

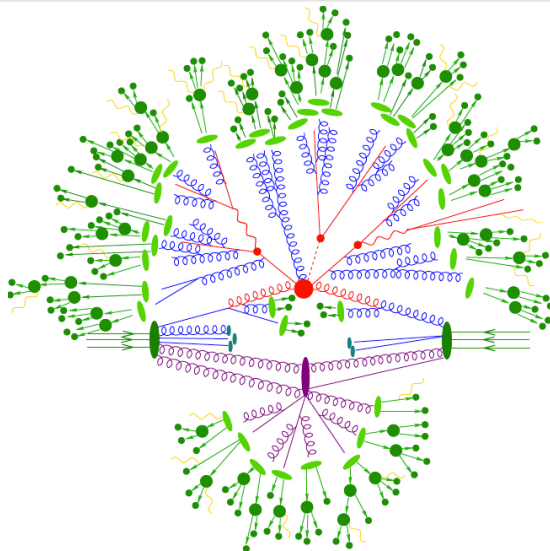
Pomiary procesów ekskluzywnych w zderzeniach proton-proton z detekcją protonów rozproszonych "do przodu"

Rafał Sikora

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek

5 listopada 2021, Kraków

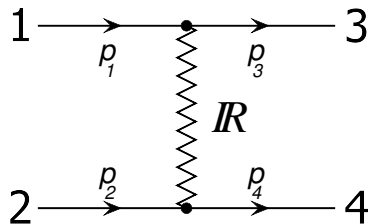
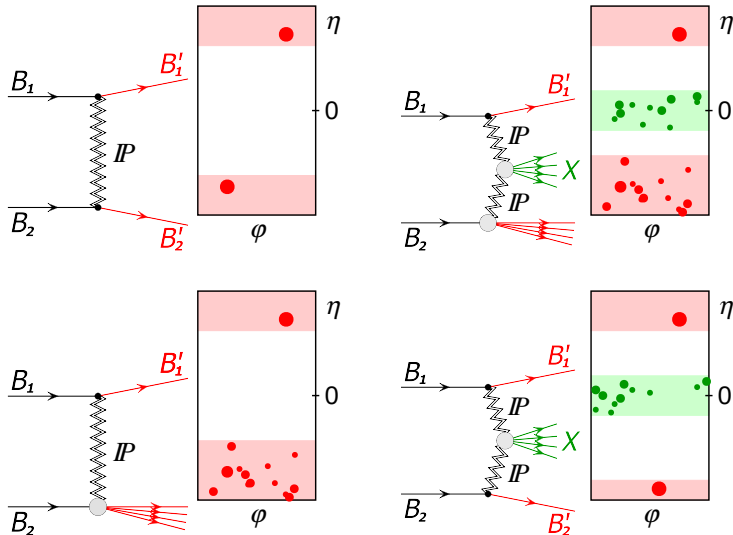




Grafiki pobrano ze strony:

https://favpng.com/png_view/plasma-atom-example-subatomic-particle-subatomic-particle-collision-proton-png/OD2qUu2K

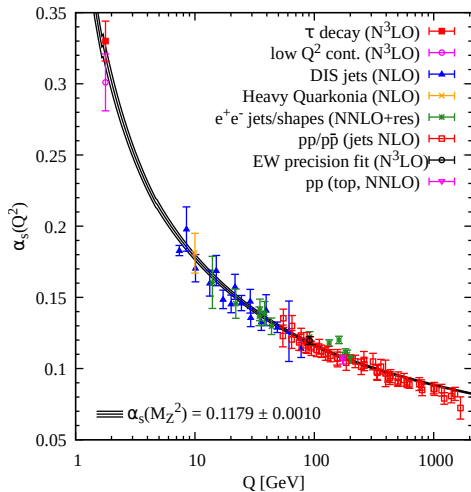
<https://sherpa-team.gitlab.io/monte-carlo.html>



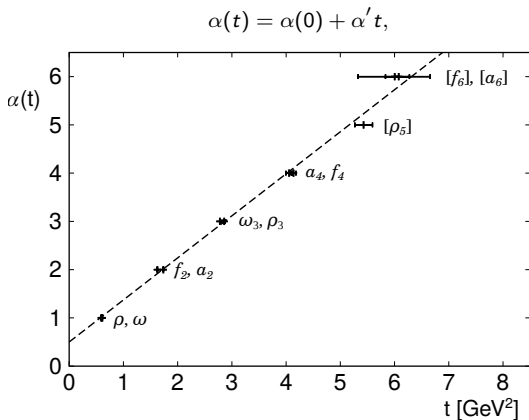
$$s \equiv (p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p_4)^2$$

$$t \equiv (p_1 - p_3)^2 = (p_2 - p_4)^2$$

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)$$



W obszarze niskich przekazów czteropędu $\alpha_s \sim 1$ - brak możliwości zastosowania rachunku perturbacyjnego do wyznaczania amplitud.



$$A(s, t) = \beta(t) \zeta(t) s^{\alpha(t)}$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{16\pi s^2} |A^2(s, t)|$$

$$B_1 + B_2 \rightarrow B'_1 \bigoplus^{\Delta\eta_1} X \bigoplus^{\Delta\eta_2} B'_2$$

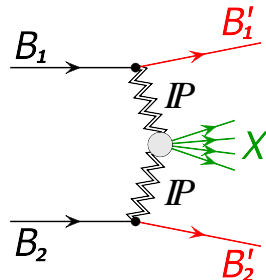
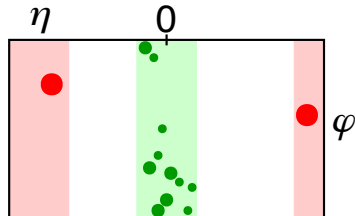
- Zderzane cząstki wiązek B_1 oraz B_2 zachowują postać.
- Zostaje wyprodukowany centralny stan X odseparowany od rozproszonych cząstek wiązek tzw. "przerwami w pseudopospieszności" ($\Delta\eta_1, \Delta\eta_2$).

Klasyfikacja mechanizmów CEP:

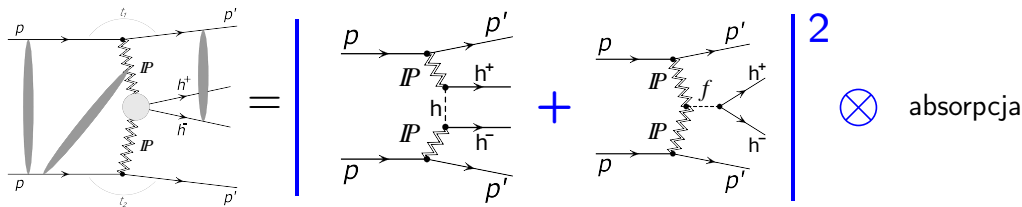
- Podwójna Wymiana Fotonu, $\gamma^* + \gamma^* \rightarrow X$ (np. $\gamma\gamma, \ell^+\ell^-, W^+W^-$).
- Fuzja foton-IPomeron (Reggeon), $\gamma^* + \mathbb{P}(\mathbb{R}) \rightarrow X$ (np. $\rho^0, J/\psi$).
- **Podwójna Wymiana Pomeronu**, $\mathbb{P} + \mathbb{P} \rightarrow X$ (np. f_0, f_2)
(także $\mathbb{P}+\mathbb{R}$ oraz $\mathbb{R}+\mathbb{R}$; mechanizm w pełni dyfrakcyjny).

Temat badań: pomiar CEP zidentyfikowanych, lekkich stanów X w oddziaływaniach $p+p$ z detekcją rozproszonych protonów, przy $\sqrt{s} = 200$ GeV oraz 13 TeV.

- detekcja protonów $\Rightarrow -t \gg 0 \Rightarrow$ redukcja wkładu od $\gamma^* + \gamma^*/\mathbb{P}/\mathbb{R}$.
- wysokie $\sqrt{s} \Rightarrow$ redukcja wkładu od $\mathbb{R}+\mathbb{R}/\mathbb{P}$ ($A \propto s^{\alpha(t)}$, $\alpha_{\mathbb{P}} \sim 1, \alpha_{\mathbb{R}} < 1$).



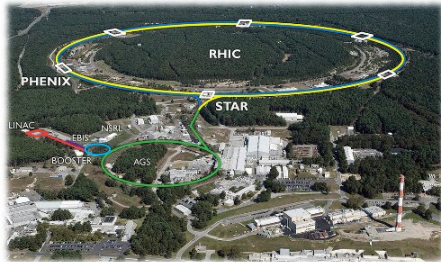
- IPomeron w chromodynamice kwantowej (QCD) = para gluonów $\Rightarrow$ DIPE potencjalnym miejscem produkcji **glueballi**.
- Produkcja wyłącznie stanów o l. kwantowych $I^G J^{PC} = 0^{++}$ (filtr l. kwantowych).
- Produkcja głównie $m_X \lesssim 2$ GeV, brak twardej skali $\Rightarrow$ **niemożność zastosowania pQCD do obliczenia amplitud**.
- Przekroje czynne tłumione i modulowane przez tzw. **efekty absorpcyjne**.
- Istotne **efekty interferencyjne** - produkcja bezpośrednia (kontinuum) oraz rezonansowa.



- DIPE opisywana fenomenologicznie - duża l. parametrów modeli.
- Dostępne pomiary DIPE - niskie $\sqrt{s}$ + duże niepewności eksperymentalne.



DIPE obiektem intensywnych badań eksperymentalistów i teoretyków.

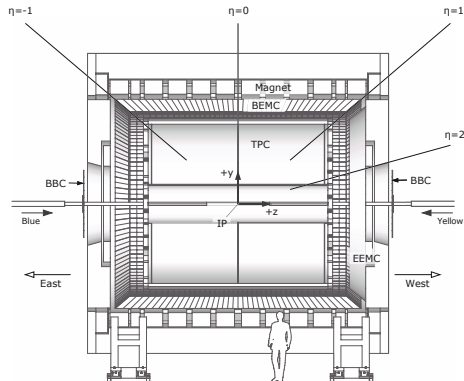


Detektor STAR:

- Detektor śladowy Time Projection Chamber (TPC) pokrywający $|\eta| < 1$, $0 < \phi < 2\pi$
- Identyfikacja cząstek poprzez pomiar dE/dx oraz czasu przelotu (ToF)
- Detektory scyntylacyjne w obszarze $2.1 < |\eta| < 5.0$ (Beam-Beam Counters, BBCs)
- Krzemowe detektory paskowe (SSD) typu Roman Pot dedykowane do pomiaru protonów "do przodu"

Relativistic Heavy Ion Collider:

- Obwód 3.8 km
- Unikalna zdolność zderzania **spolaryzowanych protonów** (poprzecznie i podłużnie)
- Inne rodzaje zderzanych jonów: Cu , Au , U , Al , 2H , 3He
- Maks. en. zderzeń w ukł. śr. masy $p+p$ $\sqrt{s} = 510$ GeV



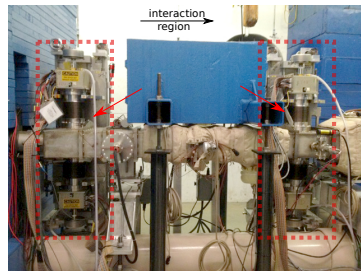
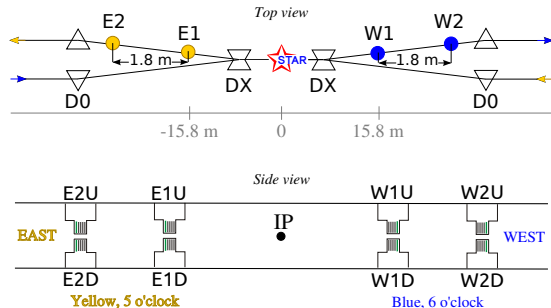
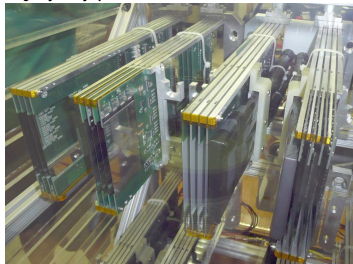
Eksperyment STAR na zderzaczu RHIC - detektory protonów rozproszonych "do przodu"

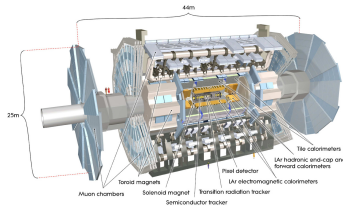
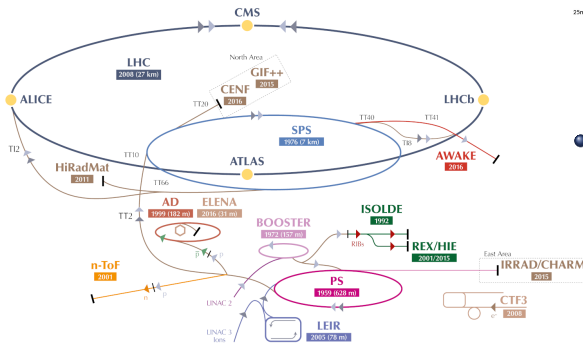
- 8 pakietów SSD (obsz. akt. $\approx 79 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$) zainstalowanych we wnękach Roman Pot
- 4 detektory SSDs/pakiet (2 typu x + 2 typu y), rozdzielczość pomiaru pozycji $\approx 30 \mu\text{m}$
- 4 stacje detektorów (2 stacje/stronę detektora centralnego) 15.8 m and 17.6 m od IP, za dipolami DX
- stacja = 2 zorientowane wertykalnie Roman Poty (nad i pod linią wiązki)

Roman Pot:



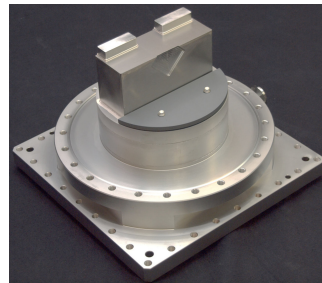
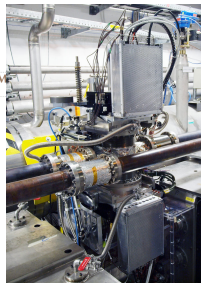
Pojedynczy pakiet SSD:



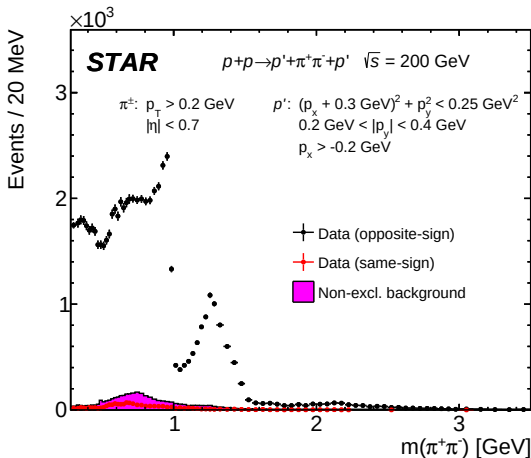


- Detektor śladowy:
Inner Detector (ID)
 $|\eta| < 2.5$, $p_T > 0.1$ GeV
- Minimum Bias Trigger
Scintillators
 $2.76 < |\eta| < 3.86$

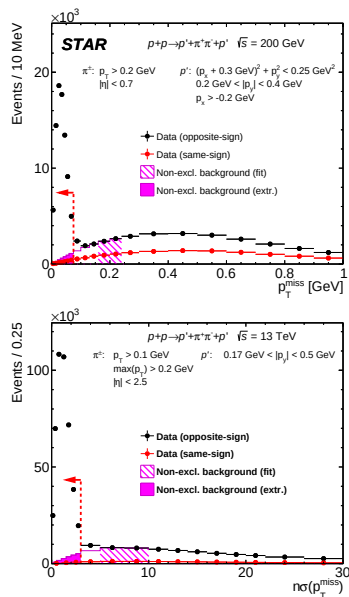
- ALFA - zestaw 8 detektorów (włókna scyntylacyjne) typu Roman Pot operujących przy specjalnej optyce wiązki.



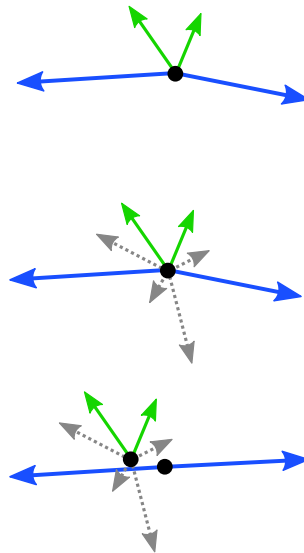
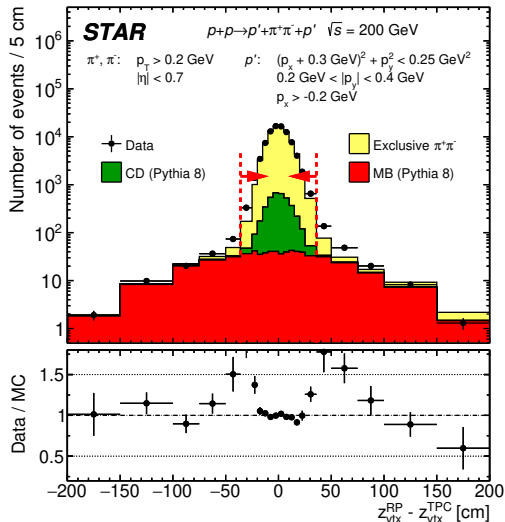
Nieekskluzywne tło zostało oszacowane z wykorzystaniem balansu p_T (rozkładu p_T^{miss} w STAR, rozkładu $n\sigma(p_T^{\text{miss}})$ w ATLAS) poprzez ekstrapolację wielomianu 2-go stopnia z obszaru zdominowanego przez tło do obszaru sygnałowego.

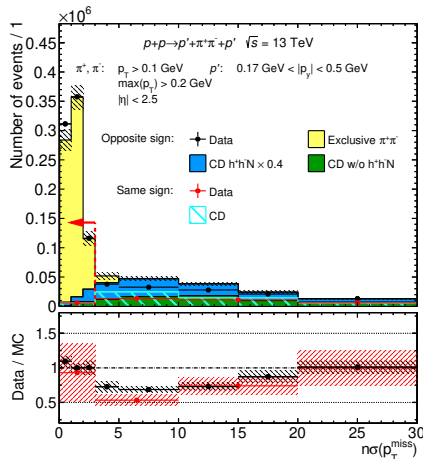
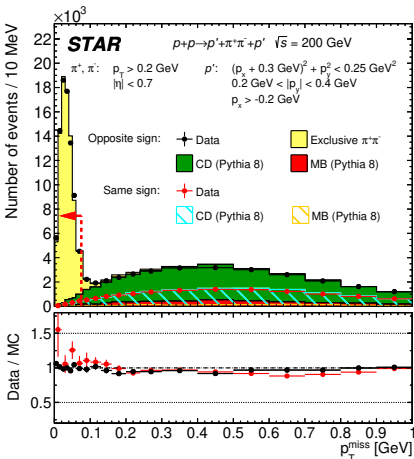


Istotnie zredukowany udział tła nieekskluzywnego w wyselekcjonowanych próbkach.



$$z_{\text{vtx}}^{\text{RP}} = 0.5 \times c \times (t_1 - t_2)$$

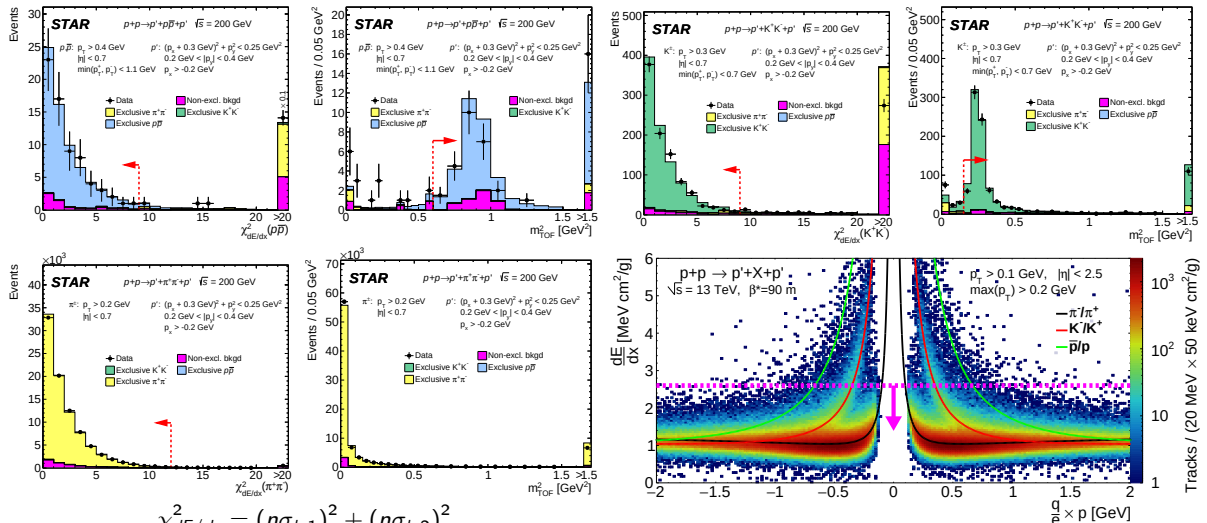




- Rozkłady całkowitego pędu poprzecznego zrekonstruowanych cząstek poprawnie opisane uwzględniając proces:
 - CEP,
 - centralnej dyfrakcji,
 - minimum bias + rozpraszanie elastyczne.
- Generator Pythia 8 przeszacowuje wkład od produkcji stanów dyfrakcyjnych o postaci $h^+h^- + N$ (gdzie N to cząstki neutralne).

Dobre zrozumienie wkładu od procesów nieekskluzyjnych do tła obecnego w próbkach danych po pełnej selekcji przypadków CEP.

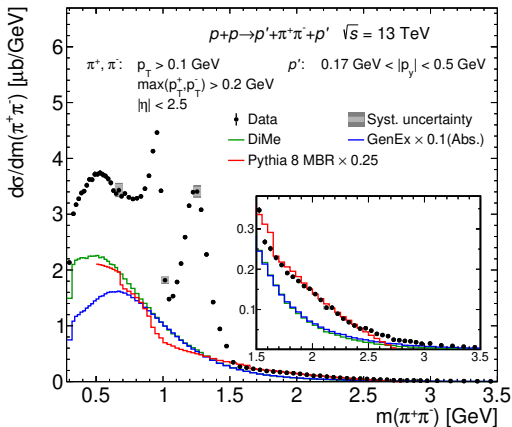
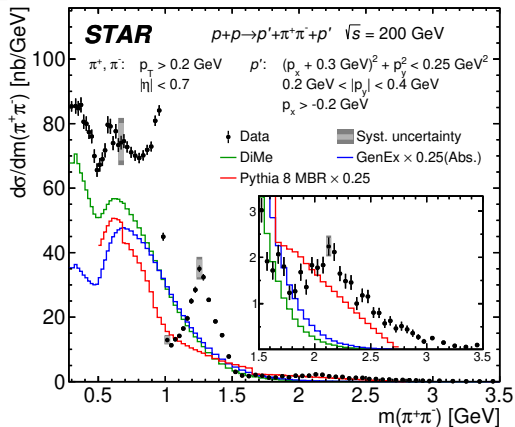
Identyfikacja cząstek stanu centralnego



$$\chi_{dE/dx}^2 = (n\sigma_{h,1})^2 + (n\sigma_{h,2})^2$$

$$\Delta t = L_1 \sqrt{1 + m_{\text{TOF}}^2/p_1^2} - L_2 \sqrt{1 + m_{\text{TOF}}^2/p_2^2} \rightarrow m_{\text{TOF}}^2$$

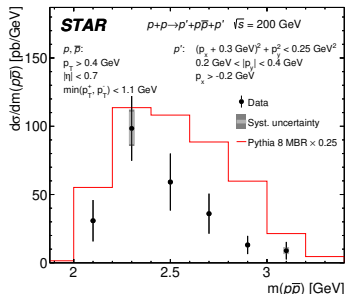
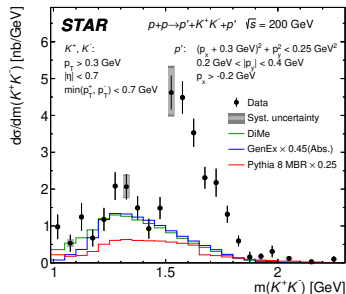
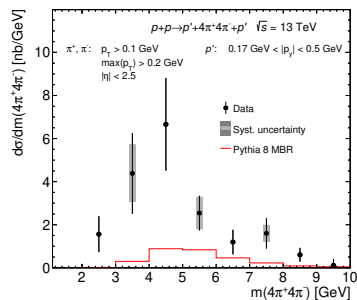
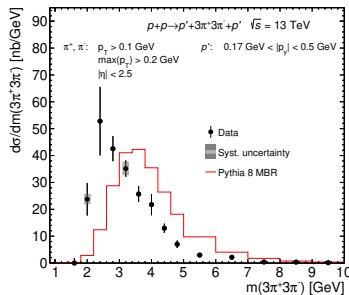
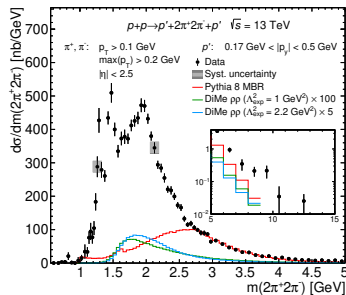
Rekonstrukcja dE/dx (STAR i ATLAS) oraz Δt (STAR) umożliwiły wydajną identyfikację cząstek stanu X .



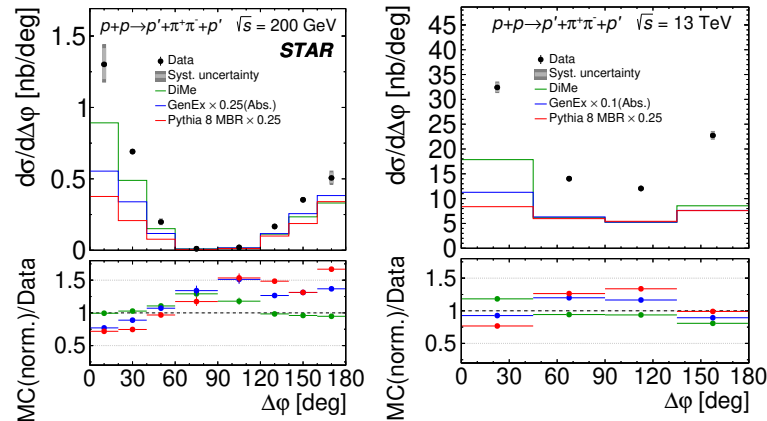
- Mnogość struktur: pik przy 1 GeV z następującym ostrym spadkiem przekroju czynnego - konsystentne z obecnością mezonu $f_0(980)$, pik w obszarze 1 – 1.5 GeV konsystentny z mezonem $f_2(1270)$ - obydwa oczekiwane w DIPE.
- Struktura rezonansowa w okolicach ~ 2.2 GeV (dane STAR) tj. oczekiwana masa glueballa tensorowego.
- Dane porównano z dostępnymi modelami kontinuum zaimplementowanymi w generatorach Monte Carlo.

Kilkukrotna redukcja niepewności syst. w stosunku do wcześniejszych pomiarów DIPE.

Masa niezmiennicza stanów $2\pi^+2\pi^-$, $3\pi^+3\pi^-$, $4\pi^+4\pi^-$ (ATLAS), K^+K^- , $p\bar{p}$ (STAR)



- Zrekonstruowano i zidentyfikowano, poza $\pi^+ \pi^-$, pięć innych kanałów CEP.
- Wiele nietrywialnych cech rozkładów.
- Bezprecedensowy pomiar CEP stanu $4\pi^+ 4\pi^-$.



Kątowa separacja rozproszonych protonów (jak również $\mathbb{P}$ omeronów) w płaszczyźnie poprzecznej:

$$\Delta\phi = \angle\{(\mathbf{p}'_{x,1}, \mathbf{p}'_{y,1}), (\mathbf{p}'_{x,2}, \mathbf{p}'_{y,2})\}$$

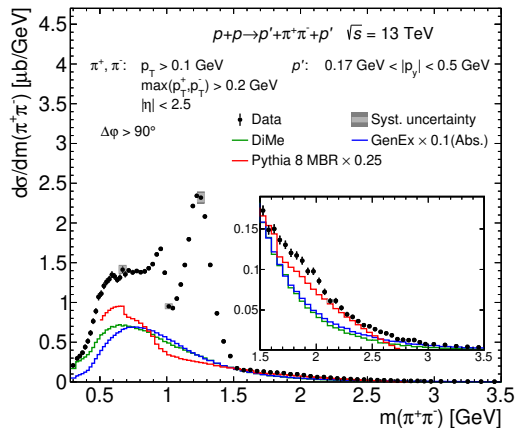
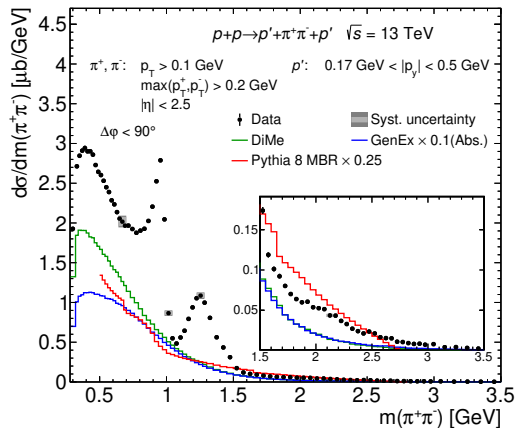
Bliski związek z "filtrem glueballi":

$$|\Delta\vec{p}_T| = (\vec{\mathbb{P}}_1 - \vec{\mathbb{P}}_2)_T$$

F.Close, A.Kirk, PLB 397 (1997) 333-338

Obserwabla dostępna wyłącznie dzięki detekcji protonów "forward".

- Znacząca asymetria przekroju czynnego w zależności od kąta pomiędzy rozproszonymi protonami (obniżenie w okolicach $\Delta\phi = 90^\circ$ efektem ograniczonej akceptancji geometrycznej).
- Rozkład szczególnie czuły na efekty absorpcyjne.



- Istotne różnice wartości przekroju czynnego/rozmiaru struktur w zależności od $\Delta\phi$: w obszarze $\Delta\phi < 90^\circ$ tłumienie piku w obszarze rezonansu $f_2(1270)$ oraz wzmocnienie piku $f_0(980)$ (w porównaniu z obszarem $\Delta\phi > 90^\circ$).
- Podobne obserwacje w pozostałych badanych kanałach CEP.

Analiza fal parcjalnych/cząstkowych daje dostęp do informacji nt. amplitud produkcji badanych stanów.

Mierzymy

$$\frac{d\sigma}{dm} = \int |\mathcal{M}|^2 d\Omega = \int I(\Omega) d\Omega$$

Element macierzowy $\mathcal{M}$ można zapisać jako

$$\mathcal{M} = \langle out | \hat{T} | in \rangle, \quad in = \mathbb{P}\mathbb{P}, \quad out = \pi^+ \pi^-,$$

gdzie $\hat{T}$ jest operatorem rozpraszania, który można sfaktoryzować (założenie) i zapisać jako

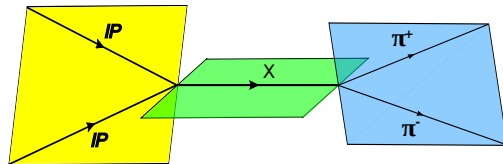
$$\hat{T} = \hat{T}_{\text{decay}} \hat{T}_{\text{production}}$$

Uwzględniając wszystkie możliwe stany pośrednie pomiędzy $|in\rangle$ oraz $|out\rangle$, $|X\rangle$ - tzw. fale parcjalne, które są jednoznacznie określone przez zestaw liczb kwantowych $\{k\}$, otrzymujemy

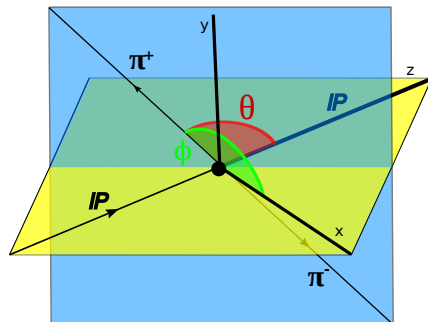
$$\mathcal{M} = \sum_X \underbrace{\langle out | \hat{T}_{\text{decay}} | X \rangle}_{\text{decay amp. } A(\Omega)} \underbrace{\langle X | \hat{T}_{\text{production}} | in \rangle}_{\text{production amp. } V} = \sum_k A_k(\Omega) V_k$$

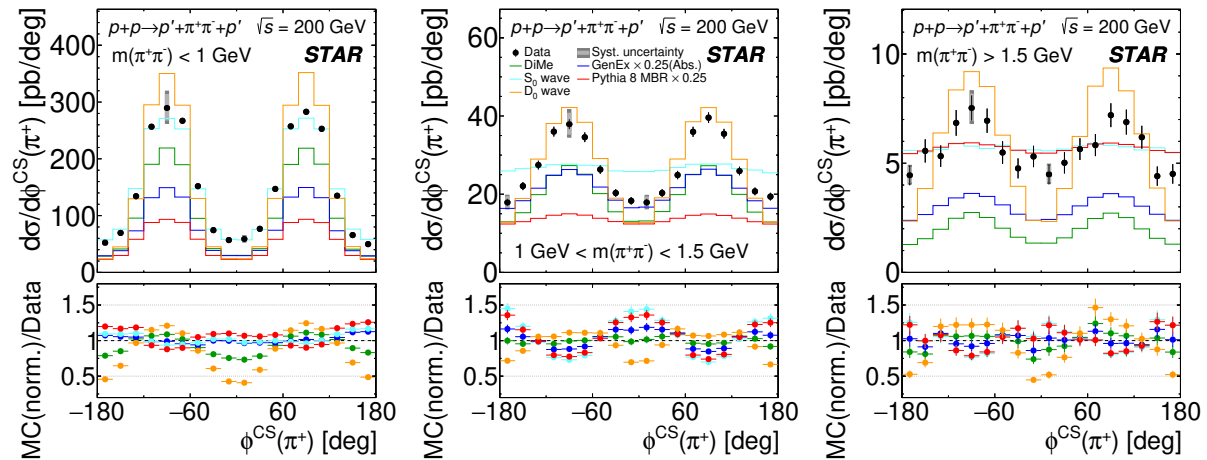
Amplitudy rozpadu $A_k(\Omega)$ zależą wyłącznie od Ω tj. parametrów opisujących orientację produktów rozpadu względem płaszczyzny reakcji, np. kątów. $\{\theta, \phi\}$ (rysunek po prawej).

Układ laboratoryjny:

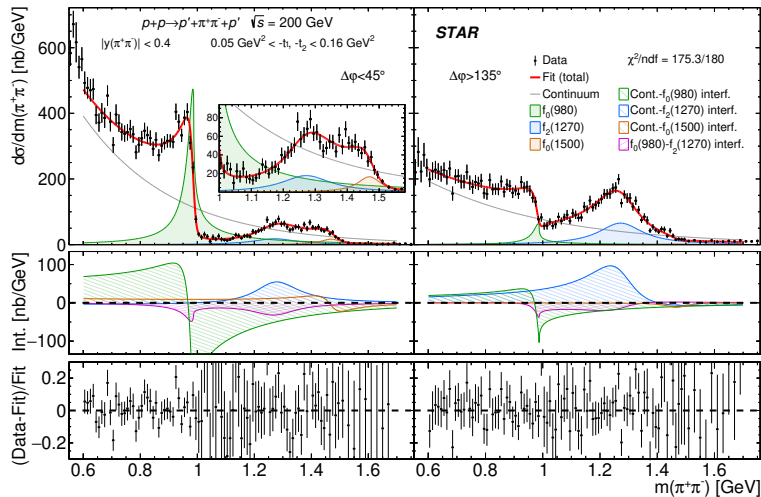


Układ środka masy $\pi^+ \pi^-$ (G-J):



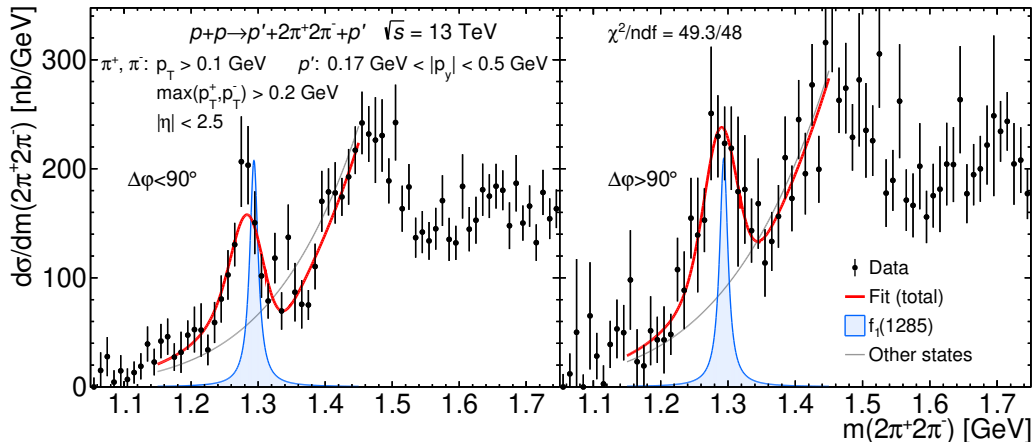


- Zbadano rozkłady kątowe dodatnio naładowanych cząstek w stanach h^+h^- .
- Potwierdzono dominację stanów S_0 w obszarze $m(\pi^+\pi^-) < 1$ GeV oraz stanów D_0 w obszarze $1 \text{ GeV} < m(\pi^+\pi^-) < 1.5$ GeV.



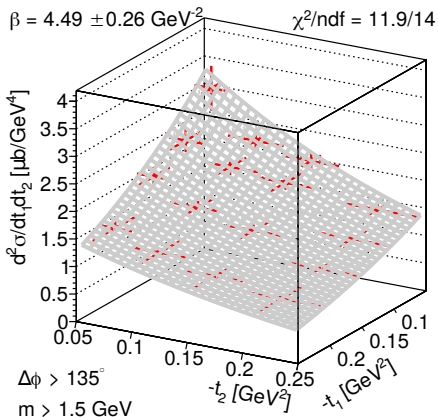
Silna zależność produkcji rezonansów od $\Delta\varphi$ (kąta azymutalnego pomiędzy oddziałującymi Pomeronomi).

- Przekrój czynny $d\sigma/dm(\pi^+\pi^-)$ dobrze opisany przez koherentną sumę amplitud kontinuum oraz trzech rezonansów (obszar mas niezmienniczych 0.6-1.7 GeV).
- Otrzymane masy i szerokości rezonansów zgodne z parametrami mezonów $f_0(980)$ oraz $f_0(1500)$ (produkcja mezonu $f_2(1270)$ założona *a priori*).
- Produkcja mezonu $f_0(1500)$ wzmocniona w obszarze $\Delta\varphi < 45^\circ$ - wskazanie na obecność komponenty gluonowej w tym stanie rezonansowym.

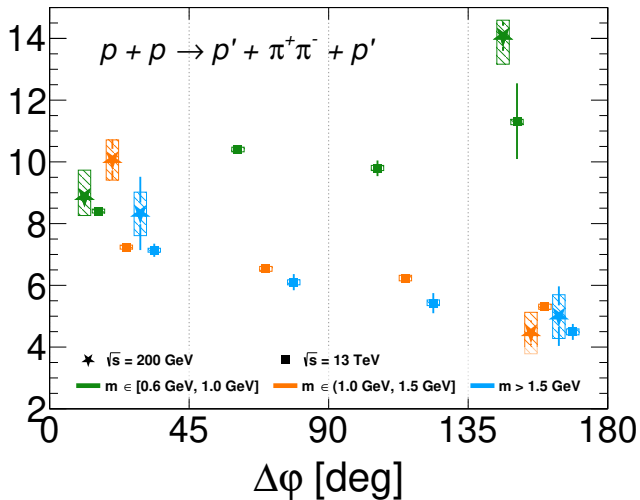


- Przekrój czynny $d\sigma/dm(2\pi^+2\pi^-)$ dobrze opisany przez koherentną sumę dwóch amplitud: wąskiego rezonansu oraz pozostałych stanów (obszar mas niezmienniczych 1.15-1.45 GeV).
- Otrzymana masa i szerokość rezonansu konsystentna z mezonem $f_1(1285)$.

Poniżej: Przykładowe dopasowanie funkcji wykładniczej do podwójnie-różniczkowego przekroju czynnego w zmiennych (t_1, t_2) .

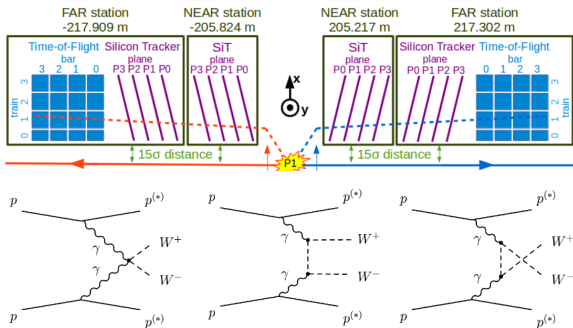


Exponential slope β [GeV^{-2}]

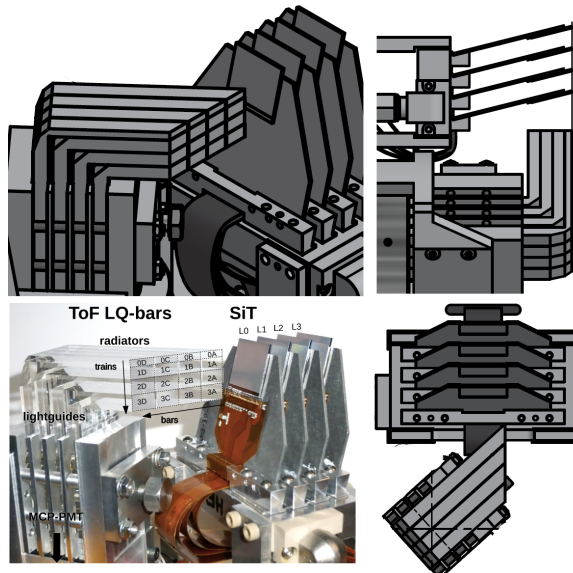


Silna zależność przekroju czynnego $d^2\sigma/dt_1 dt_2$ od masy niezmienniczej stanu centralnego, m , oraz azymutalnej separacji rozproszonych protonów, $\Delta\phi$.

Pomiar ekskluzywnej produkcji pary bozonów W^+W^- - detektor AFP



- Rozpoczęto analizę ekskluzywnej produkcji par W^+W^- z pomiarem protonów w detektorze AFP ($\sqrt{s} = 13$ TeV)
- Poszukiwanie "Nowej Fizyki"
- Walidacja modeli "gap survival probability"
- Test możliwości pomiaru ekskluzywnej produkcji bozonu Higgsa w przyszłej konfiguracji LHC (High-luminosity LHC, HL-LHC)



- Pomiar procesów ekskluzywnych z detekcją protonów rozproszonych do przodu dają możliwość badania obszarów QCD gdzie rachunek perturbacyjny nie daje się zastosować
- Przedstawiono pomiar Centralnej Ekskluzywnej Produkcji układów zidentyfikowanych, naładowanych hadronów w zderzeniach proton-proton przy $\sqrt{s} = 200$ GeV oraz 13 TeV.
- Są to obecnie najwyższe energie zderzeń w układzie środka masy przy których zmierzono DPE z jednoczesną detekcją rozproszonych cząstek wiązek.
- Systematyczna precyzycja otrzymanych przekrojów czynnych jest kilukrotnie wyższa od tej w dotychczas wykonanych pomiarach.
- Przekroje czynne porównano z modelami produkcji kontinuum dostępnymi w formie generatorów Monte Carlo. Żaden model nie opisuje zmierzonych rozkładów.
- W spektrum masy niezmienniczej stanu centralnego zidentyfikowano (poprzez dopasowanie modelu) rezonanse: $f_0(980)$, $f_2(1270)$, $f_0(1500)$ (pary $\pi^+\pi^-$), oraz $f_1(1285)$ (stan $2\pi^+2\pi^-$). Zaobserwowano dodatkowe struktury np. rezonans w obszarze $m(\pi^+\pi^-) \sim 2.2$ GeV.
- Zmierzono parametr nachylenia rozkładów $d^2\sigma/dt_1dt_2$. Zaobserwowano silną zmienność ww. nachylenia z kątem $\Delta\varphi$ oraz masą niezmienniczą stanu centralnego.
- Wyniki analizy przeprowadzonej w ramach eksperymentu STAR opublikowano w *JHEP 07 (2020) 178*, zaś wyniki analizy danych eksperymentu ATLAS są poddawane wewnętrznej dyskusji.
- Rozpoczęto analizę ekskluzywnej produkcji W^+W^- z jednoczesnym pomiarem protonów rozproszonych "do przodu" w detektorze AFP

Dziękuję za uwagę