

# Modelowanie procesów produkcji cząstek w strunowych modelach zderzeń relatywistycznych jąder atomowych



Tomasz Berliński

SKN Fizyków KWANT, Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach,

ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce

## WSTĘP

Według teorii Wielkiego Wybuchu materia na samym początku istnienia Wszechświata prawdopodobnie była w stanie tzw. plazmy kwarkowo-gluonowej. Do dziś stan ten nie jest dokładnie znany i dlatego wciąż trwają jego badania. Prowadzone są m. in. eksperymenty polegające na zderzaniu ze sobą jąder atomowych przy bardzo wysokich energiach. Podczas takich zderzeń nukleonów o energiach rzędu teraelektronowoltów, składniki, z których zbudowane są nukleony, tj. kwarki i gluony, tworzą wspomnianą plazmę. Oprócz eksperymentów szeroko prowadzone są symulacje takich zderzeń.

## CEL PRACY

Celem pracy było przeprowadzenie symulacji zderzeń relatywistycznych jąder atomowych za pomocą programu komputerowego odwzorowującego zderzenia wg strunowego modelu o nazwie Heavy Ion Jet Interaction Generator (HIJING). Model ten zakłada, że rezultatem oddziaływania nukleonów w zderzeniach są podłużnie zorientowane obiekty zwane strunami czyli obiekty kwark – antykwark lub kwark – dikwark. Energia struny rośnie wraz z odległością pomiędzy połączonymi kwarkami i gdy osiągnie dostatecznie dużą wartość, to struna pęka tworząc mniejsze struny lub inne cząstki. Pary kwarków powstają w wyniku wymiany pędu między kwarkami w hadronach [1].

## METODA

Symulacje zostały przeprowadzone w programie komputerowym o nazwie HIJING, działającym za pomocą metody Monte-Carlo. Na podstawie wprowadzanych danych do programu takich jak:

- liczba zderzeń,
- rodzaj zderzanych jąder,
- energia zderzenia w układzie środka masy,

program generuje liczby dla każdego zderzenia, które są liczbą wyprodukowanych w zderzeniu cząstek naładowanych, opisywanych przez wartość pospiesznosci, tj. funkcję energii i składowej pędu równoległej do kierunku wiązki wyprodukowanej cząstki. Jedną z generowanych liczb jest liczba nukleonów, które nie oddziaływały w zderzeniu.

## WIELKOŚCI FIZYCZNE OPISUJĄCE ZDERZENIA

Określając kierunek poruszania się generowanej cząstki, względem miejsca, w którym doszło do zderzenia posługujemy się parametrem, który nazywamy **pospiesznością**; jest on wyliczany ze wzoru:

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_L}{E - p_L} \right),$$

gdzie:

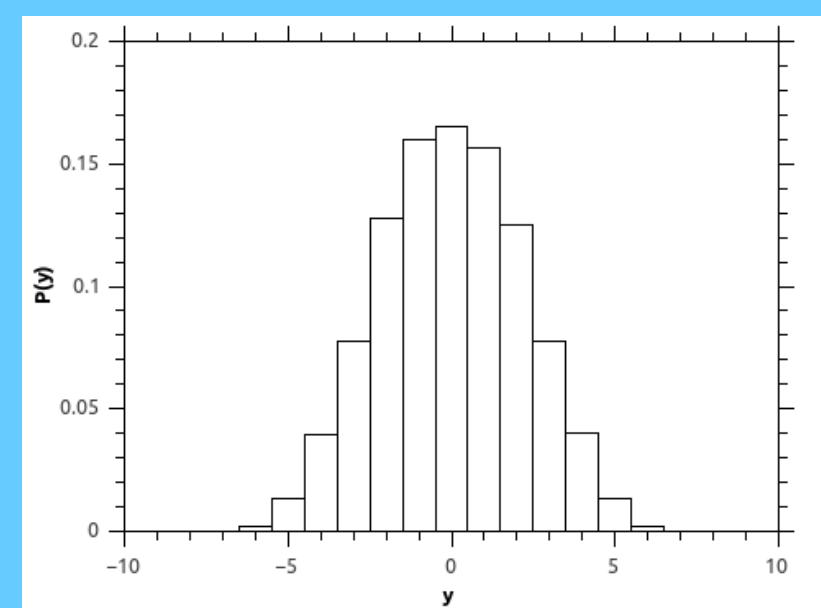
$E$  – energia cząstki równa jest  $E = \sqrt{m^2 + p^2}$ ,

przy czym:

$m$  – masa cząstki,

$P$  – pęd całkowity cząstki,

$p_L$  – składowa pędu wygenerowanej cząstki, równoległa do kierunku wiązki.



Do określenia pospiesznosci generowanych cząstek użyto masy pionu naładowanego.

Jak widać na rysunku obok rozkład jest symetryczny względem  $y=0$ .

**Nukleony uczestnicy** – nukleony oddziałujące w zderzeniu.

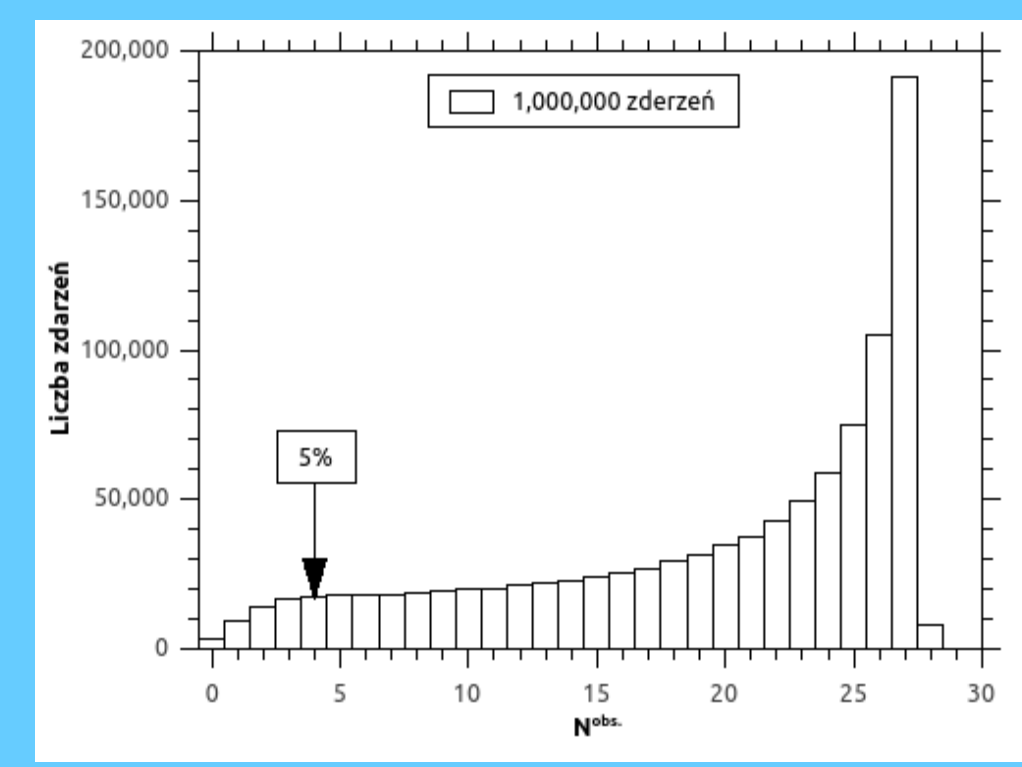
**Nukleony obserwatorzy** – rejestrowane nukleony, które nie uczestniczyły w zderzeniu.

Do analizy zderzeń użyteczna jest wiedza na temat tego, ile nukleonów wzięło czynny udział w zderzeniu. W przypadku zderzeń przy wysokich energiach oddziałują tylko te nukleony, które napotkały na swojej drodze inne nukleony, a reszta podąża dalej, więc można za pomocą rejestracji tych nie oddziałujących nukleonów, poznać liczbę nukleonów oddziałujących.

**Krotność zderzenia  $N_{CH}$**  – liczba naładowanych elektrycznie cząstek wyprodukowanych w zderzeniu.

## WYZNACZANIE CENTRALNOŚCI W SYMULOWANYCH ZDERZENIACH

Znajomość liczby nukleonów obserwatorów pozwala określić, jak bardzo zderzenie było centralne. Im bardziej centralne zderzenie, tym więcej wygenerowanych zostaje cząstek i tym bardziej właściwe jest badanie i analiza konkretnego rodzaju zderzenia. Do wybrania 5% najbardziej centralnych zderzeń, wykorzystano program komputerowy, przygotowany w języku Fortran. Za jego pomocą sortowano dane względem liczby nukleonów obserwatorów, od najmniejszej do największej oraz wyznaczono częstość wystąpienia danej liczby. Następnie zsumowano częstość wystąpienia liczb i gdy wartość sumy przekroczyła 5% ilości wszystkich zderzeń, zebrane dane poddano dalszej analizie, znajdując średnią krotność  $N_{CH}$ .



Rozkład ilości nukleonów obserwatorów z zaznaczonym obszarem najbardziej centralnych zderzeń dla jąder: Si + Si, przy energii zderzenia: 7 TeV/n.

## ANALIZA DANYCH

Wykonano symulacje: **p+p, C+C, Si+Si, Au+Au, Pb+Pb** dla energii w układzie środka masy:

$$\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV/n}, 200 \text{ GeV/n}, 2 \text{ TeV/n}, 7 \text{ TeV/n}.$$

Do wyznaczenia średniej krotności z histogramów opisujących 5% najbardziej centralnych zderzeń, posłużono się wzorem:

$$\bar{x} = \sum x_i * P(x_i),$$

gdzie:

$x_i$  – liczba wygenerowanych cząstek w zderzeniu,

$P(x_i)$  – prawdopodobieństwo wystąpienia danej krotności.

Błąd wartości średniej został wyliczony ze wzoru:

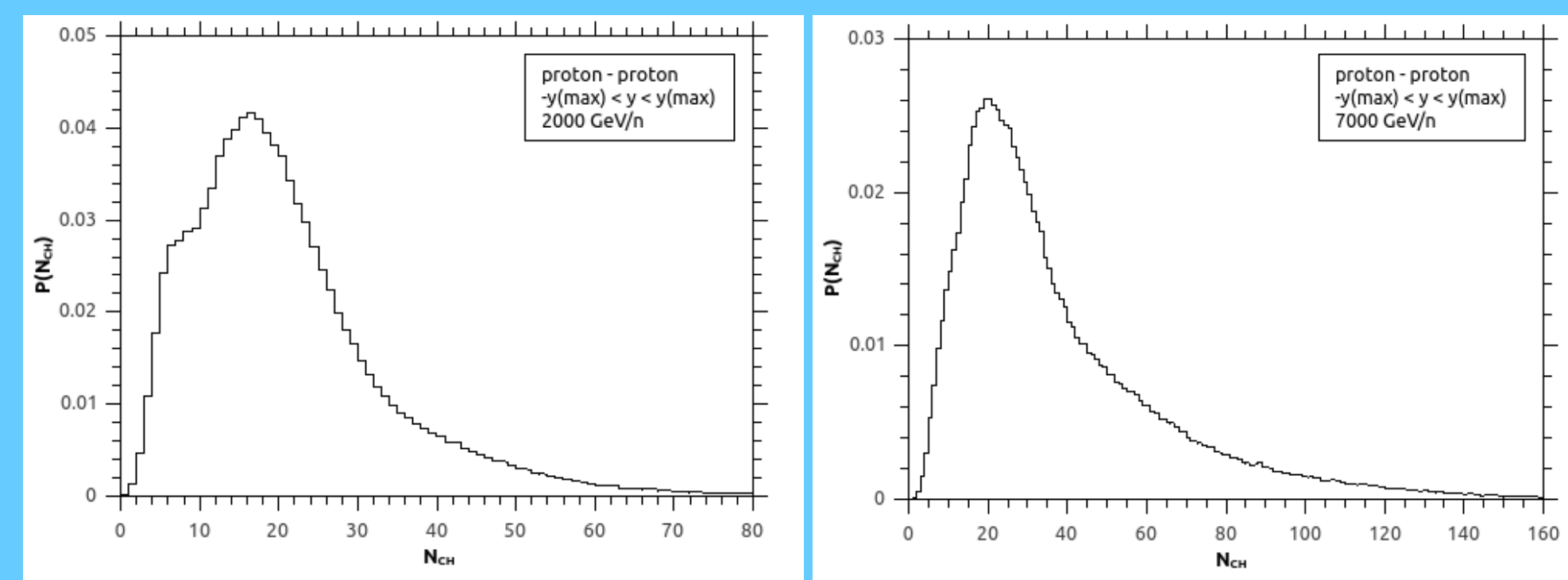
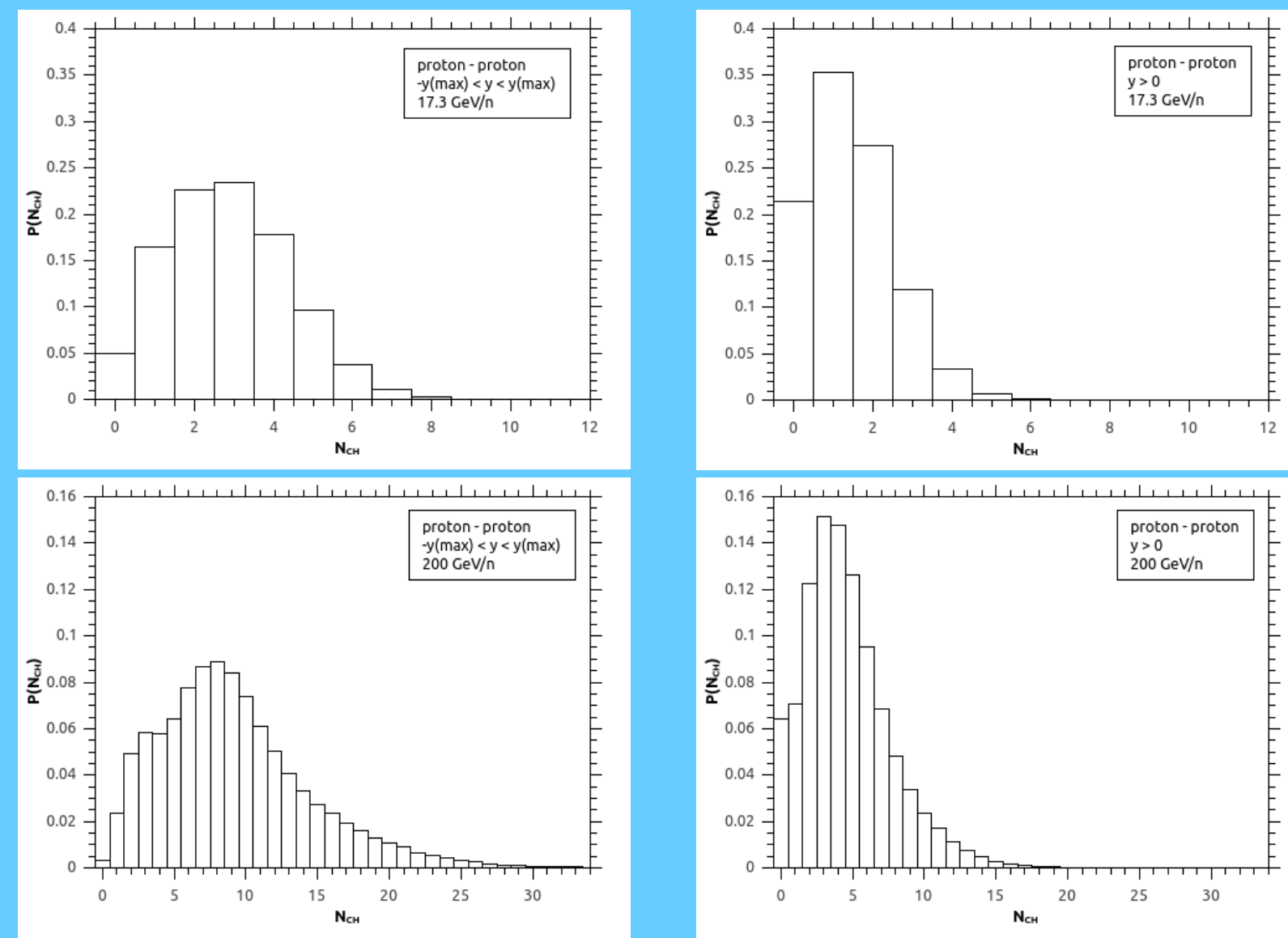
$$s = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}},$$

gdzie:

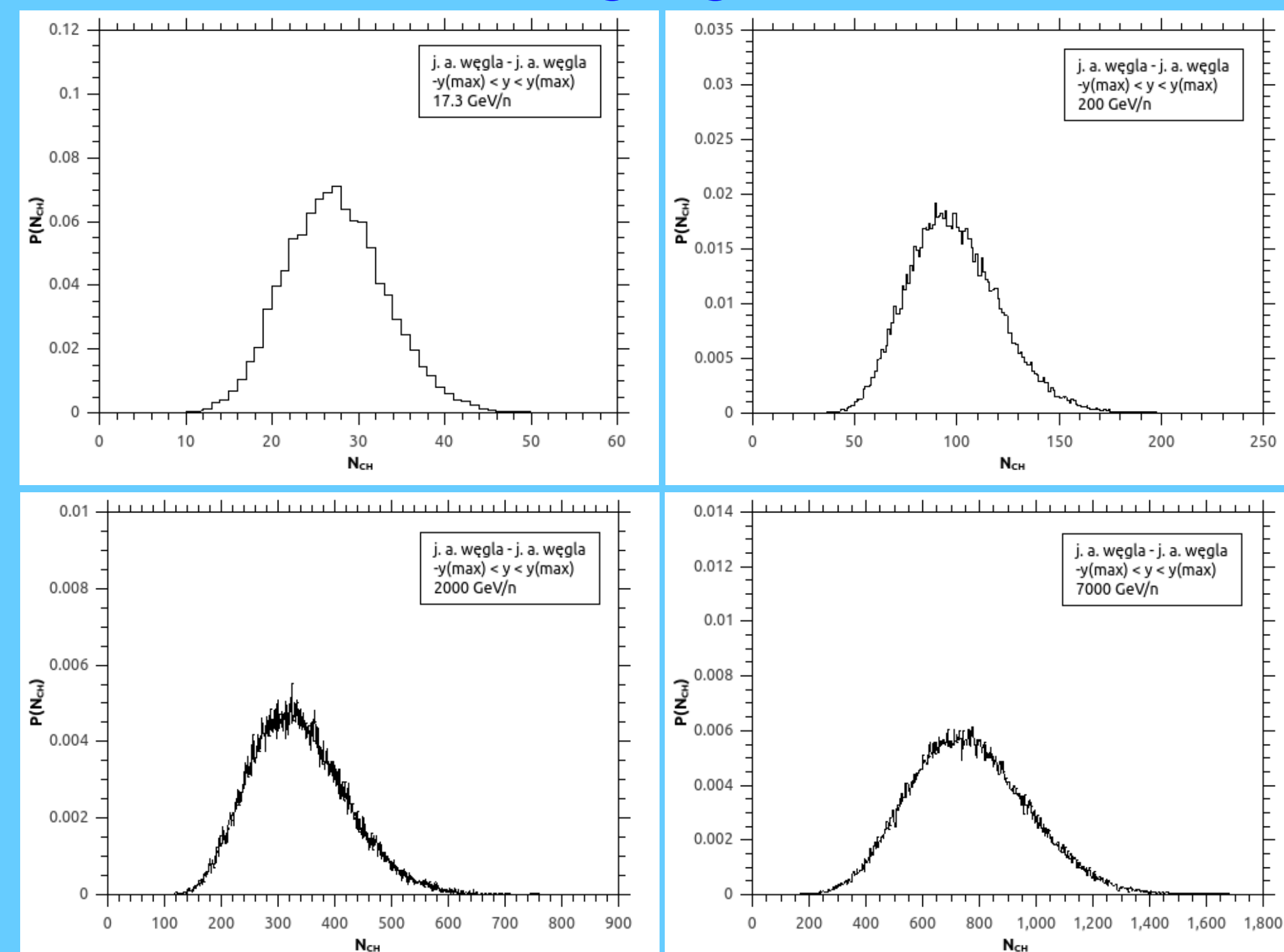
$\sigma_x$  – odchylenie standardowe równe jest  $\sigma_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$ ,

$N$  – liczba zderzeń.

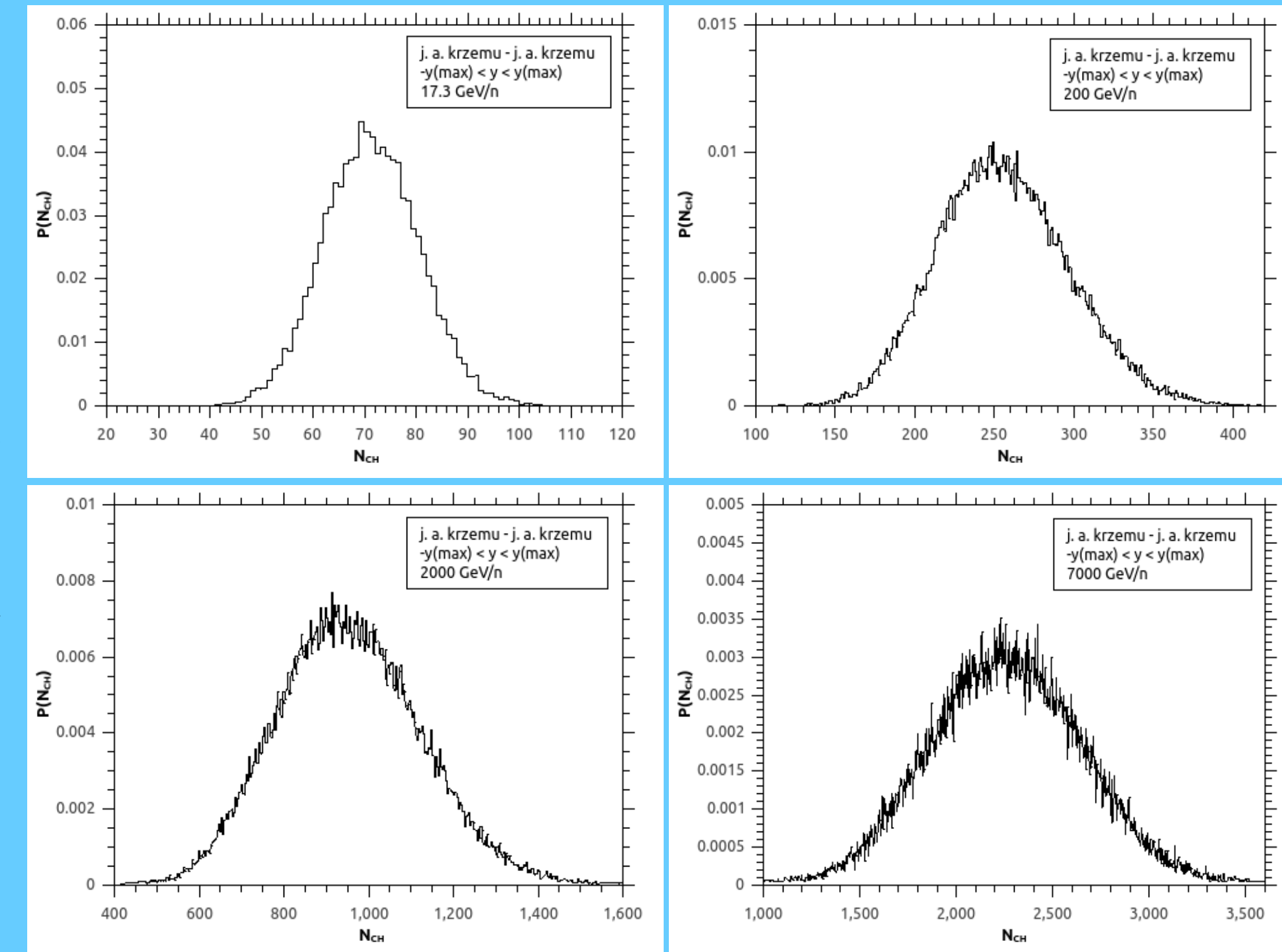
## ROZKŁADY PRAWDOPODOBIENSTWA $P(N_{CH})$ w zderzeniu proton (H) + proton (H)



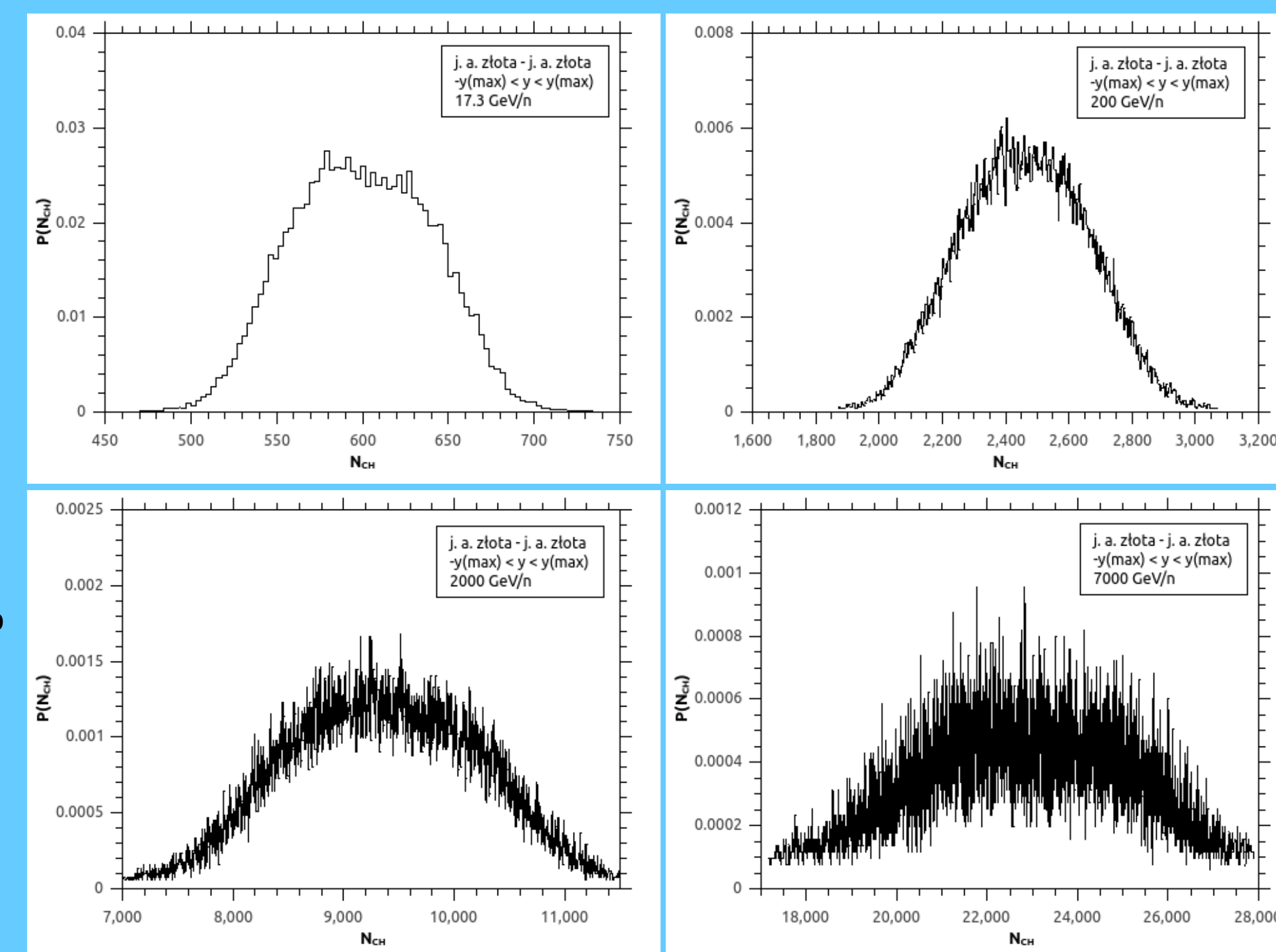
## C + C



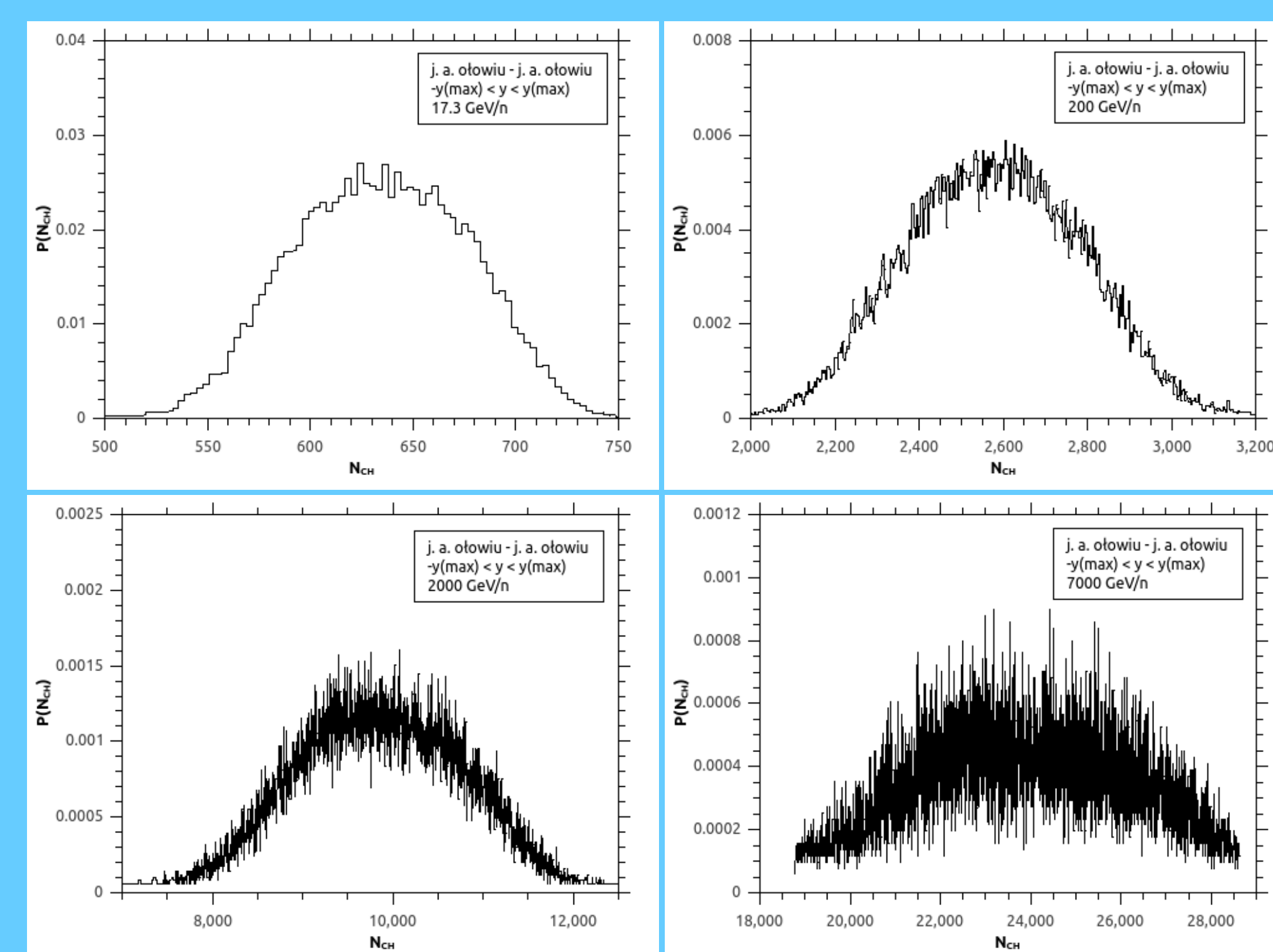
## Si + Si



## Au + Au

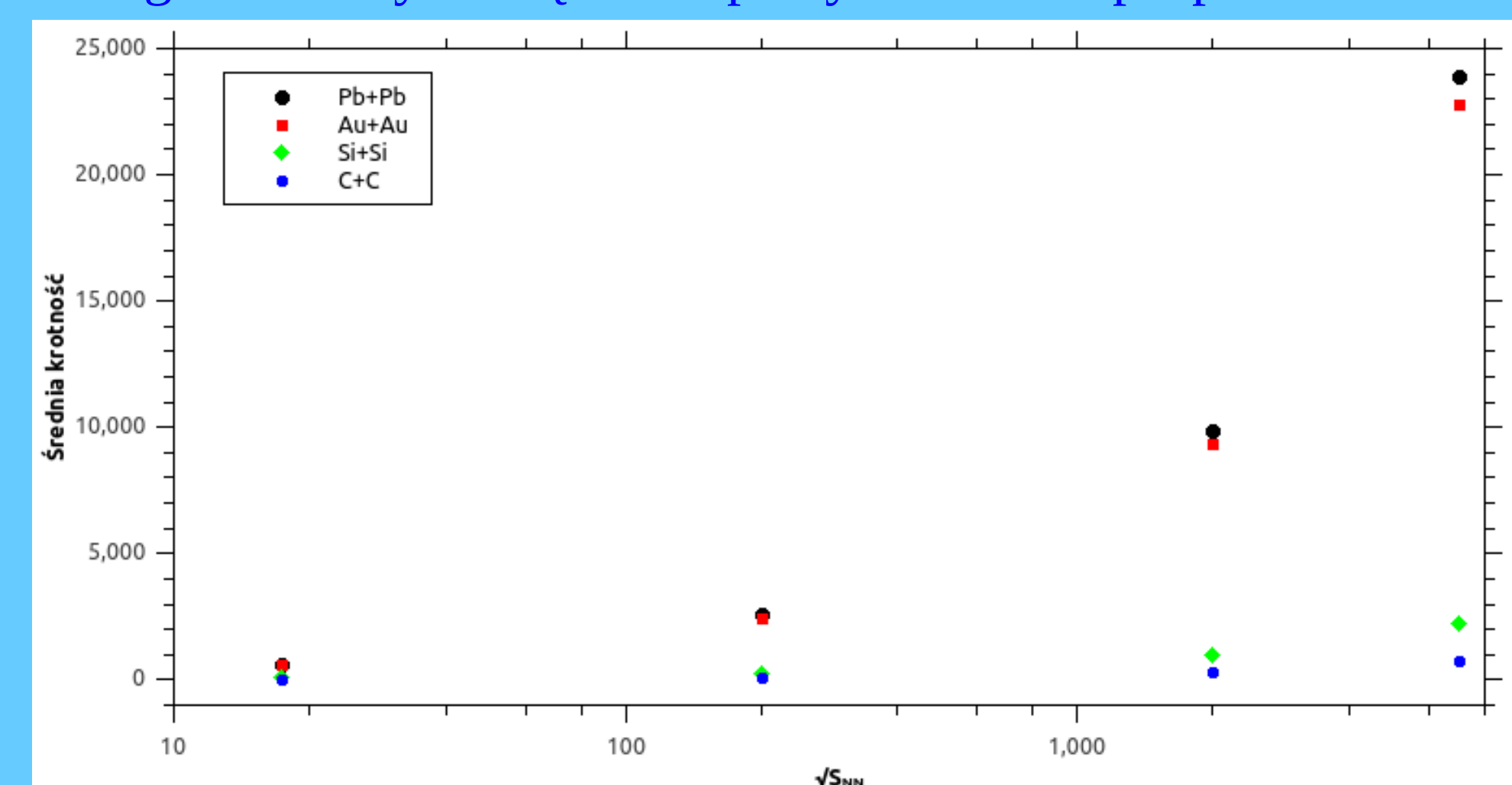


## Pb + Pb



## WNIOSKI

Średnia krotność w zderzeniach A+A w funkcji energii w układzie środka masy zderzanych jąder, dla 5% najbardziej centralnych zderzeń i generowanych cząstek w pełnym zakresie pospiesznosci:



- Liczba nukleonów i energia zderzenia mają wpływ na ilość wygenerowanych cząstek naładowanych w symulowanym zderzeniu.
- Im większa wartość liczby nukleonów biorących udział w zderzeniu, tym więcej cząstek zostaje wyprodukowanych (przyrost liniowy).
- Im większa wartość energii w układzie środka masy, tym więcej cząstek zostaje wyprodukowanych.

Przedstawione dane można porównać z danymi eksperymentalnymi w celu określenia czy model stworzony do tego rodzaju symulacji jest zgodny z wiedzą na temat fizyki zderzeń.