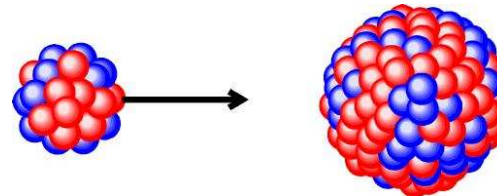


Podprogowa produkcja cząstek



- Oddziaływanie nukleon-nukleon
 $N+N \rightarrow N+N+X$
- Energia progowa

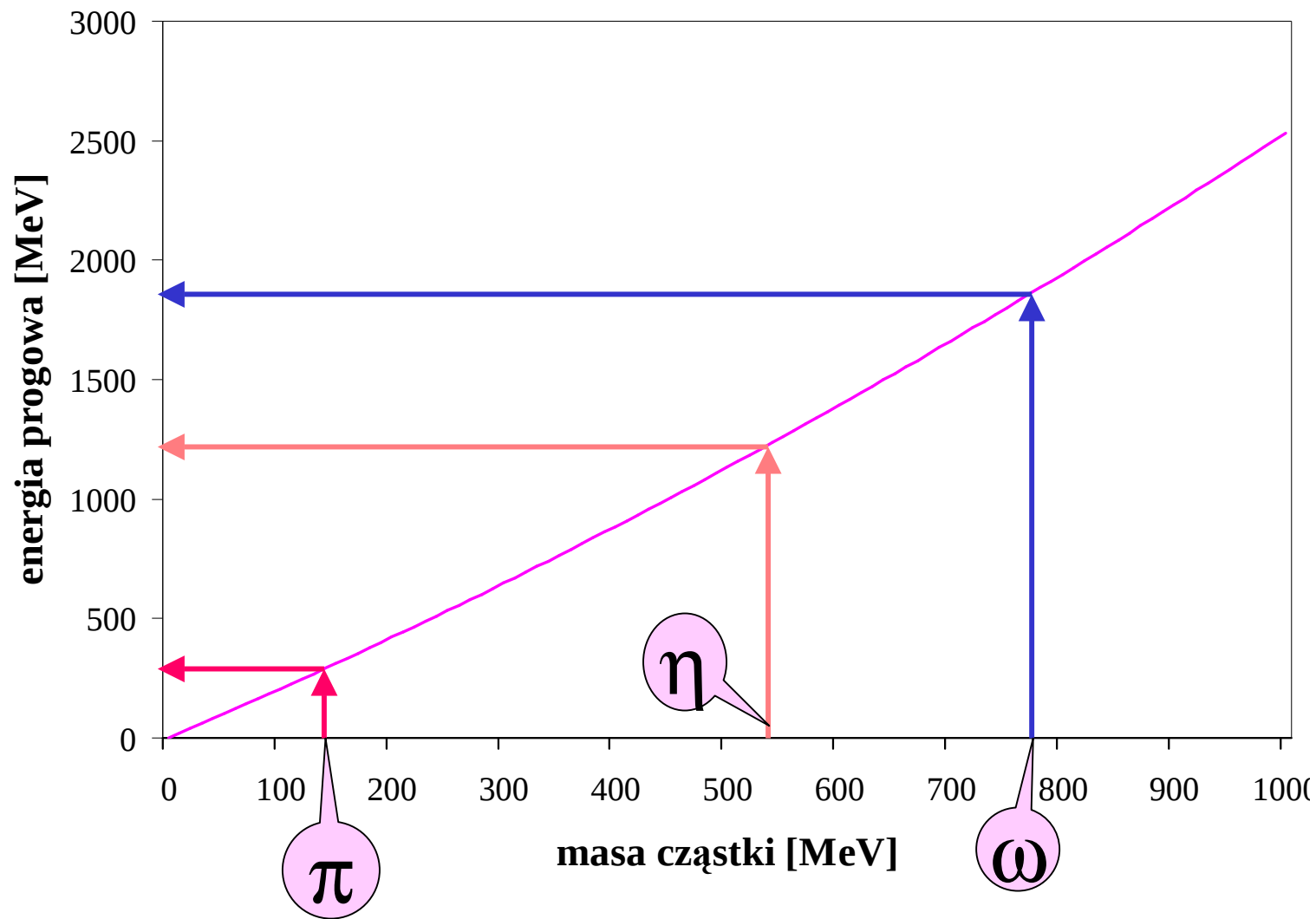
$$T_{pr} = 2m_X + \frac{m_X^2}{2m_N}$$



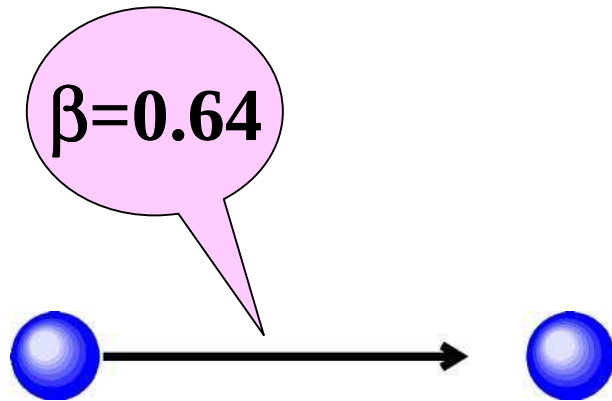
- Zderzenie jąder atomowych
 $A+A \rightarrow A+A+X$
- Energia jądra pocisku T_A

$$\frac{T_A}{A} < T_{pr}$$

Wykres energii progowej

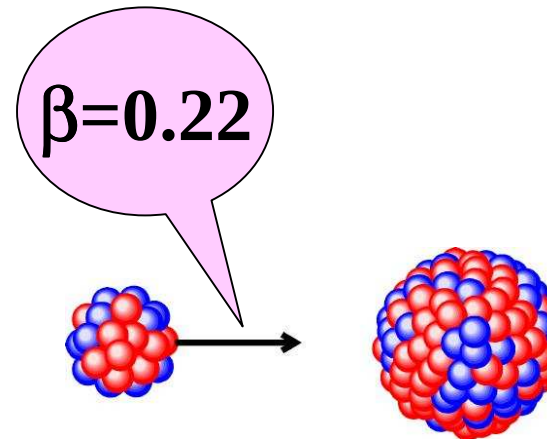


Przykład: produkcja π^0



$$m_{\pi}=135 \text{ MeV}$$

$$T_{\text{pr}}=280 \text{ MeV}$$



Obserwowano produkcję π^0
w zderzeniach ciężkich
jonów o energii $T_A=25A \text{ MeV}$

THE PHYSICAL REVIEW

A journal of experimental and theoretical physics established by E. L. Nichols in 1893

SECOND SERIES, VOL. 72, No. 1

JULY 1, 1947

On the Production of Mesotrons by Nuclear Bombardment

W. G. McMILLAN† AND E. TELLER
University of Chicago, Chicago, Illinois

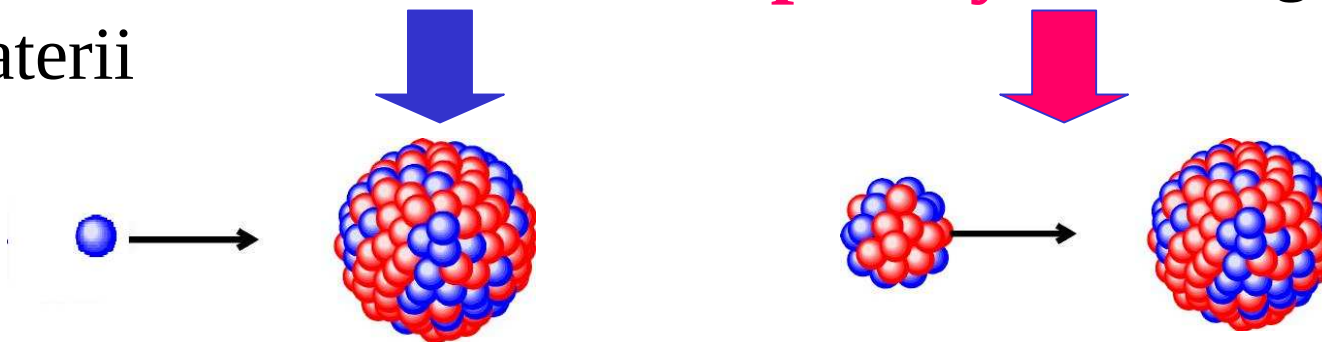
(Received March 27, 1947)

Mesotron production by nuclear bombardment with fast, heavy particles has been investigated theoretically in a semi-quantitative way to determine the expected threshold energies, the cross sections, and their energy dependence. Whereas a treatment in which the target nucleons are assumed to be at rest predicts a requisite incident energy of ~ 210 Mev, the present treatment, based on the Fermi degenerate gas model, finds the threshold incident energy as ~ 95 Mev. The threshold is somewhat higher for positive than for negative mesotrons. The cross

section for single mesotron production, evaluated from the accessible volume in momentum space, is found to vary with the fractional excess energy, ϵ , as $\epsilon^{3.6}$ in the scalar or axial-vector theories; at low values of ϵ , a small difference in the energy dependence for negative and positive mesotrons arises from the necessity of giving the former a non-zero initial kinetic energy. For the pseudo-scalar and the polar-vector theories, the matrix element for mesotron emission is proportional to the momentum of the mesotron. This changes the power law to $\epsilon^{4.5}$.

Własności produkcji podprogowej

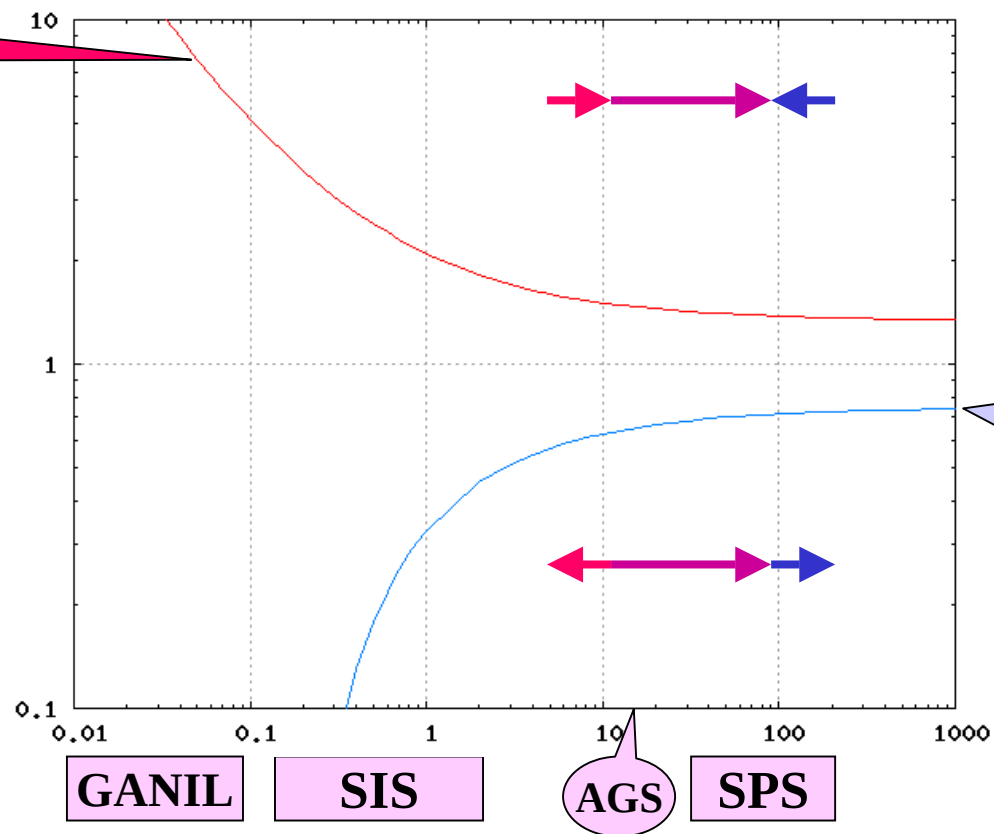
- Energia wiązki na nukleon poniżej progu na produkcję mezonów w zderzeniu elementarnym NN (280 MeV dla π^0): *badanie wstępnej fazy reakcji*
- **p+A** vs **A+A**: „**zimna**” vs **gorąca** materia jądrowa
- **p+A** vs **A+A**: **normalna** vs **podwyższona** gęstość materii



Znaczenie ruchu Fermiego ($270 \text{ MeV}/c \rightarrow E \sim 35 \text{ MeV}$)

konstruktywne

$$\frac{\sqrt{s_{NN}^{AA}} - 2m_N}{\sqrt{s_{NN}} - 2m_N}$$



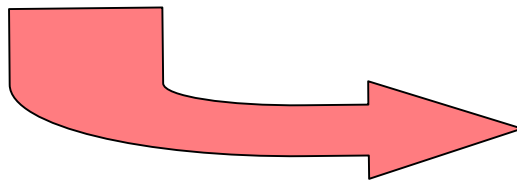
energia kinetyczna wiązki AGeV

de
struk
tyw
ne



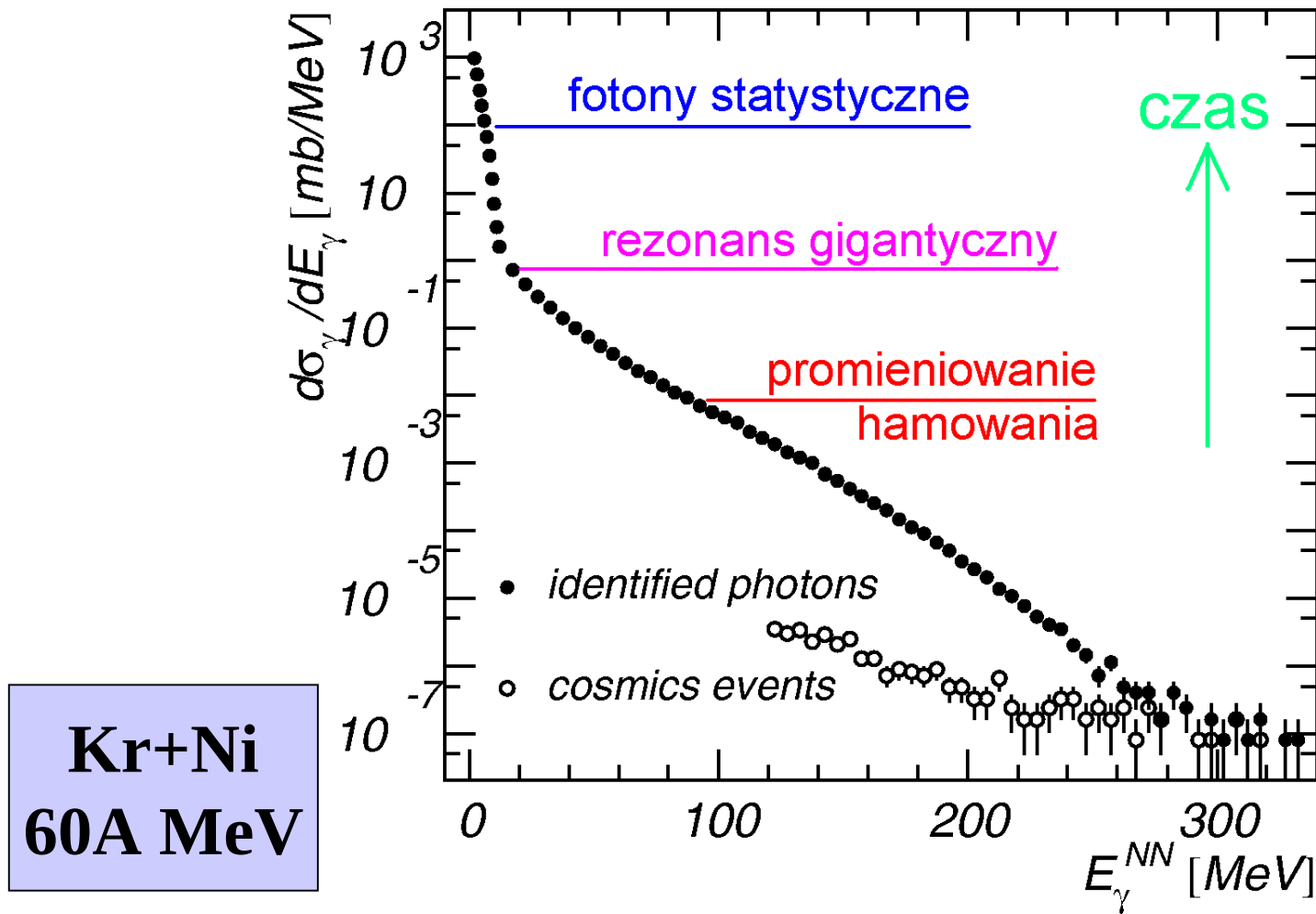
Foton - najlepsza sonda

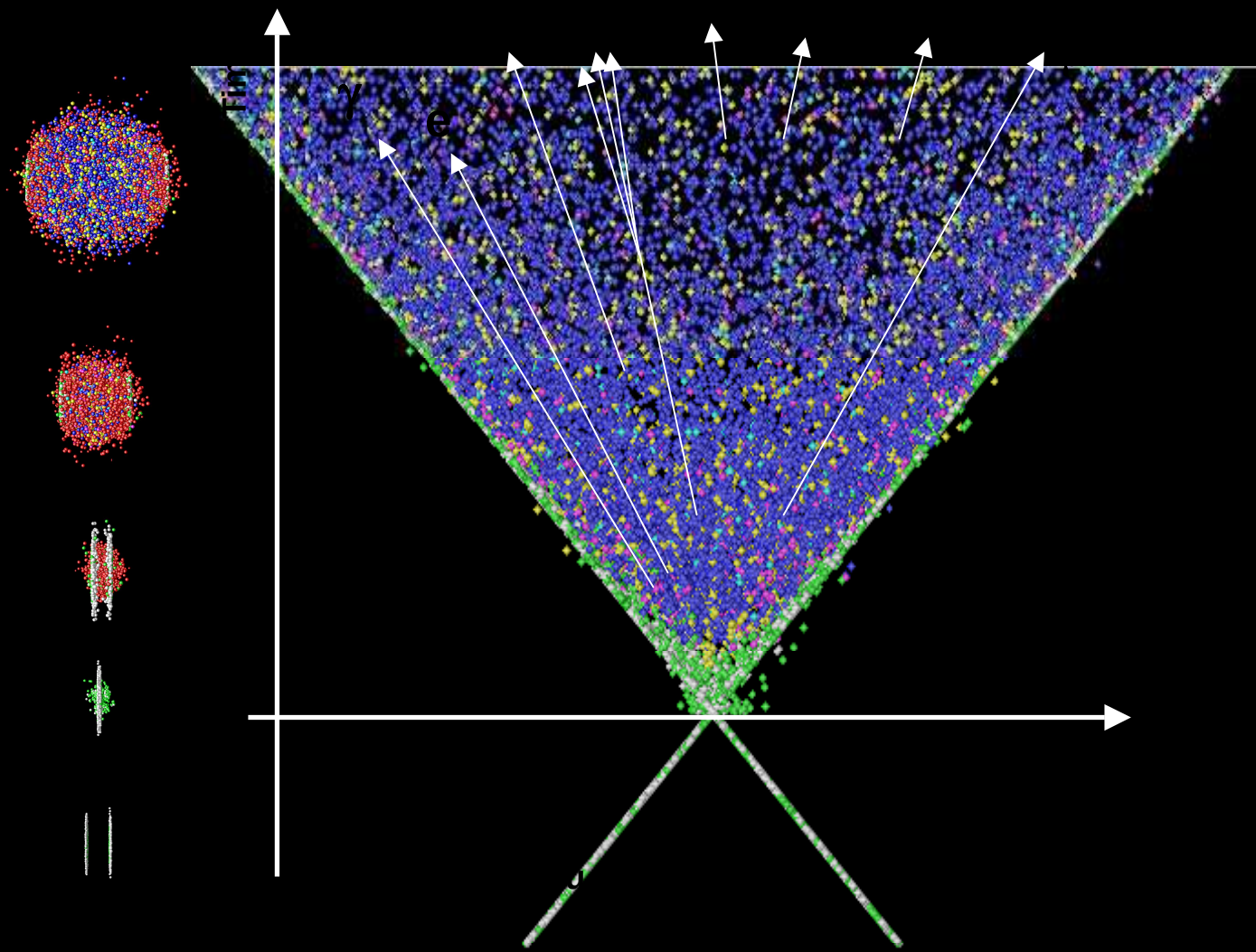
- **Opuszcza obszar oddziaływania bez zaburzeń wynikających z silnych oddziaływań w stanie końcowym**
- **Niski przekrój czynny**
- **Tło pochodzące z rozpadów e-m barionów ($\Delta \rightarrow N\gamma$) i mezonów neutralnych (98.9% $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, 39.2% $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, ...)**



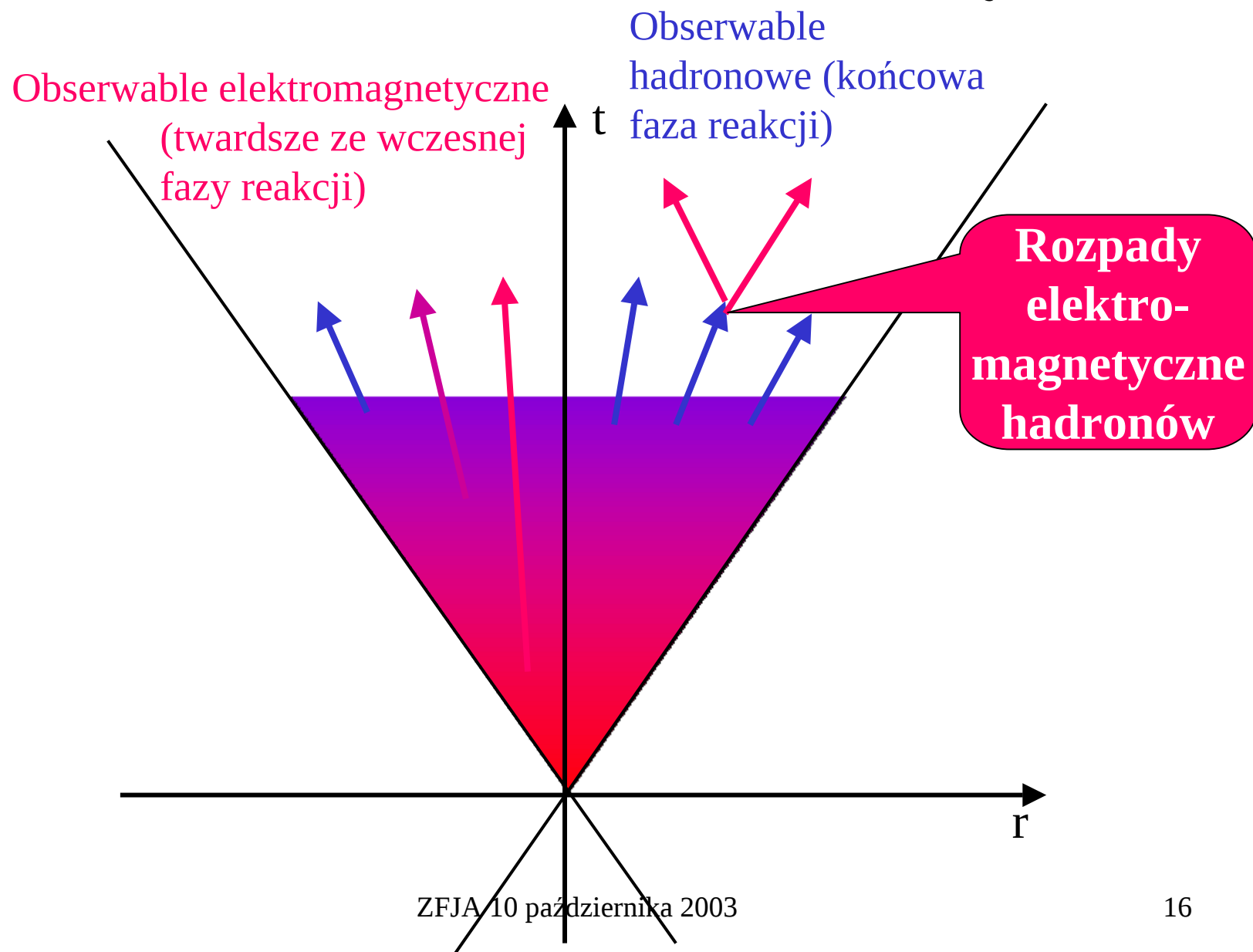
Dane dotyczące produkcji mezonów i wzbudzeń barionowych są niezbędne!

Widmo energetyczne fotonów





Elektromagnetyczne i silne sondy

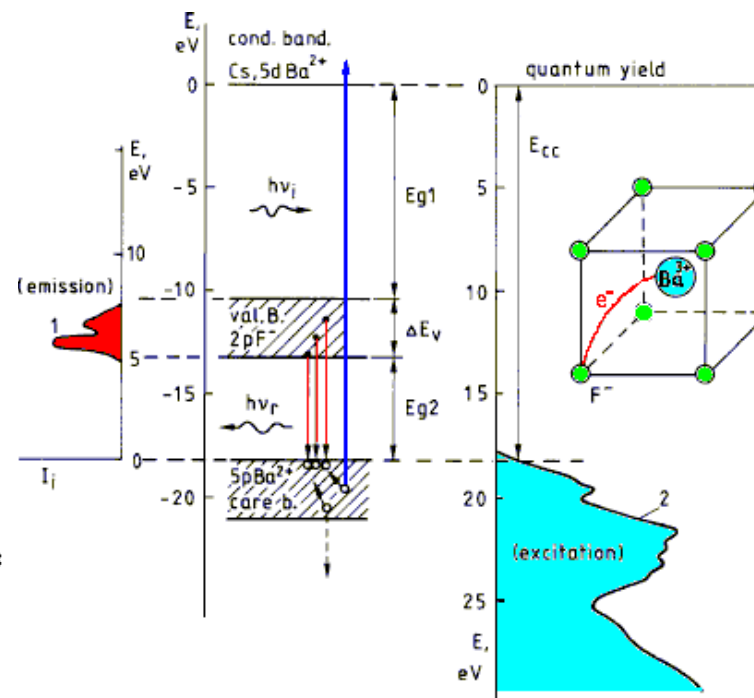
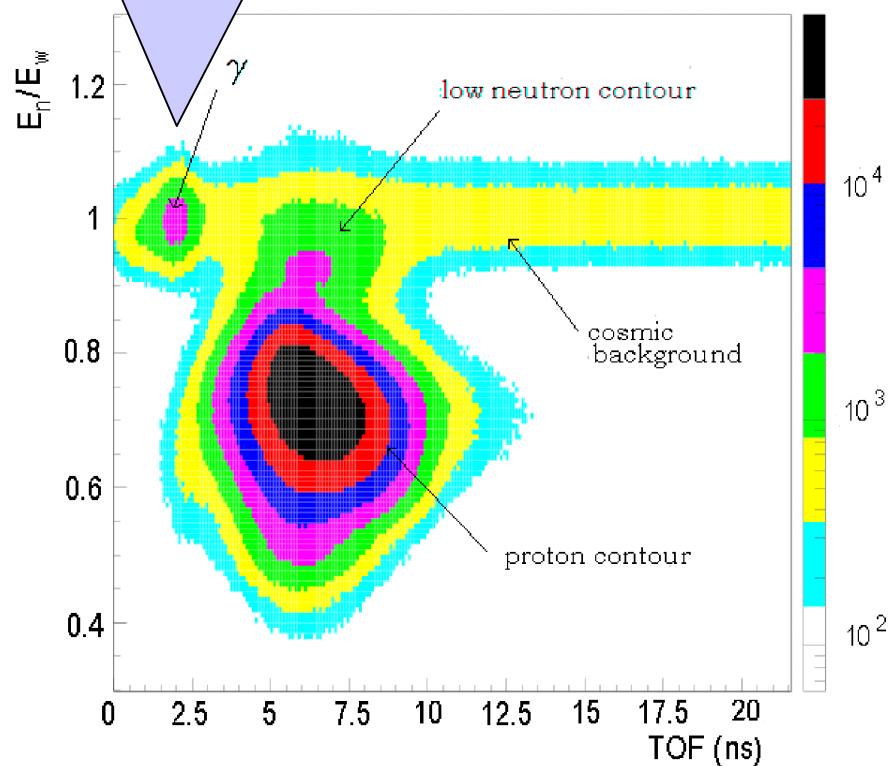


Detekcja wysokoenergetycznych fotonów

- Jak wykryć fotony ($\sim 10^{-4}$ /reakcję) wśród wielu (~ 100 /reakcję) hadronów?
- Scyntylator BaF₂: doskonała czasowa zdolność rozdzielcza (separacja γ/h) oraz analiza kształtu sygnału scyntylacyjnego (dyskryminacja e/h)
- Mobilny spektrometr **TAPS** (Two Arm Photon Spectrometer)
- Pozycyjna zdolność rozdzielcza pozwala na identyfikację mezonów: $m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos \vartheta_{\gamma_1\gamma_2})}$

Własności scyntylacji BaF_2

Czasowa zdolność
rozdzielcza na poziomie
300-600 ps (FWHM)

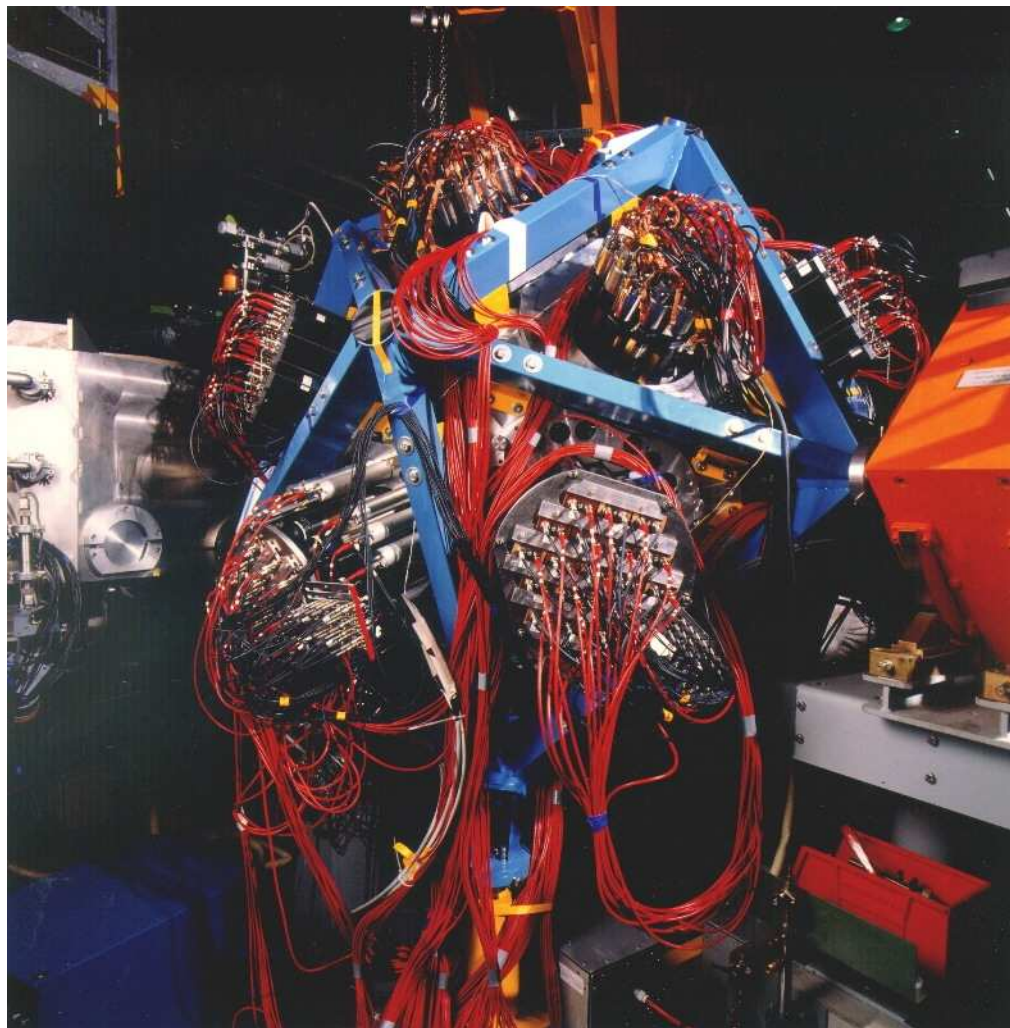


Jeden moduł spektrometru TAPS

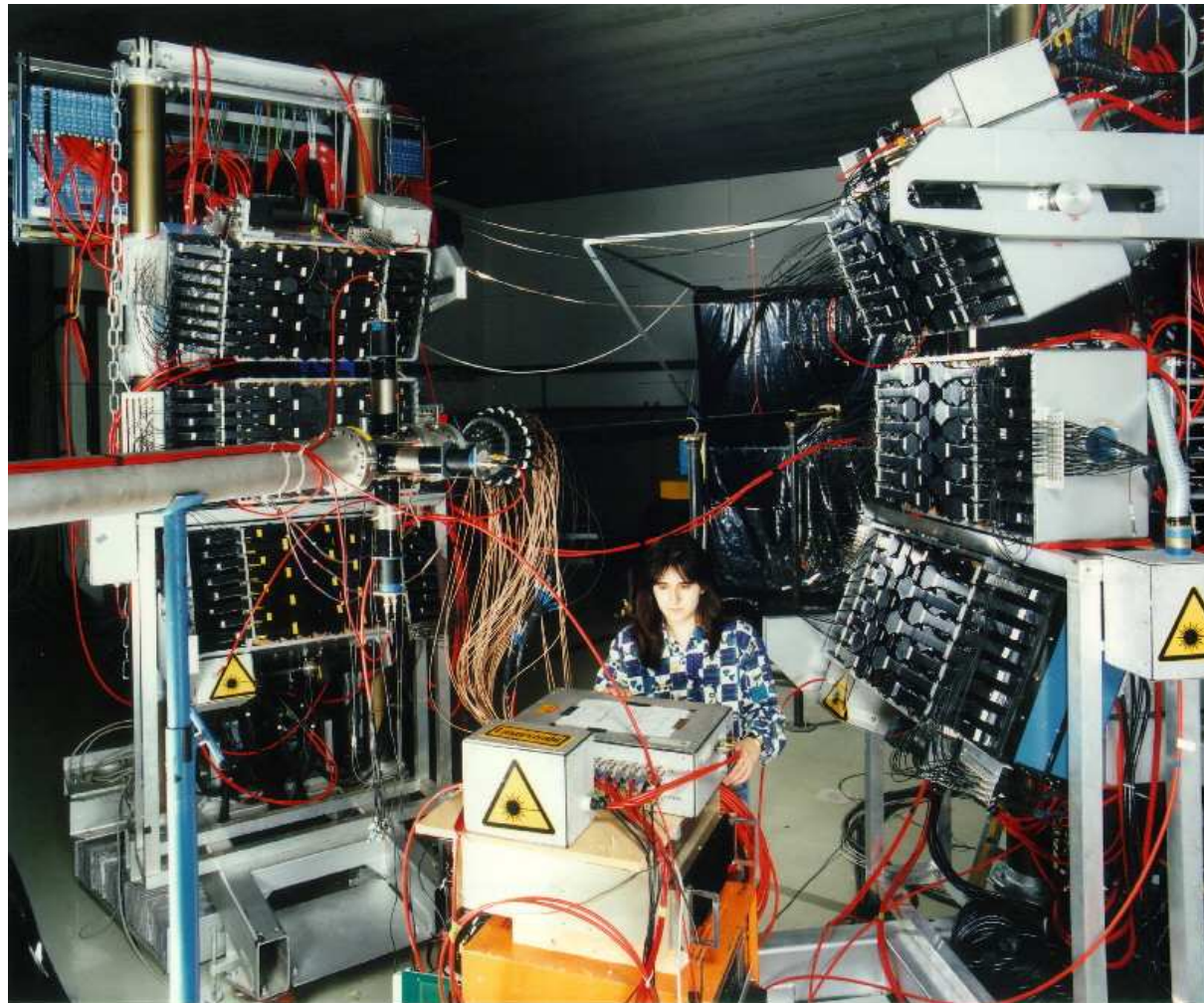


- Kryształ BaF_2
- długość 25 cm (12 długości radiacyjnych)
- średnica 6 cm
- fotopowielacz z oknem kwarcowym
- cena ~5000 euro

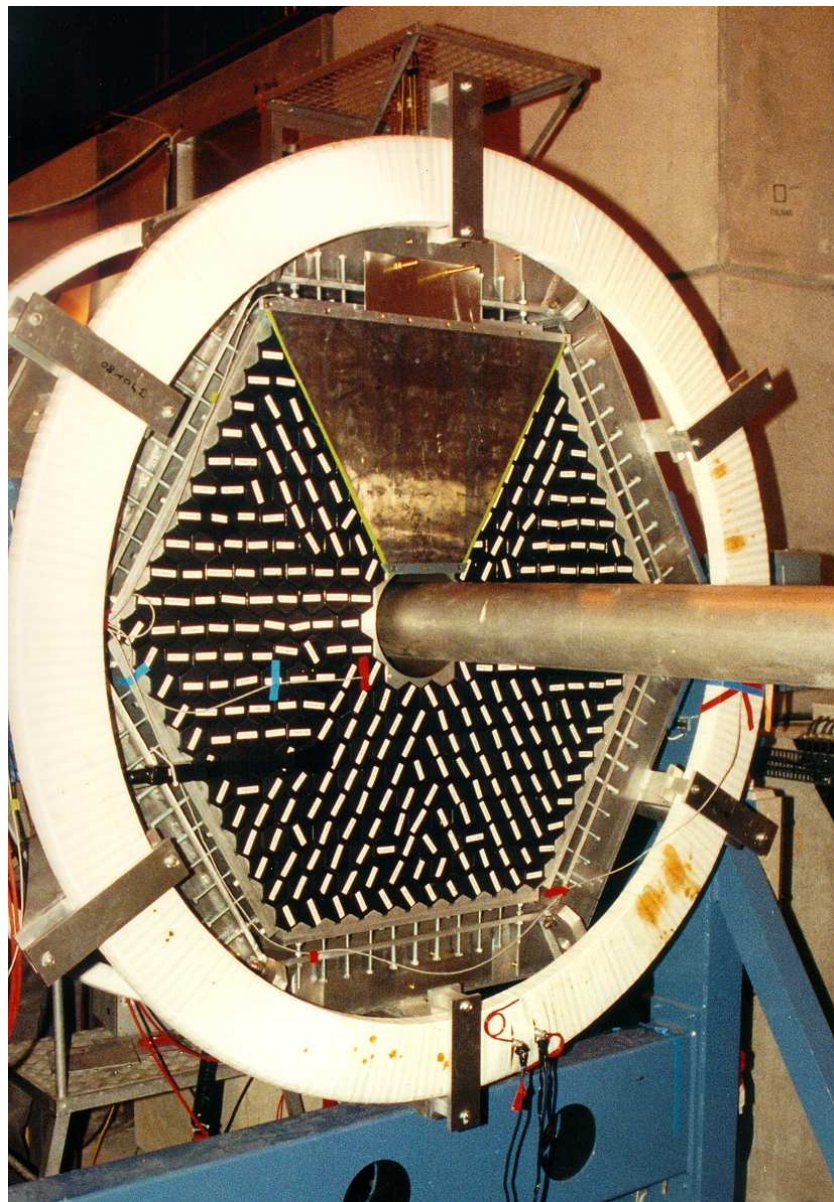
Moduły można ustawiać blisko tarczy...



... nieco dalej ...



ZFJA 10 października 2003



... oraz
bardzo
daleko

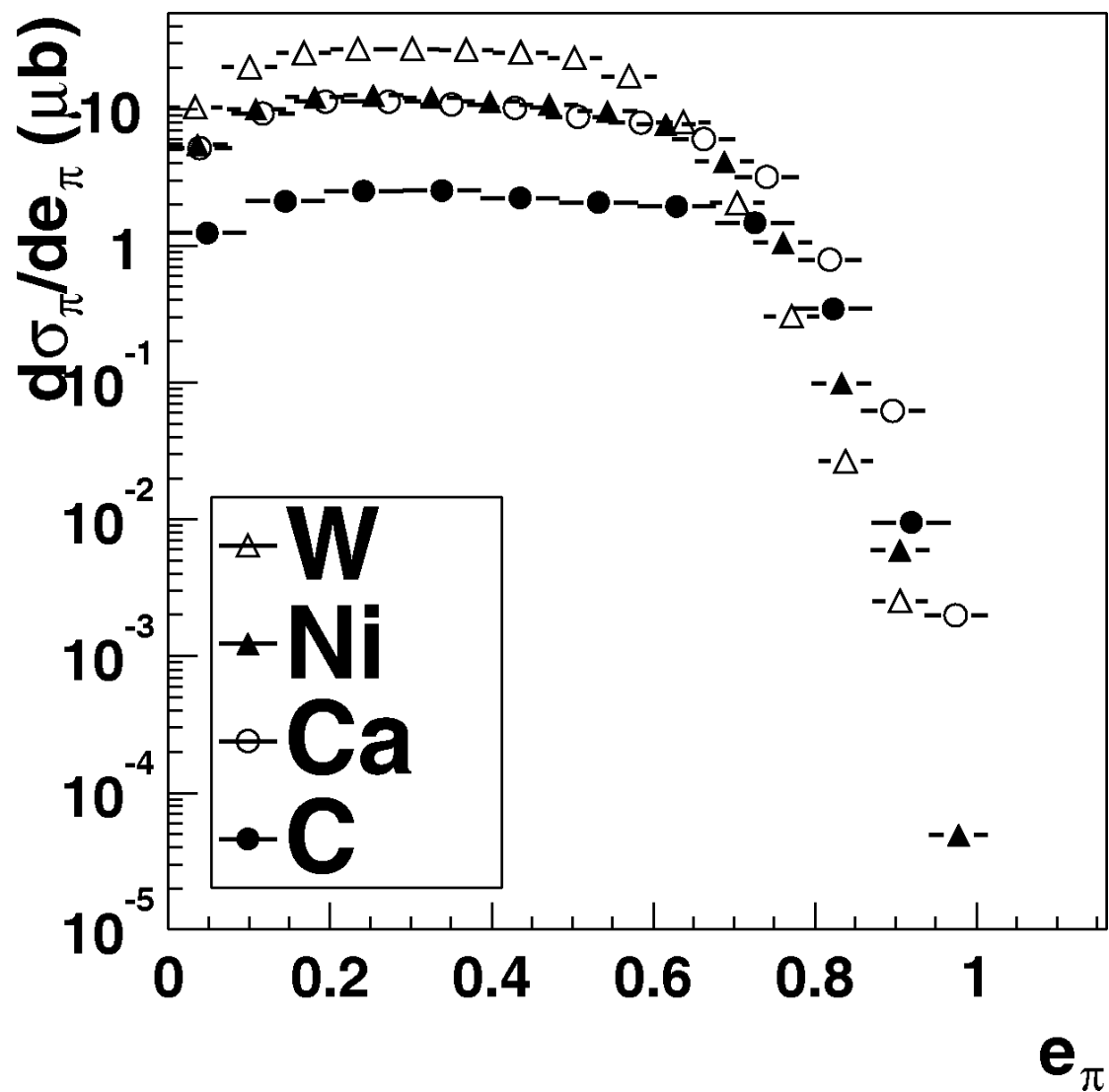
Zderzenia proton-jądro

$p (190 \text{ MeV}) + \text{C, Ca, Ni, W}$

- Eksperyment: AGOR w KVI Groningen
- produkcja mezonów π^0
- produkcja fotonów
- wielostopniowe procesy w produkcji fotonów

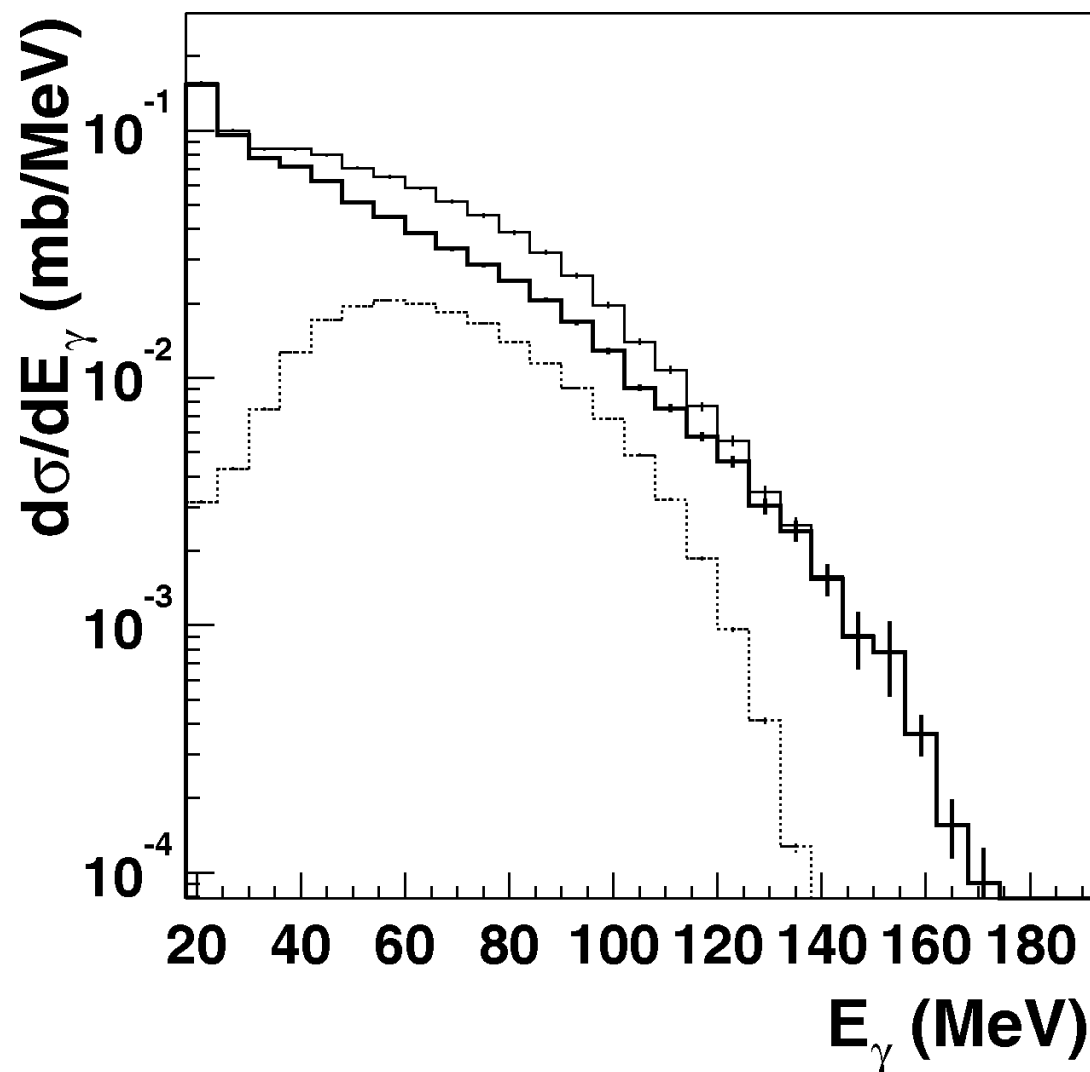
Widmo energii π^0

$$e_{\pi} = \frac{E_{\pi}}{E_{\pi}^{MAX}}$$

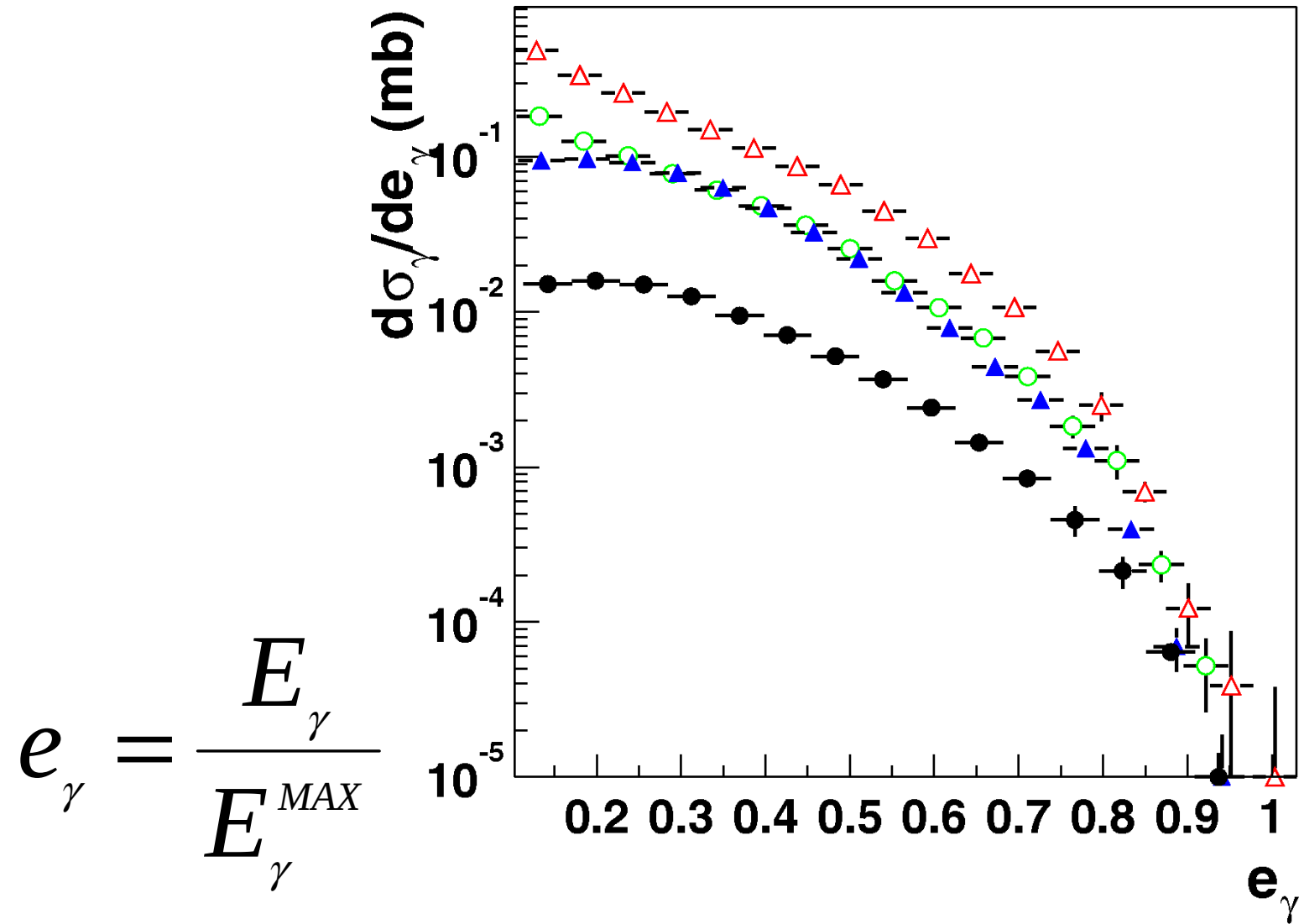


Wkład od procesu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Widmo fotonów
z rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
jest symulowane,
ale mezony π^0 są
mierzone w tym
samym ekspery-
mencie z dużą
akceptancją.



Widmo fotonów po usunięciu wkładu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



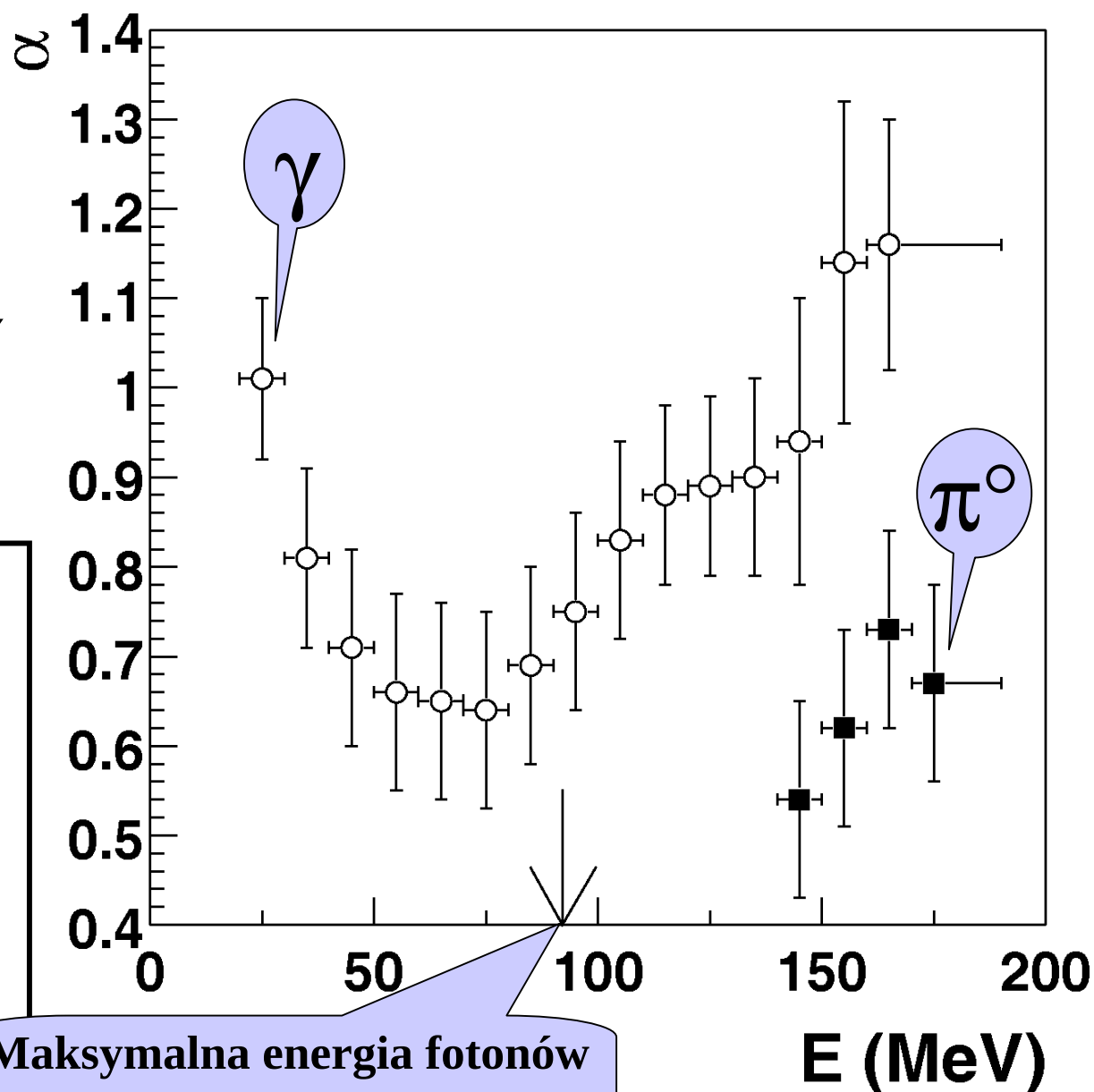
$$e_\gamma = \frac{E_\gamma}{E_\gamma^{MAX}}$$

Zależność
od masy
jądra tarczy

$$\frac{d\sigma}{dE} \sim A^\alpha$$

$\alpha=2/3$
produkcja
powierzchniowa

$\alpha=1$
produkcja
objętościowa

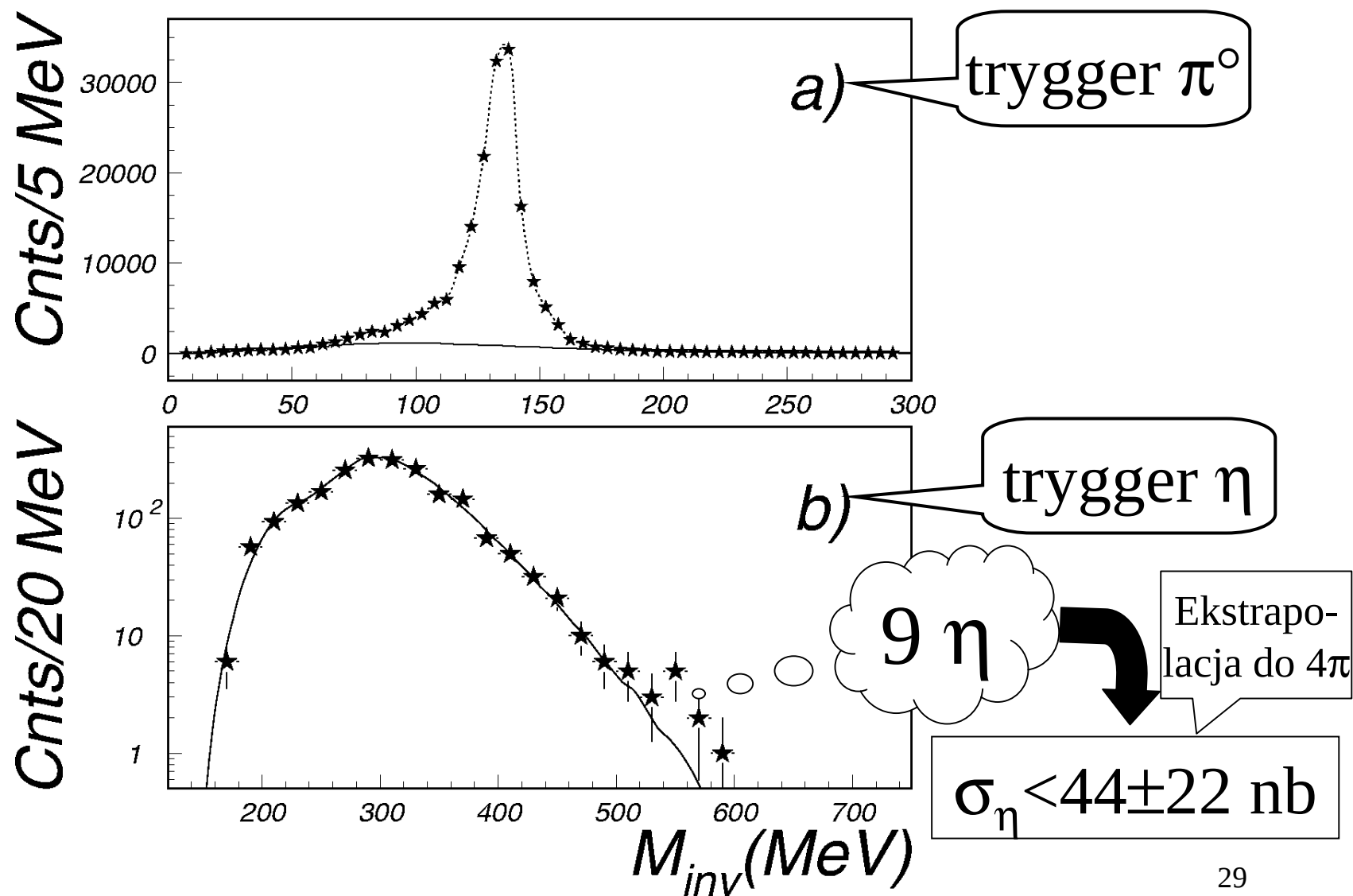


Zderzenia ciężkich jąder

Ar (180A MeV) + Ca

- Eksperyment: SIS w GSI Darmstadt
- Produkcja mezonów
- Produkcji rezonansu $\Delta(1232)$
- Widmo fotonów: jak uwzględnić wkład od rozpadu neutralnych mezonów?

Masa niezmiennicza $\gamma\gamma$



Skalowanie energetyczne

$$p_X = f \left(\frac{E_{BEAM}^{CC} / A}{E_{THRESHOLD}^{NN \rightarrow NNX}} \right)$$

Z pomiarów przekroju
czynnego dla mezonów:

180A MeV dla η

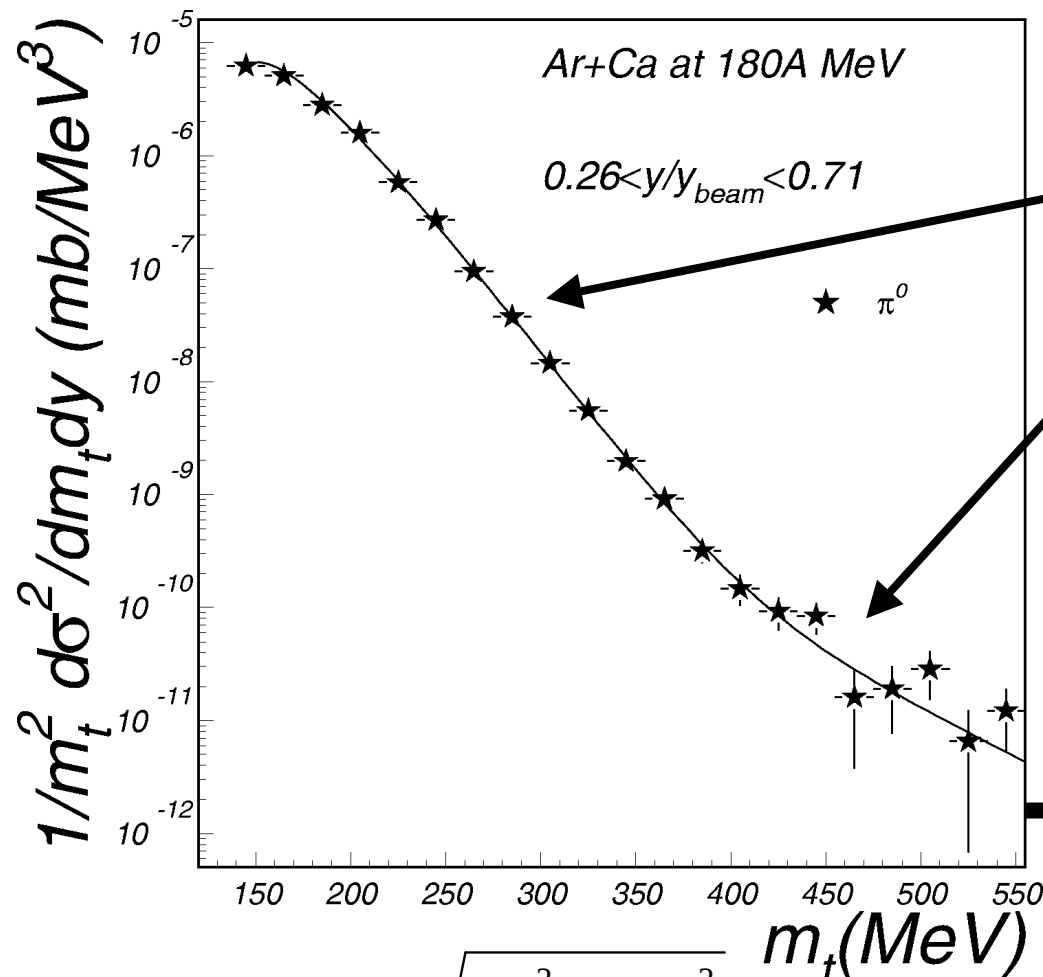
odpowiada

40.4A MeV dla π°

Obserwowana
liczba η jest **10-20**
razy mniejsza od
przewidywań.

Widmo masy poprzecznej π^0

poprawione na wydajność detektora



2 nachylenia:

18 ± 1 MeV

54 ± 7 MeV

Skalowanie m_t :

ekstrapolacja

dla $m_t > m_\eta$

$\sigma = 28 \pm 20$ nb

$$m_t = \sqrt{m^2 + p^2}$$

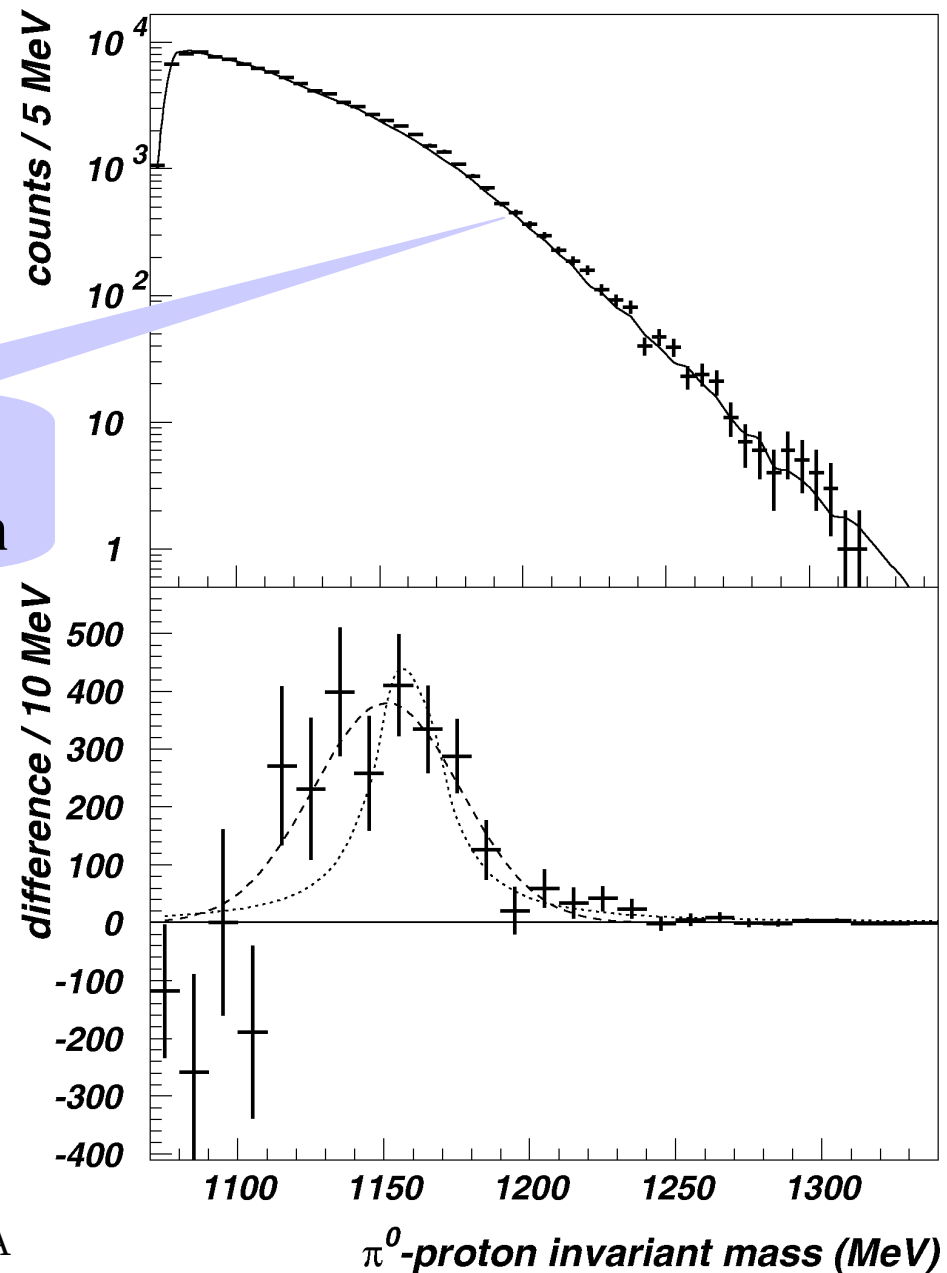
ZFJA 10 października 2003

Korelacje π^0 -proton

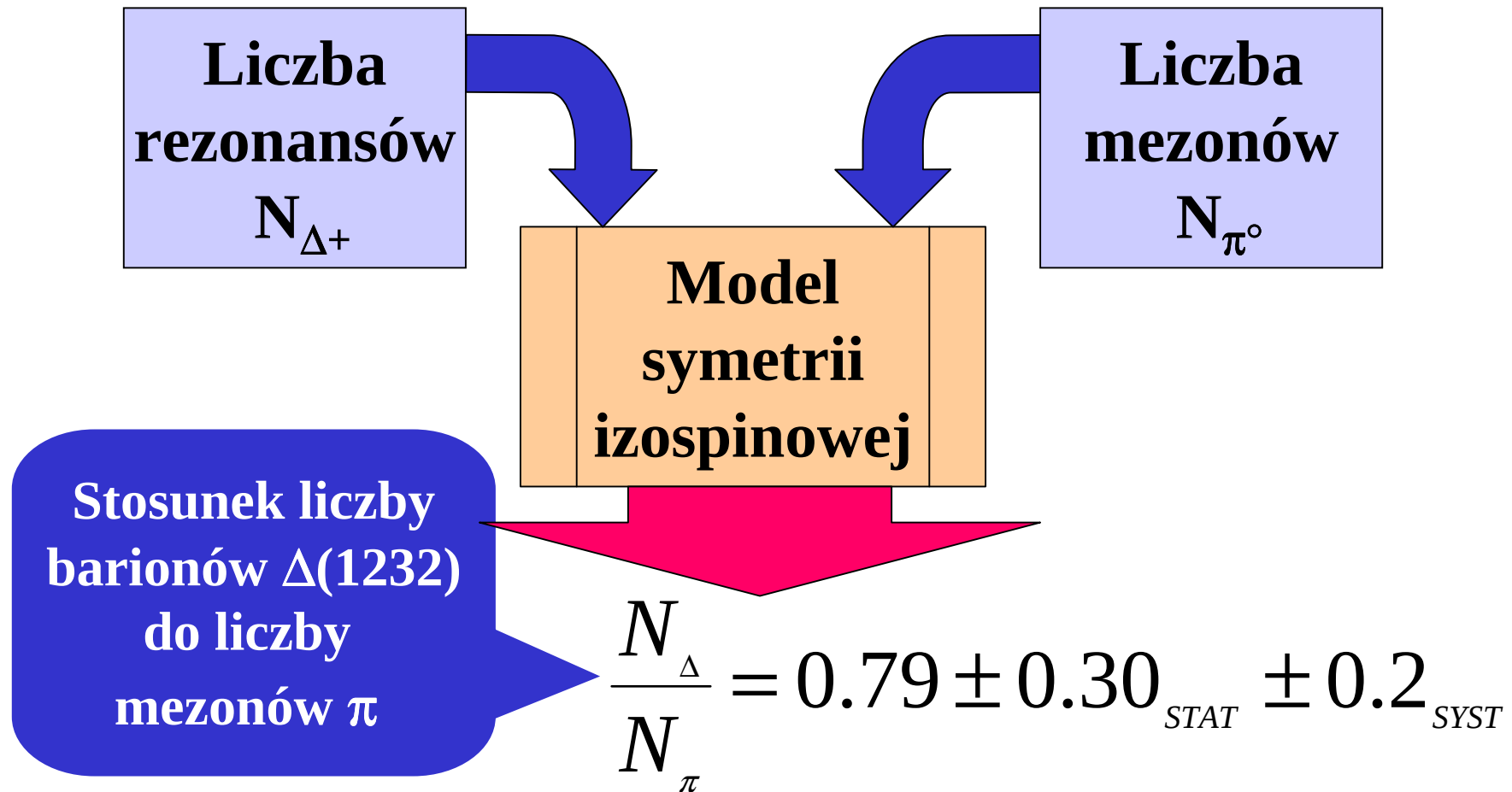
Tło z procedury
mieszania zdarzeń

1940 ± 740 zdarzeń
powyżej tła
kombinatorycznego:
 $\Delta^+(1232) \rightarrow \pi^0 p$

ZFJA

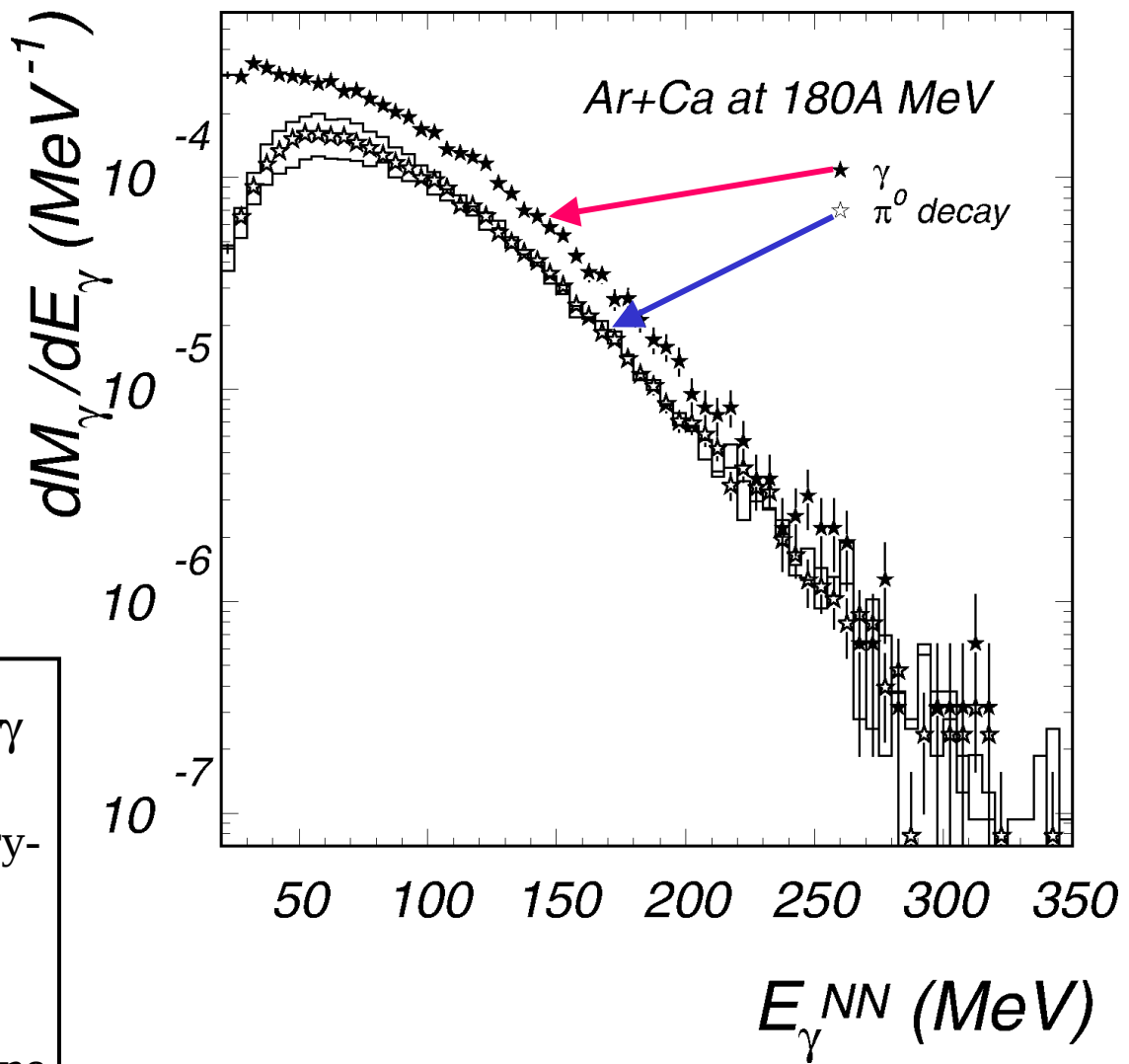


Pochodzenie mezonów π



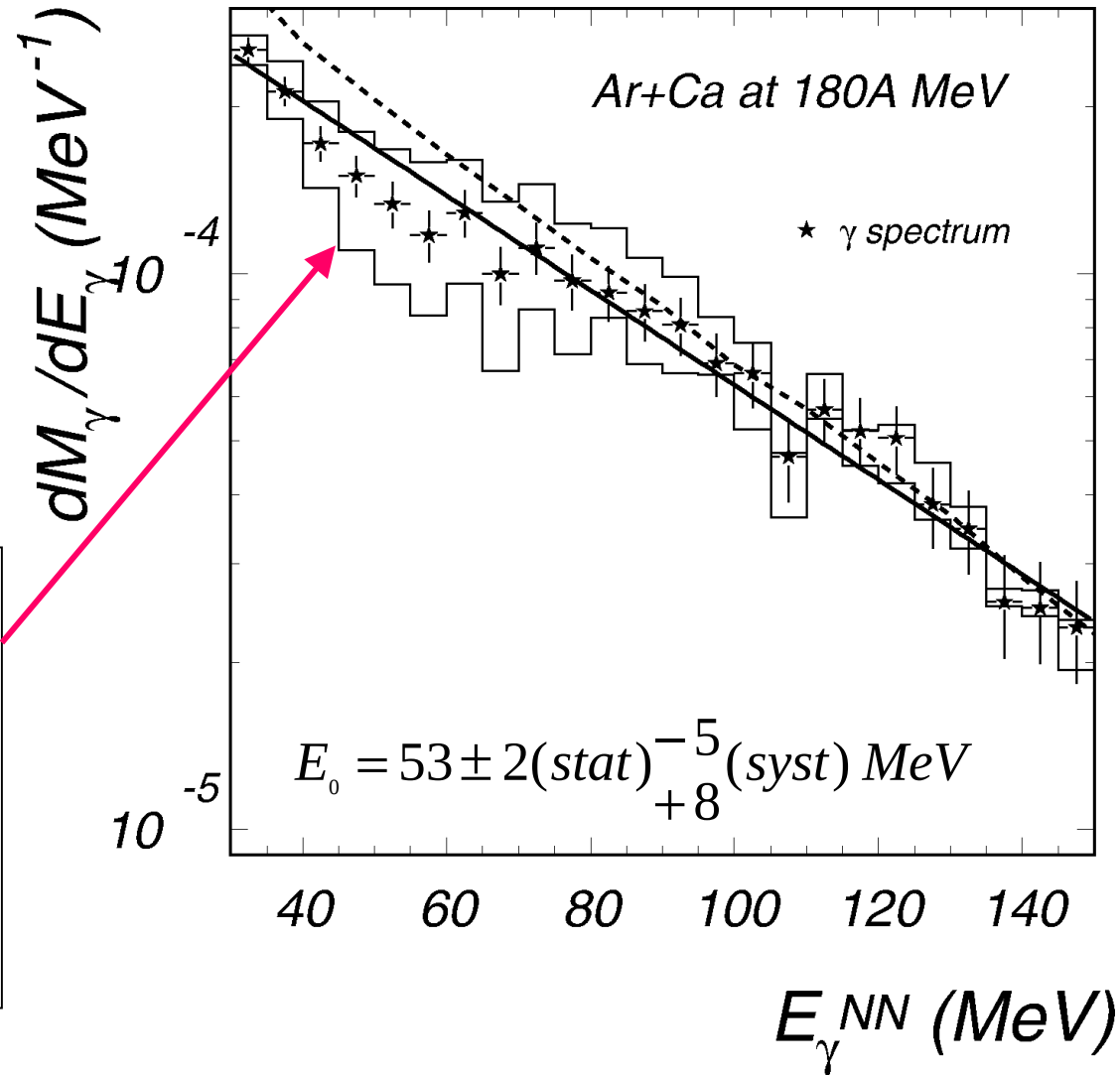
Całkowite widmo fotonów oraz wkład od rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Wkład od rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
wynika z symulacji, ale
mezony π^0 w tym ekspery-
mencie były mierzone
w wąskim przedziale
akceptancji:
duże błędy systematyczne

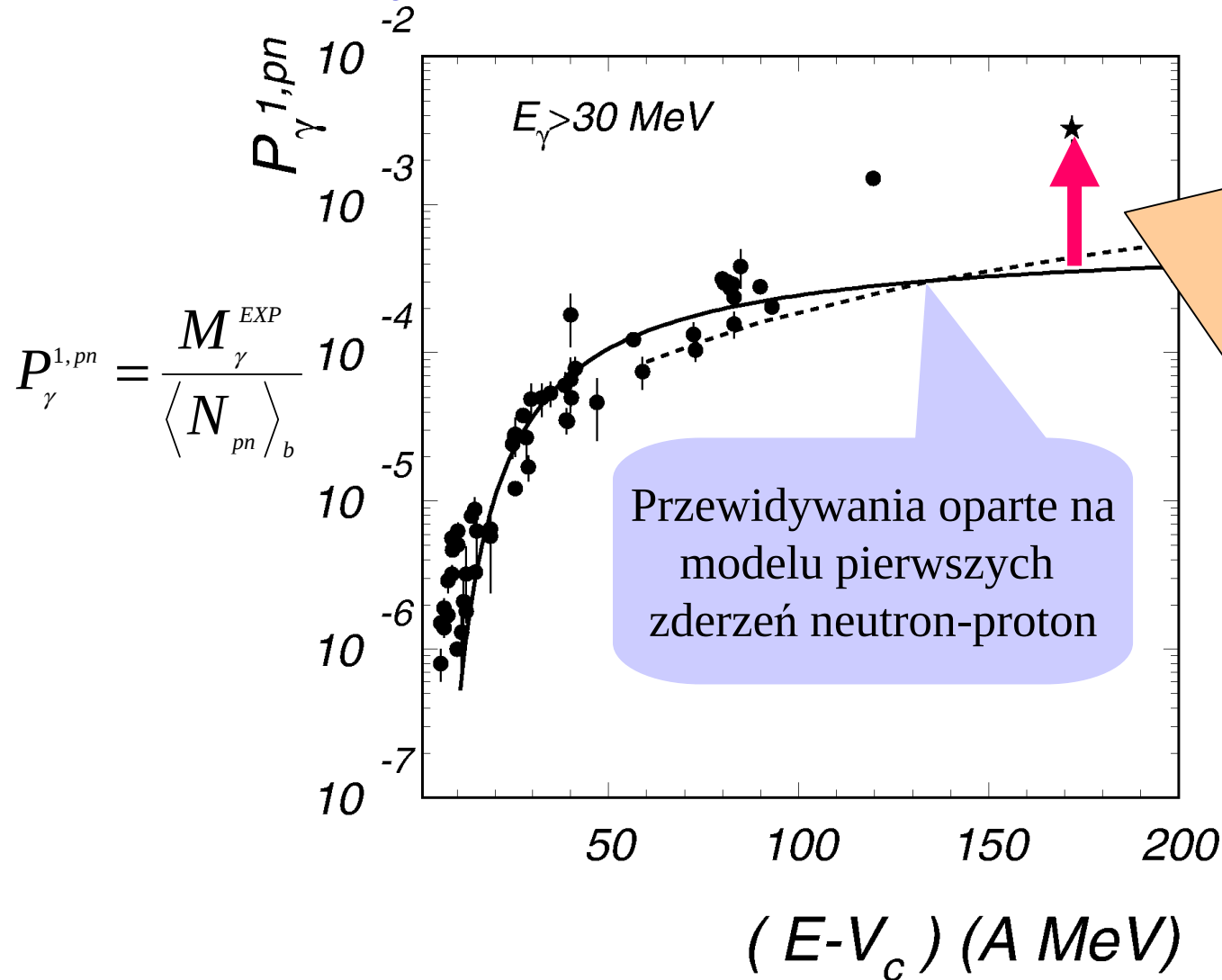


widmo fotonów

histogramy:
granice
błędów
systema-
tycznych



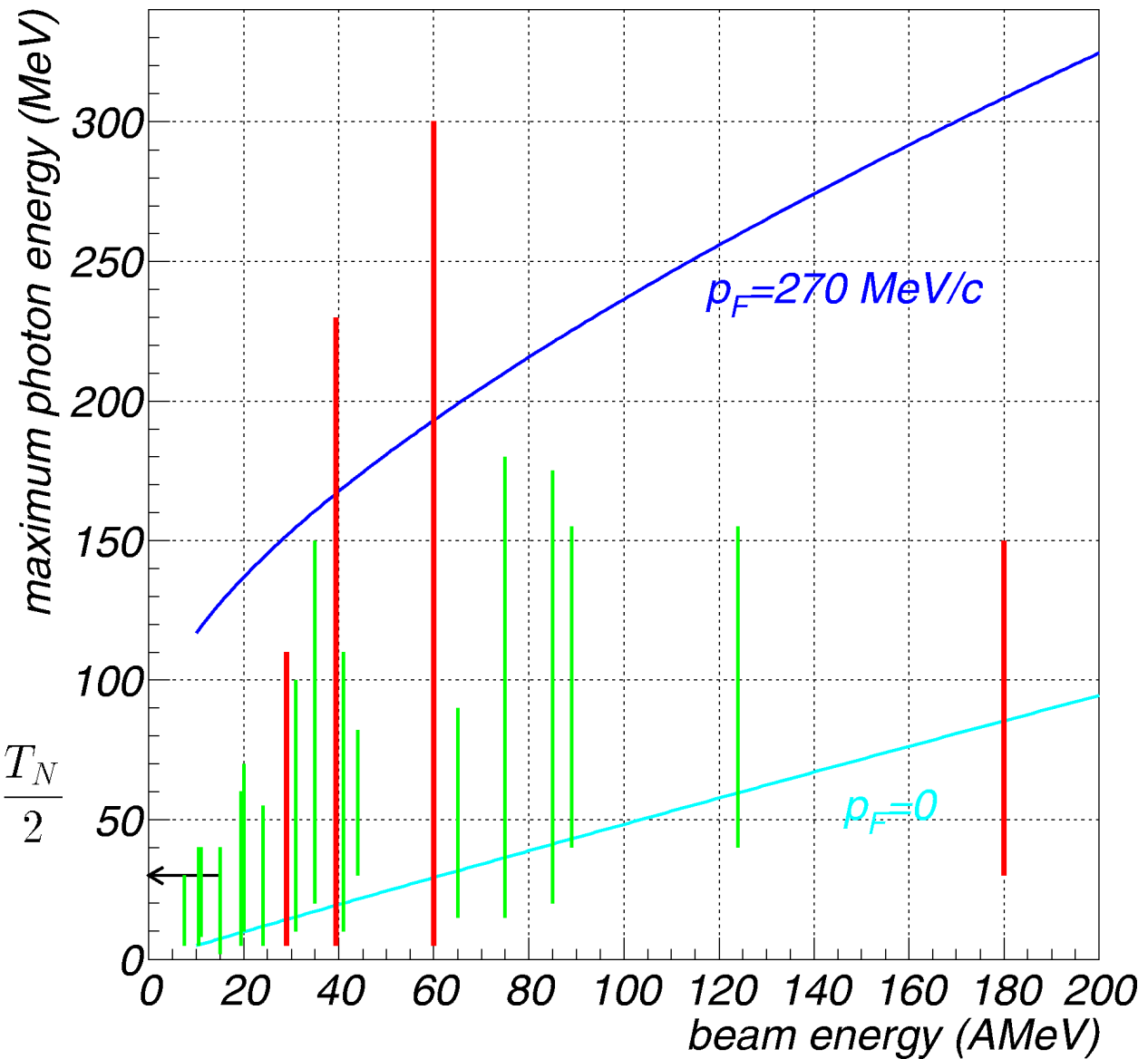
Prawdopodobieństwo produkcji fotonów w materii jądrowej



Zwiększenie
produkcji:
 $\sim 80\%$
fotonów
pochodzi
z wtórnych
zderzeń
p-n

Skąd
pochodzi
energia
fotonów
?

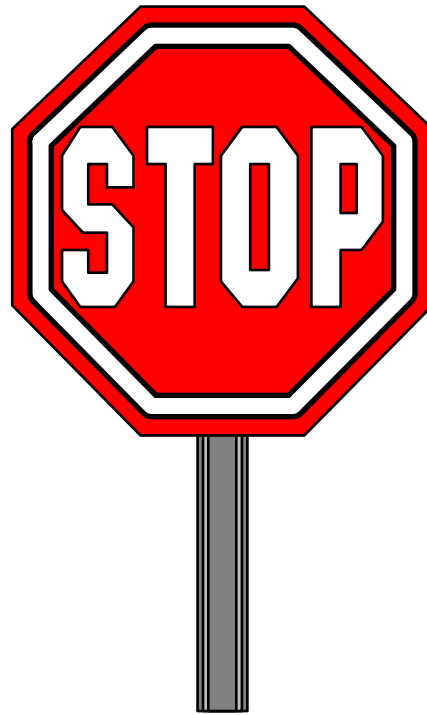
$$E_{\gamma}^{max} = \frac{s - 4m_N^2}{\sqrt{s}} \approx \frac{T_N}{2}$$



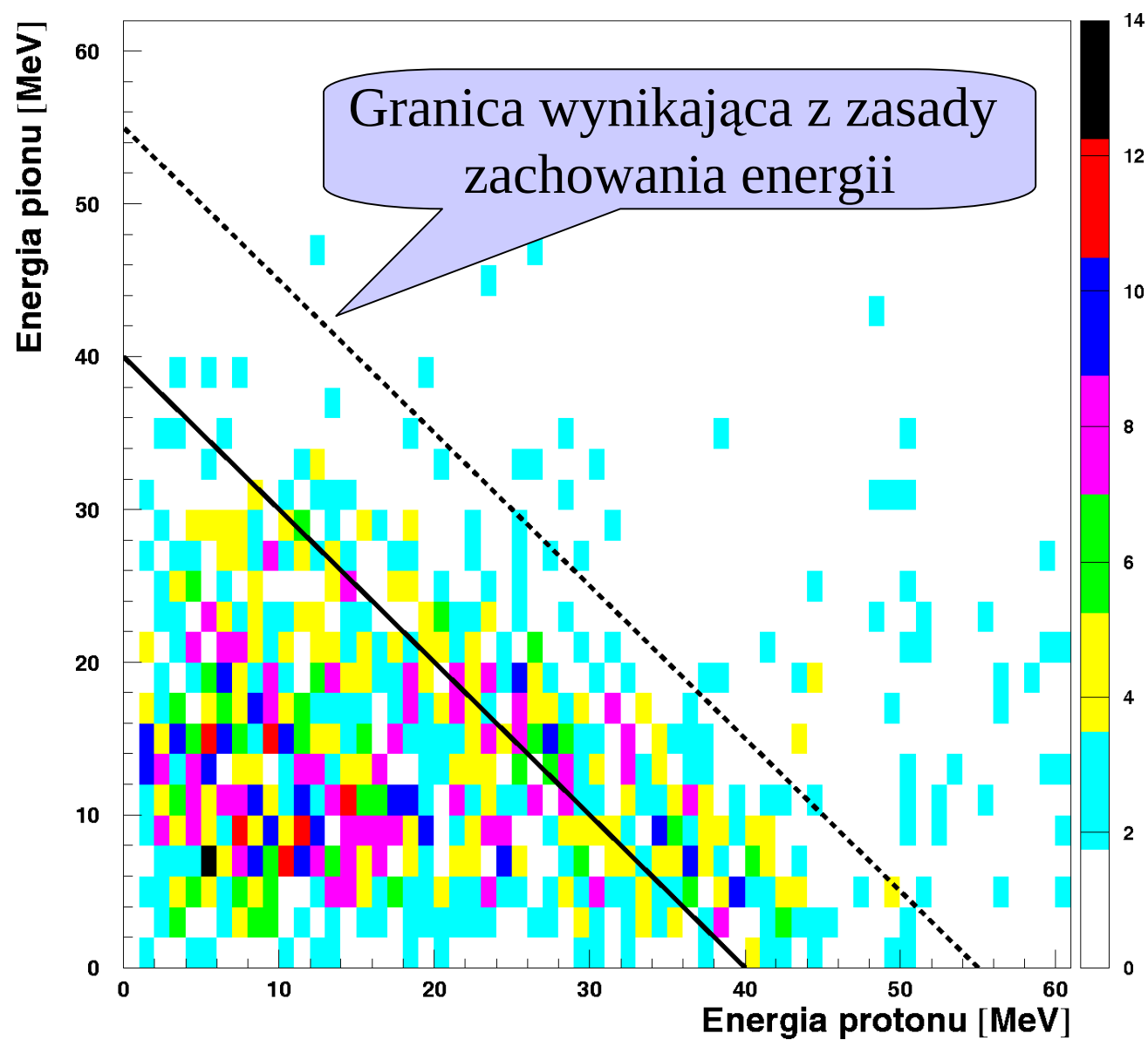
Podsumowanie

- **Badanie zderzeń proton-jądro (pA) ważnym elementem zrozumienia bardziej złożonych zderzeń jądro-jądro (AA).**
- **Fotony-sonda trudna ale używalna także dla wyższych energii niż oczekiwano.**
- **Zmiana mechanizmu produkcji fotonów w funkcji ich energii.**
- **Cząstki podprogowe pochodzą nie tylko z pierwszych zderzeń NN, ale także z procesów wielostopniowych.**
- **Dominująca rola rezonansu Δ w produkcji mezonów π wykazana doświadczalnie.**

Slajdy zapasowe



Korelacje pion-proton



On the origin of pions

$$\frac{N_{\Delta}}{N_{\pi}} = \frac{Y_{\Delta^+}}{Y_{\pi^0}} \times \frac{f_{\pi^0}}{p_{\Delta \rightarrow N\pi} f_{\Delta^+} f_{\Delta^+ \rightarrow p\pi^0}} \times \frac{\epsilon_{\pi^0}}{\epsilon_{\Delta^+ \rightarrow p\pi^0}}$$

exp. yields

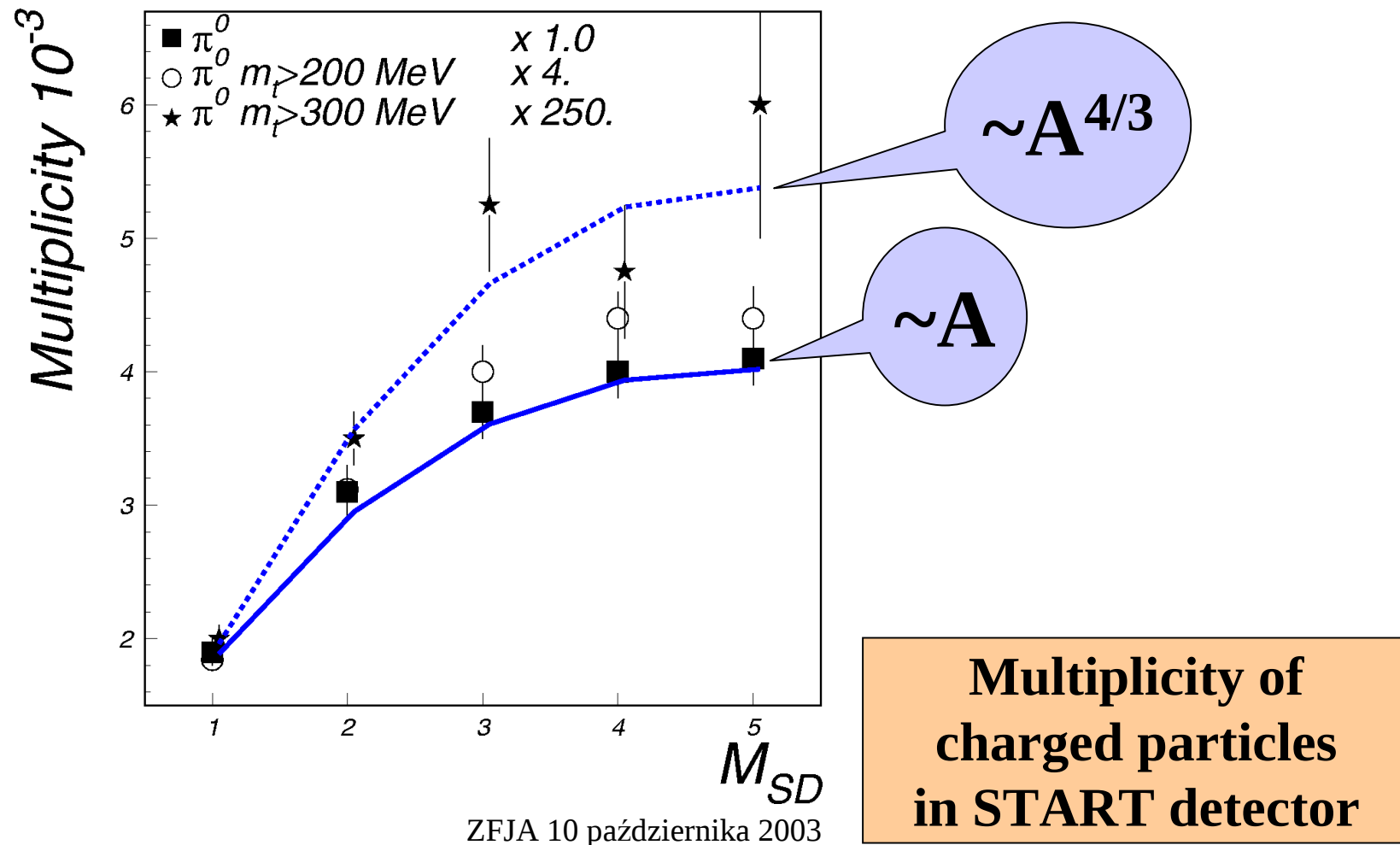
C-G coefficients
accounting for izospin

efficiency

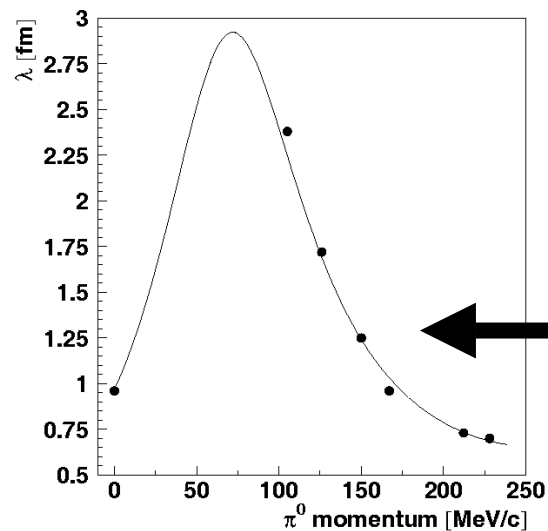
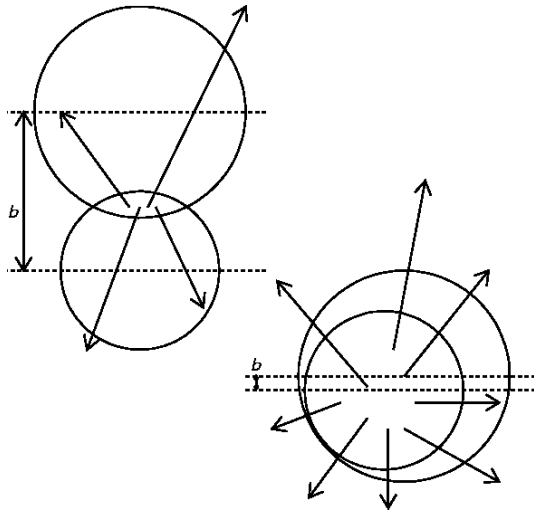
Δ to pion
ratio

$$\frac{N_{\Delta}}{N_{\pi}} = 0.79 \pm 0.30_{STAT} \pm 0.2_{SYST}$$

High m_t pions: from multi-step processes

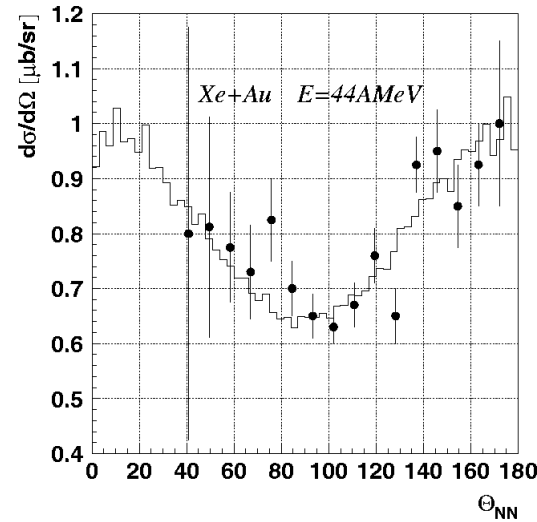
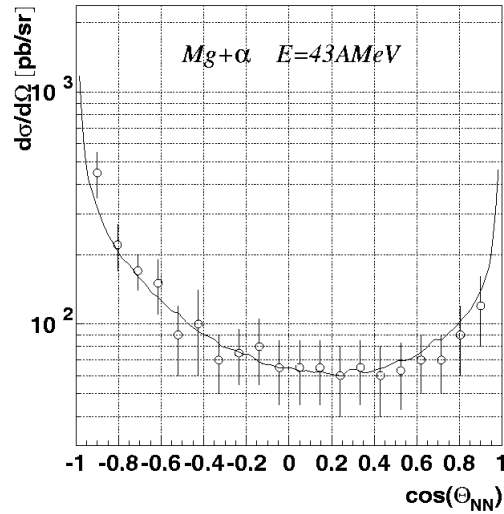


Pion reabsorption in nuclear matter

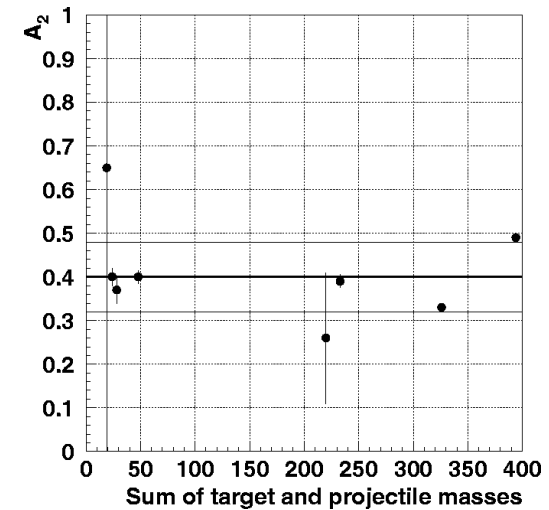
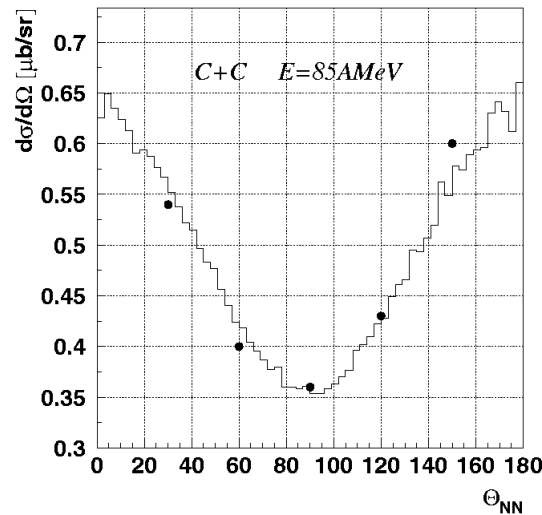
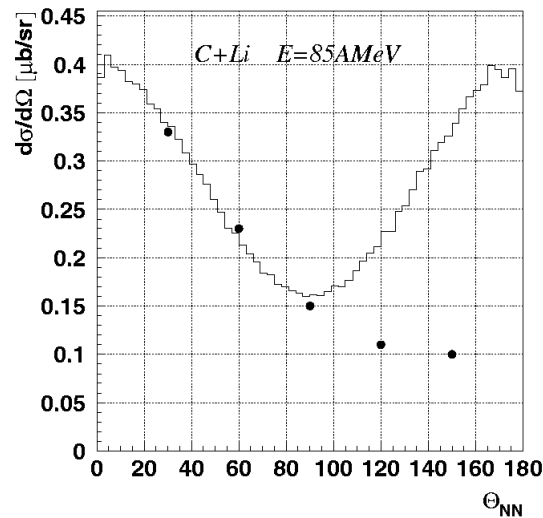


- Pion production proportional to the overlap volume
- Random emission according to $1 + A_2 P_2(\cos\theta)$ angular distribution and thermal energy distribution in NN center of mass system
- Absorption of pions depending on the distance travelled in nuclear matter (frozen shape)
- Momentum-dependent absorption length

angular distribution of primordial pions: constant



A_2 fitted to reproduce experimental angular distribution

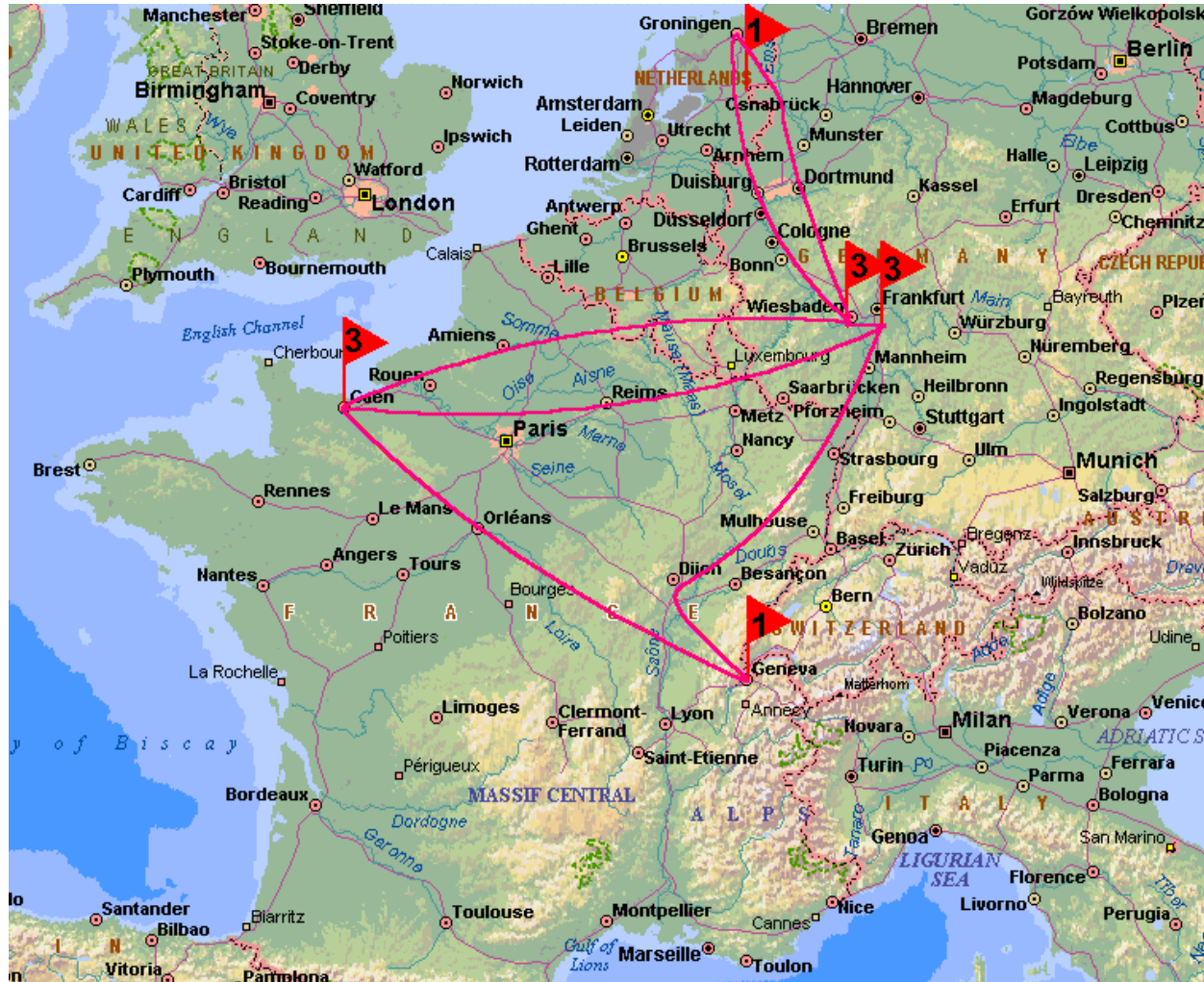


$$A_2 = 0.40 \pm 0.08$$

Stan termodynamiczny zderzenia AA

- Modelowanie dynamiki wielocząstkowej poprzez równanie transportu przybliżane numerycznie (BUU, #QMD, etc). Składniki modeli : EOS, ???
- Podejście empiryczne: porównywanie zderzeń AA i pA.

Podróże z TAPS 1989-2003



ZFJA 10 października 2003