



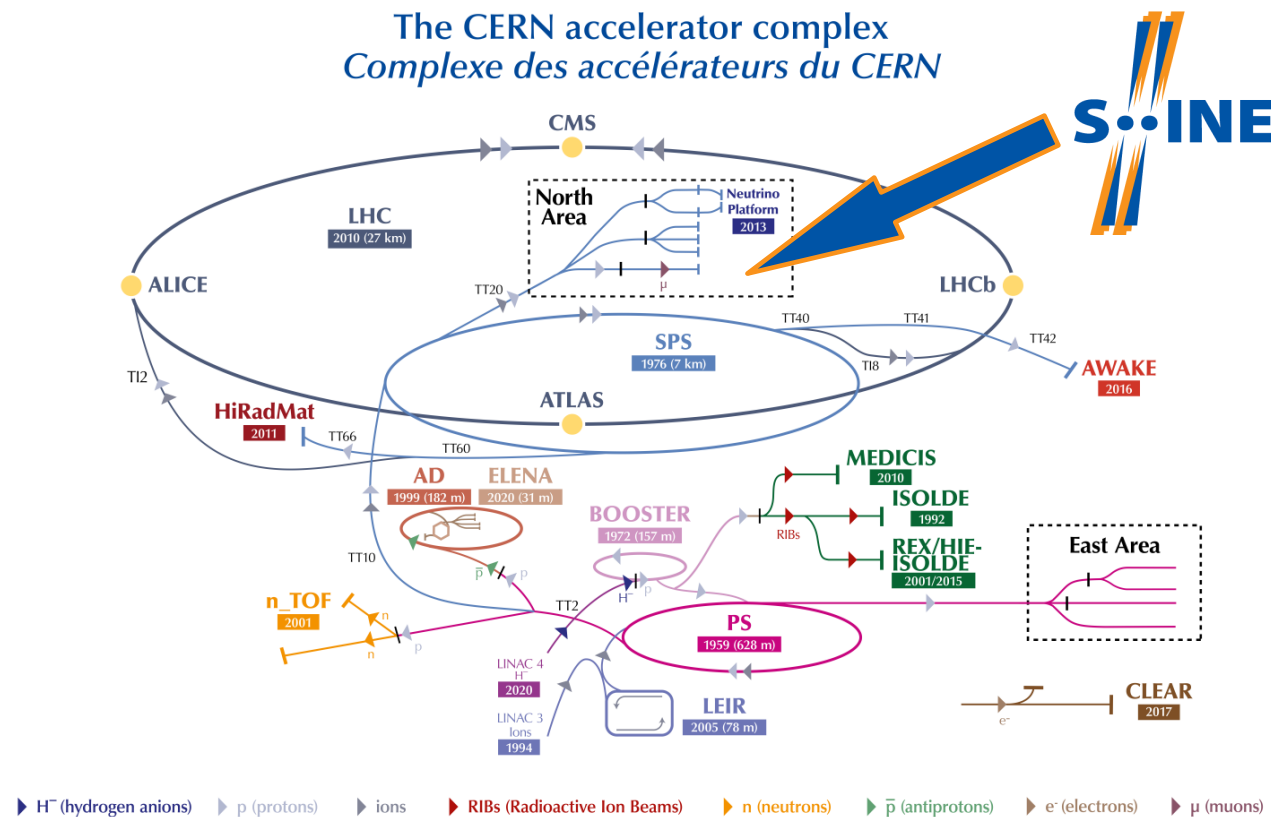
EKSPERYMENT NA61/SHINE: OD ZDERZEŃ JĄDER DO KOSMICZNYCH NEUTRIN

Seweryn Kowalski

dla NA61/SHINE

CERN – kompleks akceleratorów

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LInear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Dostępne wiązki:

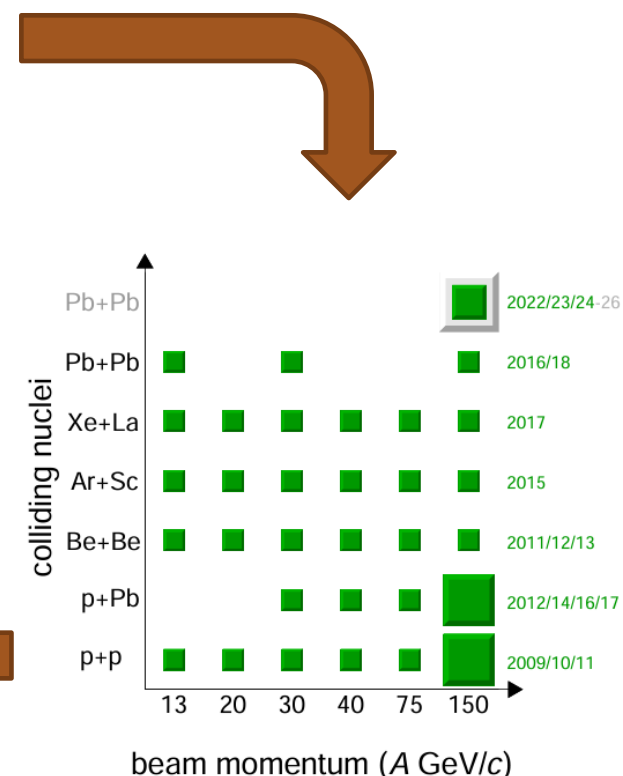
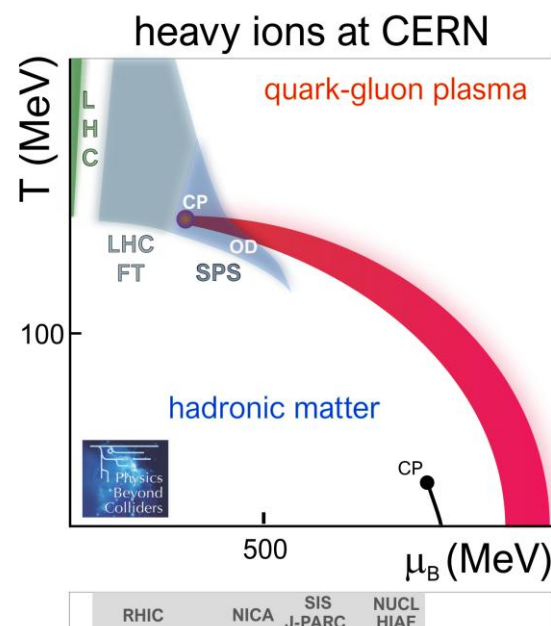
- Pierwotne:
 - Protony 400 GeV/c
 - Jony (Ar, Xe, Pb) at 13A – 150A GeV/c
- Wtórne:
 - Hadrony ($\pi^{+/-}$, $K^{+/-}$, anty- p) at 13 - 400 GeV/c
 - Jony (Be) 13A - 150A GeV/c



NA6I/SHINE program fizyczny

■ Fizyka oddziaływań silnych:

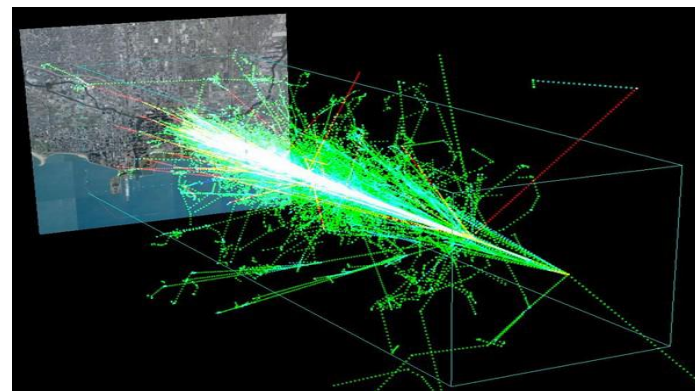
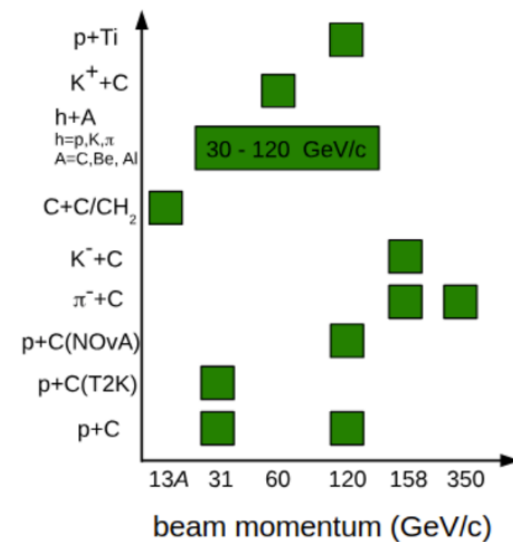
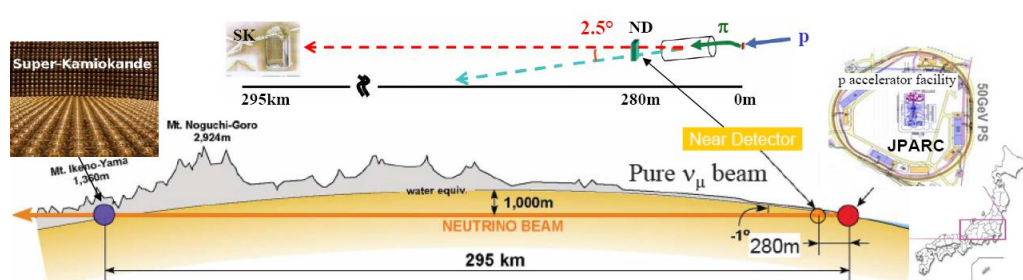
- badanie własności przejścia do plazmy kwarkowo-gluonowej (tzw. „onset of deconfinement”),
- poszukiwanie punktu krytycznego materii silnie oddziałującej,
- bezpośrednie pomiary otwartego powabu.



NA6I/SHINE program fizyczny

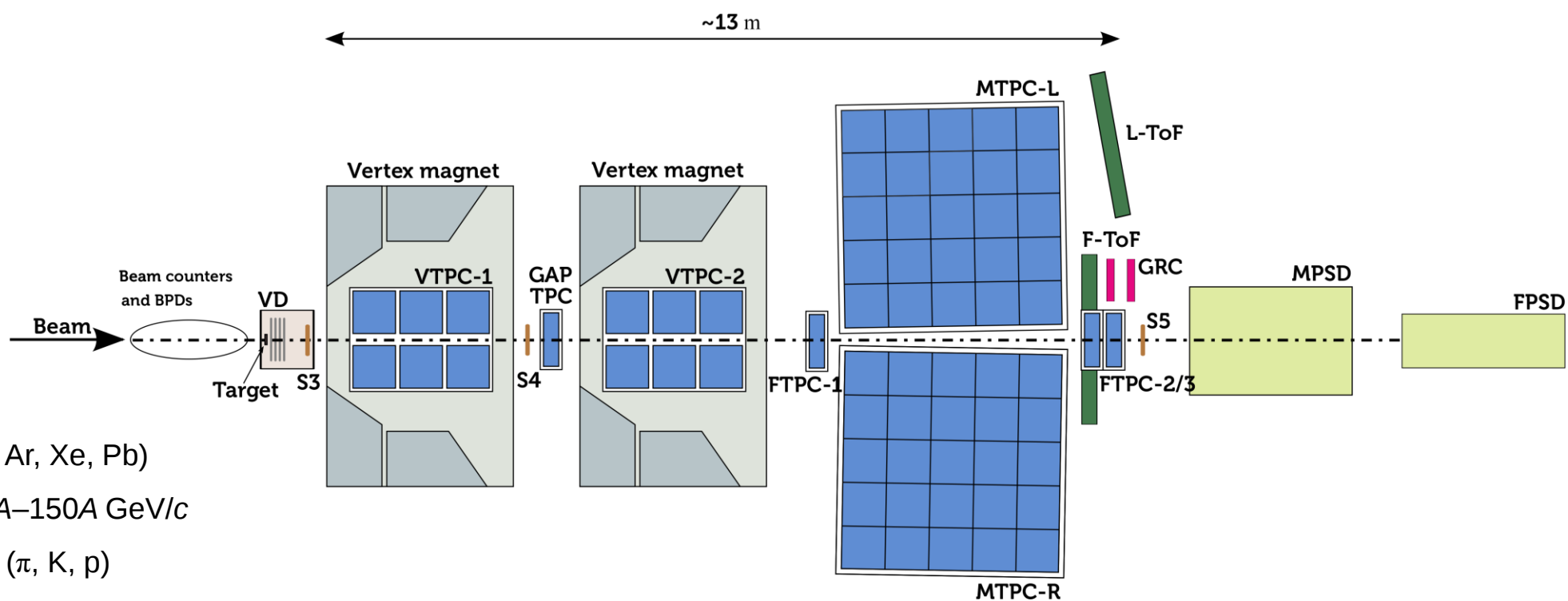
■ Fizyka neutrin i promieniowania kosmicznego:

- pomiary produkcji hadronów na potrzeby programów neutrinowych w J-PARC i Fermilab,
- pomiary produkcji hadronów i przekrojów czynnych fragmentacji jądrowej dla fizyki promieniowania kosmicznego.



NA61/SHINE układ pomiarowy

Eksperyment ze stacjonarną tarczą zlokalizowany przy akceleratorze SPS w CERN.



Wiązki:

- jony (Be, Ar, Xe, Pb)

$$p_{\text{beam}} = 13\text{A} - 150\text{A GeV}/c$$

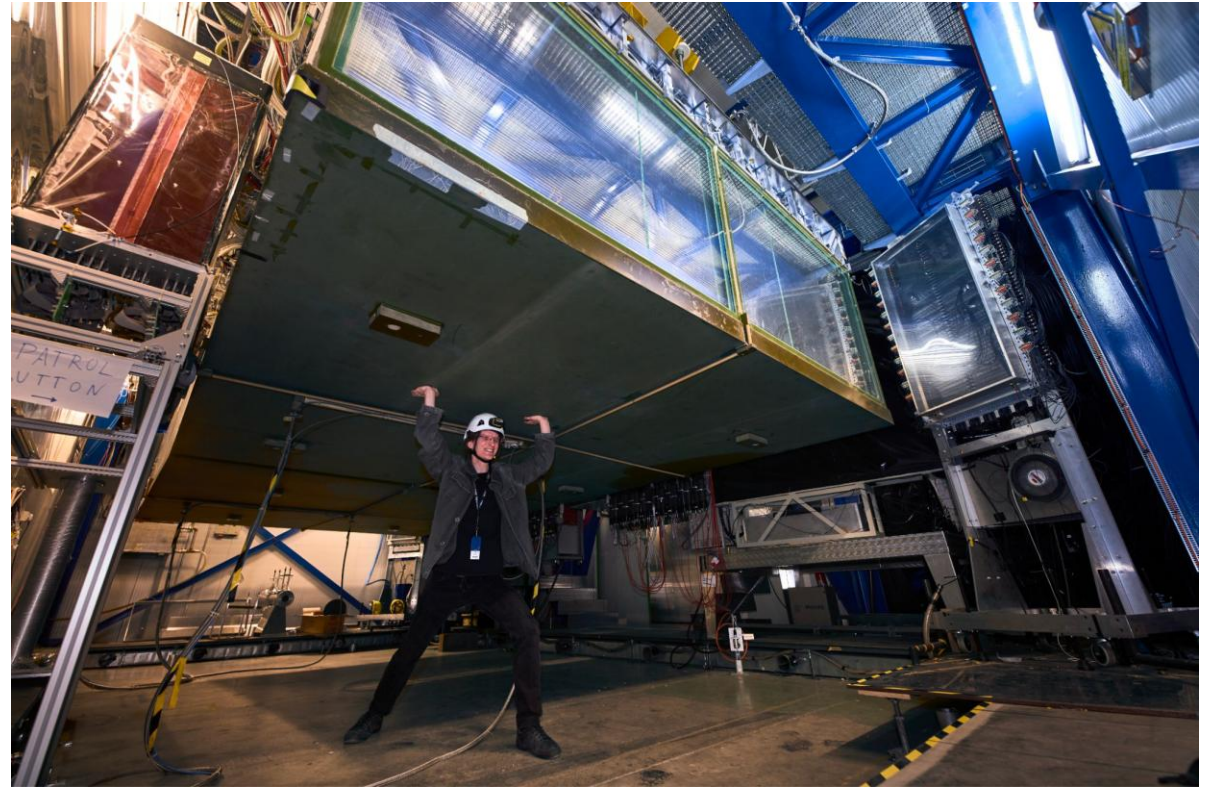
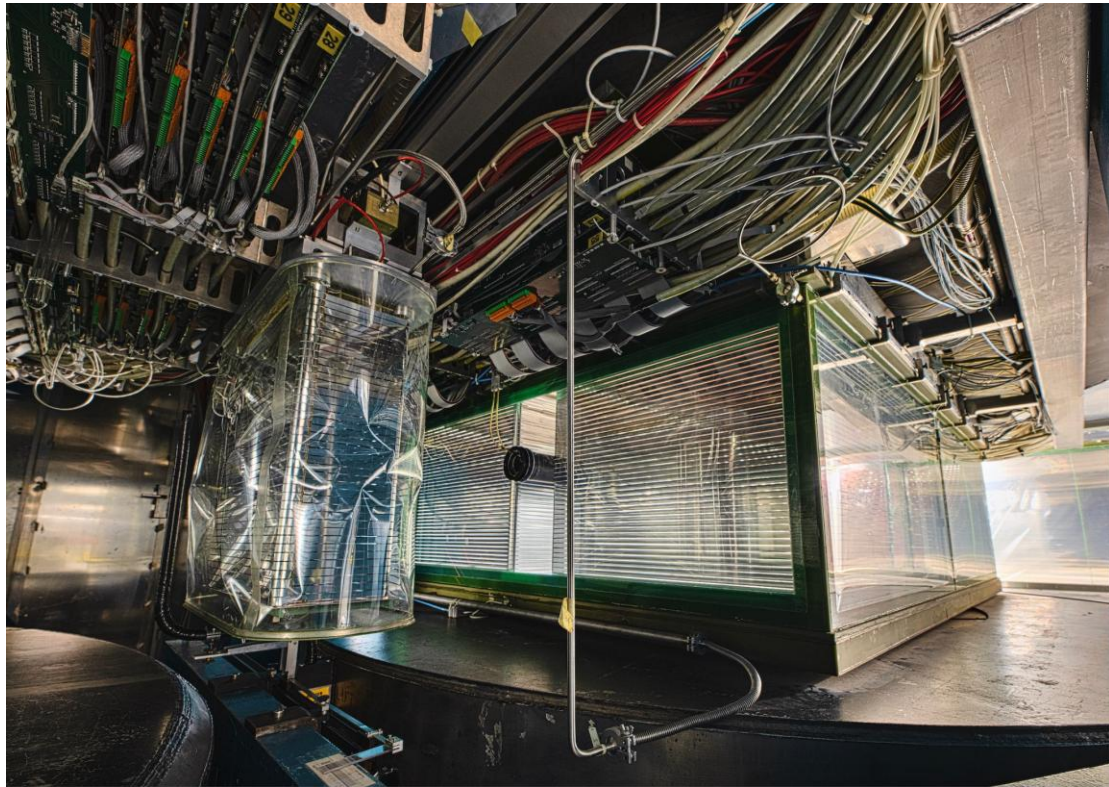
- hadrony (π , K, p)

$$p_{\text{beam}} = 13 - 400 \text{ GeV}/c$$

$$\sqrt{s_{NN}} = 5.1 - 16.8 (27.4) \text{ GeV}$$

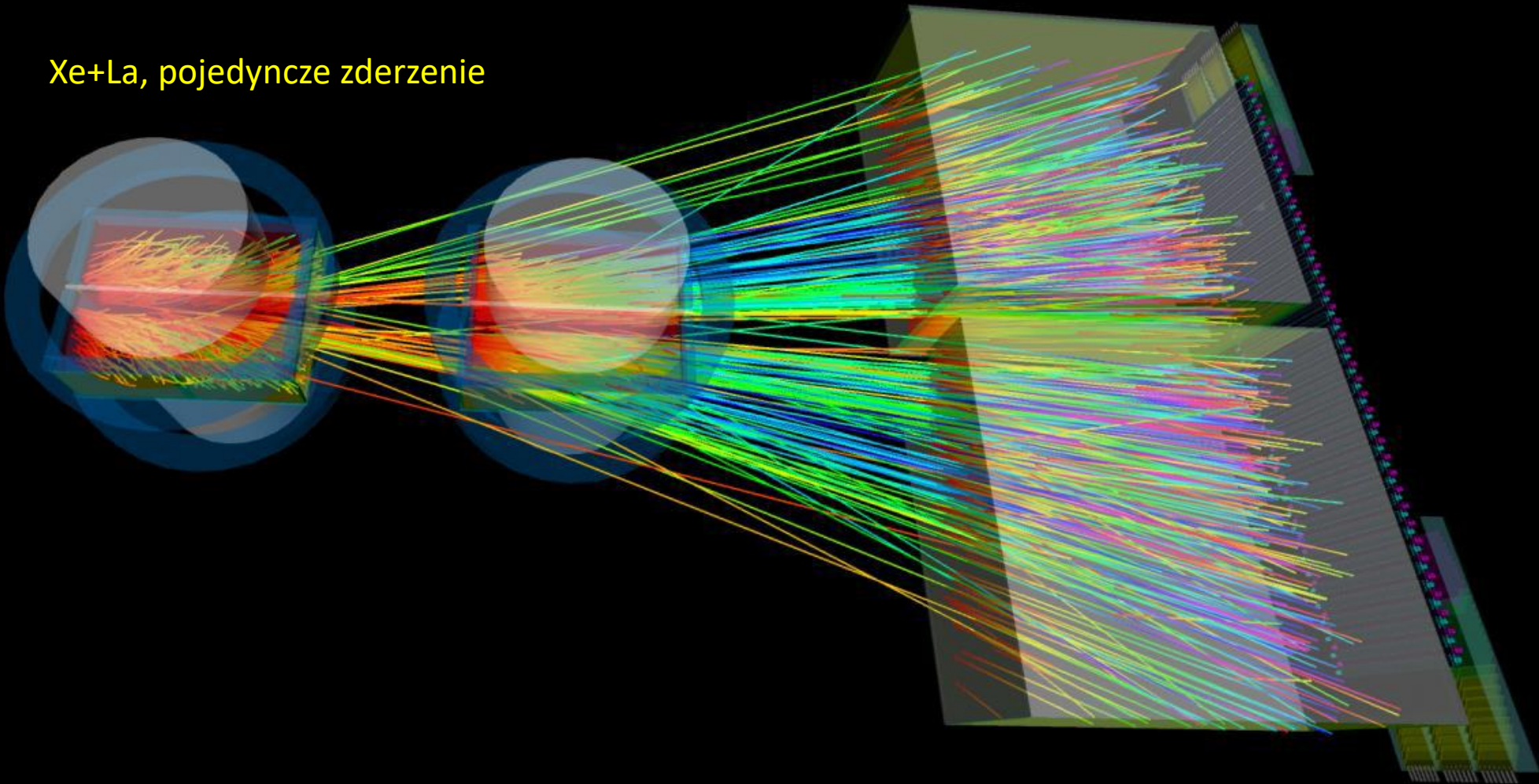
Spektrometr hadronowy o dużej akceptacji.

NA6 I/SHINE układ pomiarowy – komory projekcji czasowej (TPC)



NA6 I/SHINE układ pomiarowy

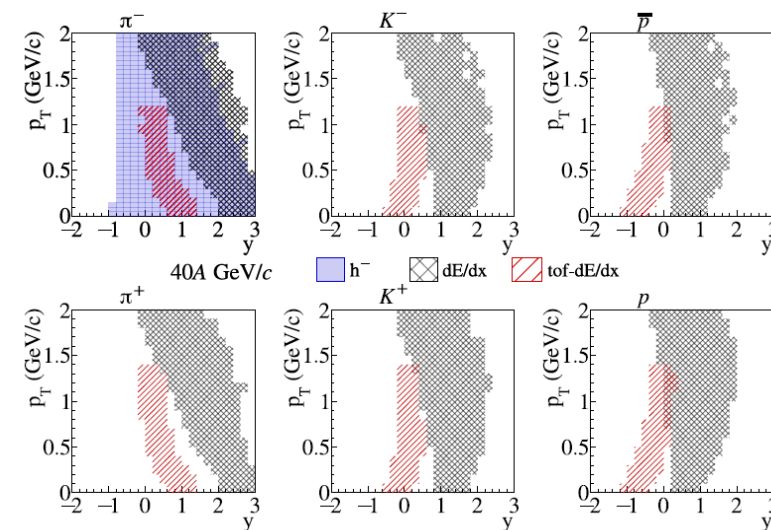
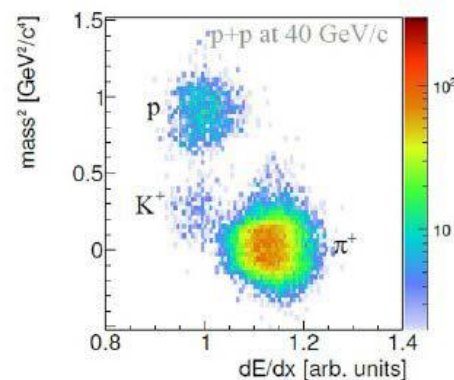
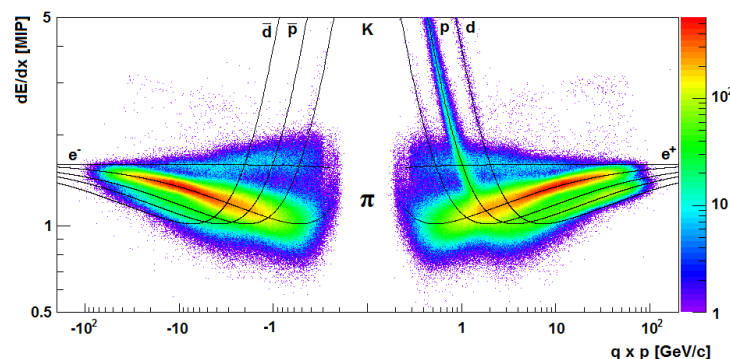
Xe+La, pojedyncze zderzenie



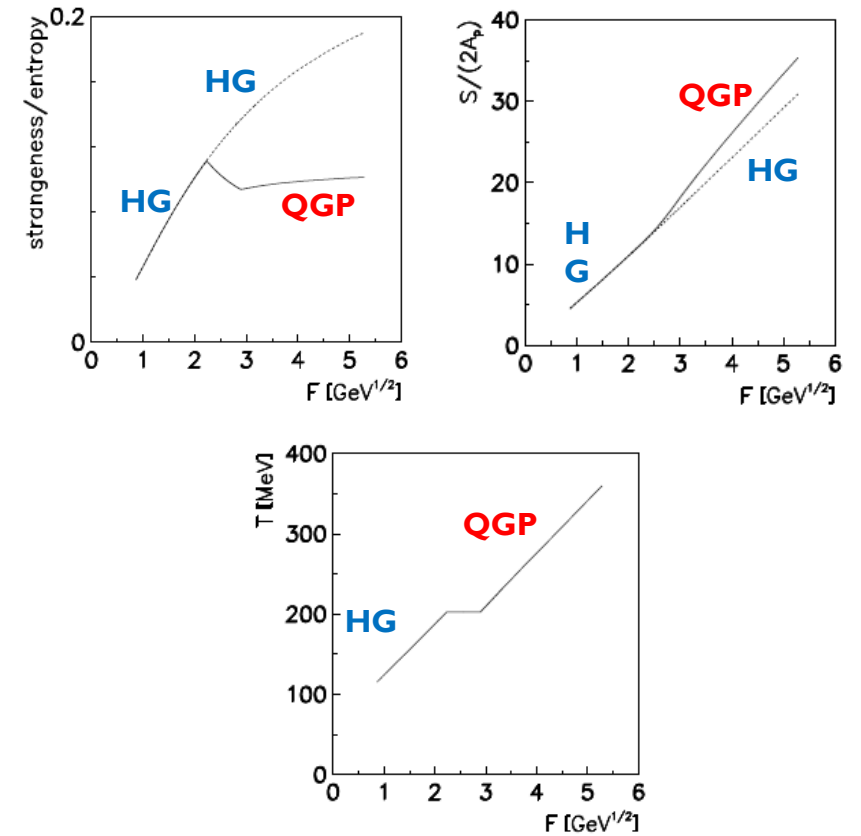
Identyfikacja cząstek naładowanych

Pomiary cząstek pierwotnych wytworzonych w procesach silnych i elektromagnetycznych; skorygowane o geometryczną akceptację detektora i wydajność rekonstrukcji, a także o rozpady słabe i oddziaływania wtórne.

- **Analiza h^-** opiera się na założeniu że większość ujemnie naładowanych cząstek to mezony π^- . Wkład od pozostałych cząstek jest odejmowany z wykorzystaniem symulacji Monte Carlo.
- **Analiza dE/dx** wykorzystuje informację o stratach energii w komorach TPC do identyfikacji cząstek.
- **Metoda tof- dE/dx** szacuje liczby π , K i p na podstawie pomiarów strat energii oraz czasu przelotu cząstek.



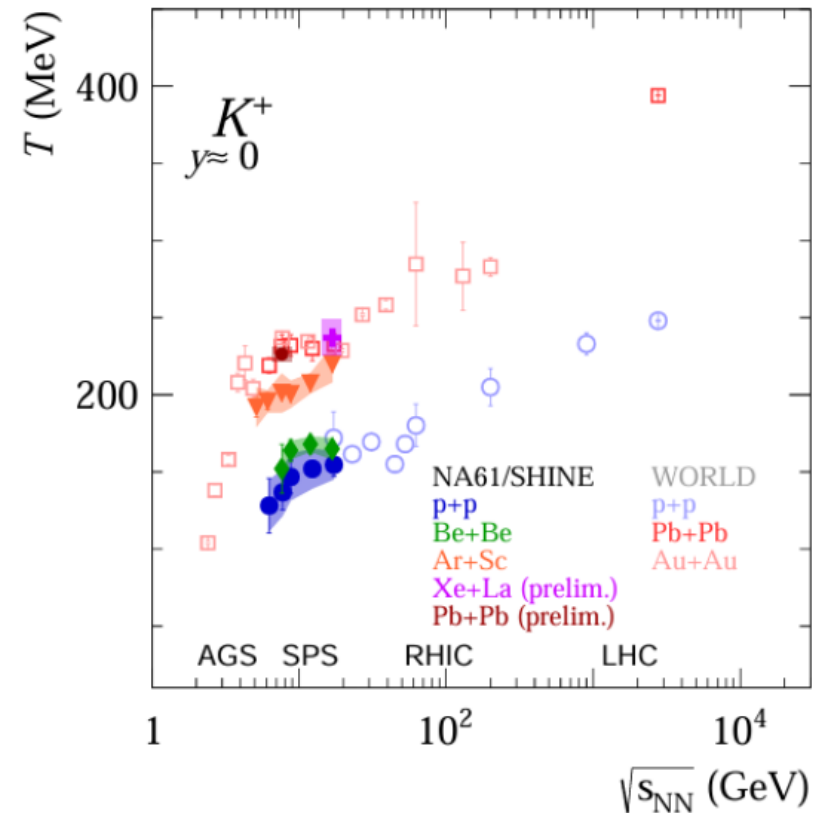
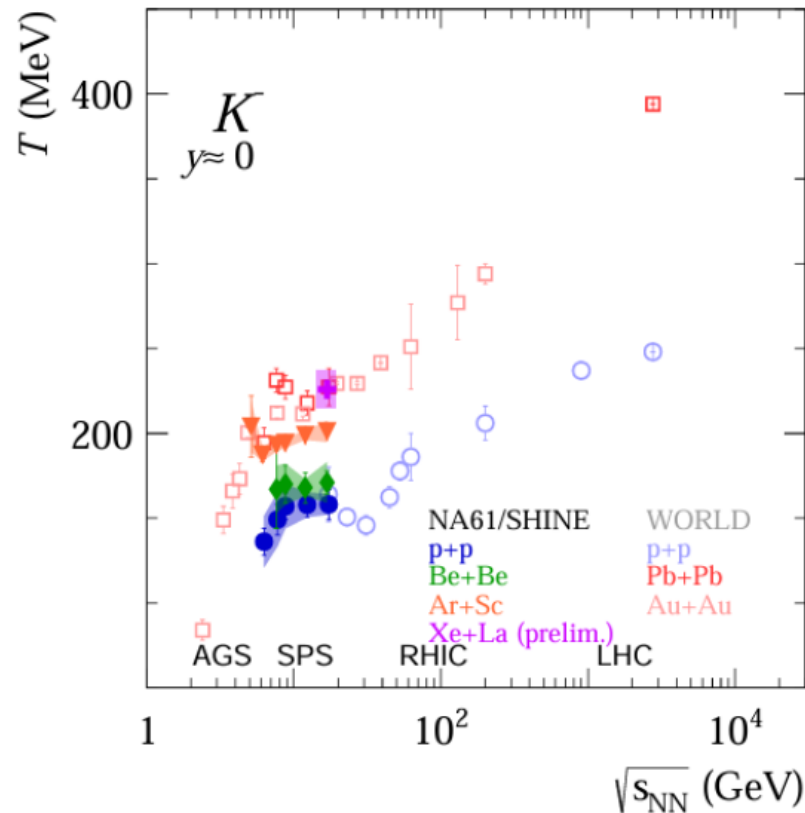
HORN - STEP - KINK



ONSET OF DECONFINEMENT

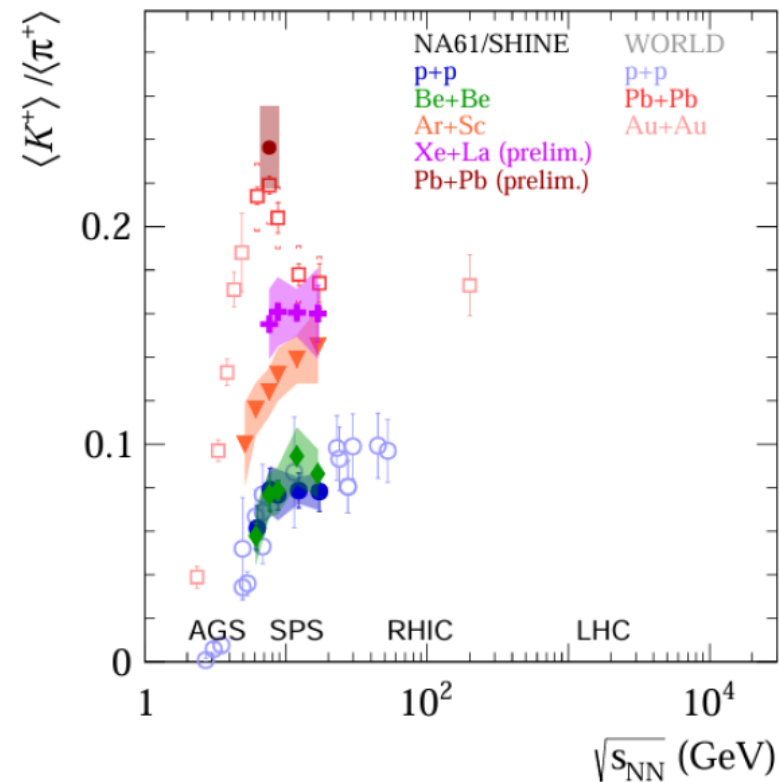
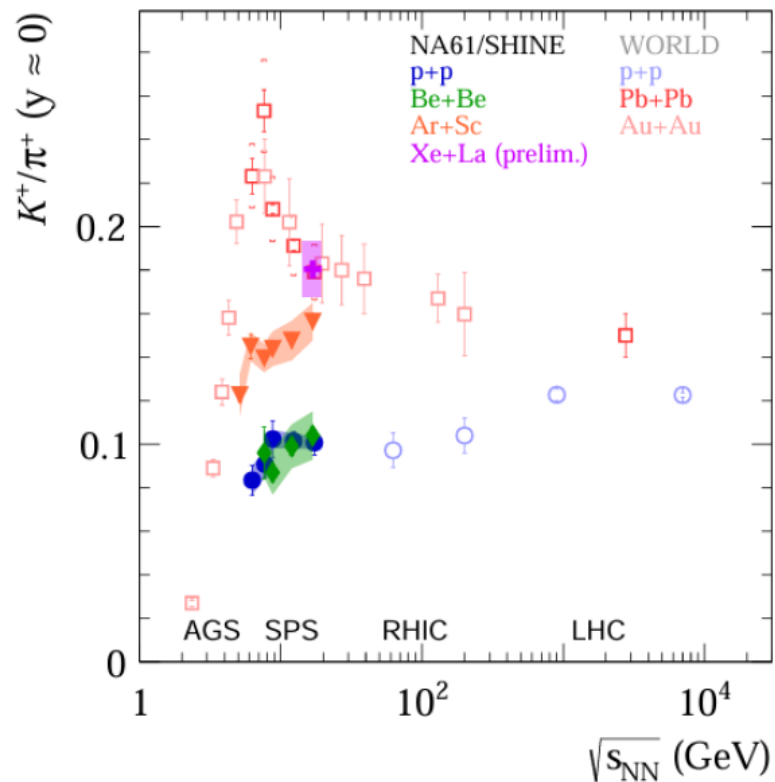
Onset of deconfinement: step

**Jakościowo podobna zależność od energii jest obserwowana w p+p, Be+Be, Ar+Sc i Pb+Pb.
Wartość parametru T rośnie wraz z rozmiarem układu.**



Onset of deconfinement: horn

Xe+La przy niższych energiach poniżej Pb+Pb, jednocześnie wyższe niż w Ar+Sc, Be+Be i p+p.



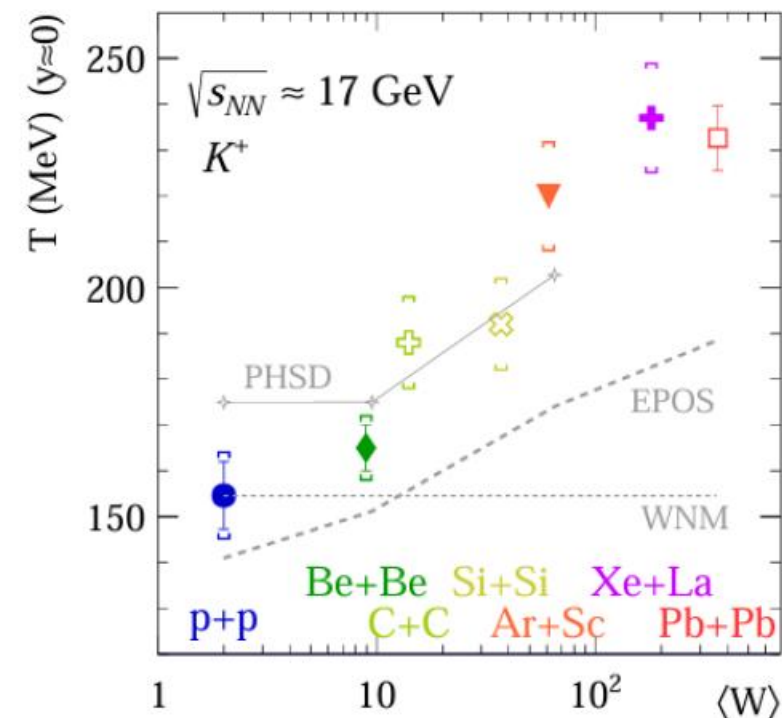
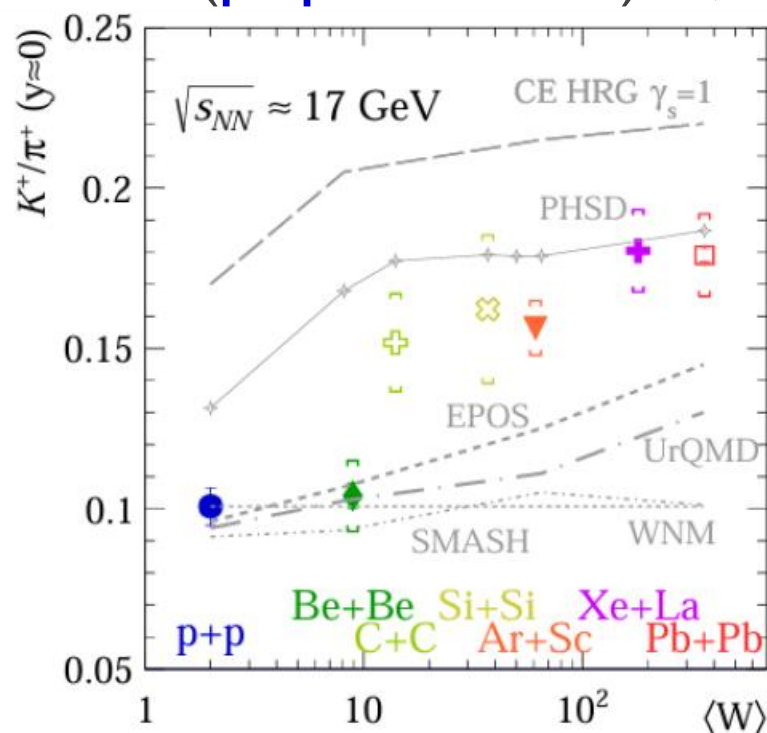


ZALEŻNOŚĆ OD ROZMIARU UKŁADU



K/π i T vs rozmiar układu

$$(p+p \approx \text{Be+Be}) \leq \text{Ar+Sc} \leq (\text{Xe+La} \approx \text{Pb+Pb})$$



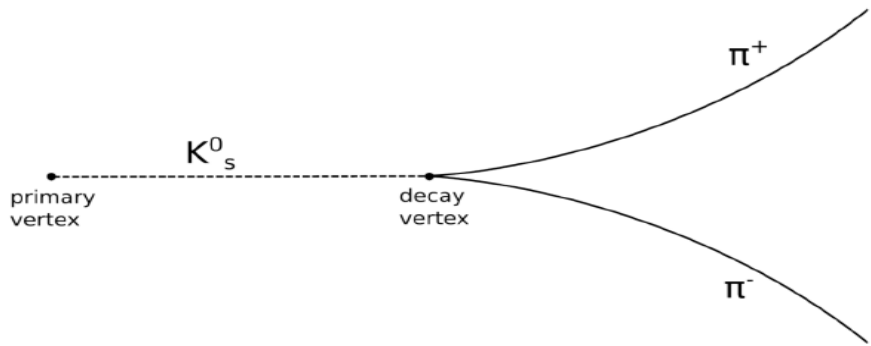
Żaden z modeli nie odtwarza
stosunku K^+/π^+ i T dla całego zakresu $\langle W \rangle$.

PHSD: Eur.Phys.J.A 56 (2020) 9, 223, arXiv:1908.00451 and private communication;
SMASH: J.Phys.G 47 (2020) 6, 065101 and private communication;
UrQMD and HRG: Phys. Rev. C99 (2019) 3, 034909;

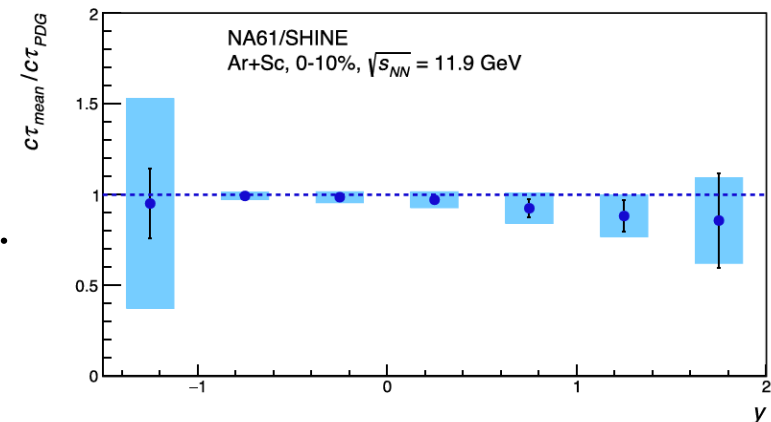
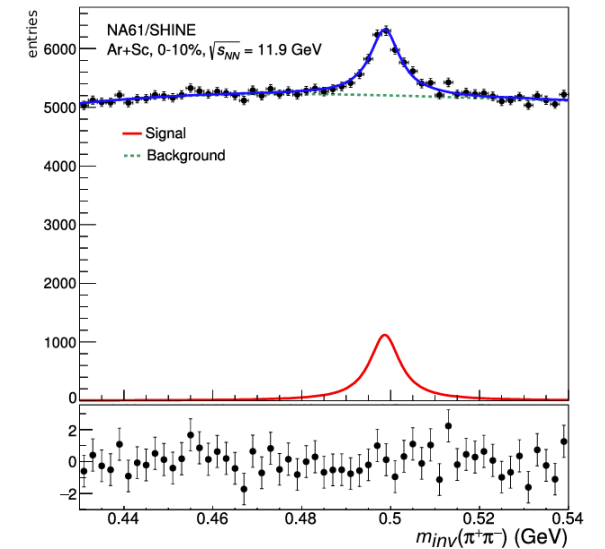
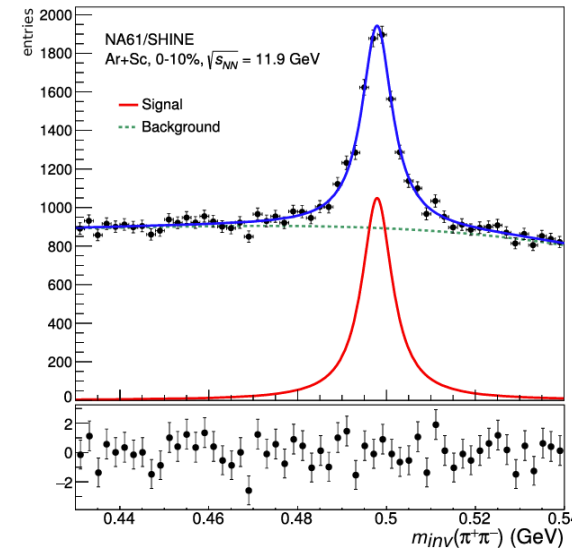


ANOMALIA W PRODUKCJI KAONÓW NAŁADOWANYCH/NEUTRALNYCH

Detekcja neutralnych K_S^0 (Ar+Sc at 75A GeV/c)



- Rekonstrukcja oparta na topologii rozpadu.
- K_S^0 rozpada się na π^+ i π^- z prawdopodobieństwem $\text{BR} \approx 69,2\%$.
- Do opisu sygnału używana jest funkcja Breita-Wignera.



Symetria zapachowa

- Masy kwarków u i d są podobne i małe ($\Lambda_{\text{QCD}} \sim 200 \text{ MeV}$).
- Proton (uud) vs neutron (udd): różnica mas wynosi 0,14%.

W ogólności symetria zapachowa jest łamana:

$$P(t\bar{t}) \ll P(u\bar{u})$$

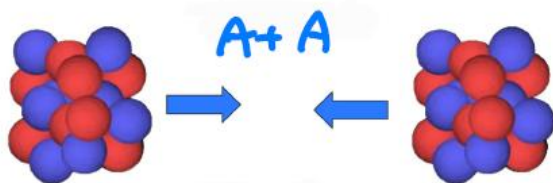
jednak masy u i d są podobne i małe stąd powinny zachowywać symetrię zapachową:

$$P(u\bar{u}) = P(d\bar{d})$$

Kwark	Masa
u	$2,16 \pm 0,07 \text{ MeV}$
d	$4,70 \pm 0,07 \text{ MeV}$
s	$93,5 \pm 0,8 \text{ MeV}$
c	$1,2730 \pm 0,0046 \text{ GeV}$
b	$4,183 \pm 0,007 \text{ GeV}$
t	$172,56 \pm 0,31 \text{ GeV}$

Najprostszy eksperymentalny test przewidywań symetrii zapachowej

- Kolizja dwóch jąder



- Zmierz stosunek wyprodukowanych kaonów naładowanych do neutralnych

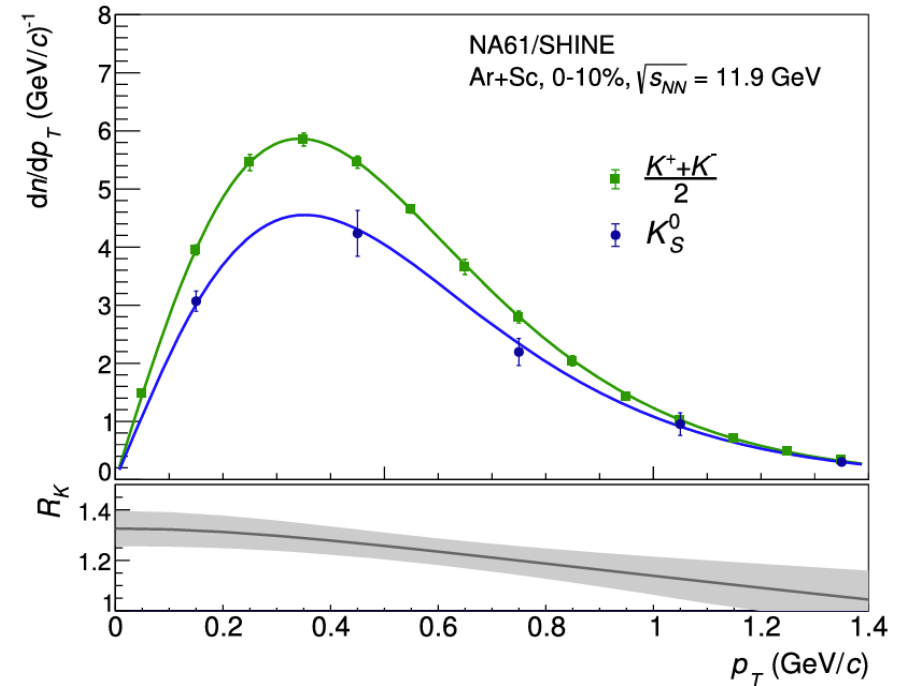
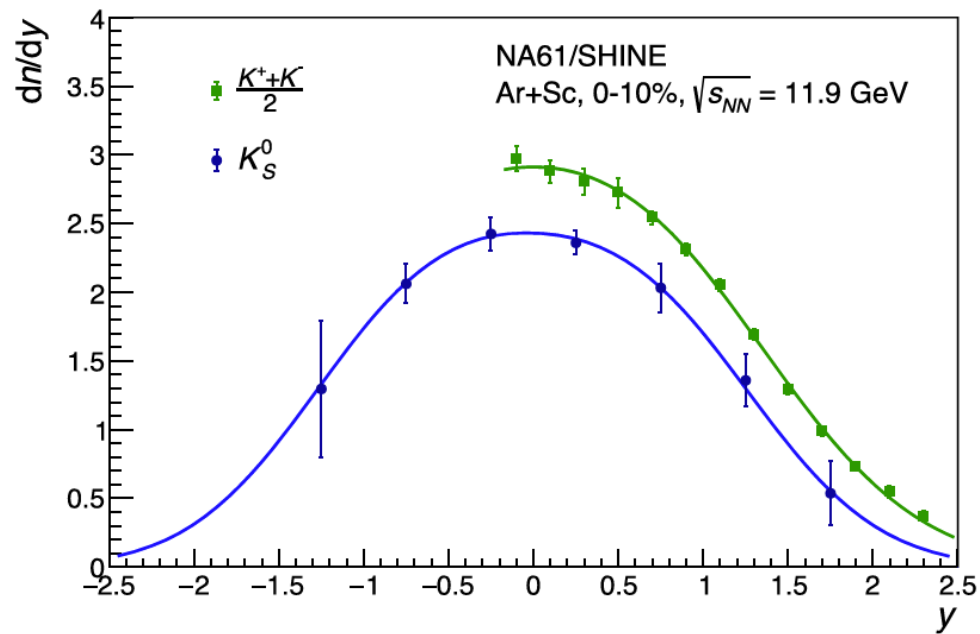
$$\langle K^+(u\bar{s}) \rangle = \langle K^0(d\bar{s}) \rangle \quad \langle K^-(\bar{u}s) \rangle = \langle \bar{K}^0(\bar{d}s) \rangle$$

$$\frac{\langle K^+ = u\bar{s} \rangle + \langle K^- = \bar{u}s \rangle}{\langle K_S^0 = d\bar{s} \rangle + \langle \bar{K}_S^0 = \bar{d}s \rangle} = \frac{\langle K^+ \rangle + \langle K^- \rangle}{2 \langle \bar{K}_S^0 \rangle} = 1$$



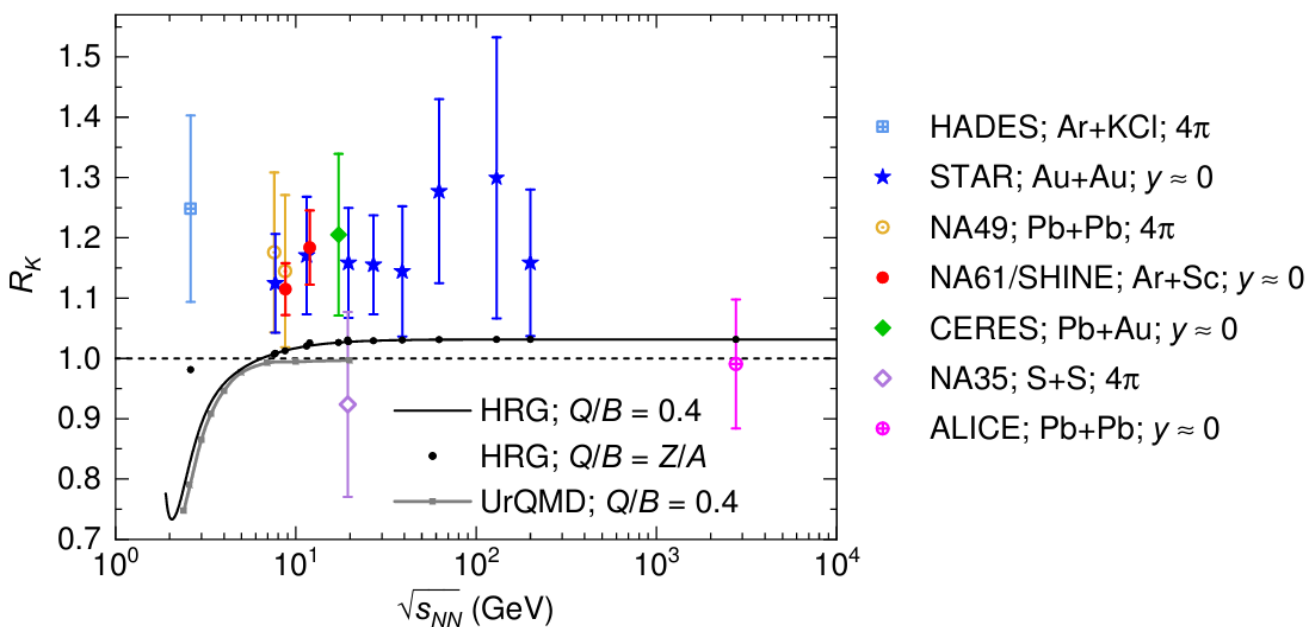
Zakładając zderzenie jąder $N=Z$ i pomijając (1%) różnicę mas między kaonami naładowanymi a neutralnymi.

Produkcja K_S^0 w porównaniu K^+ i K^- (Ar+Sc at 75A GeV/c)



Wyniki NA61/SHINE dla zderzeń Au+Sc: $\sim(18.4 \pm 6.1)\%$ (w zakresie tzw. mid-rapidity) więcej kaonów naładowanych niż neutralnych.

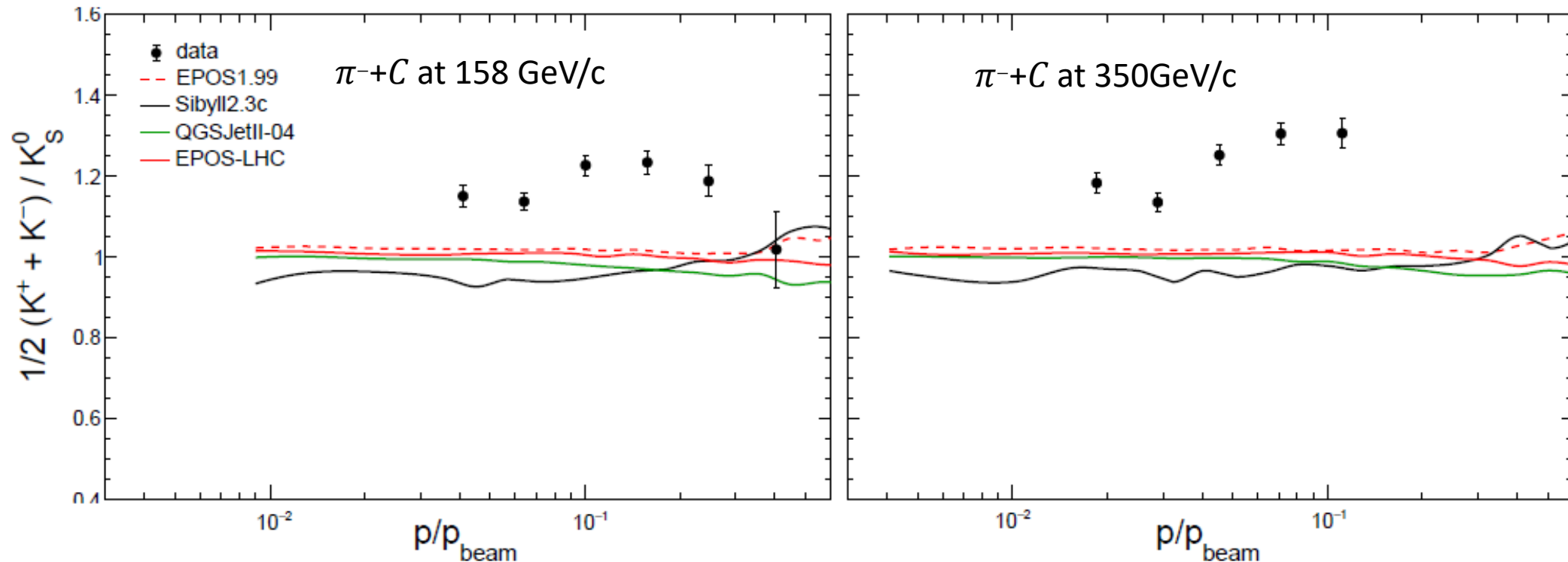
Kaony naładowane vs neutralne w innych eksperymentach



$$R_K = \frac{\langle K^+ \rangle + \langle K^- \rangle}{2\langle K_S^0 \rangle}$$

- Nieoczekiwany nadmiar produkcji kaonów naładowanych w stosunku do neutralnych w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy energii w układzie środka masy 11,9 GeV na parę nukleonów.
- Zmierzony nadmiar odpowiada około czterem dodatkowym kaonom K^+ lub K^- wyprodukowanym w jednej centralnej kolizji Ar+Sc.
- Nadmiar kaonów naładowanych w stosunku do neutralnych, na poziomie około 12%, zaobserwowano także w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy 8,8 GeV.

Produkcja K_S^0 w porównaniu K^+ i K^- : $\pi^- + C$ dla 158 i 350 GeV/c



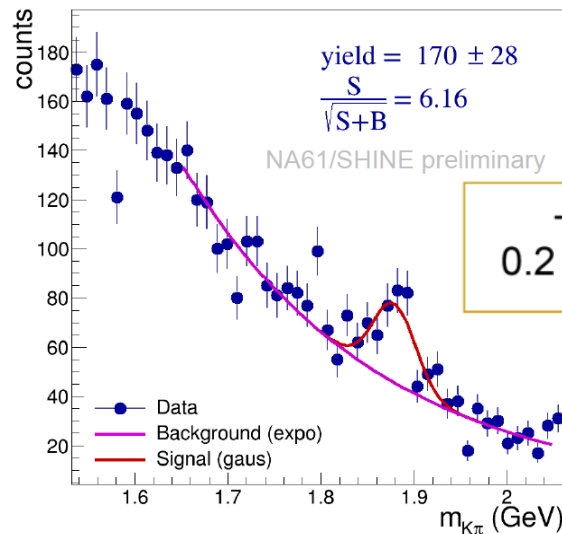
Modele nie potrafią opisać stosunku kaonów naładowanych do neutralnych, nawet dla małych, niesymetrycznych układów.



BEZPOŚREDNIE POMIARY OTWARTEGO POWABU

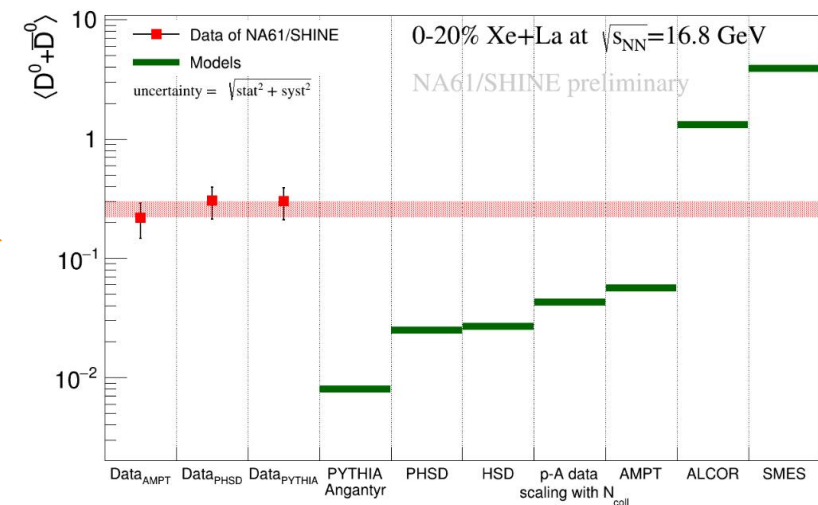


Pomiary D^0 i $\bar{D}^0$ w zderzeniach Xe+La



- Pierwsza w historii bezpośrednia obserwacja sygnału przy energiach SPS z istotnością większą niż 5σ .
- Korekcje wykonane za pomocą symulacji GEANT4 przy użyciu trzech modeli: AMPT, PHSD, PYTHIA/Angantyr.
- Dokładne dane pozwalają odróżnić przewidywania różnych modeli.
- Nowe zdarzenia Pb+Pb (2022–2024) są obecnie analizowane.

Correction made with:	Yield in 4π $\langle D^0 + \bar{D}^0 \rangle$
AMPT	$0.218 \pm 0.039(\text{stat}) \pm 0.060(\text{syst})$
PHSD	$0.303 \pm 0.054(\text{stat}) \pm 0.074(\text{syst})$
PYTHIA/Angantyr	$0.300 \pm 0.052(\text{stat}) \pm 0.075(\text{syst})$

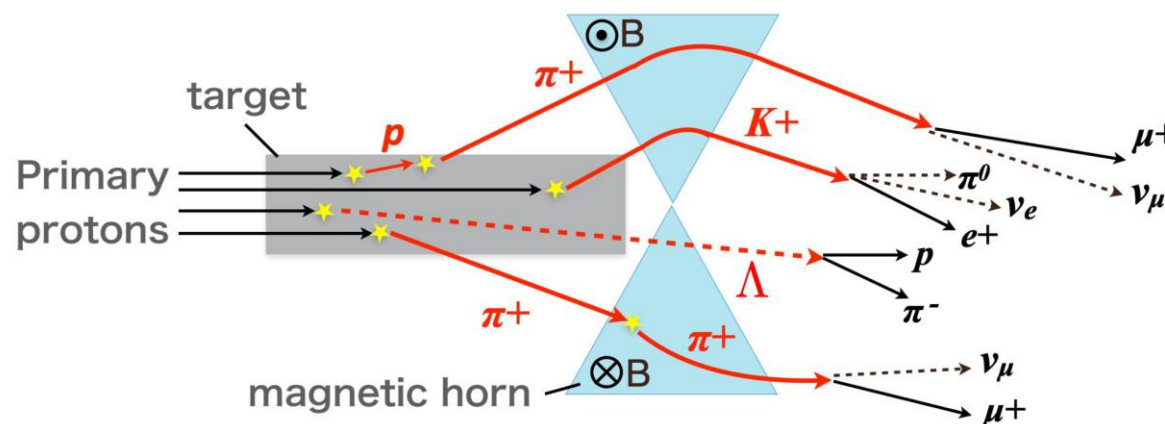




POMIARY PRODUKCJI HADRONÓW NA POTRZEBY PROGRAMÓW NEUTRINOWYCH

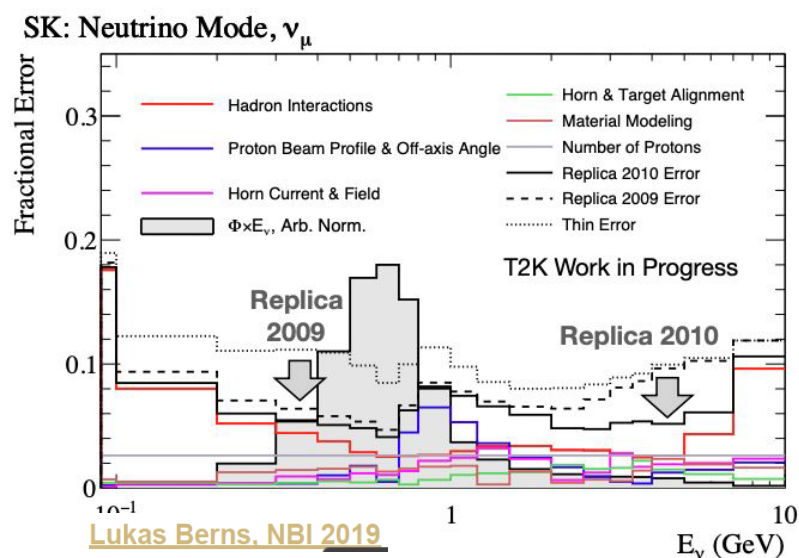
Dlaczego mierzyć produkcję hadronów?

- Niepewność strumienia (flux) ogranicza precyzję pomiarów w eksperymentach neutrinowych opartych na akceleratorze:
- Głównym źródłem niepewności jest produkcja hadronów.
- Symulacje strumienia neutrinowego opierają się na modelach oddziaływań hadronowych używanych w generatorach zdarzeń MC, które niosą ze sobą dużą niepewność.
- Dlatego ważne jest posiadanie ograniczeń dotyczących procesów hadronowych:
 - Pierwotne oddziaływanie hadronu z tarczą.
 - Oddziaływania wtórne:
 - Wewnątrz tarczy.
 - W innych materiałach.

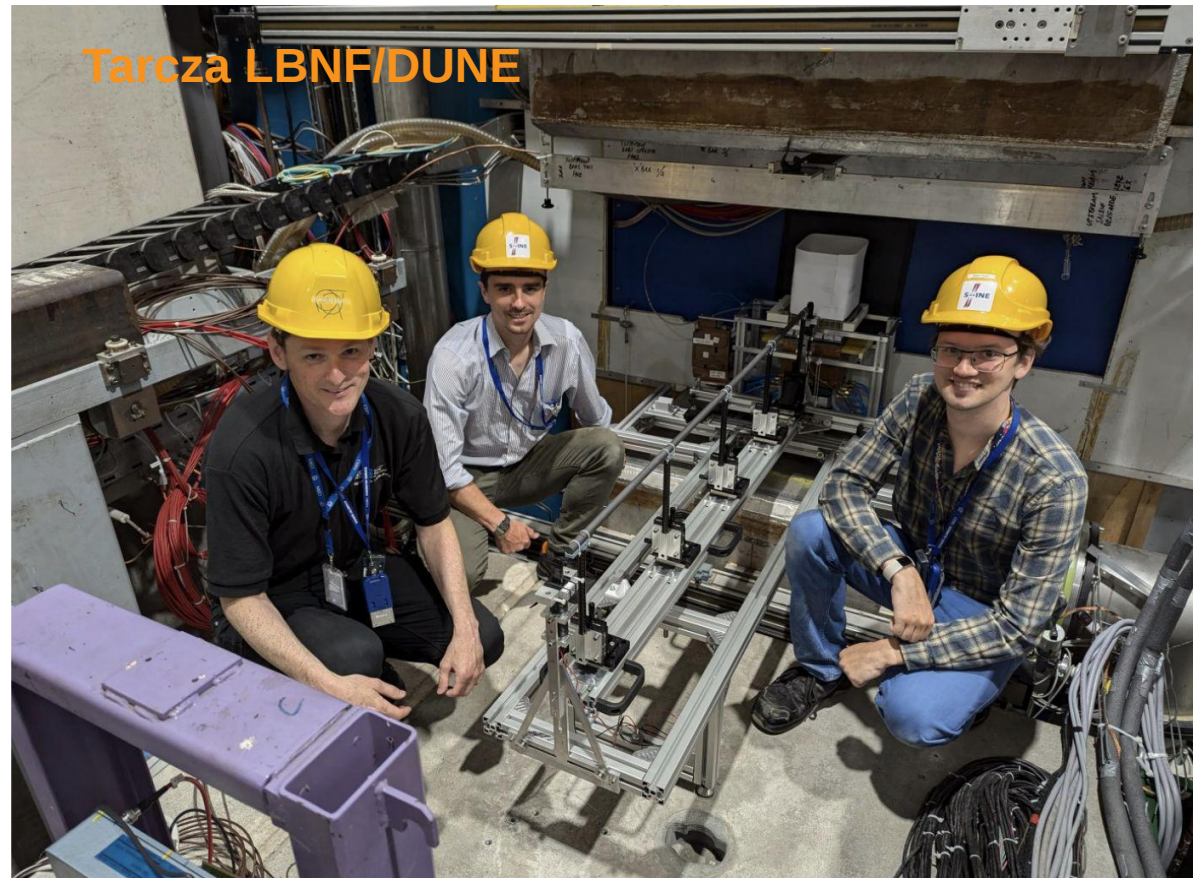
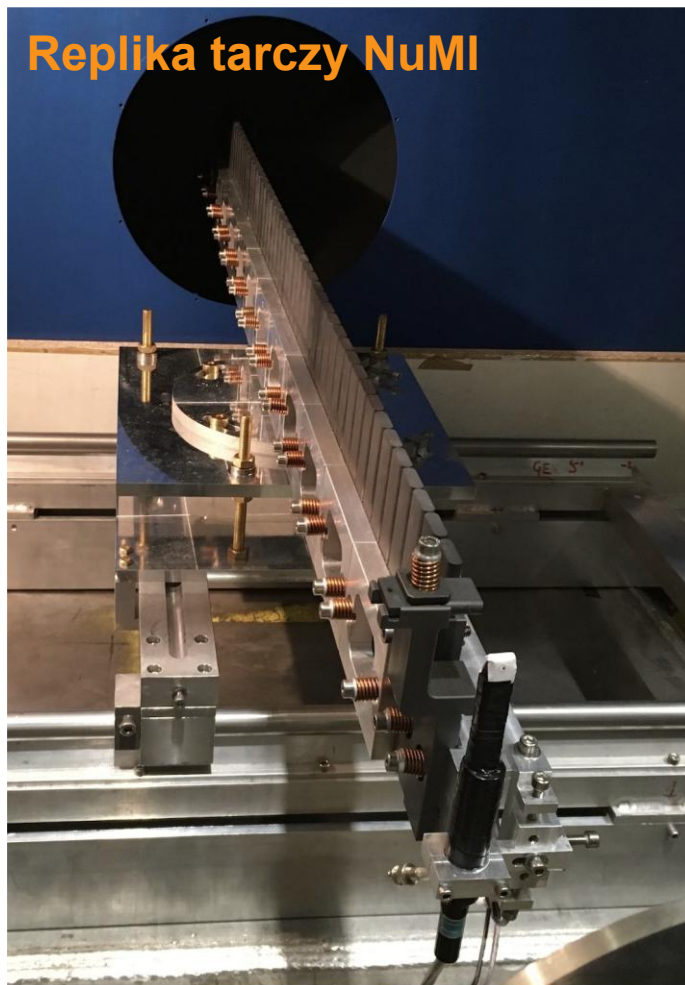


Pomiary NA6 I/SHINE dla eksperymentu T2K – przykład

- Pierwsza udana realizacja pomiarów produkcji hadronów przy użyciu repliki tarczy w przewidywaniu strumienia neutrin:
 - Zredukowano niepewność strumienia T2K do ~5%.
- Nowa analiza koncentruje się na produkcji kaonów:
 - W 2022 roku zebrane dane z repliką tarczy charakteryzują się 18-krotnie większą statystyką.



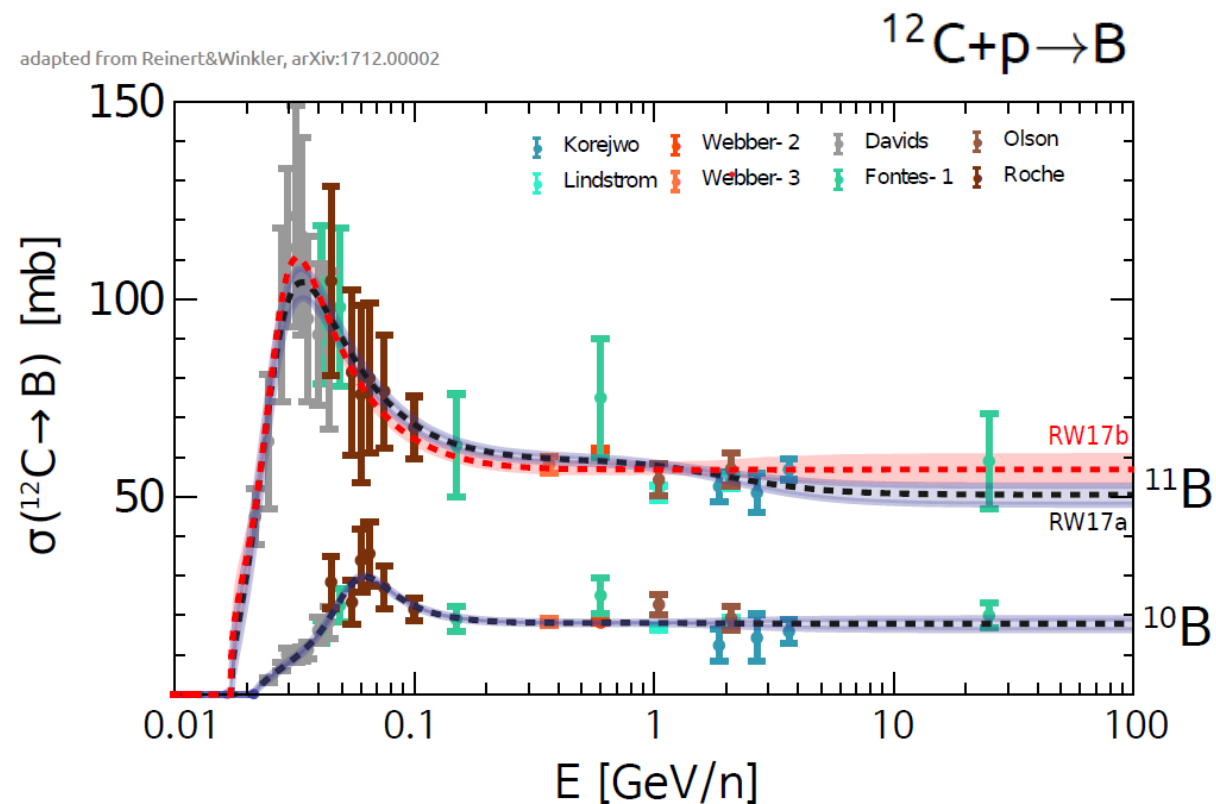
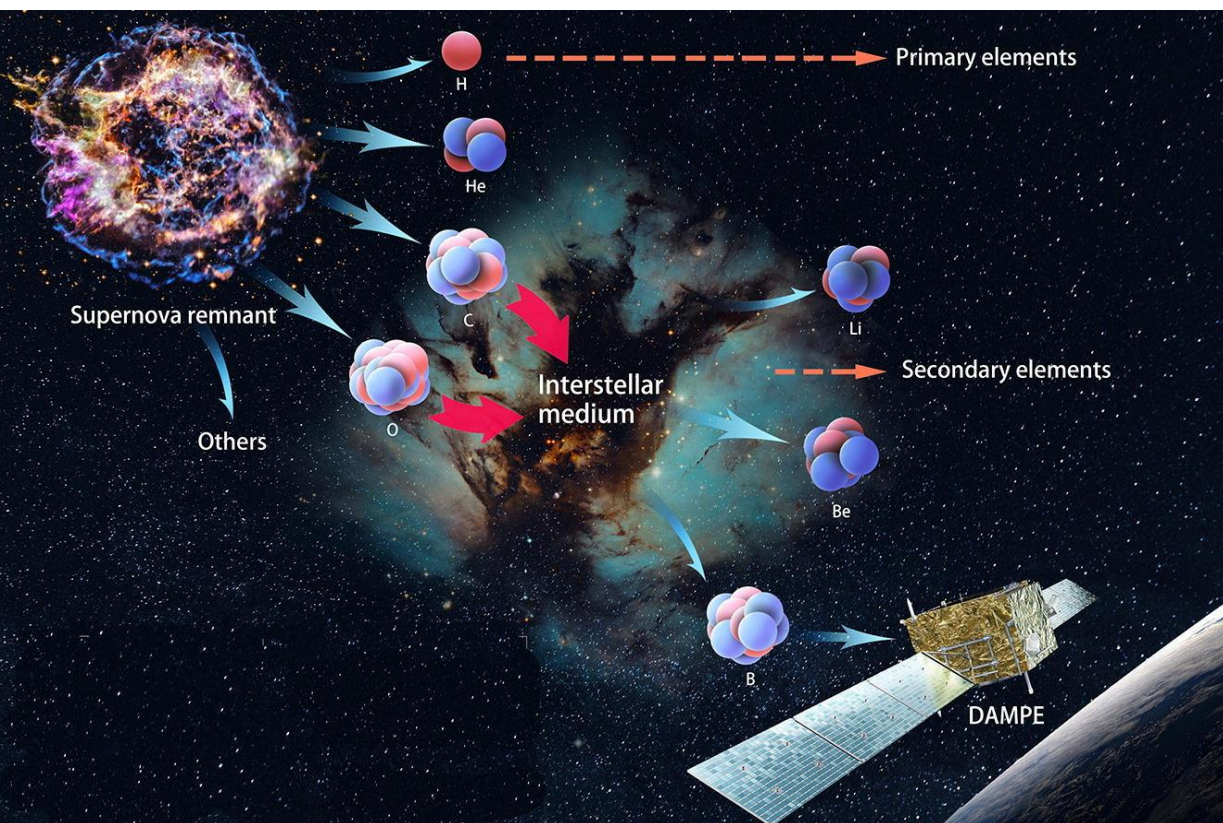
Pomiary NA6 I/SHINE dla eksperymentów LBNF/DUNE i NuMI



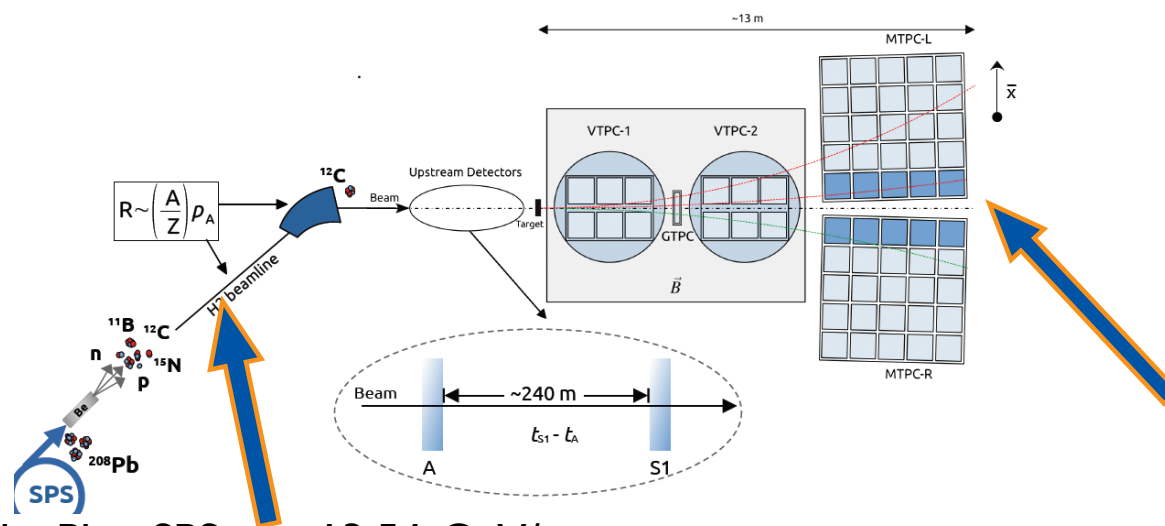


POMIARY PRODUKCJI HADRONÓW DLA FIZYKI PROMIENIOWANIA KOSMICZNEGO

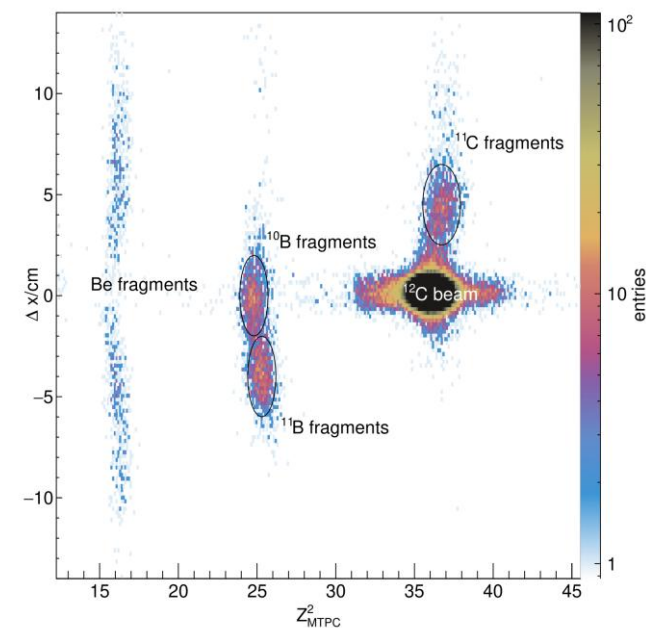
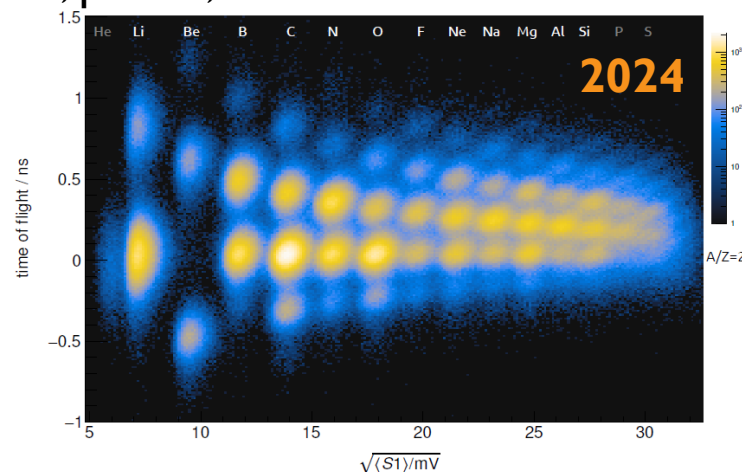
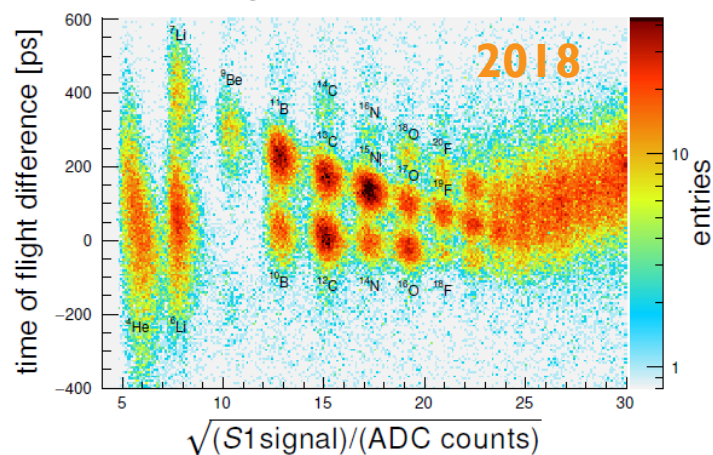
Pomiary procesów fragmentacji dla fizyki promieniowania kosmicznego



Pomiary procesów fragmentacji dla fizyki promieniowania kosmicznego



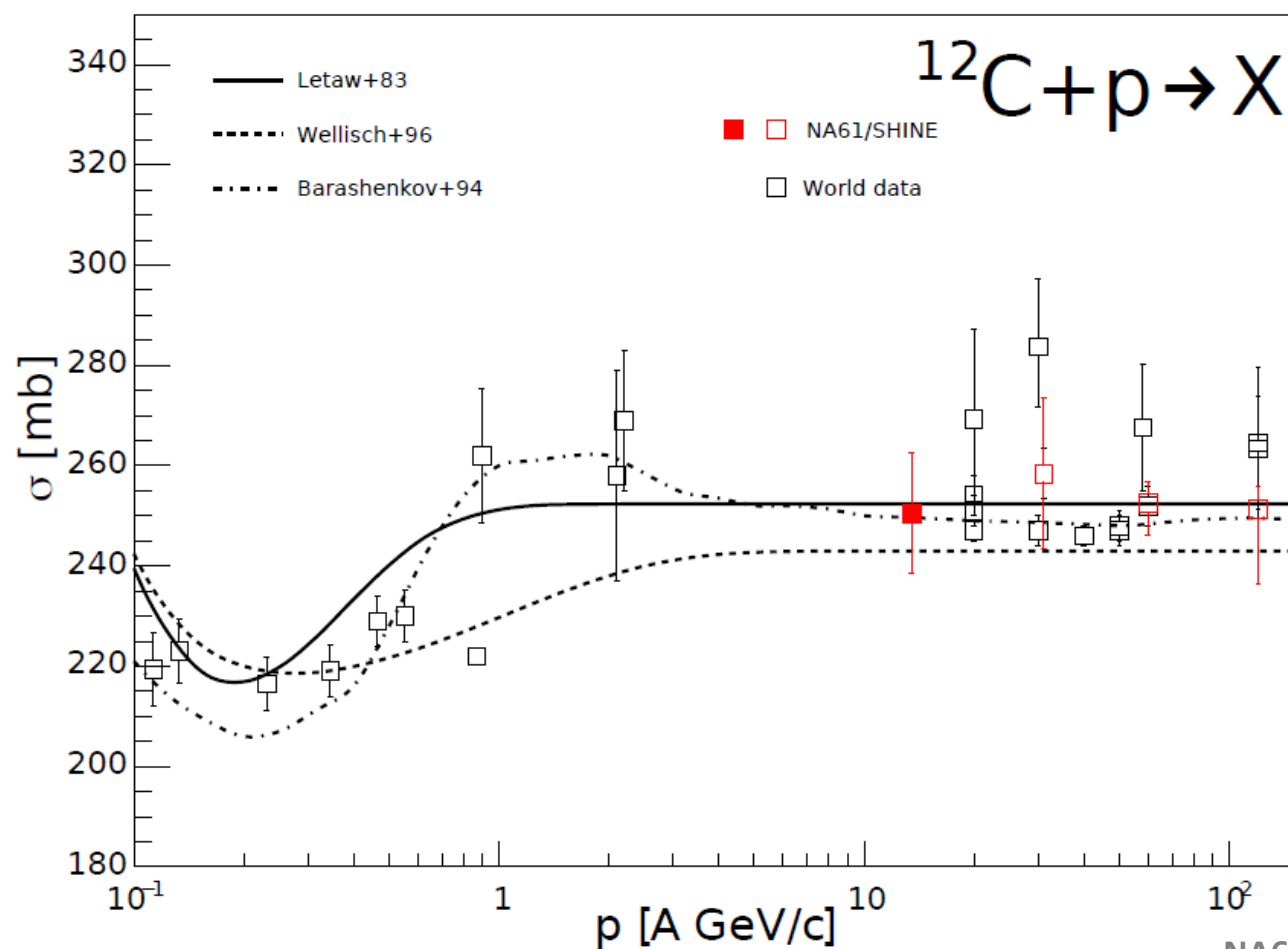
fragmentowana wiązka Pb z SPS, $p = 13,5A$ GeV/c



fragmenty zmierzone w MTPC

Pomiary procesów fragmentacji dla fizyki promieniowania kosmicznego

Przekrój czynny na zmianę masy w zderzeniach C+p



Plany pomiarowe

- Planowane pomiary z użyciem lekkich jonów – głównie O, Mg oraz B.
 - Badania zależności od wielkości układu
 - Testowanie symetrii izosponowej.
- Program pomiarów otwartego powabu („charm”).
 - pomiar korelacji charm–anticharm ($c\text{--}\bar{c}$) w centralnych zderzeniach Pb+Pb przy 150A GeV/c.
- Neutrino i astrofizyka promieniowania kosmicznego.
 - Rozbudowa programów fizyki neutrinowej i kosmicznej z wykorzystaniem replik i prototypów tracz oraz poprawa precyzji pomiarów hadronowych i fragmentacyjnych

Podsumowanie



- W skład współpracy wchodzi 140 fizyków, reprezentujących 28 instytucji z 14 krajów (9 polskich instytucji).
- Celem NA61/SHINE jest badanie interakcji hadronów i jąder w szerokim zakresie energii i układów.
- NA61/SHINE wnosi bardzo duży wkład w badania oddziaływań silnych (QCD w warunkach wysokiej gęstości energii).
 - Systematyczny skan energii i rozmiaru układu (p+p, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La, Pb+Pb).
 - Badanie przejścia fazowego od materii hadronowej do plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP).
 - Poszukiwanie punktu krytycznego QCD.
 - Zależność od rozmiaru układu (*system size dependence*) – Odkryto wyraźną zależność obserwabli od wielkości układu: $(p+p \approx \text{Be+Be}) < \text{Ar+Sc} < (\text{Xe+La} \approx \text{Pb+Pb})$.
 - Produkcja hadronów i mezonów – Obserwacja nadmiaru produkcji naładowanych mezonów K względem neutralnych.
 - Produkcja otwartego powabu – pierwszy bezpośredni pomiar produkcji D-mezonów w zderzeniach A+A przy energiach SPS.
- Dostarcza eksperymentom neutrinowym kluczowych danych o produkcji hadronów i fragmentacji jąder; umożliwia realistyczne pomiary na replikach tarcz oraz redukuje niepewności strumienia neutrin do poziomu kilku procent – co bezpośrednio przekłada się na większą czułość eksperymentów T2K, NOvA i DUNE.
- NA61/SHINE dostarcza unikalnych danych eksperymentalnych o produkcji i fragmentacji jąder w zakresie energii istotnym dla promieniowania kosmicznego. Dane te:
 - poprawiają modele propagacji promieniowania kosmicznego,
 - wspierają interpretację wyników z misji AMS-02, PAMELA, CALET, DAMPE,
 - pomagają w modelowaniu kaskad atmosferycznych i promieniowania wtórnego.



DZIĘKUJE ZA UWAGĘ

seweryn.kowalski@us.edu.pl