

Fizyka "do przodu"

Część 2: przegląd wyników z CMS

Grzegorz Brona

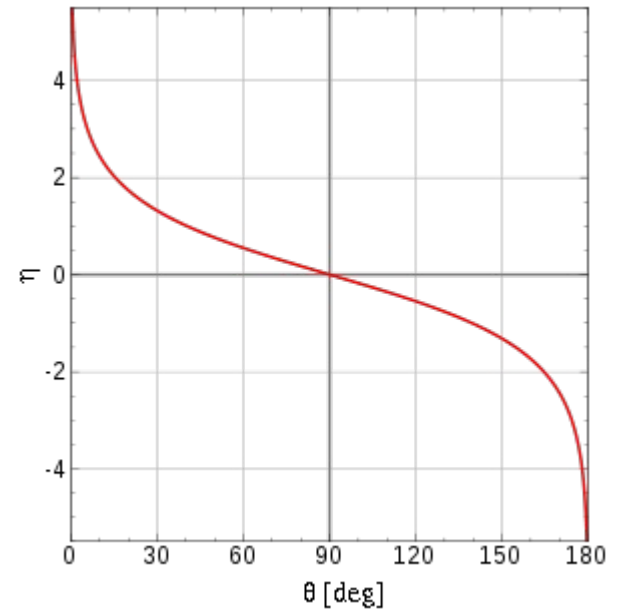
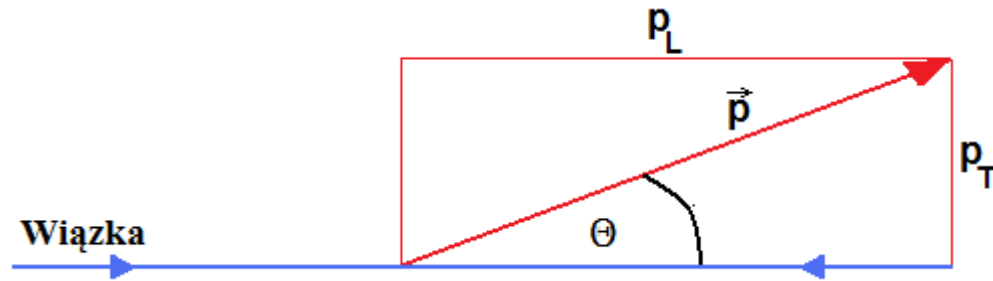


Seminarium Fizyki Wielkich Energii

Warszawa, 23.03.2012

Do przodu czyli gdzie?

Fizyka do przodu = Zjawiska obserwowane pod małym kątem θ

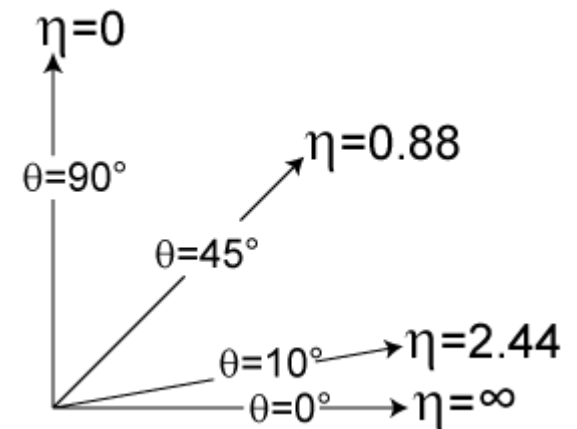


Fizyka dużych prędkości: $y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_L}{E - p_L} \right)$

lub pseudoprędkości:

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|\mathbf{p}| + p_L}{|\mathbf{p}| - p_L} \right), \quad \eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right],$$

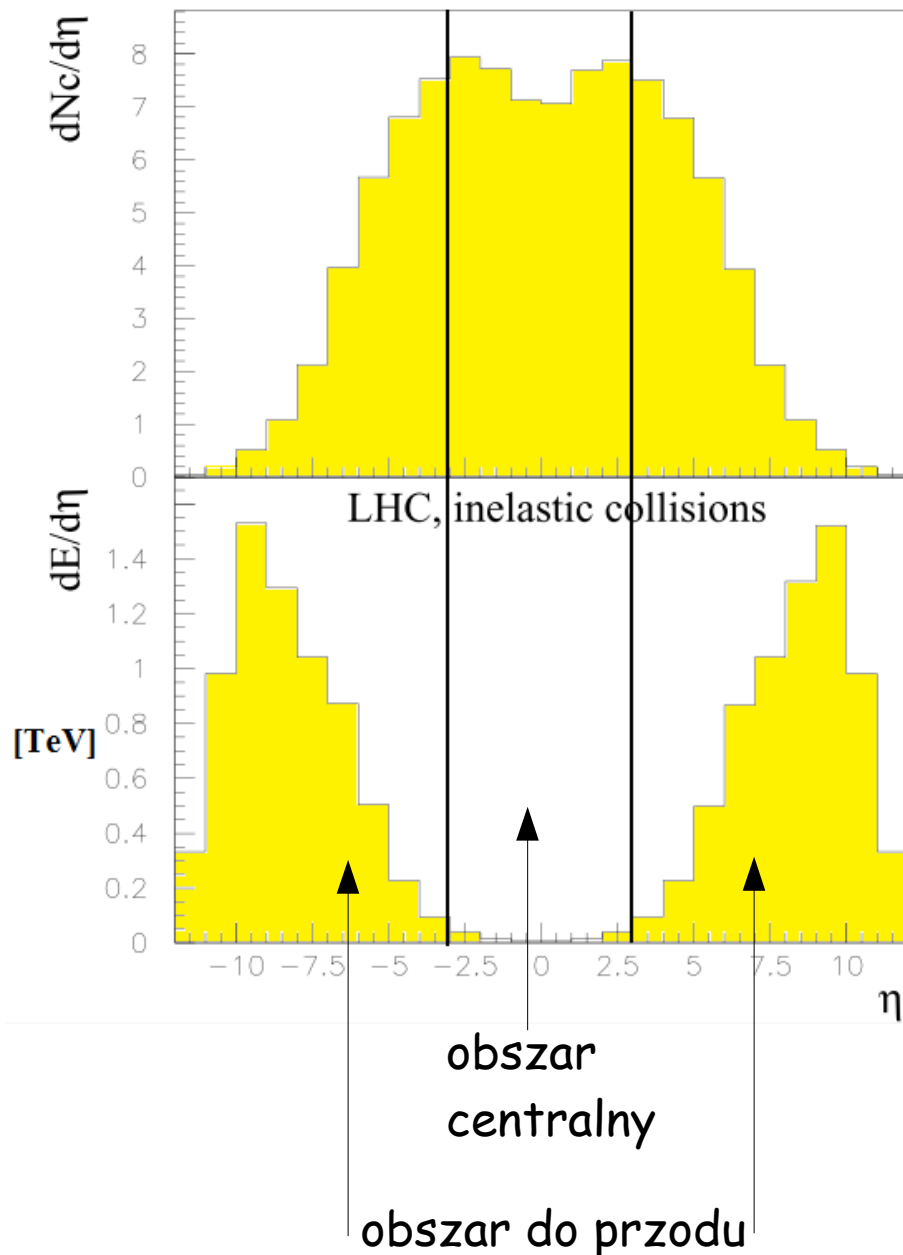
$$y = \ln \frac{\sqrt{m^2 + p_T^2} \cosh^2 \eta + p_T \sinh \eta}{\sqrt{m^2 + p_T^2}}$$



η można mierzyć nawet bez znajomości pędu i masy

Dlaczego do przodu?

2



- Istotna część informacji o oddziaływaniu nieelastycznym
- Informacja o oddziaływaniach dyfrakcyjnych
- Wybór przypadków z ekskluzywną produkcją
- Pomiar oddziaływań elastycznych
→ całkowity przekrój czynny
- Zjawiska związane z fizyką low-x

Oddziaływanie pp

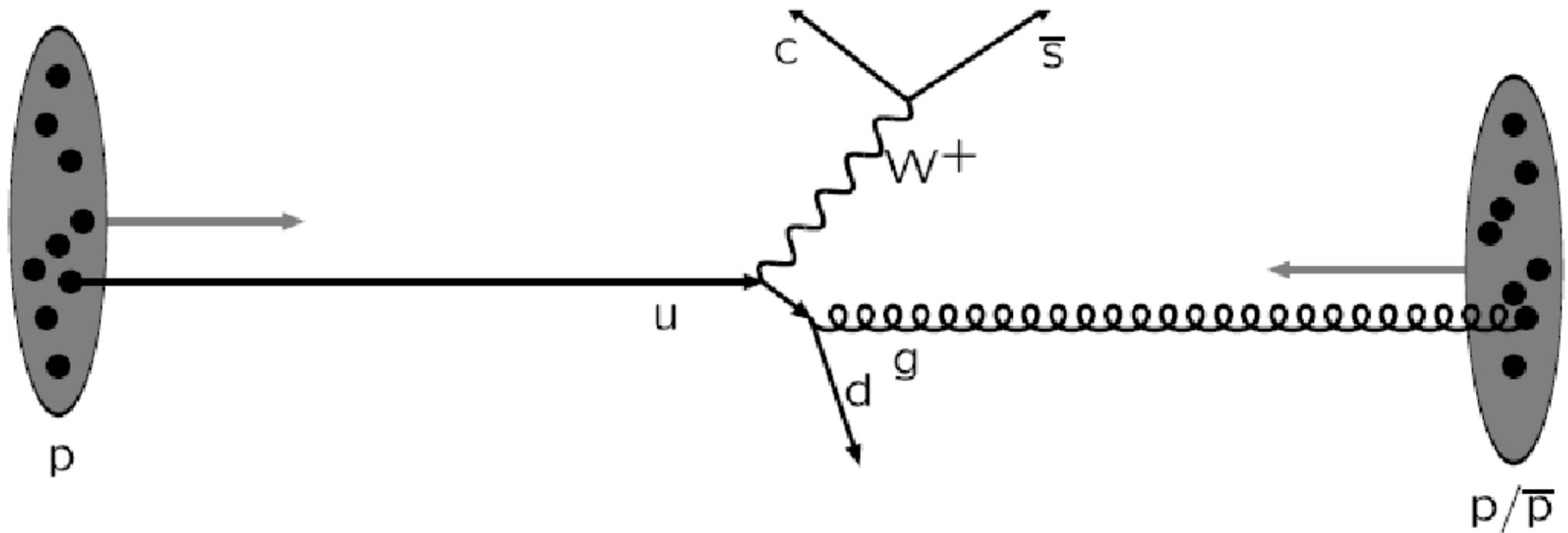
3



Dwa zderzające się protony: dystrybucje partonów (PDF)

Oddziaływanie pp

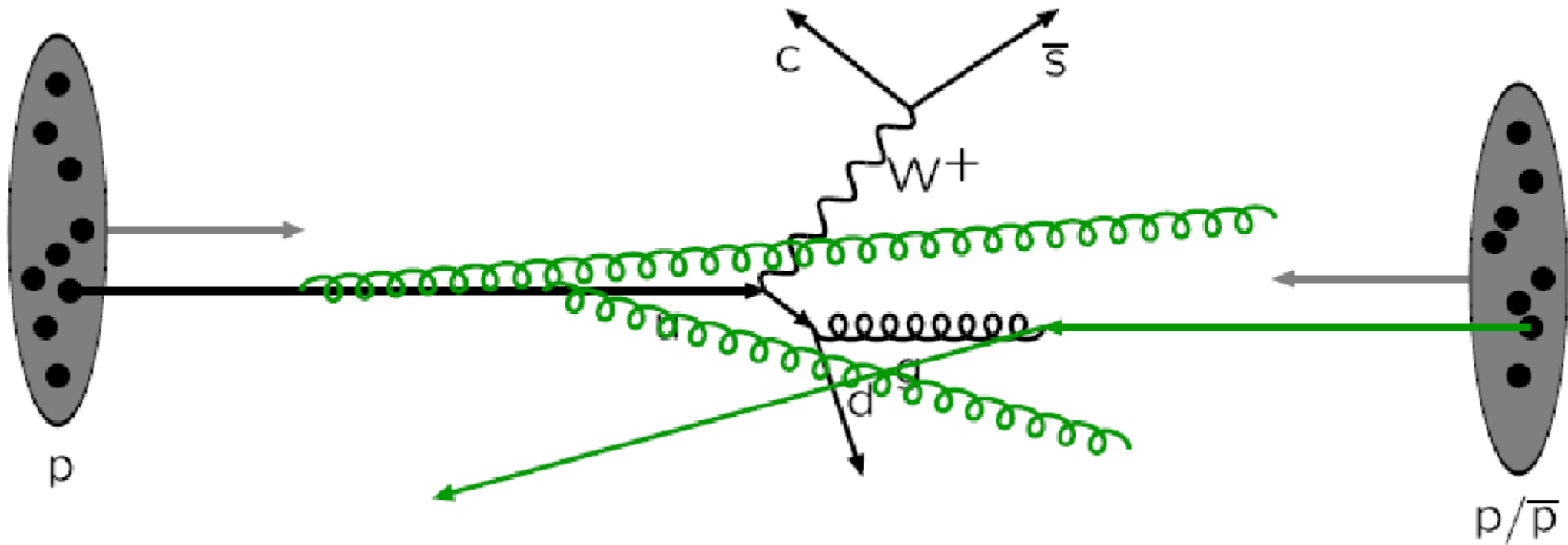
4



Oddziaływanie twarde: element macierzowy
+ rozpad rezonansów

Oddziaływanie pp

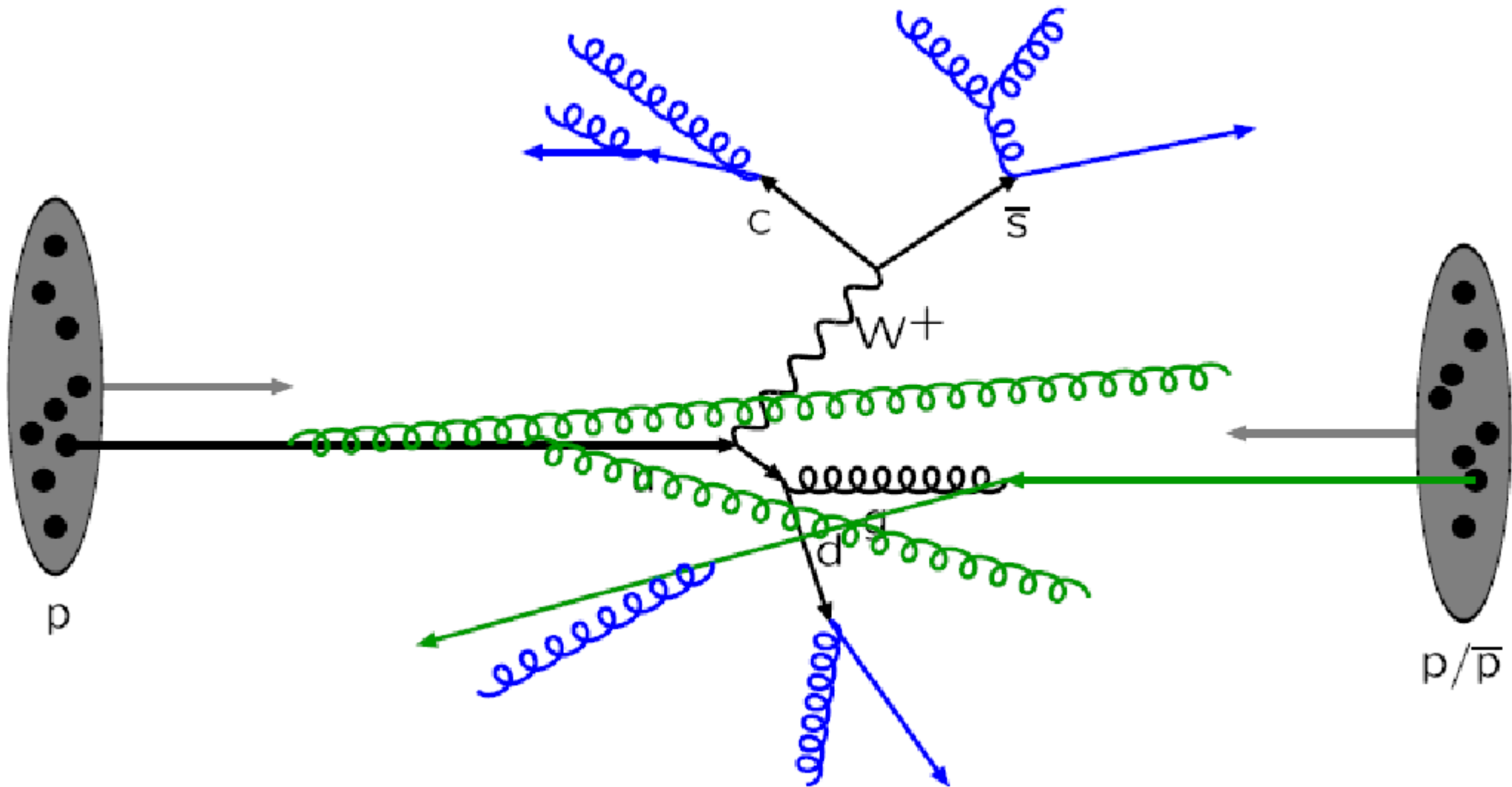
5



Radiacja ze stanów początkowych (ISR)

Oddziaływanie pp

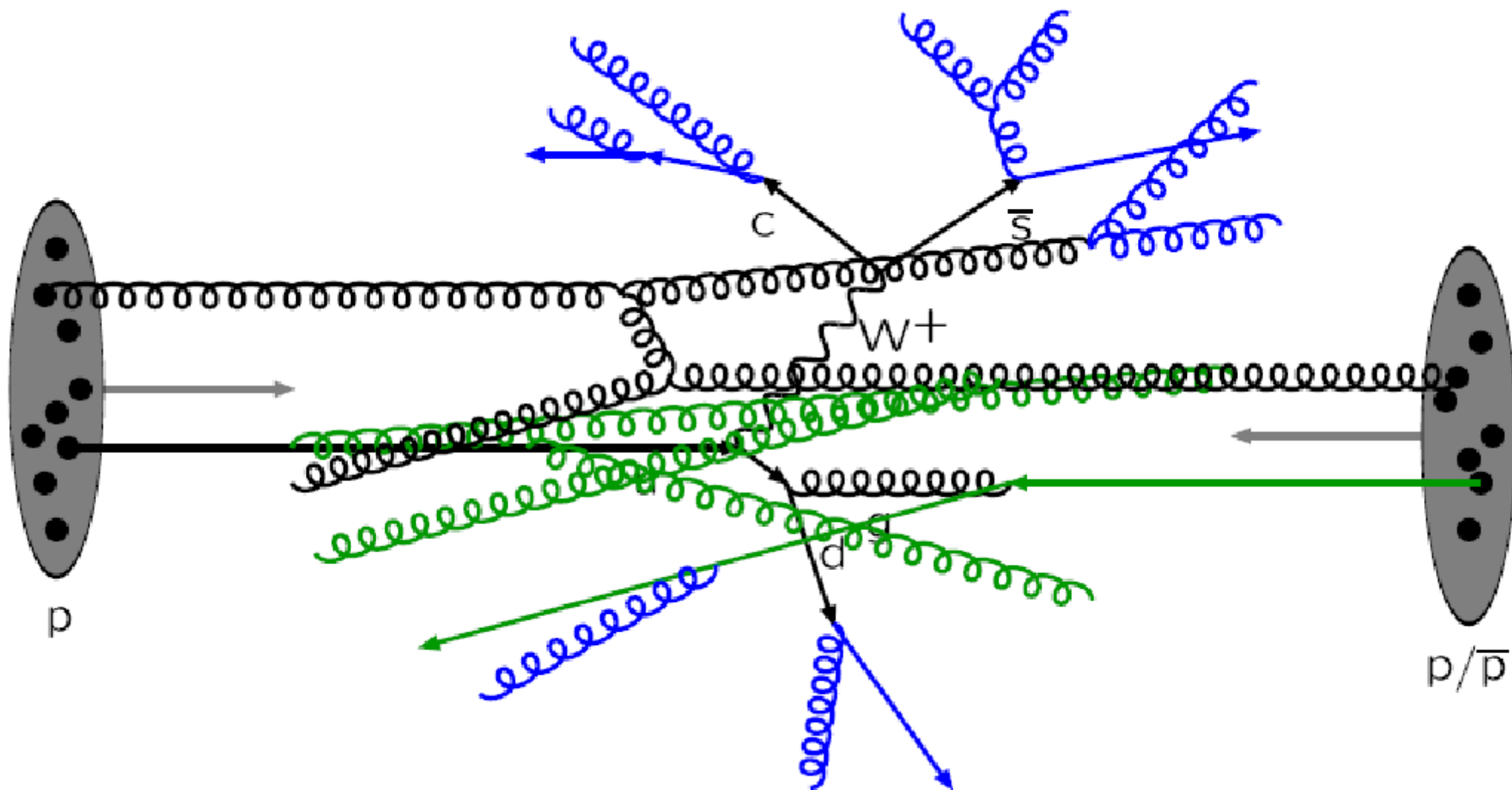
6



Radiacja ze stanów końcowych (FSR)

Oddziaływanie pp

7

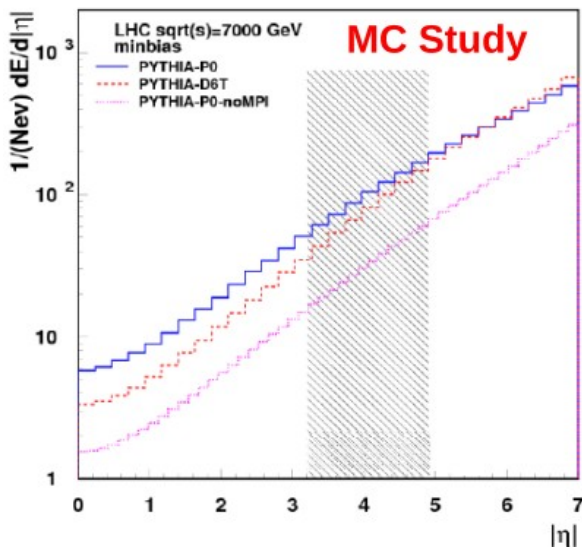
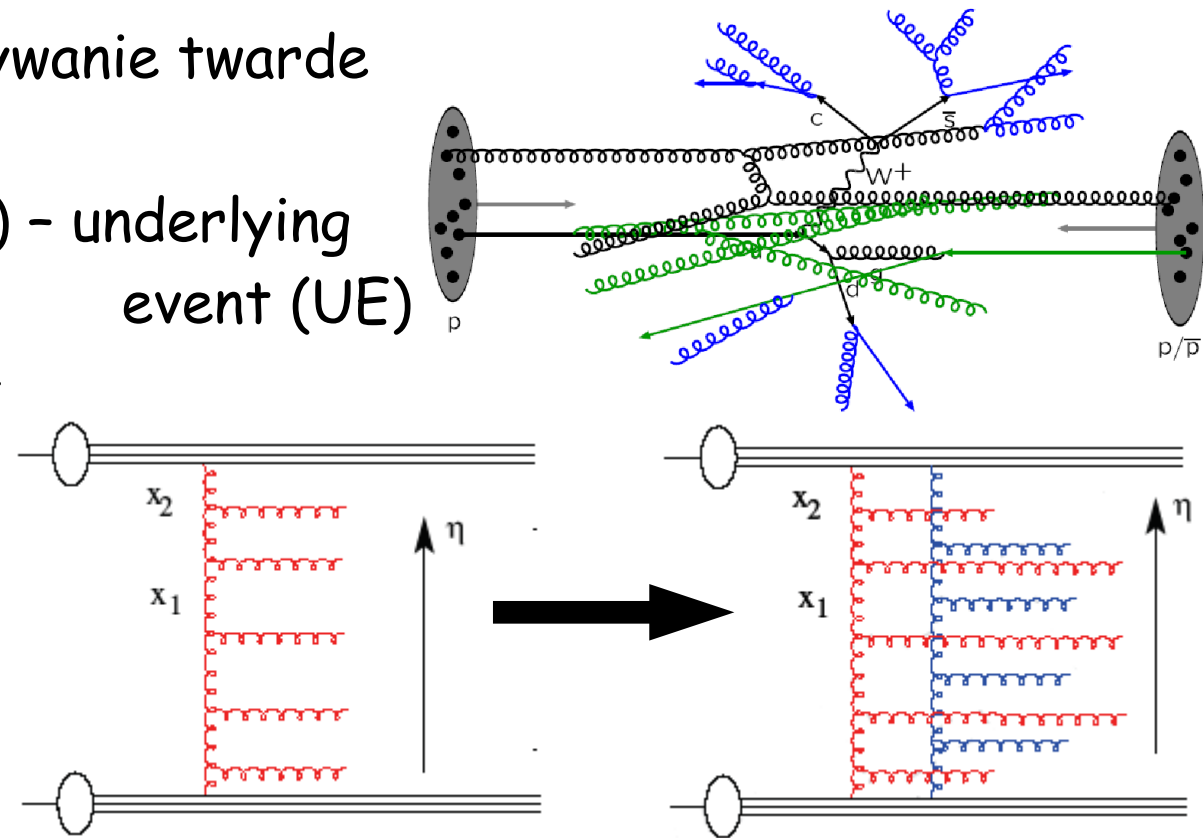


Oddziaływania wielopartonowe (MPI) - twarde lub miękkie
+ ich ISR i FSR
(Oraz pozostałości protonów)

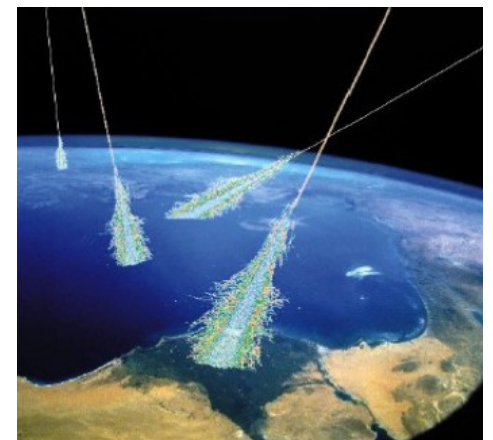
za T. Sjöstrand, "Theory of Hadronic Collisions"

Oddziaływanie pp

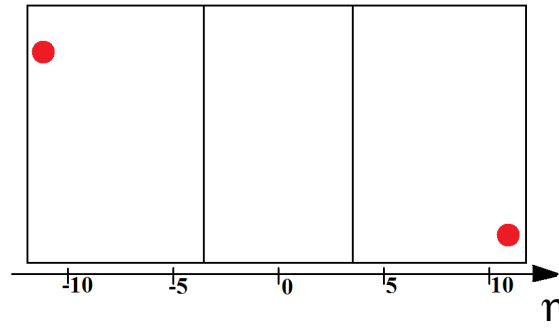
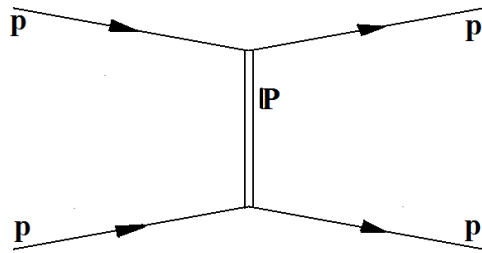
- Z zasad pierwszych - oddziaływanie twarde
- Reszta to modele (parametry) - underlying event (UE)
- Istotność MPI rośnie ze skalą
→ wzrost gęstości partonów
- W obszarze do przodu najwyższe depozyty energii
→ duża czułość



- Modele wielkich kaskad atmosferycznych
→ QGSJET, SIBYLL, EPOS

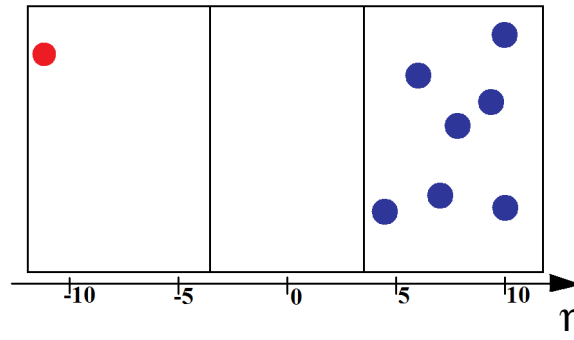
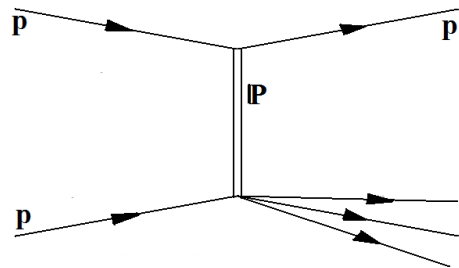


Sygnatury oddziaływań dyfrakcyjnych



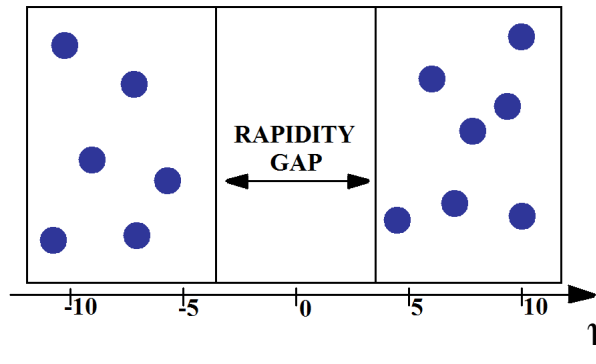
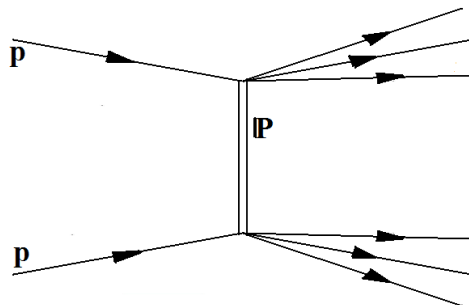
Rospraszanie elastyczne (ES)

- Brak aktywności w obszarze centralnym i do przodu oprócz...
- Dwóch protonów b. do przodu



Pojedyńcza dysocjacja dyfrakcyjna (SD)

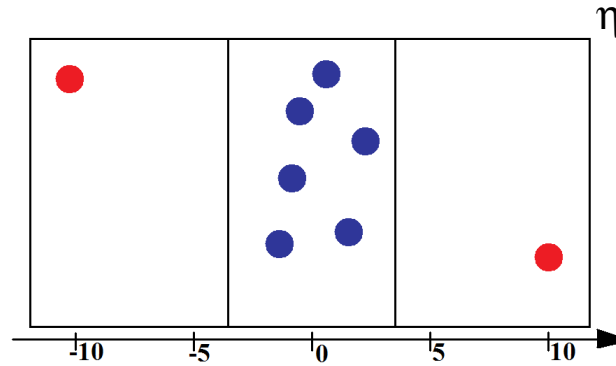
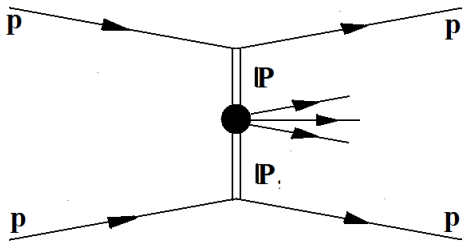
- Wysoka aktywność po jednej stronie detektora
- Brak aktywności po drugiej oprócz...
- Protonu b. do przodu



Podwójna dysocjacja dyfrakcyjna (DD)

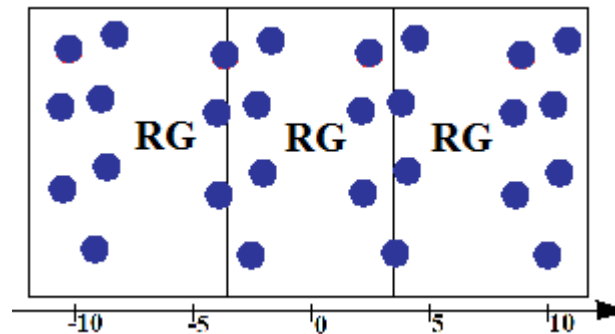
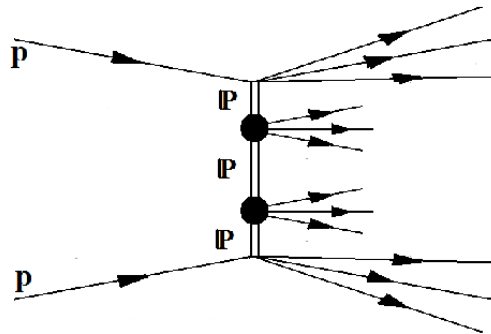
- Wysoka aktywność po obu stronach
- Brak aktywności w centrum (rapidity gap)

Sygnatury oddziaływań dyfrakcyjnych



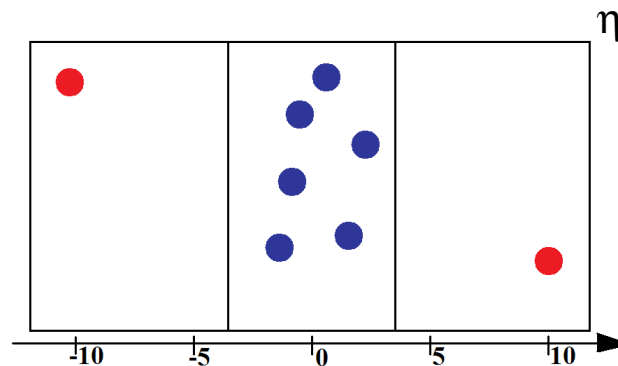
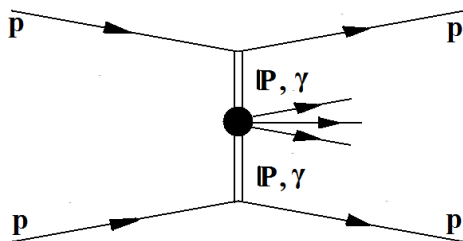
Centralna dyfrakcja (CD)

- Aktywność w centrum
- Brak aktywności do przodu oprócz
- Dwóch protonów b. do przodu



Wymiana wielu pomeronów (MPE)

- Kilka obszarów aktywnych
- Kilka obszarów rapidity gap

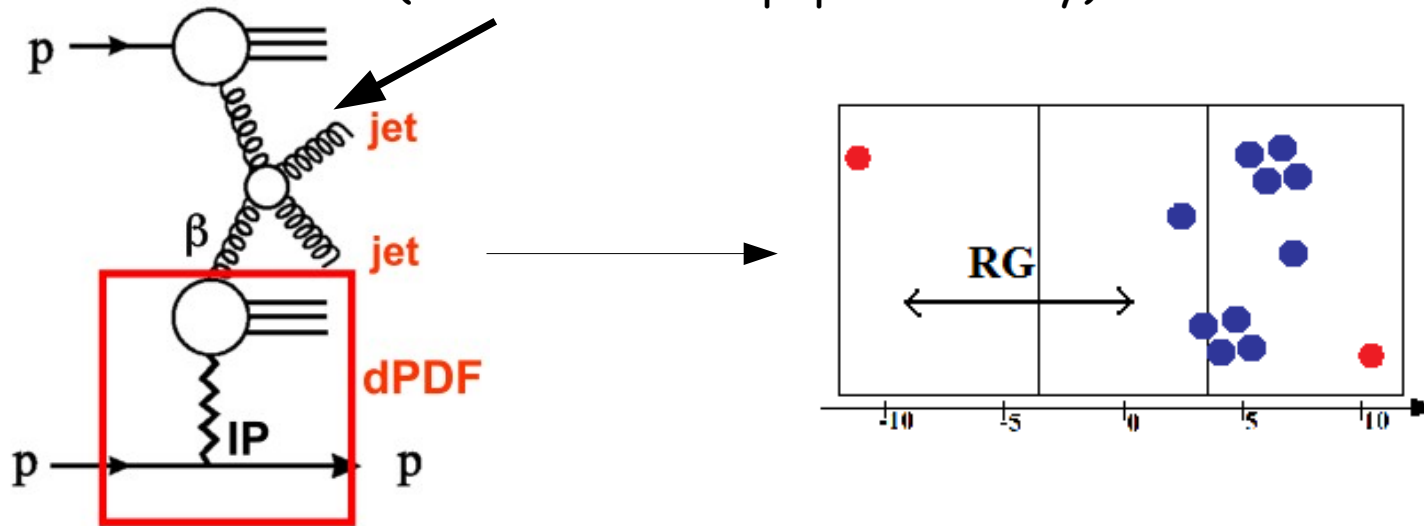


Produkcja centralna (CP)

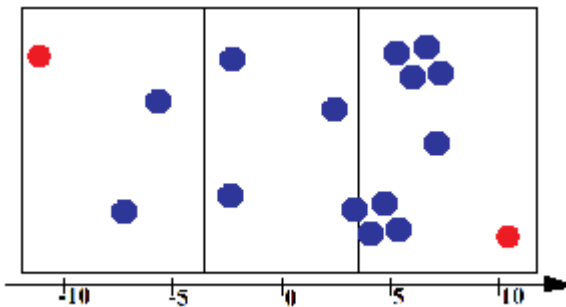
- Podobne do CD
- Również fotoprodukcja

Sygnatury oddziaływań dyfrakcyjnych

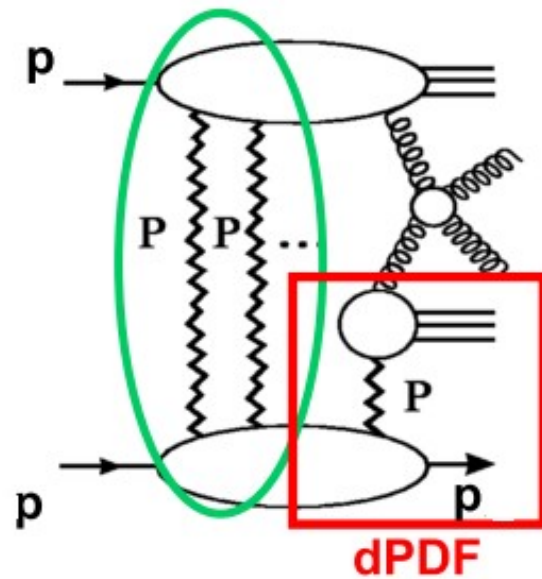
Oddziaływanie twarde
(skala ustalona np. przez dżety)



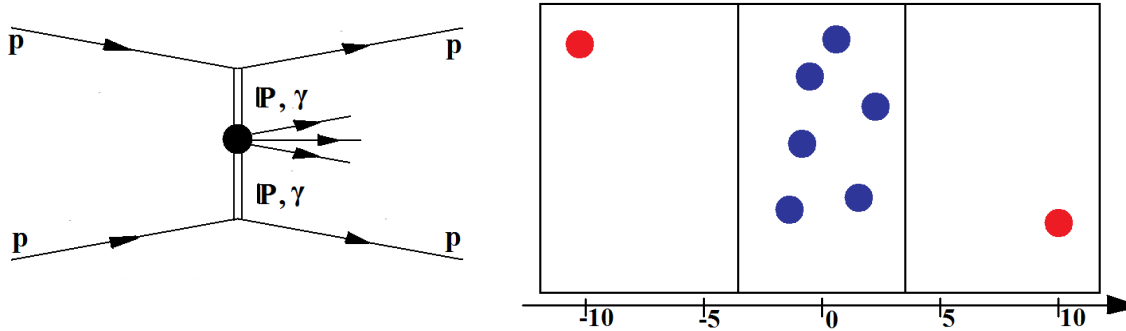
Dyfrakcyjne rozkłady partonów



Złamanie faktoryzacji



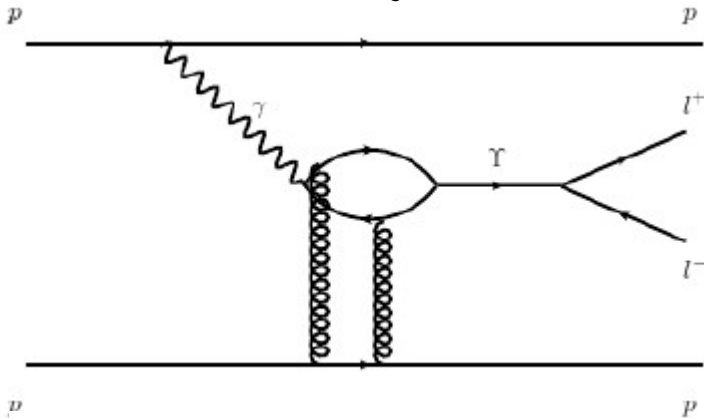
Ekсклюzywna produkcja



Ekсклюzywna produkcja centralna (CEP):

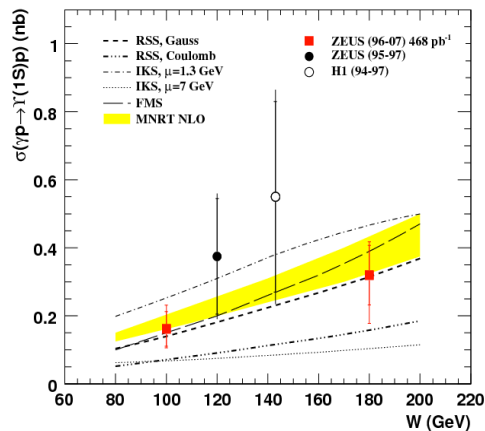
- produkcja centralna (CP)
- z dobrze ustalonym stanem centralnym

Produkcja Υ



- Bezpośrednia rekonstrukcja stanu centralnego albo (i) ...
- Dokładny pomiar protonów

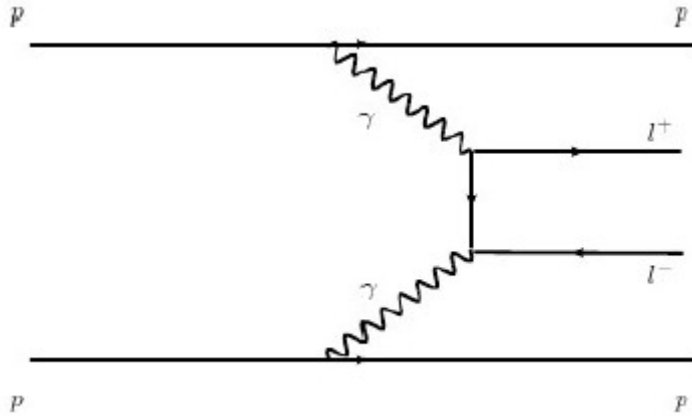
ZEUS



- Proces czuły na GPD (generalized parton distribution)
- LHC pozwala rozszerzyć zakres dostępnych zmiennych kinematycznych (cms γp en.) x3-4

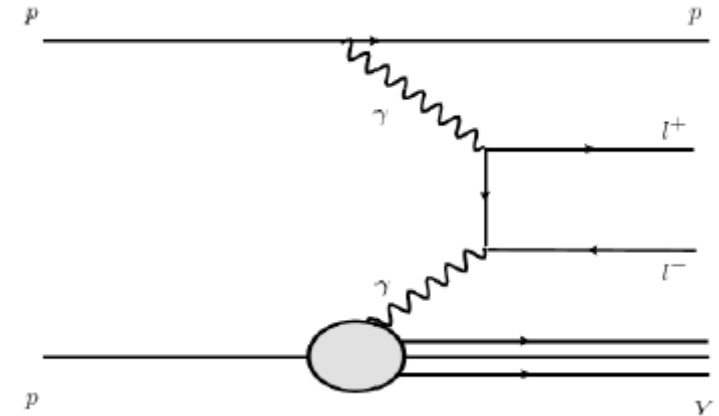
Ekskluzywna produkcja

Produkcja par leptonów



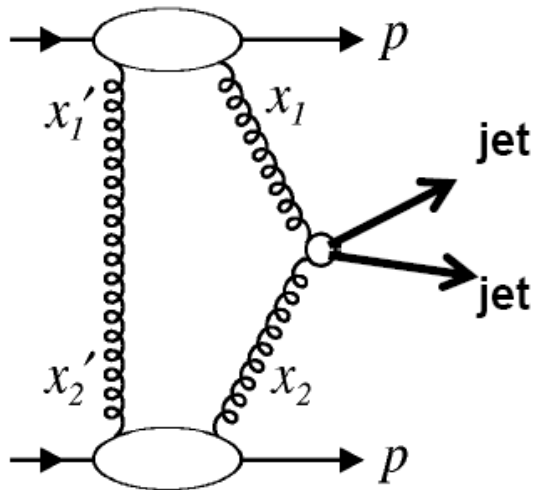
- LHC jako zderzacz fotonów
- Proces QED - niezależny pomiar luminosity

- Tło z dysocjacji:



- Detektory w obszarze centralnym: redukcja 25%

Produkcja par dżetów

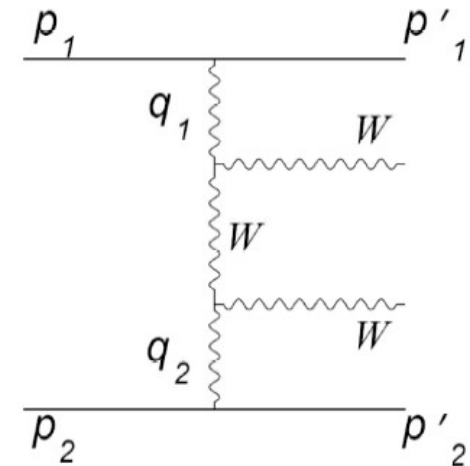
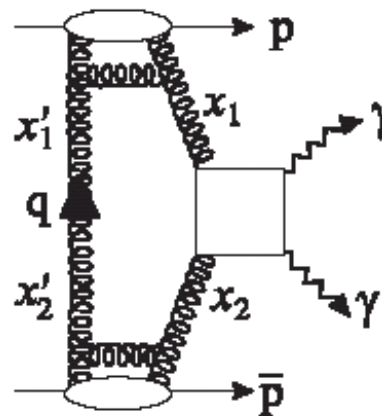
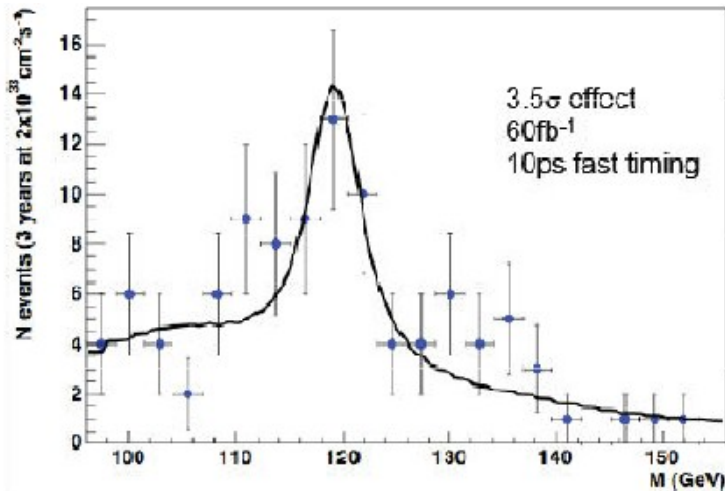
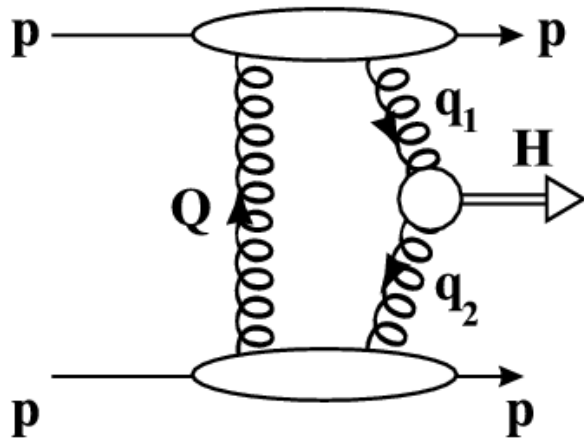


- $\sigma \sim O(10)$ pb
- ale dodatkowe oddziaływania mogą zamaskować RG
- pomiar z pile-up trudny
- obserwacja w Tevatronie (Phys. Rev. D77, 05, 2004)

Ekskluzywna produkcja

Produkcja Higgsa

- Stan centralny przy detekcji protonów jest dobrze ustalony: $J^{PC} = 0^{++}$
- Rekonstrukcja masy z pomiaru protonów (niezależnie od kanału rozpadu)
- $H \rightarrow bb$ (b-jets): $S = 11$, $B = O(10)$ w 30 fb^{-1}
- Potrzeba - doskonały pomiar protonów w stanie końcowym



Przekrój czynny pp

- Całkowity przekrój czynny na pp (σ_{tot}) - z twierdzenia optycznego:

$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{1 + \rho^2} \cdot \frac{dN_{el}/dt|_{t=0}}{N_{el} + N_{inel}}$$

Granica zerowego przekazu czteropędu

Poprawka obliczona z teorii 0,02

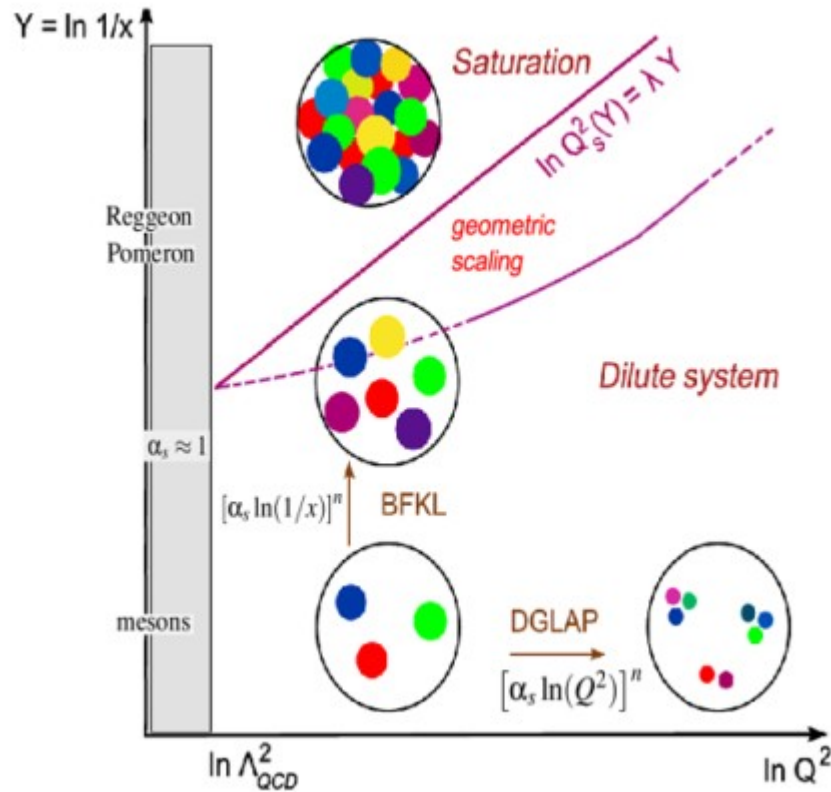
Ilość przypadków elastycznych i nieelastycznych

- Nie ma potrzeby pomiaru świetlności
- Jednoczesny pomiar oddziaływań elastycznych i nieelastycznych
- Granica zerowego przekazu czteropędu odpowiada zerowemu odchyleniu protonów (η b. duże)

- Jeśli znana świetlność:

$$\sigma_{tot}^2 = \frac{16\pi}{1 + \rho^2} \frac{d\sigma_{el}}{dt} \Big|_{t=0}$$

Fizyka małego x



- Szybki wzrost gęstości gluonów wraz z przesuwaniem się do małych x
- Wkłady od dużych członów w $(\ln 1/x)$, nie są opisywane w ramach równań ewolucji DGLAP
- Równania BFKL (CCFM)
- W obszarze do przodu dostęp do niskiego x

$$x^{min} = \frac{x_T e^{-\eta}}{2 - x_T e^{\eta}}$$



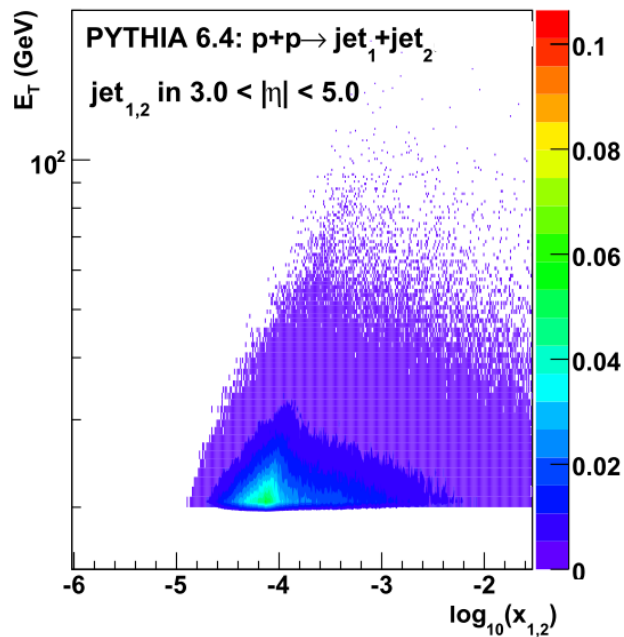
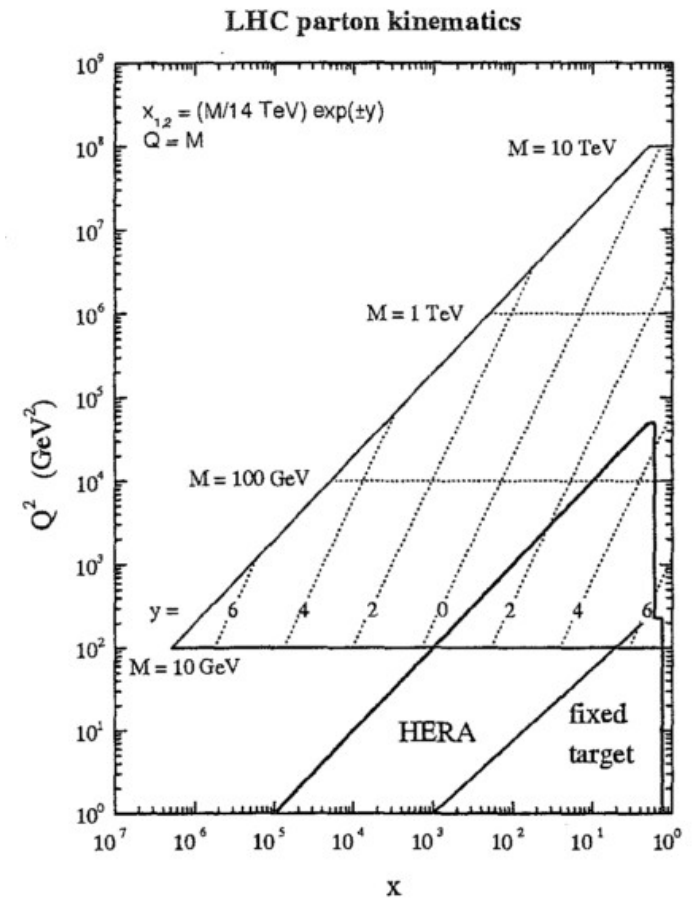
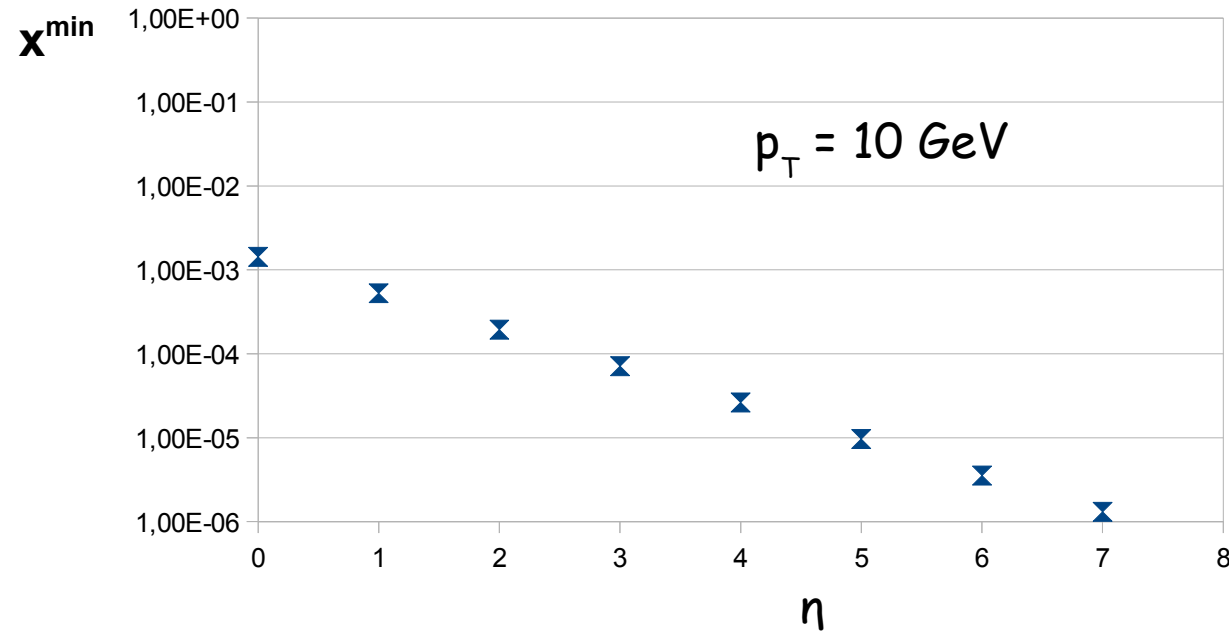
Minimalny x próbkowany przez obiekt (dżet) emitowany w η (średnie $10x^{min}$)

$$x_T = 2p_T / \sqrt{s}$$

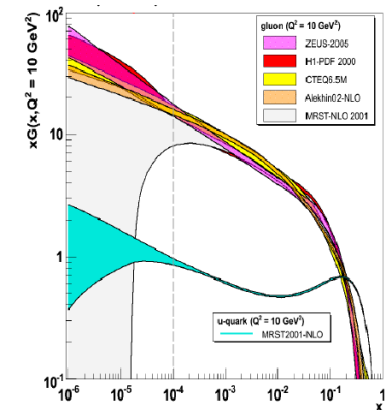


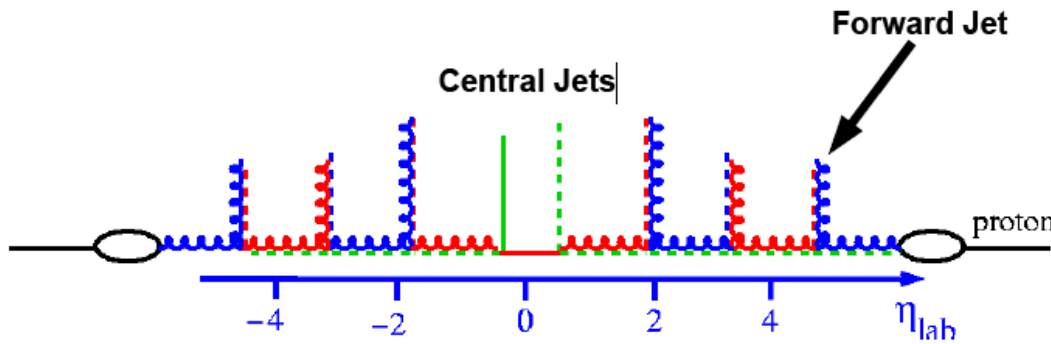
Skala procesu

Fizyka małego x



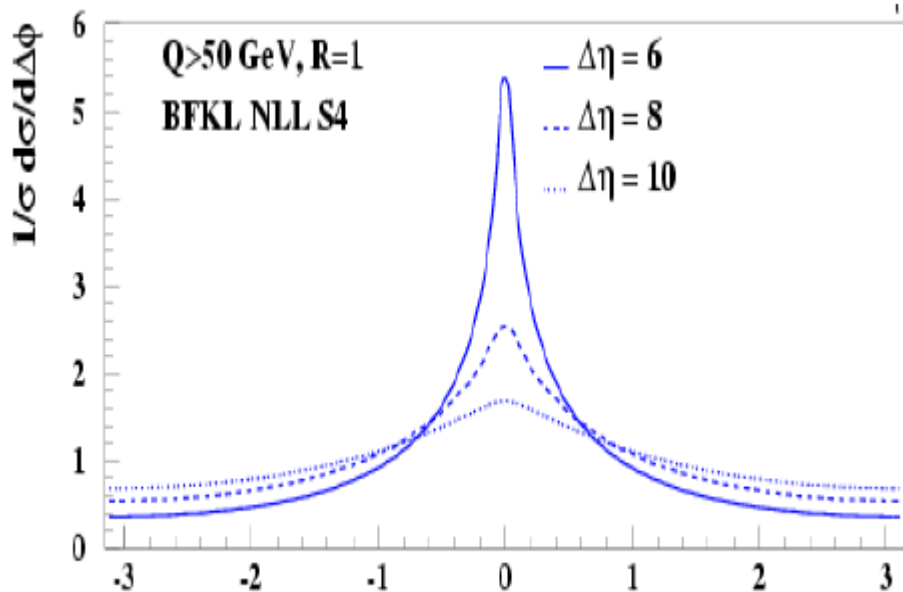
Pomiar dżetów do przodu - dodatkowe więzy na funkcje struktury \rightarrow Tevatron $x \sim 10^{-3}$



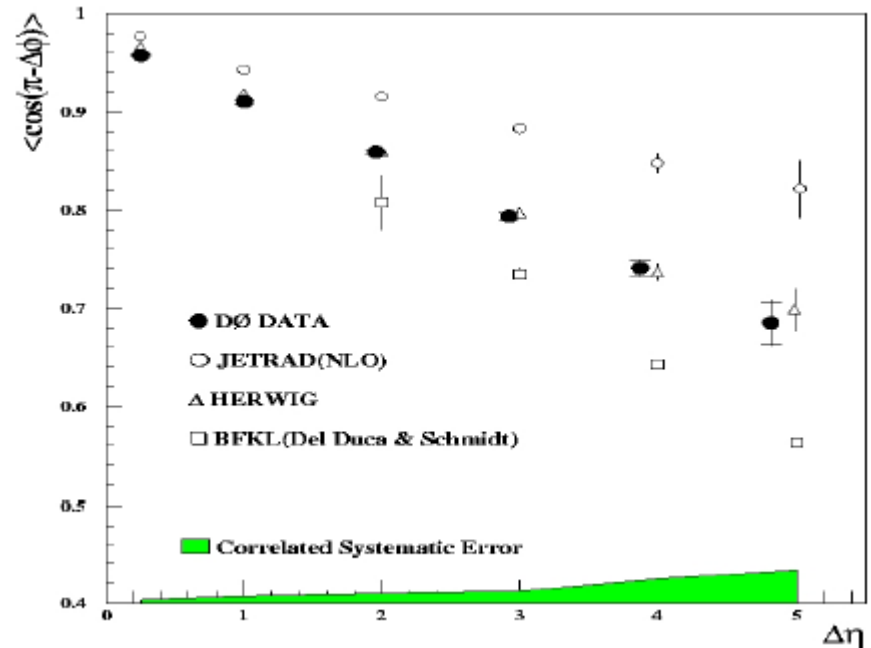


- Korelacje pomiędzy dżetami o dużej odległości w η
- Otwarta duża przestrzeń fazowa dla dodatkowych emisji gluonów

• Testy ewolucji BFKL



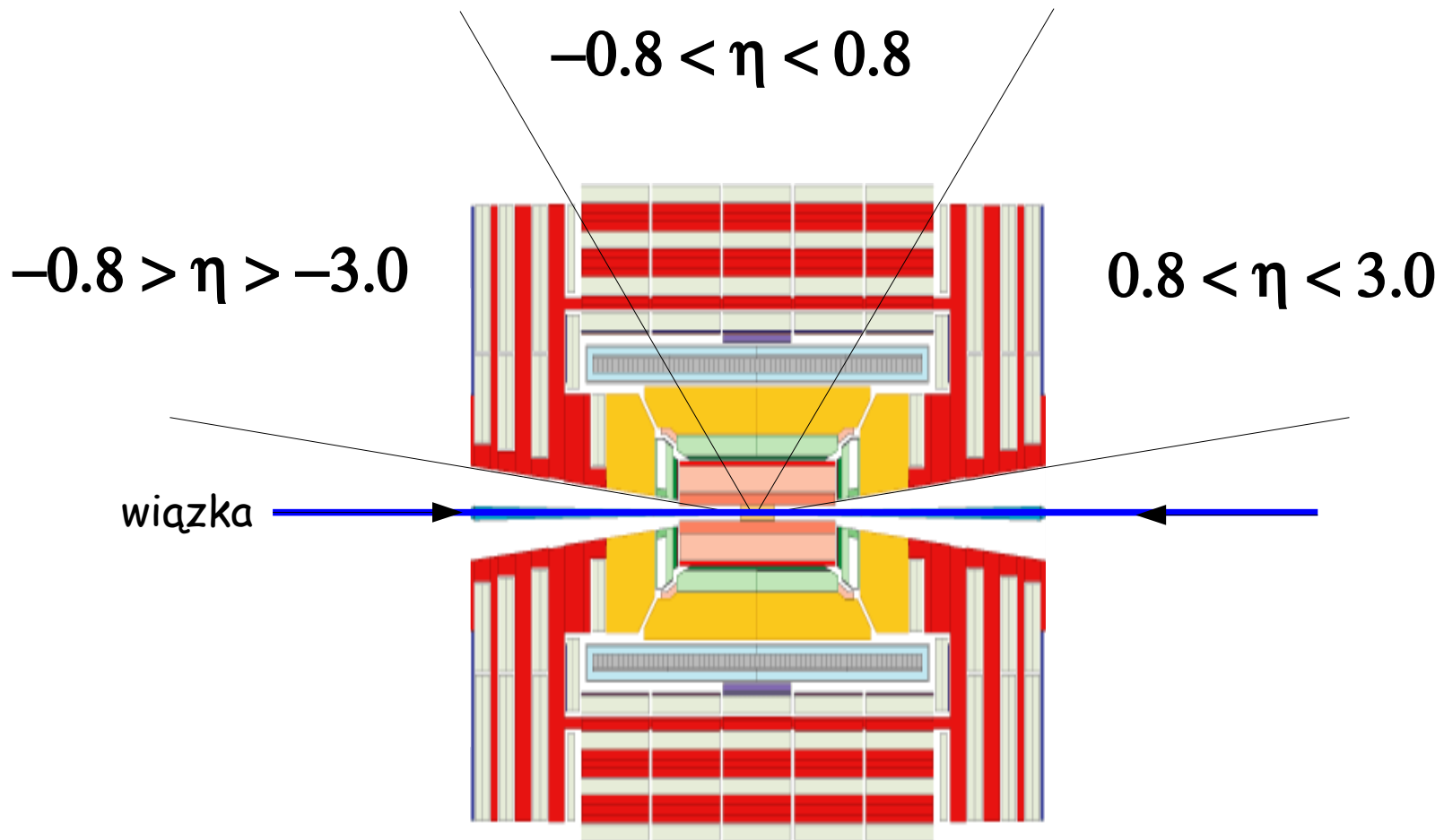
[A.Sabio-Vera, F.Schwennsen]
[C.Marquet, Royon]



S. Abachi et al. [DO Collaboration]
Phys. Rev. Lett. 77, 595 (1996).

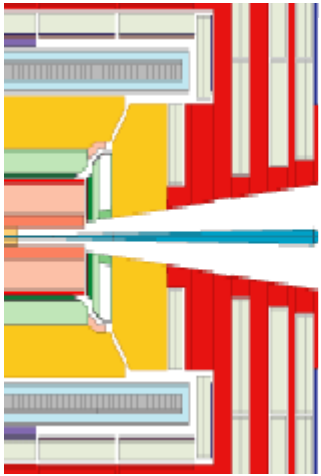
Eksperyment

Eksperyment CMS



Eksperyment CMS do przodu

20

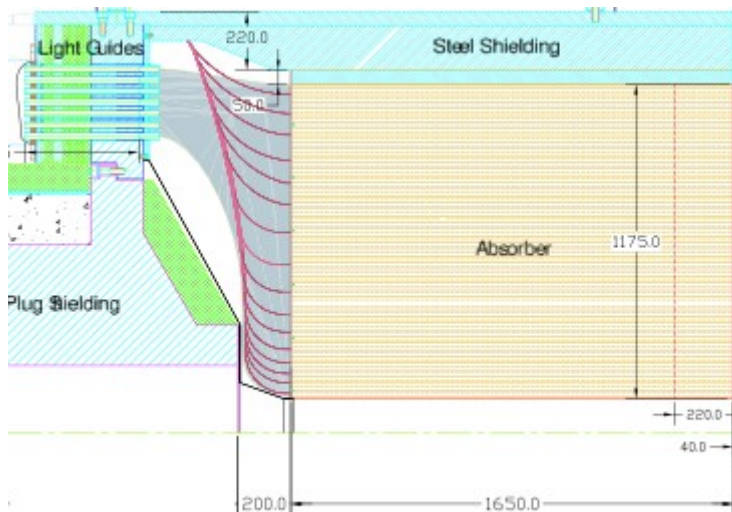
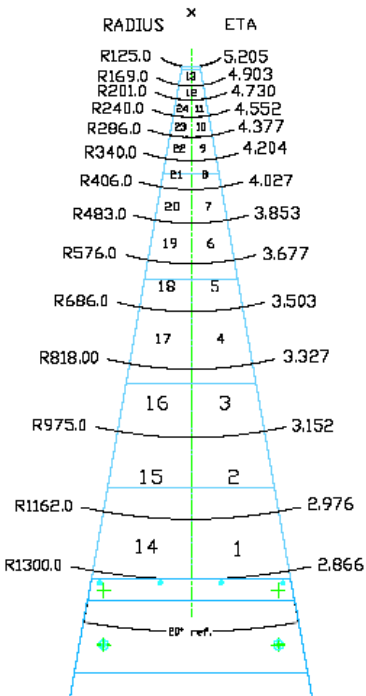


Eksperyment CMS do przodu

21

HF

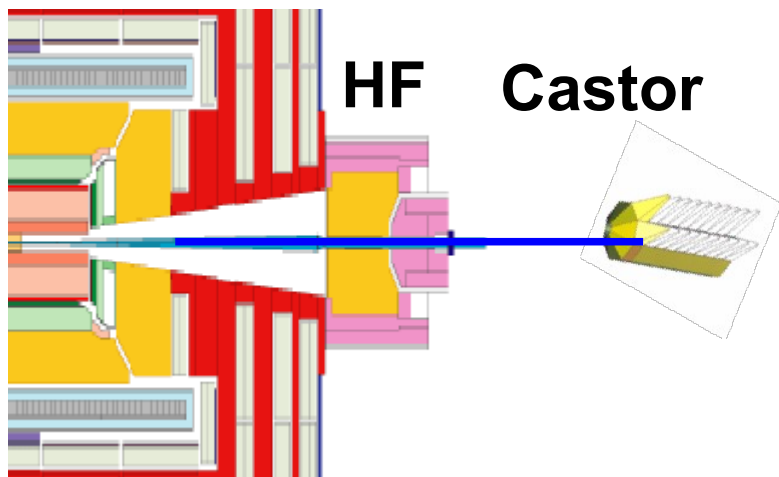
- Kalorymetr Hadronic Forward (HF)
- 11,2 m od punktu zderzenia
- Pokrycie: $3 < |\eta| < 5$
- Segmentacja w η i ϕ : 0.175×0.175
- Bazujący na zjawisku Czerenkowa
 - włókna równoległe do wiązki
 - krótkie i długie włókna



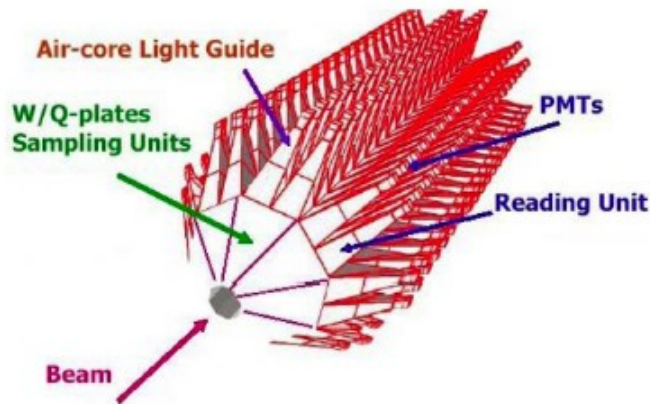
- Możliwość pomiaru dżetów (nie ma det. śladowego)
- Depozyty energii
 - lub ich brak
- Użycie jako część trygera

Eksperyment CMS do przodu

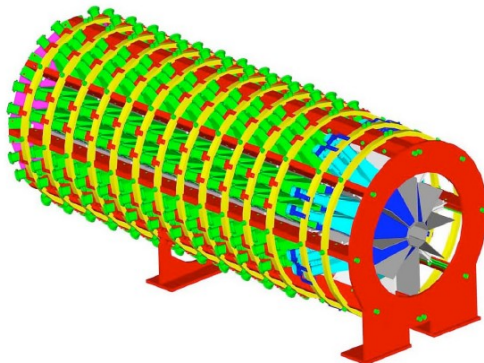
22



- Kalorymetr CASTOR
- 14,3 m od punktu zderzenia
- Pokrycie $-6.6 < \eta < -5.2$
- Segmentacja w ϕ (16 sektorów)
- Segmentacja w z: 14 modułów (2EM+12HAD)

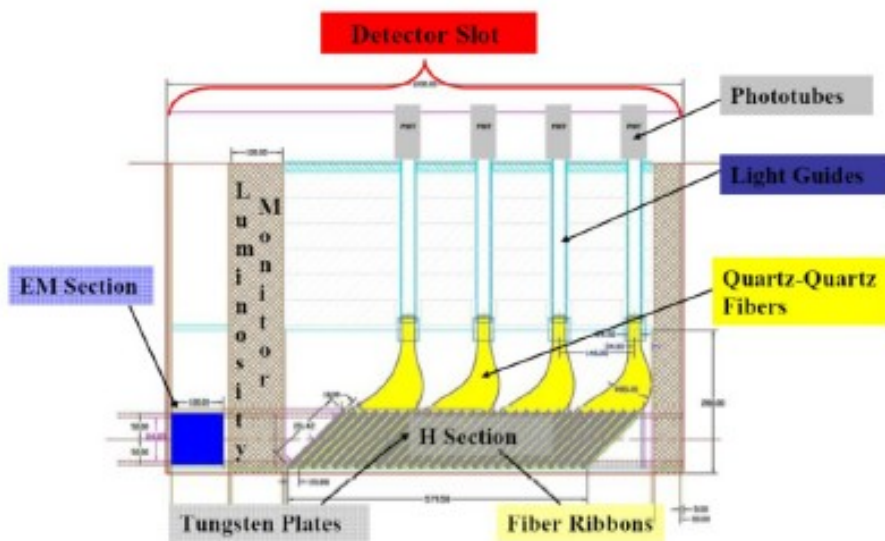
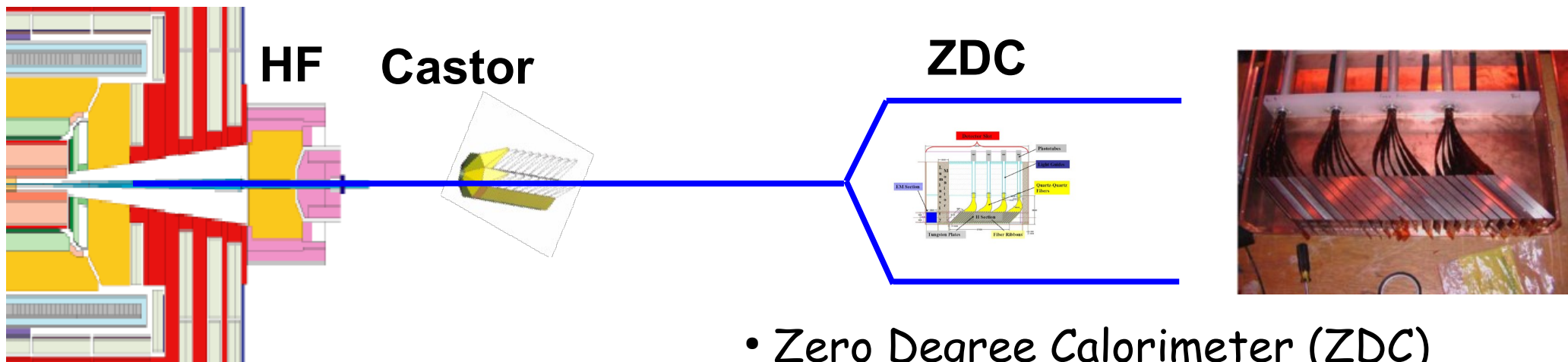


- Rekonstrukcja depozytów energii:
 - składowej EM i HAD
- Rekonstrukcja dżetów (bez det. śladowego)
- Modelowanie oddziaływania promieniowania kosmicznego → 100 PeV



Eksperyment CMS do przodu

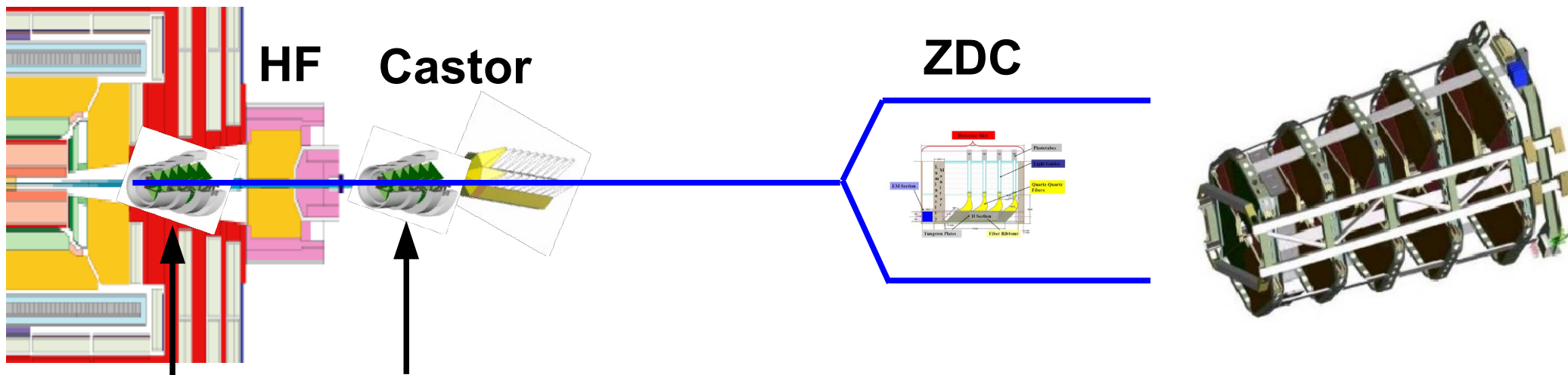
23



- Zero Degree Calorimeter (ZDC)
- 140 m od punktu zderzenia
- Pokrycie: $|n| > 8.1$
- Zjawisko Czerenkowa
- Oddzielna część EM i HAD
- Możliwość detekcji jedynie składowej neutralnej (γ, π^0, n)
- Pomiar centralności w zderzeniach ciężkich jonów
- Produkcja neutronów w pp

Eksperyment CMS do przodu

24



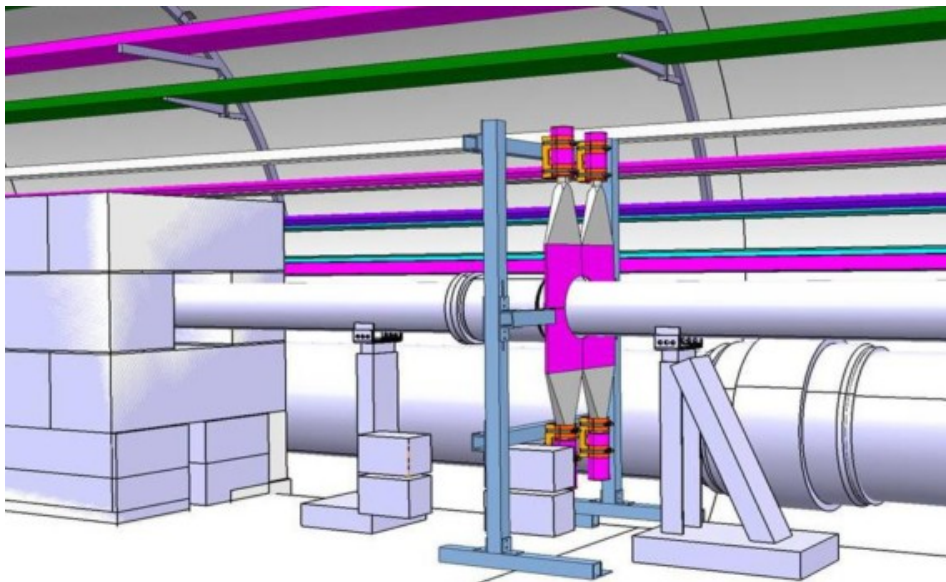
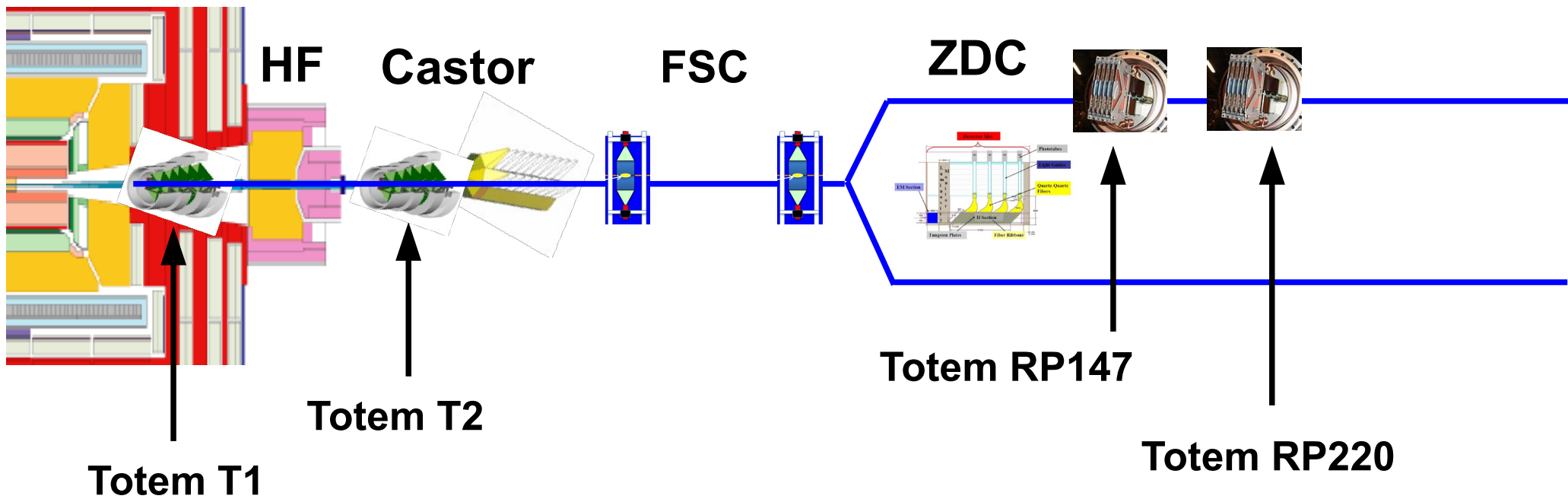
Totem T1

Totem T2

- Detektory śladowe eksperymentu Totem: T1 i T2
- Pokrycie T1: $3.2 < |\eta| < 4.7$, T2: $5.3 < |\eta| < 6.5$
- Pomiar 95% nieelastycznych oddziaływań
(99,5% niedyfrakcyjnych, 84% dyfrakcyjnych)
- Od końca 2011 synchronizacja danych z CMS i Totem

Eksperyment CMS do przodu

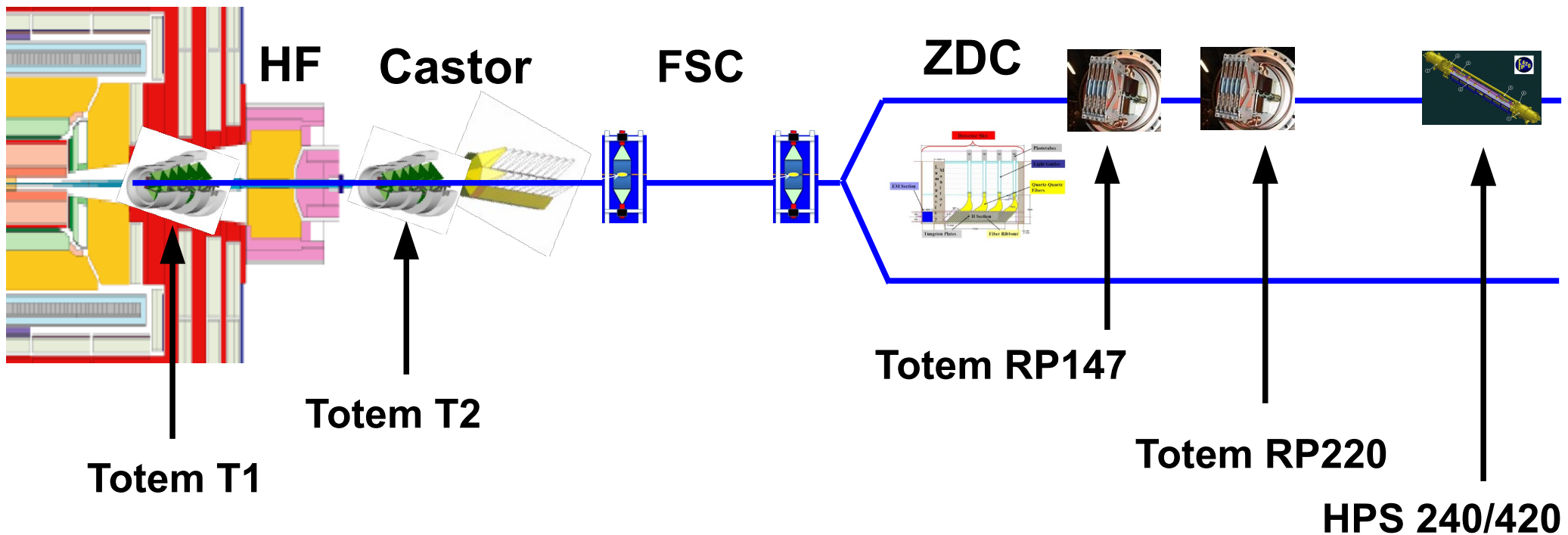
26



- 3 stacje detektorów scyntylacyjnych
- Pokrycie: $6 < |n| < 8$
- Detekcja rapidity gap
- Instalacja w 2011 roku
- Użyteczność tylko przy niskim pile-up

Eksperyment CMS do przodu

27



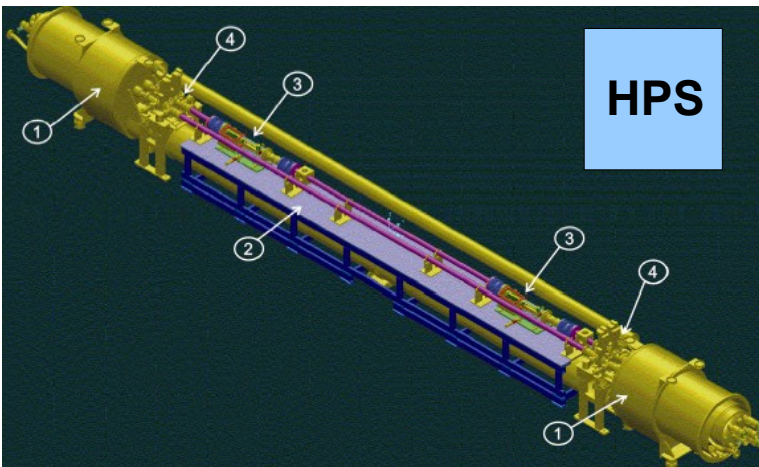
Totem T1

Totem T2

Totem RP147

Totem RP220

HPS 240/420



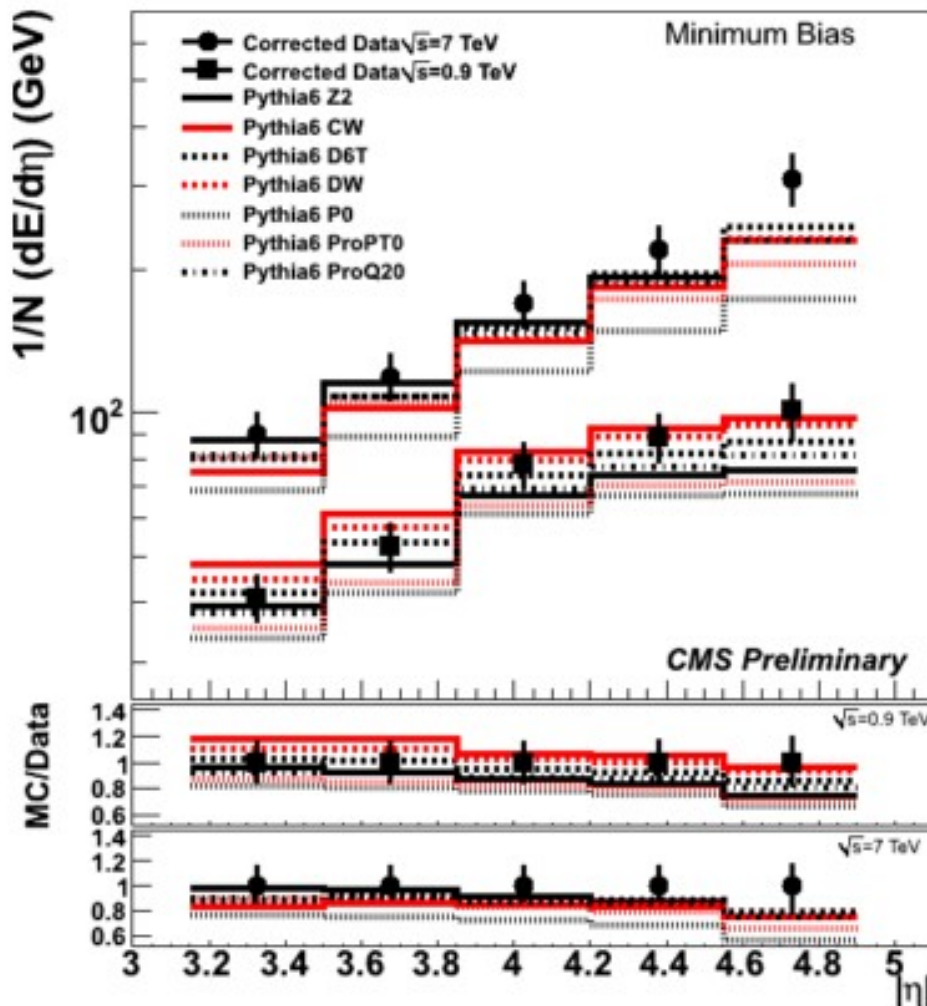
- High Precision Spectrometer (HPS)
- Dwie części: 240 m i 420 m od punktu zderzenia
- Detektor śladowy (w polu magn.) - pęd protonu
- Detekcja czasu - odseparowanie protonów z różnych wierzchołków
- Instalacja 2014 - 2018

Wyniki

Pomiar UE

$$\frac{1}{N} \frac{dE}{d\eta} [\text{GeV}]$$

Pomiar depozytów energii w binach η (HF)

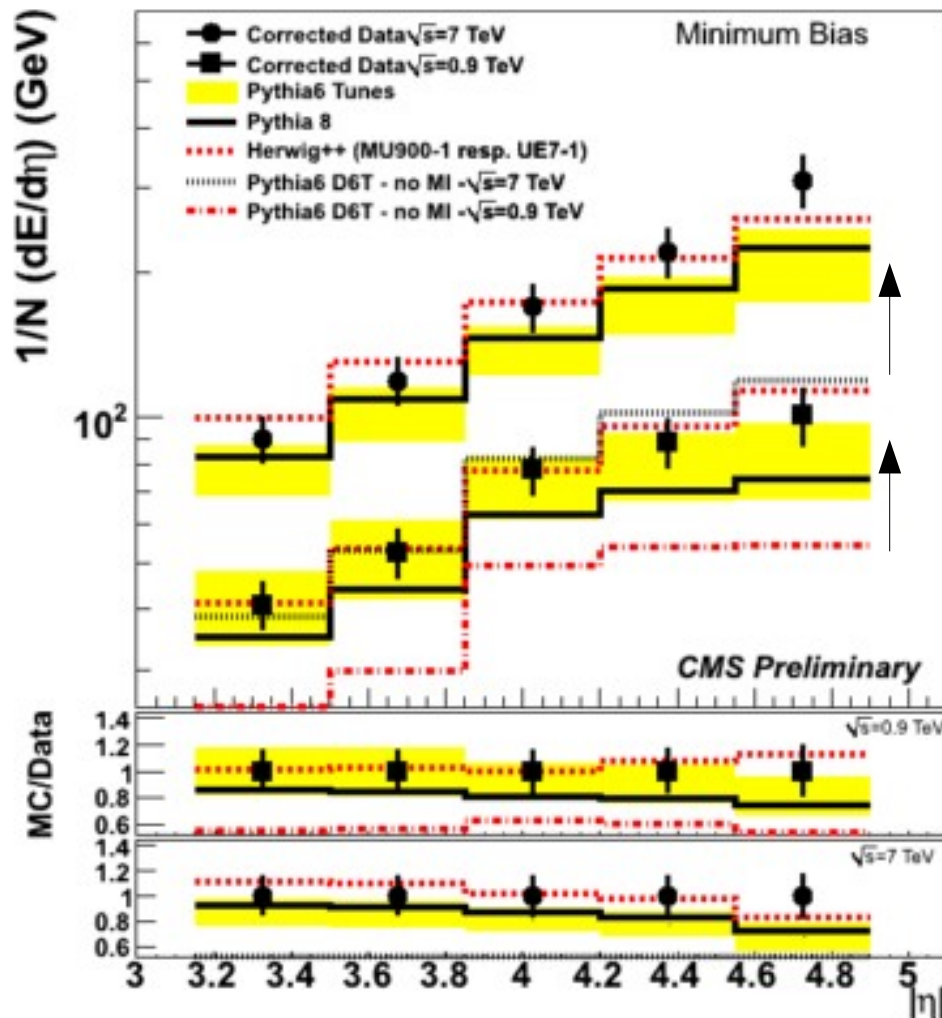


- Próbką Minimum Bias ze zredukowaną dyfrakcją (tryger)
- Przepływ energii większy bliżej wiązki
- Silna zależność od energii - podobna jak dla pomiarów krotności w centrum
- Pythia nie radzi sobie z najwyższymi η (nawet "tune" przygotowany dla LHC)

Pomiar UE

$$\frac{1}{N} \frac{dE}{dn} [\text{GeV}]$$

Pomiar depozytów energii w binach η (HF)



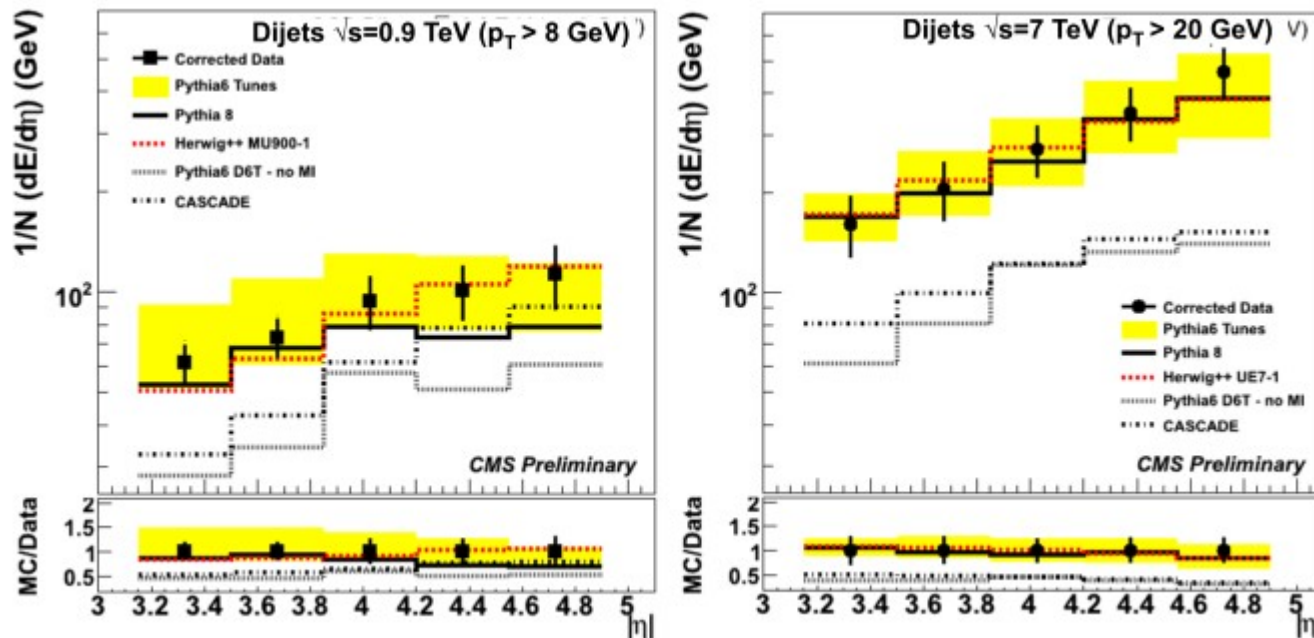
- Próbką Minimum Bias ze zredukowaną dyfrakcją (tryger)
- Żaden z modeli nie radzi sobie w pełnym obszarze.
- Dodanie MPI bardzo istotne

Pomiar UE

$$\frac{1}{N} \frac{dE}{dn} [\text{GeV}]$$

Pomiar depozytów energii w binach η (HF)

Przypadki zawierające dwa twarde dzety w centralnej części:



- Znacznie wyższy przepływ energii do przodu
- Lepsza zgodność z przewidywaniami (PYTHIA, HERWIG)

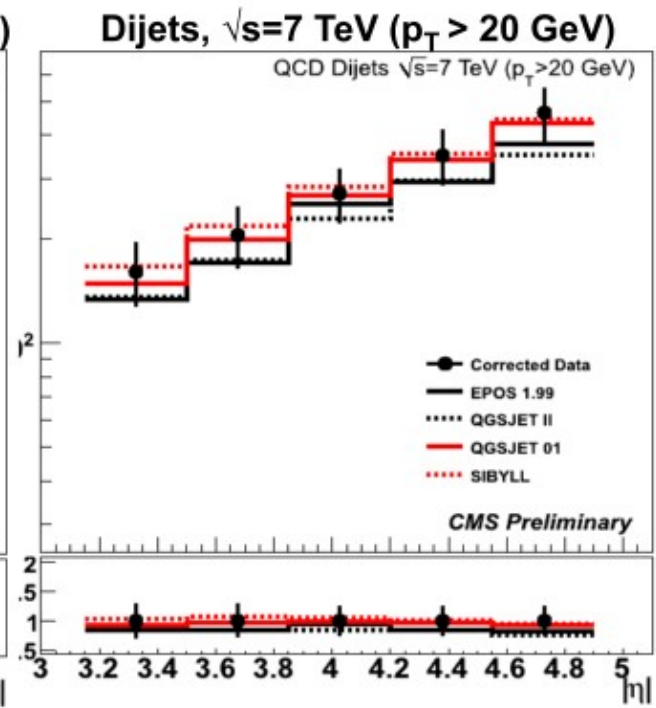
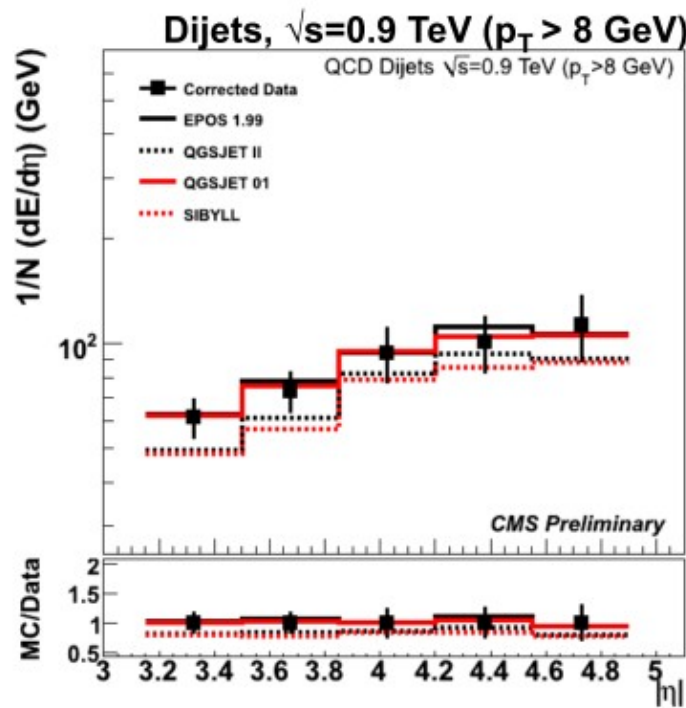
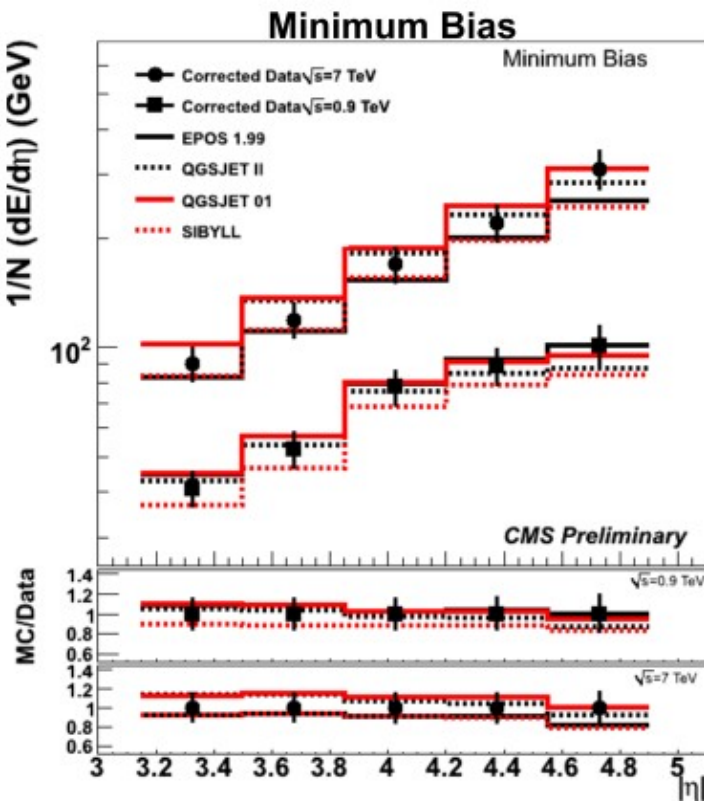
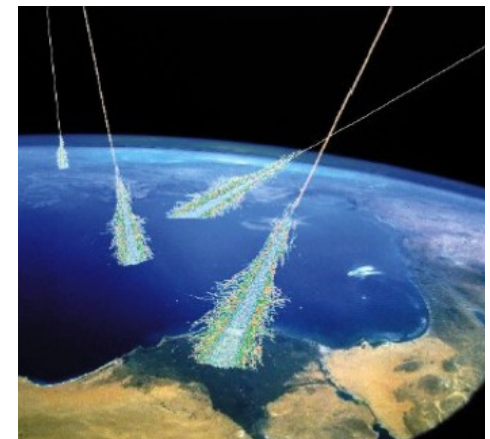
Pomiar UE

$$\frac{1}{N} \frac{dE}{d\eta} [\text{GeV}]$$

Pomiar depozytów energii w binach η (HF)

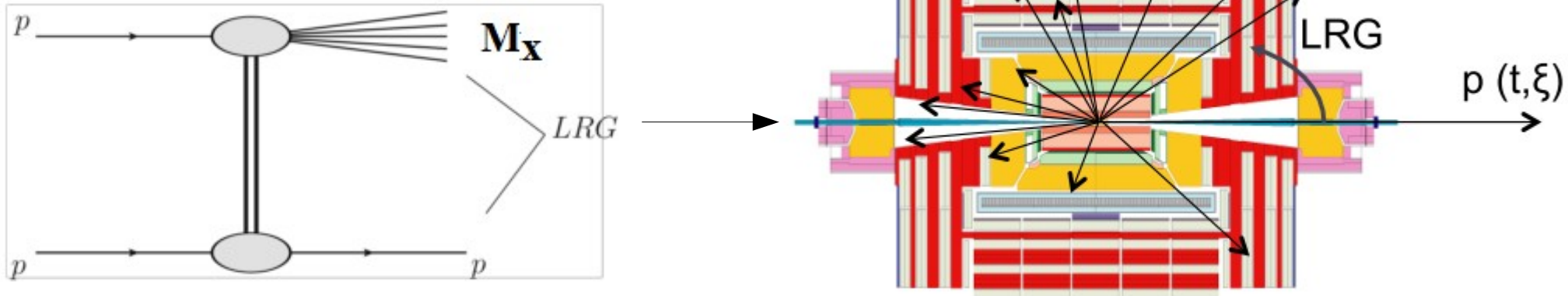
Modele propagacji promieniowania kosmicznego powinny opisywać obszar do przodu w CMS (Glauber)

Modele opisują dane



Miękka dyfrakcja

32



$$\sum (E_i + p_{z,i})$$

Suma przebiega po wszystkich celach kalorymetru (również HF),
 $\sim \xi$ oraz $\sigma(\text{difr}) \sim 1/\xi$

$$\xi = (M_x)^2 / S$$

dlatego maksimum przy małych wartościach

2) E_{HF} - Całkowita energia w HF
Gdy RG w HF, przypadki dyfrakcyjne w pierwszym binie

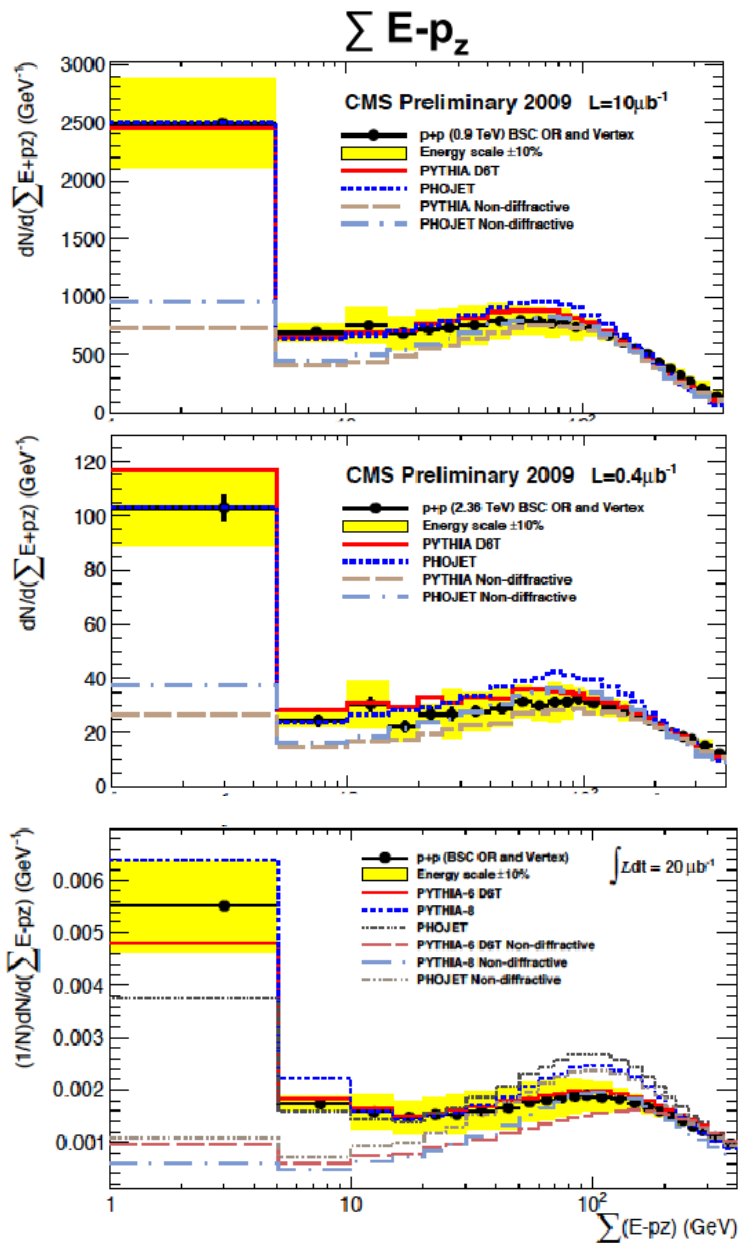
3) N_{HF} - ilość cel HF z depozytem energii powyżej 4 GeV
Gdy RG w HF, przypadki dyfrakcyjne w pierwszym binie

Miękka dyfrakcja

Wyraźny komponent dyfrakcyjny

Wraz ze wzrostem energii rosną różnice pomiędzy modelami

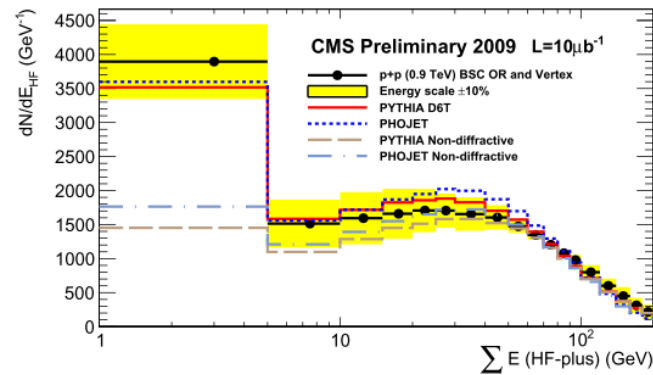
Następny krok - ilościowy pomiar komponentu dyfrakcyjnego



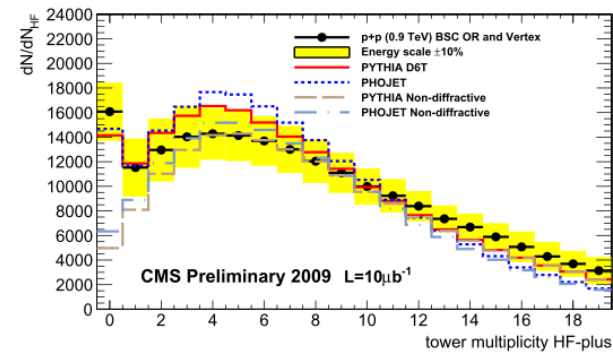
$\sqrt{s} = 0.9$ TeV

$\sqrt{s} = 2.36$ TeV

$\sqrt{s} = 7$ TeV



$\sum E$ (HF-plus) (GeV)



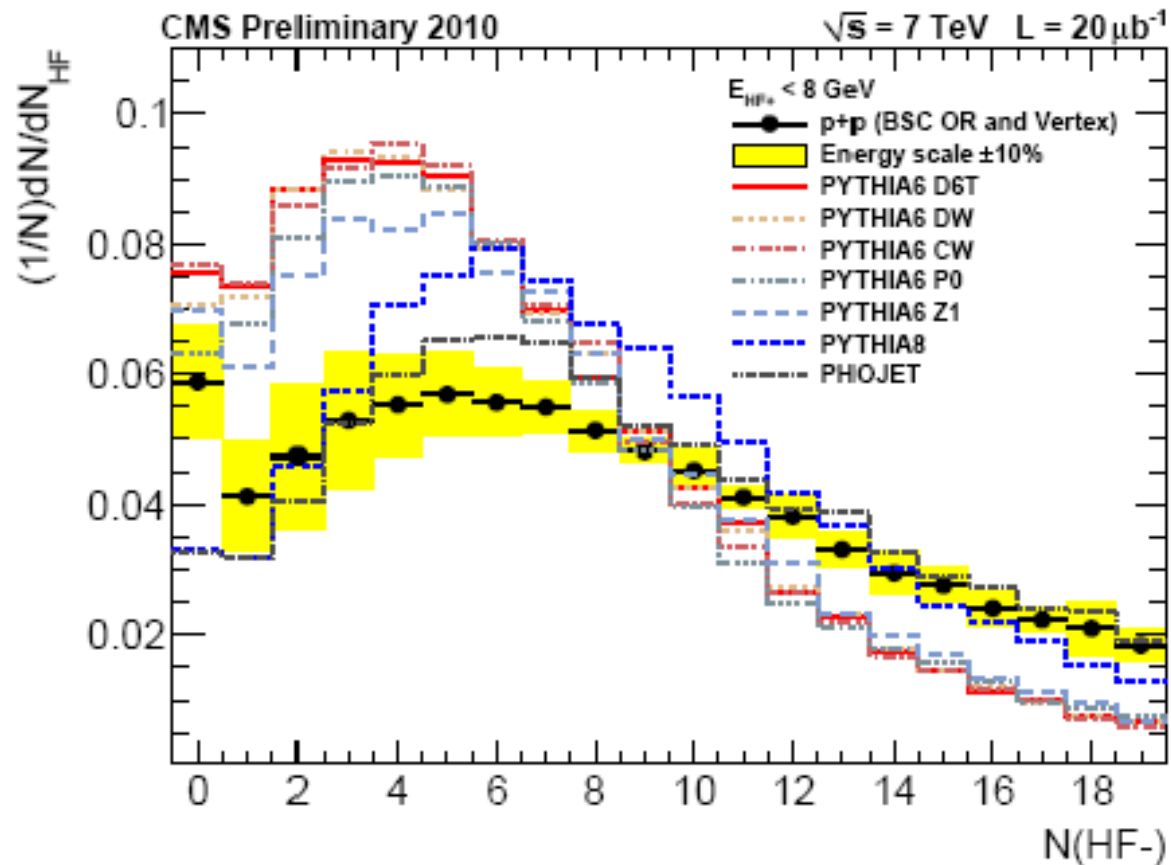
CMS Preliminary 2009 $L = 10 \mu\text{b}^{-1}$

tower multiplicity HF-plus

Miękka dyfrakcja

Komponent dyfrakcyjny zwiększony $\rightarrow E(\text{HF}) < 8 \text{ GeV}$

Depozyty energii w HF nie są opisywane przez żaden z modeli



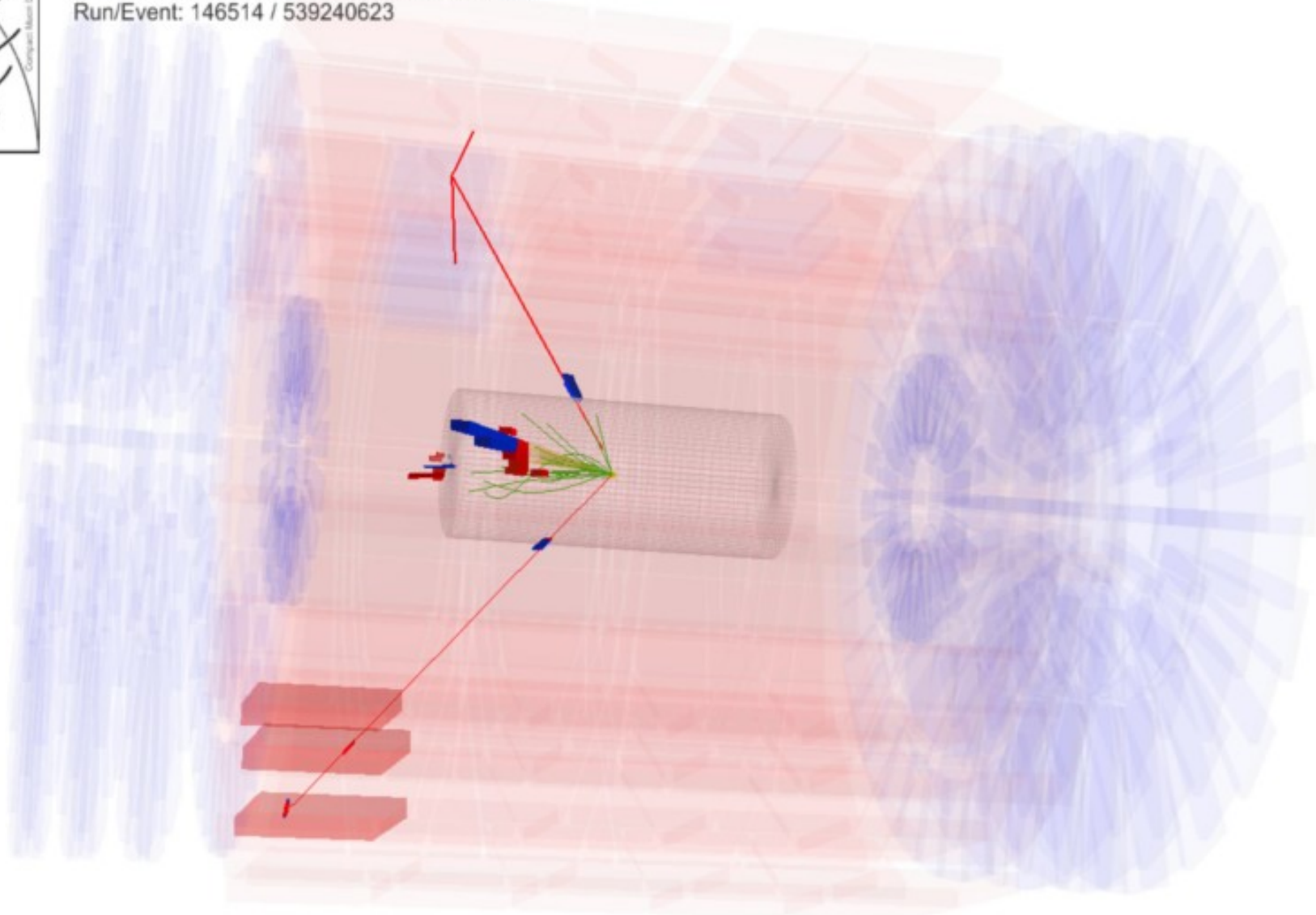
Twarda dyfrakcja w CMS

35



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri Sep 24 09:01:35 2010 CEST
Run/Event: 146514 / 539240623

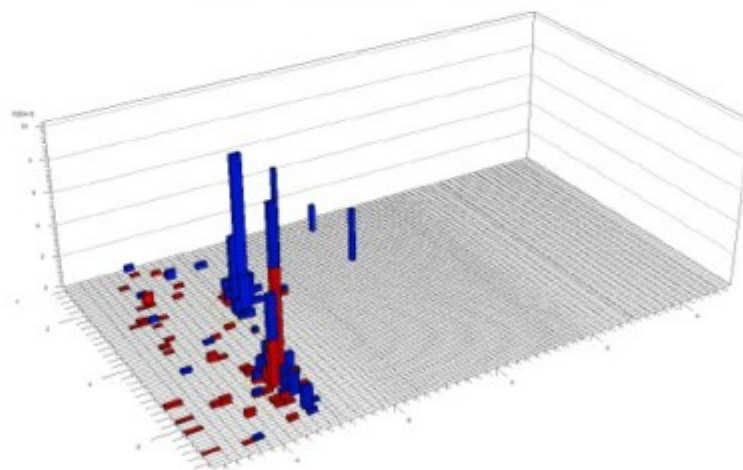
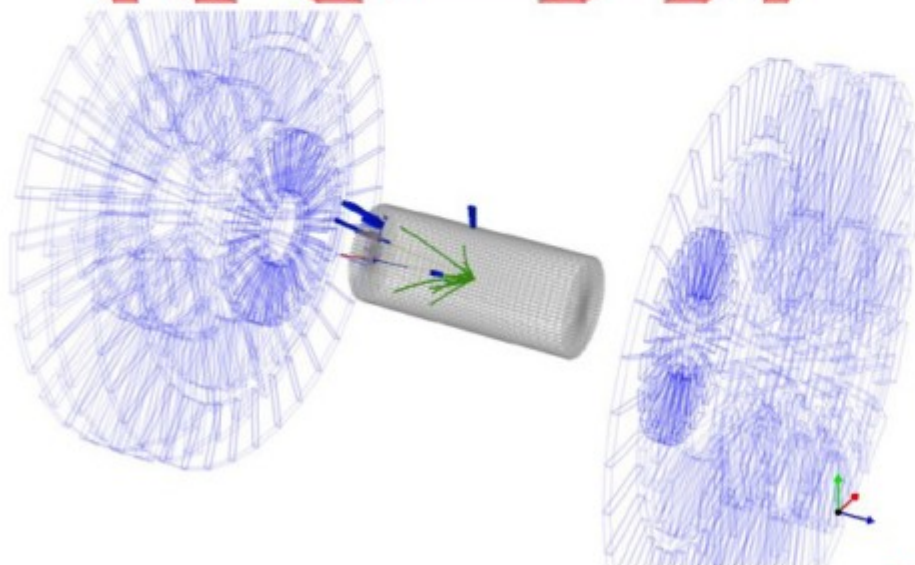
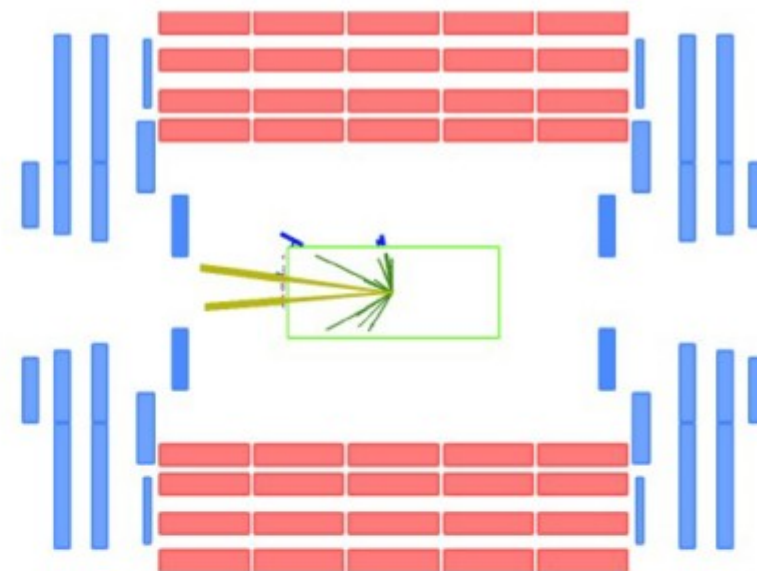
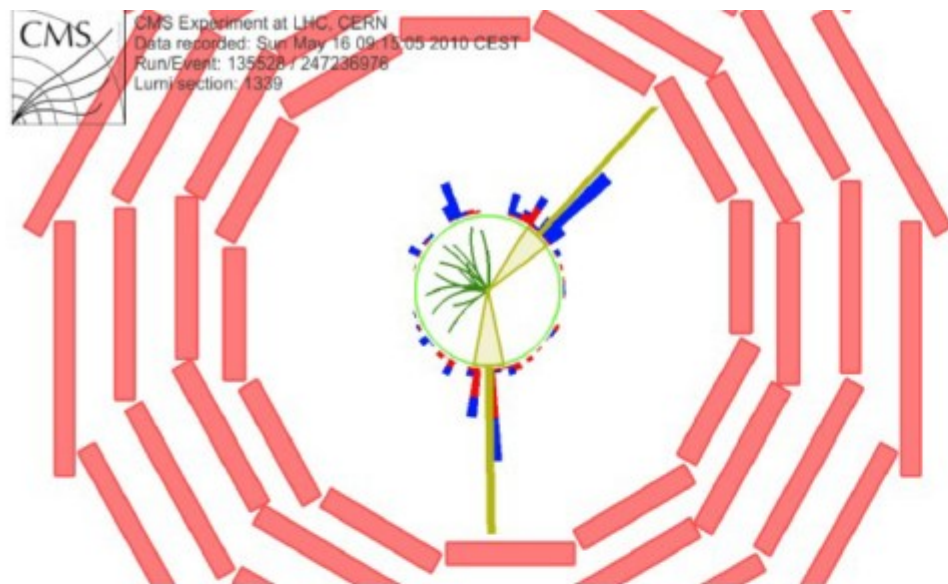
Dyfrakcyjna produkcja $W \rightarrow \mu\nu$



Twarda dyfrakcja w CMS

36

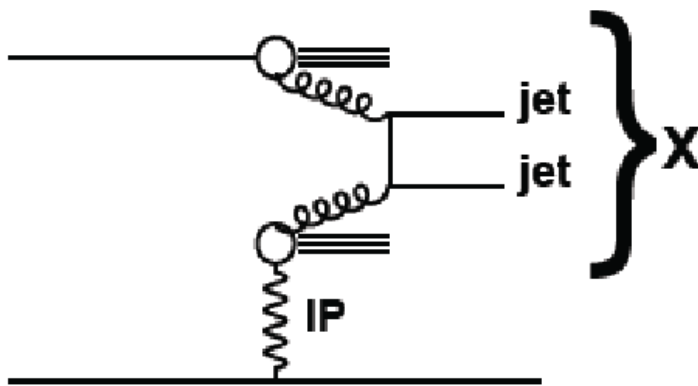
Dyfrakcyjna produkcja par dżetów



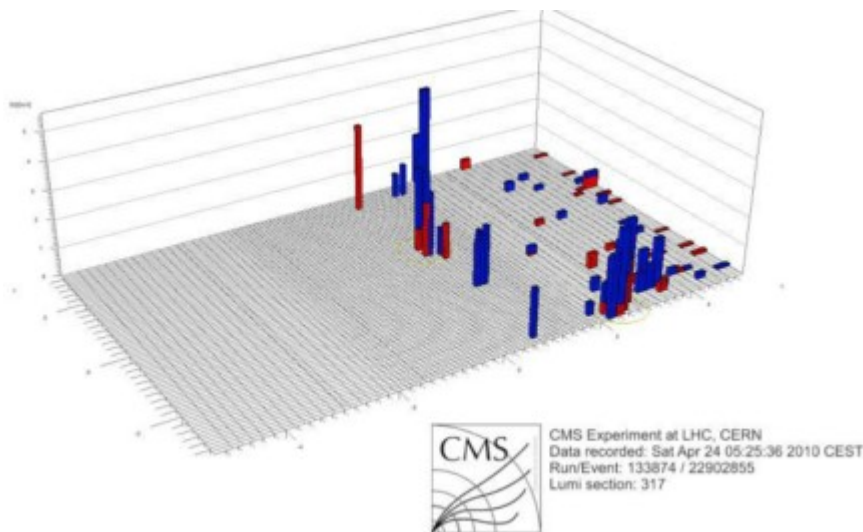
$p_T(\text{jet1}) = 41.2 \text{ GeV}$, $p_T(\text{jet2}) = 31.9 \text{ GeV}$
 $\eta(\text{jet1}) = -2.8$, $\eta(\text{jet2}) = -3.3$

Twarda dyfrakcja w CMS

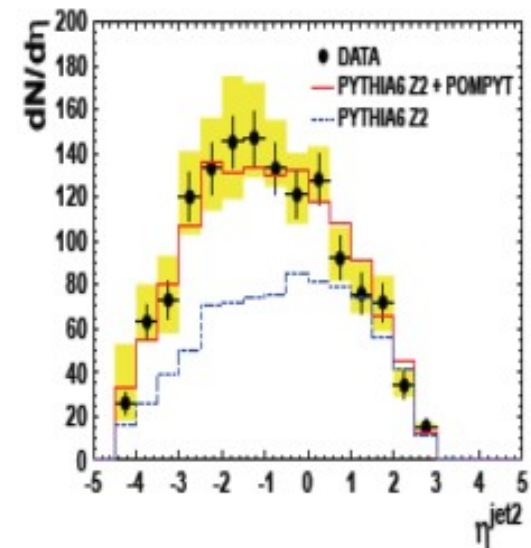
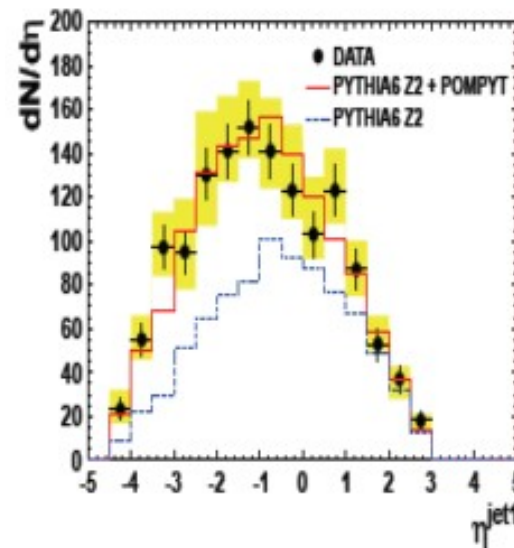
37



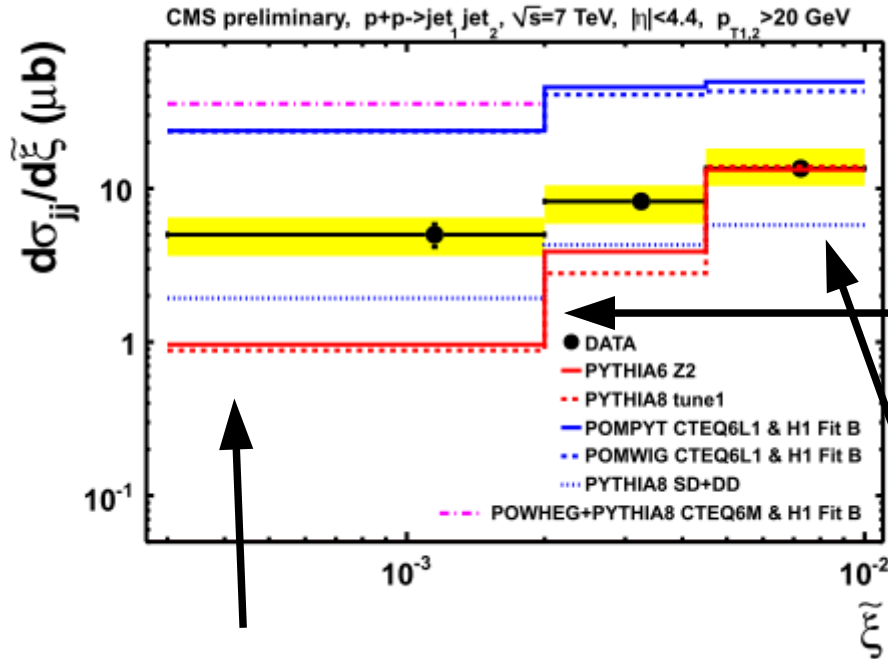
- Analiza: $2,7 \text{ nb}^{-1}$
- Wybór przypadków z parą dżetów $p_T > 20 \text{ GeV}$, $|\eta| < 4,4$
- Wybór przypadków z RG: cząstka najbardziej do przodu (tyłu) $\eta_{\text{max}} < 3$ ($\eta_{\text{min}} > -3$)



- Zmierzona dystrybucja cząstek naładowowanych zgodna z odpowiednio znormalizowanym MC: PYTHIA6 i POMPYT



Twarda dyfrakcja w CMS



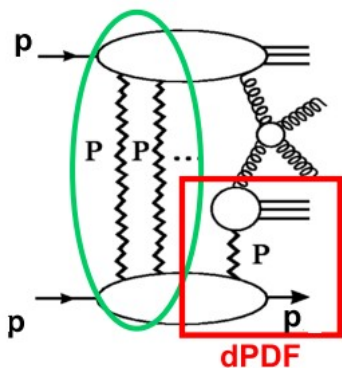
← POMPYT (POMWIG) - twarda dyfrakcja

← PYTHIA6 - bez dyfrakcji

$\sigma(\text{difr}) \sim 1/\xi$
Małe ξ , dominacja dyfrakcji

Duże ξ , dominacja oddziaływań niedyfrakcyjnych

$\tilde{\xi}$ bin	$\Delta\sigma_{jj} / \Delta\tilde{\xi}$ (μb)
$0.0003 < \tilde{\xi} < 0.002$	$5.0 \pm 0.9(\text{stat.})_{-1.4}^{+1.5}(\text{syst.})$
$0.002 < \tilde{\xi} < 0.0045$	$8.2 \pm 0.9(\text{stat.})_{-2.3}^{+2.3}(\text{syst.})$
$0.0045 < \tilde{\xi} < 0.01$	$13.5 \pm 0.9(\text{stat.})_{-3.1}^{+4.7}(\text{syst.})$

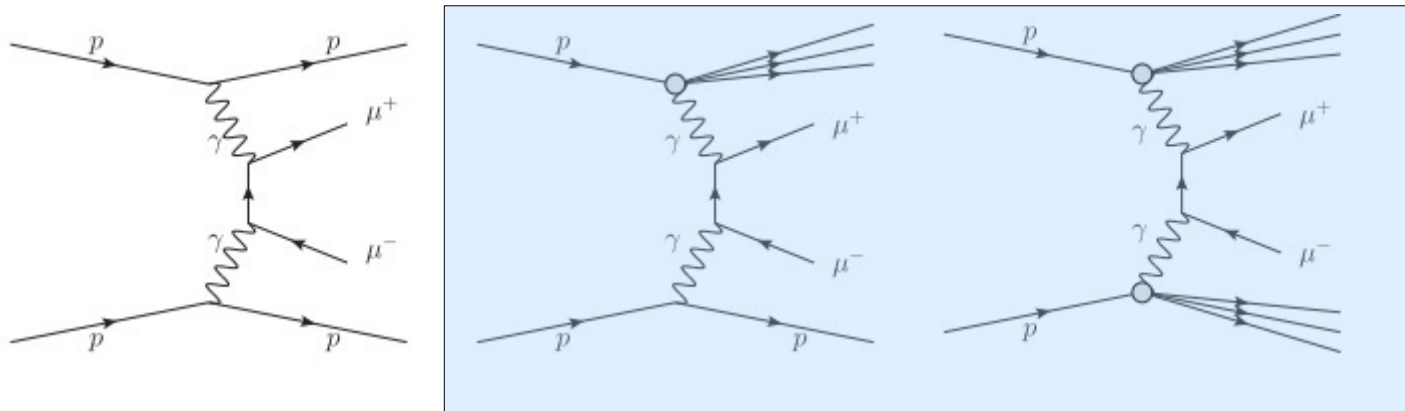


Modele nie zawierają oddziaływań tamiących faktoryzacje

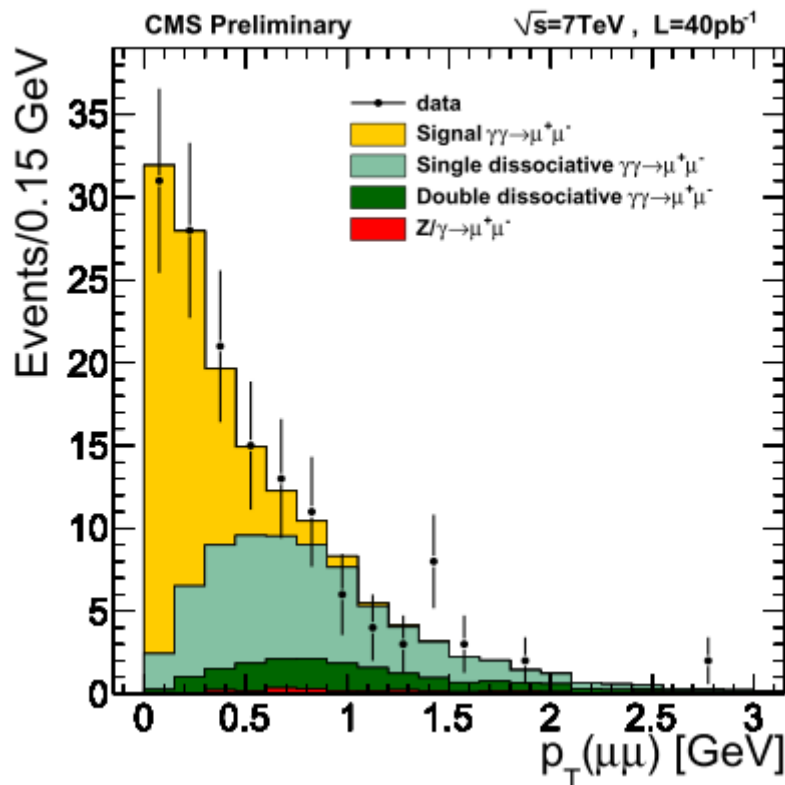
zmierzone prawd. przetrwania RG: 0.1-0.2

Ekskluzywna produkcja: $\gamma\gamma \rightarrow \mu\mu$

39



Nieredukowalne tło



Selekcja mionów:

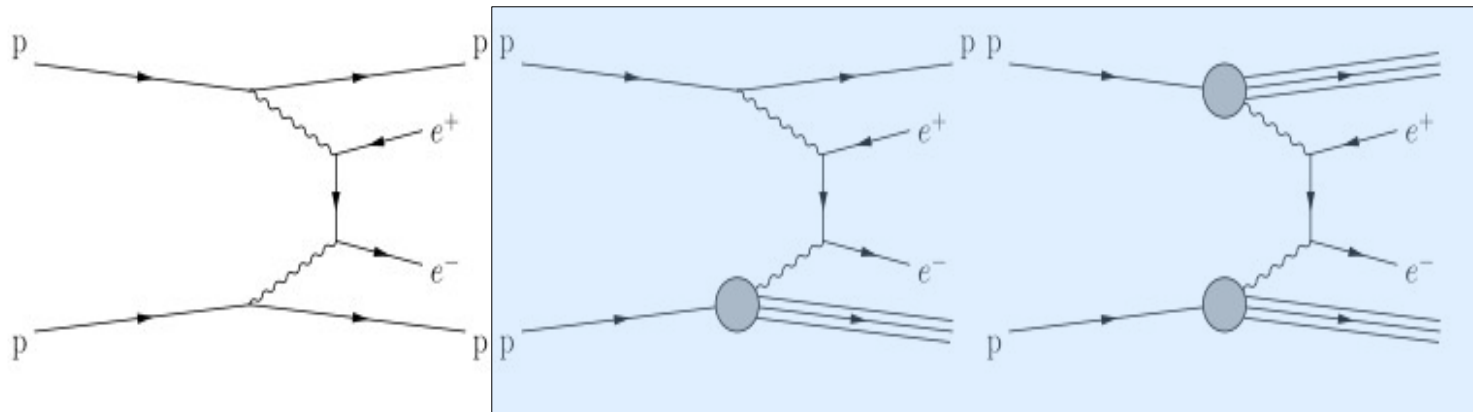
$$p_T(\mu) > 4 \text{ GeV}, |\eta| < 2.1, m(\mu\mu) > 11.5 \text{ GeV}$$

Przekrój czynny:

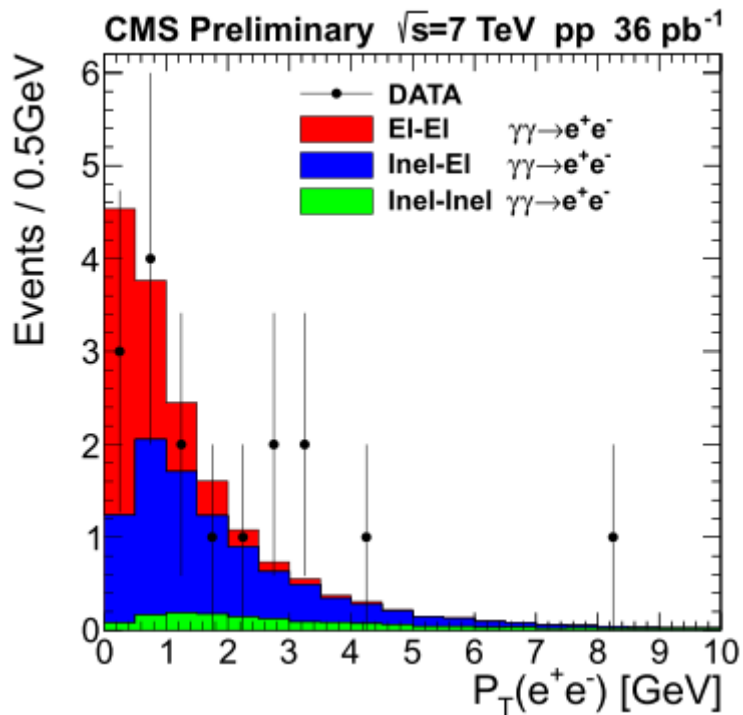
$$3.38^{+0.58}_{-0.55}(\text{stat.}) \pm 0.16(\text{syst.}) \pm 0.14(\text{lumi}) \text{ pb}$$

Przewidywanie (LPAIR): 4.08 pb

Ekskluzywna produkcja: $\gamma\gamma \rightarrow ee$



Nieredukowalne tło



$$p_T(e) > 5.5 \text{ GeV}, |\eta| < 2.5, m(ee) > 11.5 \text{ GeV}$$

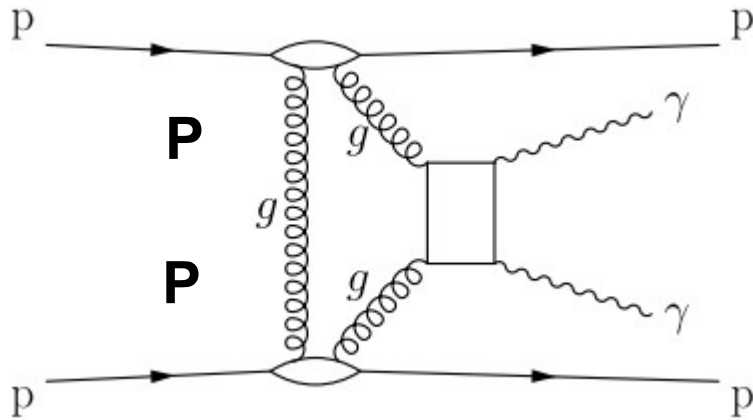
Przypadki z jednym wierzchołkiem

Process	nEvents
el-el	6.57 ± 0.07 (theo.) ± 0.80 (syst.)
inel-el	8.37 ± 1.68 (theo.) ± 0.90 (syst.)
inel-inel	1.51 ± 0.30 (theo.) ± 0.15 (syst.)
Total	16.5 ± 1.7 (theo.) ± 1.2 (syst.)

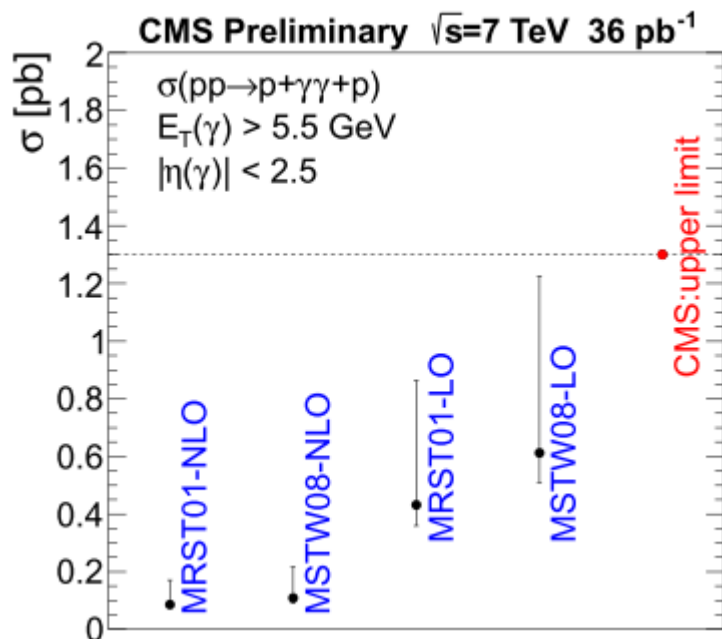
Zarejestrowano 17 przypadków

Ekskluzywna produkcja: $gg \rightarrow \gamma\gamma$

41



- Inne procesy $qq \rightarrow \gamma\gamma$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ zanedbywalne
- Identyczny proces (co do el. macierzowego) dla ekskluzywnej produkcji Higgsa
- Istotne rozkłady gluonów przy niskim x



$$\sigma_{\text{exclusive } \gamma\gamma \text{ production}}^{E_T(\gamma) > 5.5 \text{ GeV}, |\eta(\gamma)| < 2.5} < 1.30 \text{ pb}$$

- Przy MSTW08-LO prawdopodobieństwo 0 kandydatów 23%
- CDF: $1.6_{-0.3}^{+0.5}$ (stat.) ± 0.3 (syst.) pb dla znacznie niższych E_T

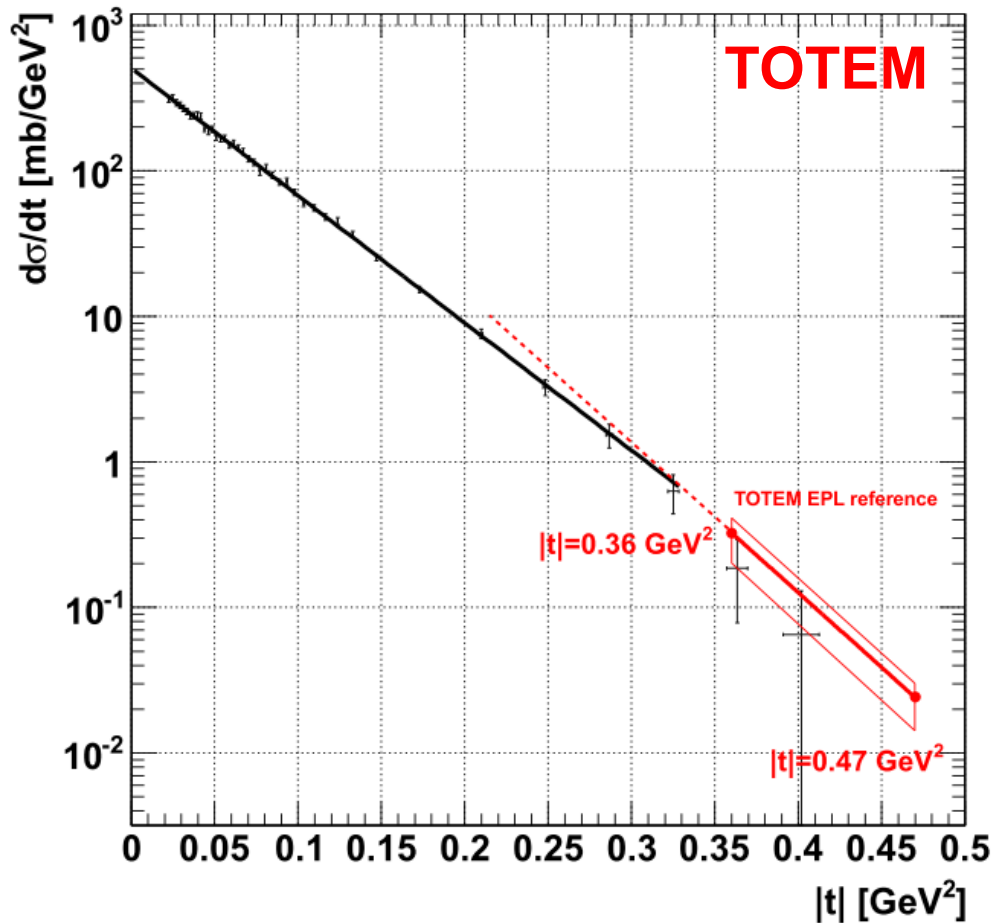
Całkowity przekrój czynny pp

Równanie: $\sigma_{\text{tot}}^2 = \frac{16\pi}{1+\rho^2} \left. \frac{d\sigma_{\text{el}}}{dt} \right|_{t=0}$

$|t_{\text{min}}| = 2 \times 10^{-2} \text{ GeV}^2$

Świetlność: $1,65 \mu\text{b}^{-1}$

Ekstapolacja: $\frac{d\sigma_{\text{el}}}{dt} = \left. \frac{d\sigma_{\text{el}}}{dt} \right|_{t=0} e^{-B|t|}$



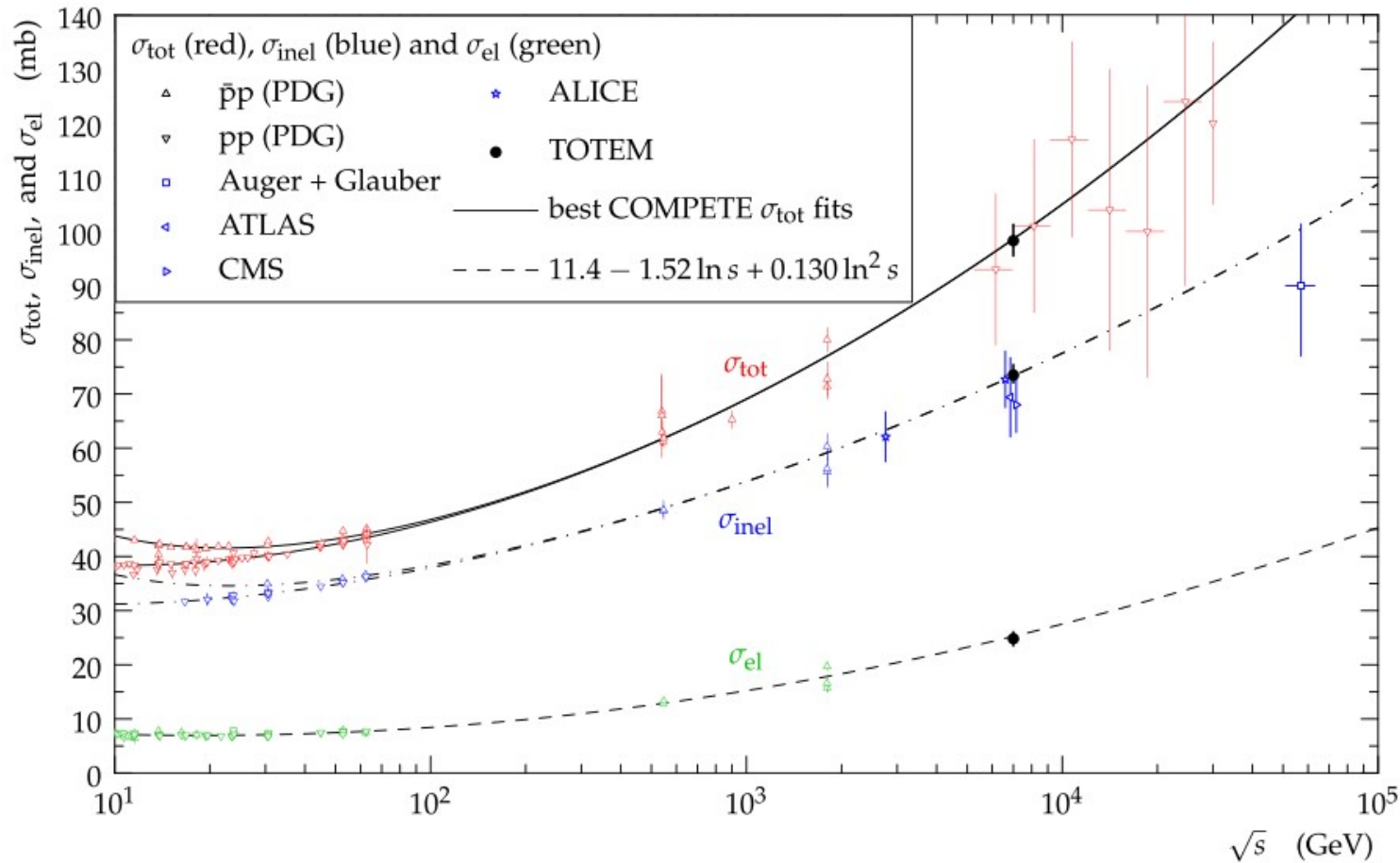
$B = (20.1 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.3(\text{syst})) \text{ GeV}^{-2}$

$\left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{t=0} = (503.7 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 26.7(\text{syst})) \text{ mb/GeV}^2$

$\sigma_{\text{tot}} = \left(98.3 \pm 0.2(\text{stat}) \begin{matrix} +2.8 \\ -2.7 \end{matrix} (\text{syst}) \right) \text{ mb}$

Elastyczny: $(24.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 1.2(\text{syst})) \text{ mb}$

Całkowity przekrój czynny pp



σ_{tot}	$(98.3 \pm 0.2^{\text{stat}} \pm 2.8^{\text{syst}}) \text{ mb}$
$\sigma_{\text{el}} = \int \frac{d\sigma}{dt} dt$	$(24.8 \pm 0.2^{\text{stat}} \pm 1.2^{\text{syst}}) \text{ mb}$
σ_{inel}	$(73.5 \pm 0.6^{\text{stat}} \pm 1.8^{\text{syst}}_{-1.3}) \text{ mb}$
$\sigma_{\text{inel}} (\text{CMS})$	$(68.0 \pm 2.0^{\text{syst}} \pm 2.4^{\text{lumi}} \pm 4^{\text{extrap}}) \text{ mb}$
$\sigma_{\text{inel}} (\text{ATLAS})$	$(69.4 \pm 2.4^{\text{exp}} \pm 6.9^{\text{extrap}}) \text{ mb}$
$\sigma_{\text{inel}} (\text{ALICE})$	$(72.7 \pm 1.1^{\text{model}} \pm 5.1^{\text{lumi}}) \text{ mb}$

Dwa komplementarne pomiary:

- Przekrój czynny na produkcję dżetów do przodu: $3.2 < |\eta| < 4.7$
→ próbkowanie PDF przy $x=10^{-4}$
- Przekrój czynny na produkcje par dżetów: centralny ($|\eta| < 2.5$) - do przodu
→ korelacje pomiędzy dżetami (BFKL)

Wybór:

→ $3,14 \text{ pb}^{-1}$

→ $35 \text{ GeV} < p_T < 150 \text{ GeV}$

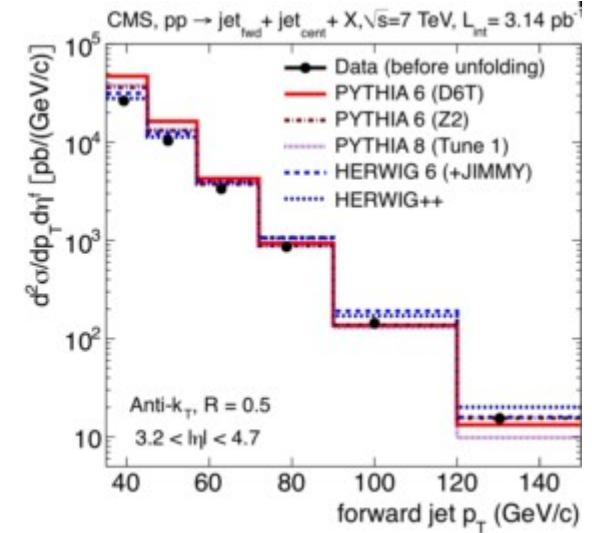
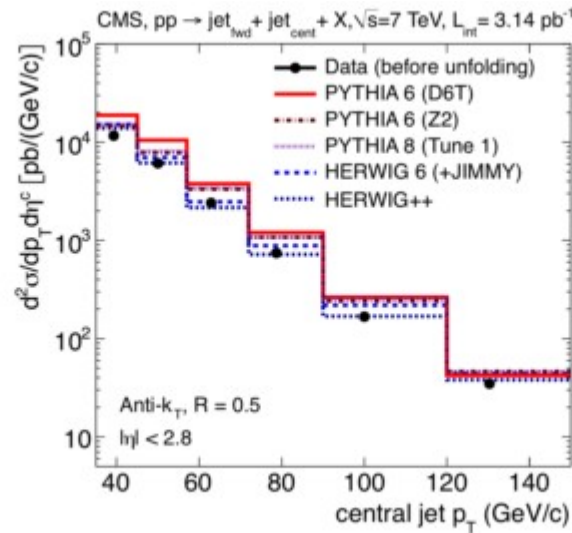
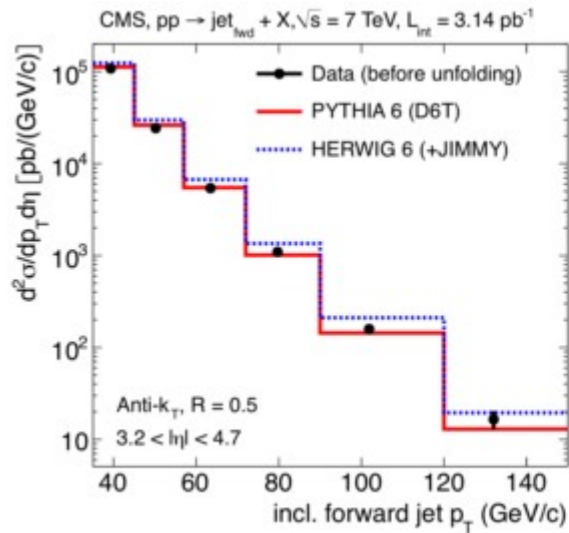
→ Korekcja do poziomu hadronowego (PYTHIA, HERWIG)

→ porównanie: PYTHIA6, PYTHIA8, HERWIG6+JIMMY, HERWIG++
NLOJET++, POWHEG (PS PYTHIA, HERWIG)
CASCADE (1/x), HEJ (duże kąty)

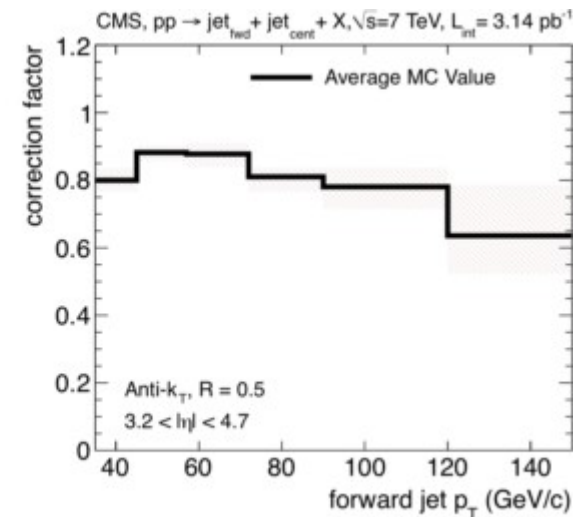
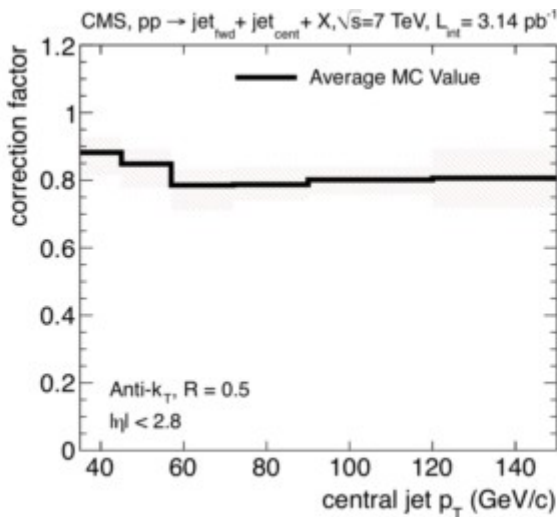
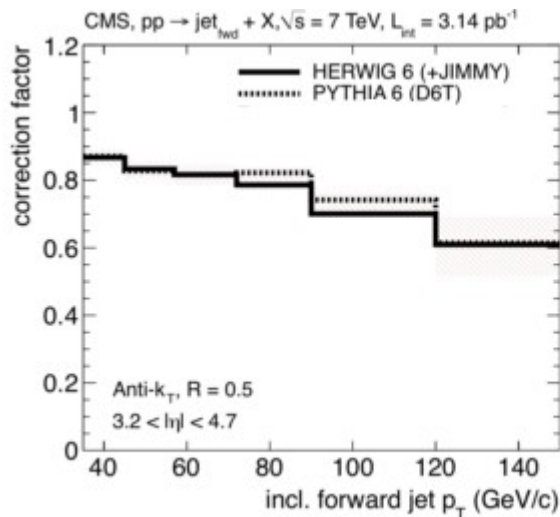
→ główna niepewność eksperymentalna - skala energii

Dzety do przodu

Dzety w detektorze:

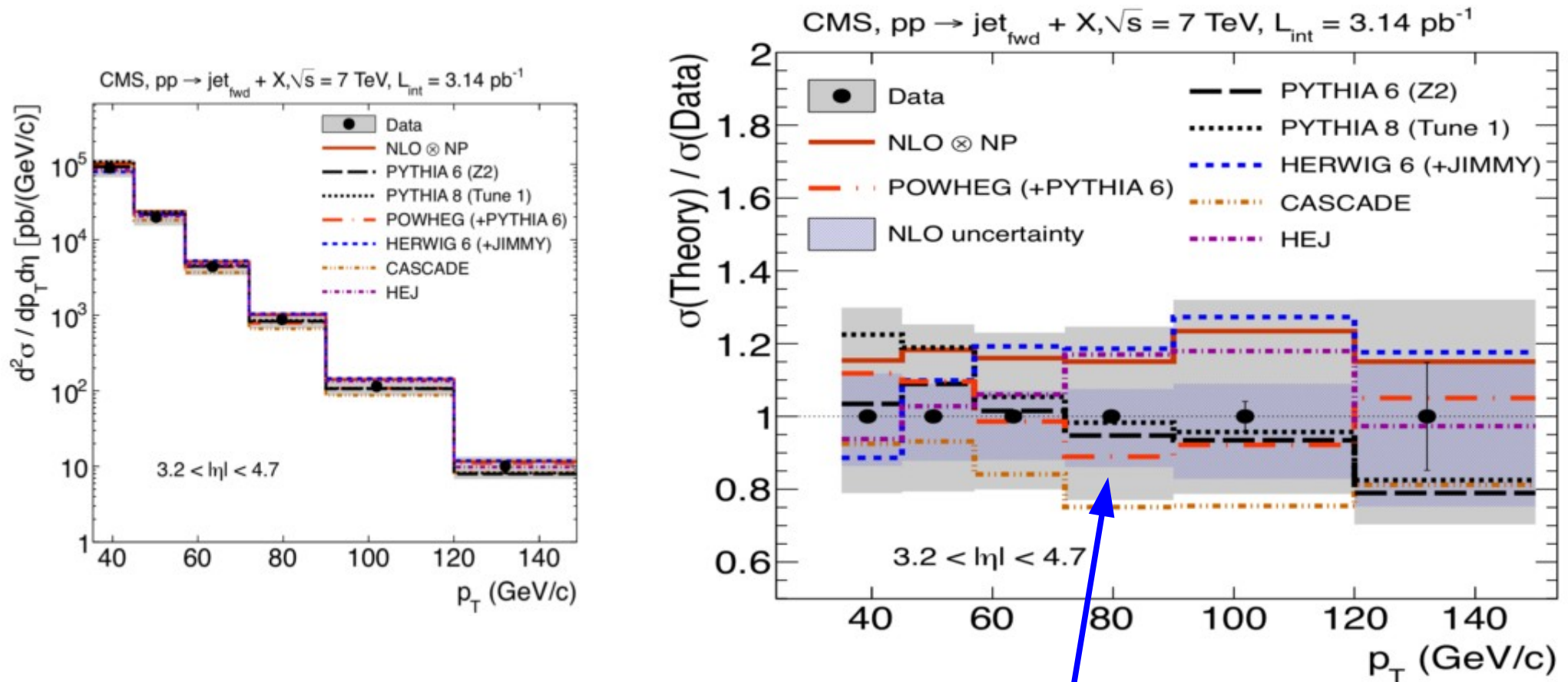


Usunięcie wpływu detektora:



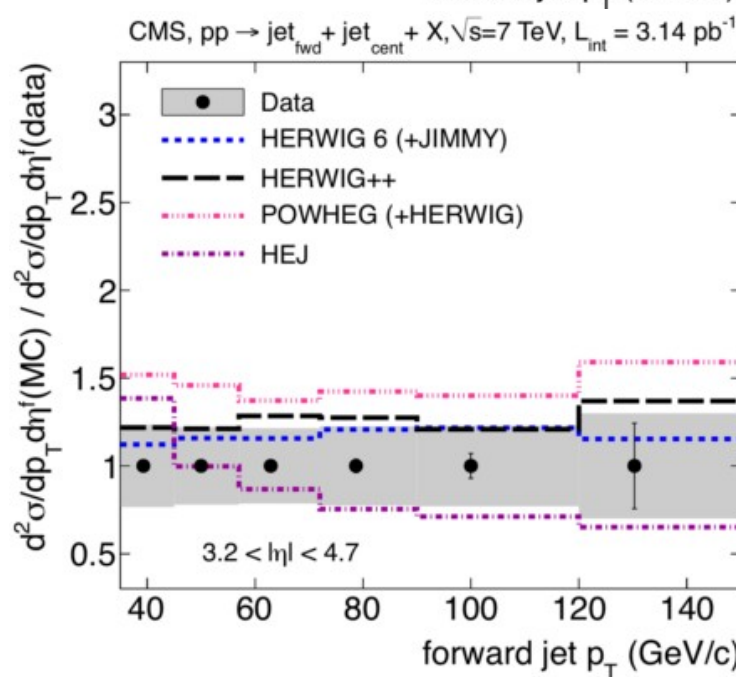
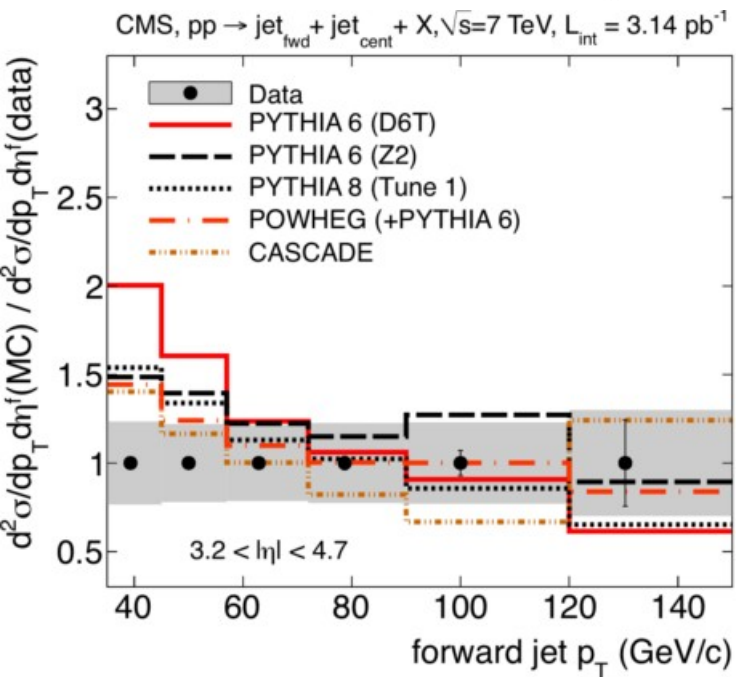
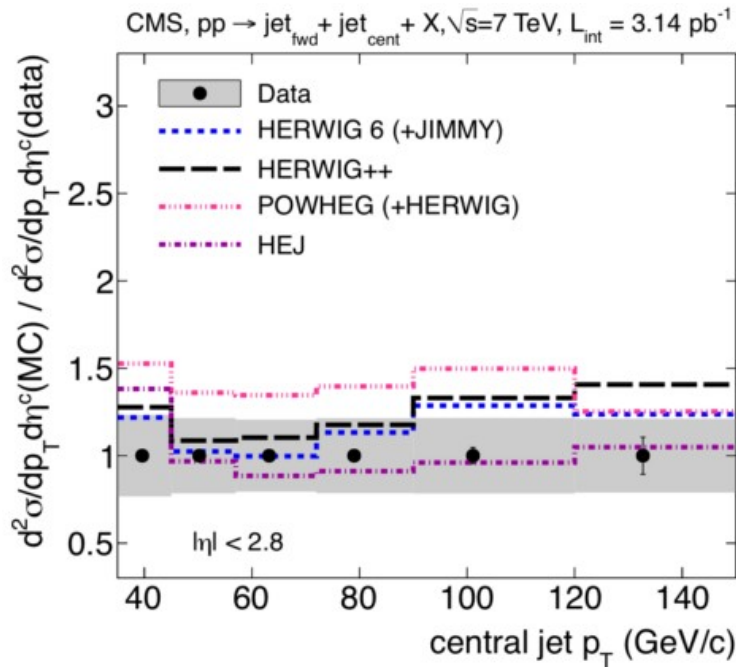
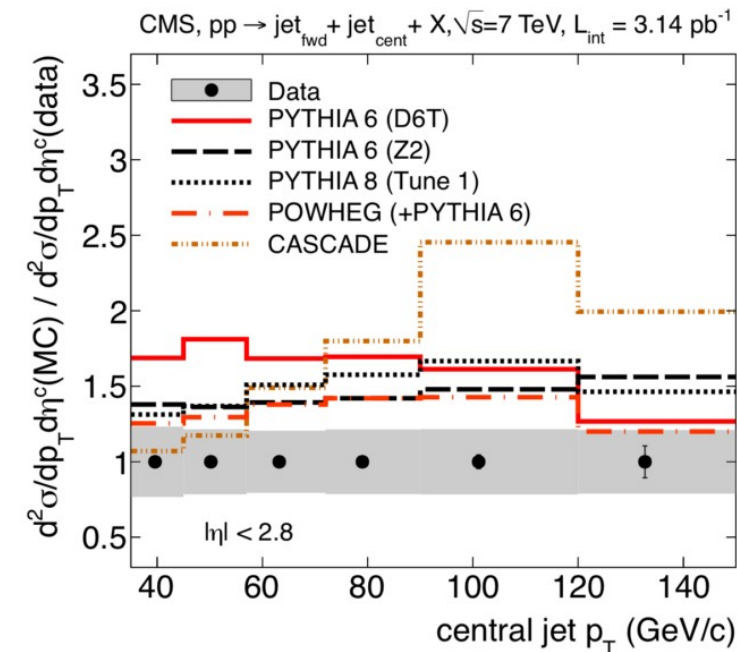
Dzety do przodu

Inkluzywne spektrum dżetów:



Niepewność wynikająca ze skali energii (3-6%)

Dzety do przodu



Wniosek:

Modele LO, NLO,
BFKL nie radzą sobie
z opisem danych

Dodatkowe miękkie
emisje? BFKL?

Dzety do przodu

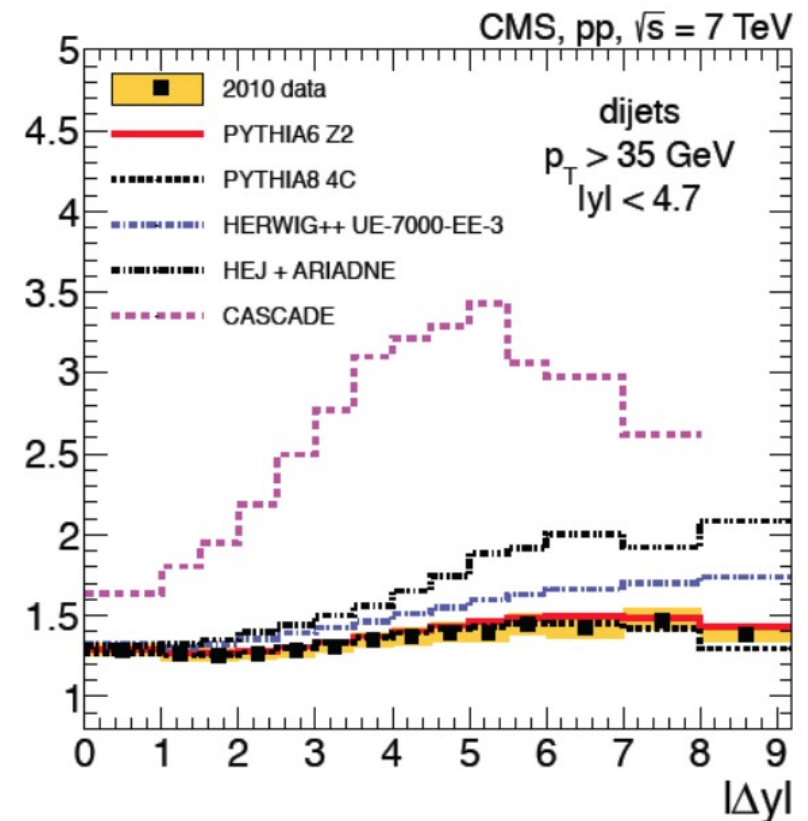
48

- Przypadki par dżetów "ekskluzywne": przypadki z tylko dwoma dżetami powyżej $p_T > 35 \text{ GeV}$
- Przypadki par dżetów "inkluzywne": przypadki z dowolną ilością dżetów powyżej $p_T > 35 \text{ GeV}$

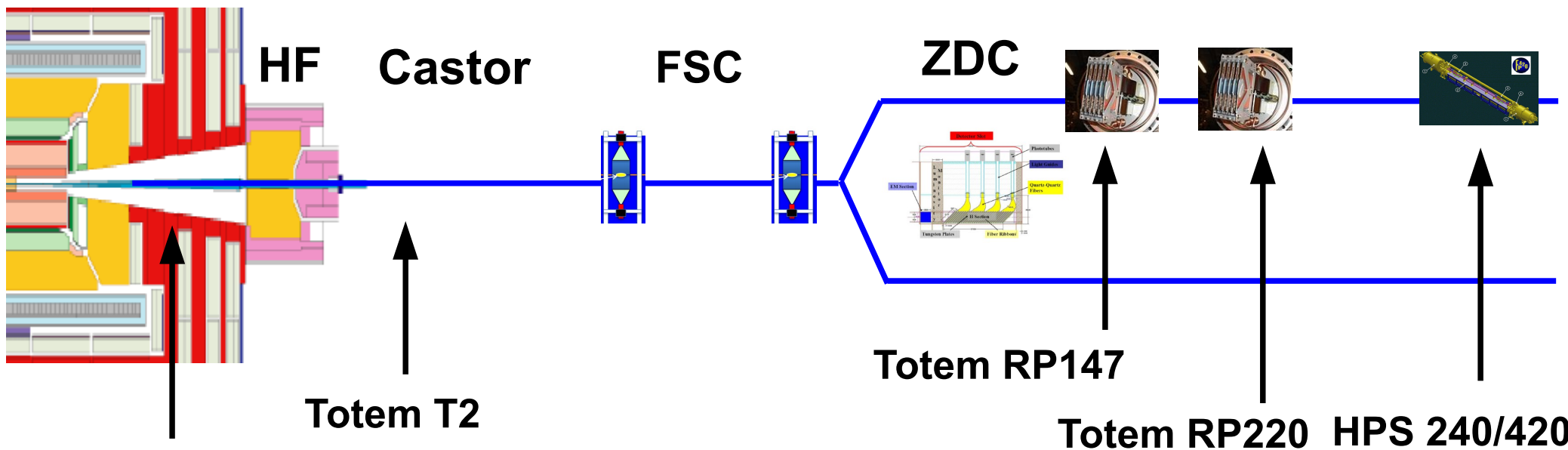
$$R = \frac{\sigma_{dijet}(\text{inclusive})}{\sigma_{dijet}(\text{exclusive})}$$

w funkcji $\Delta\eta$

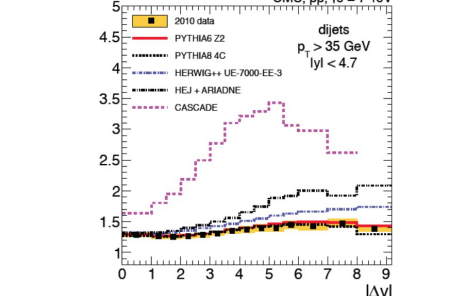
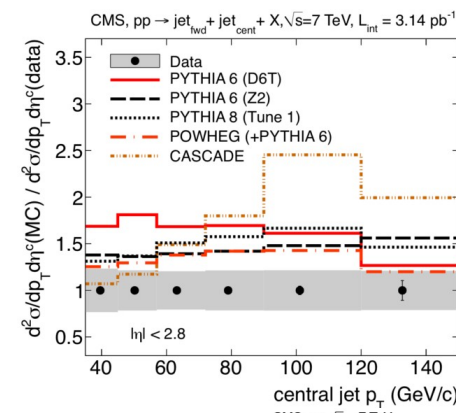
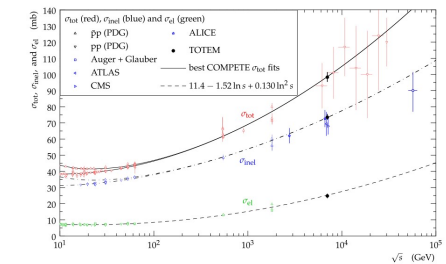
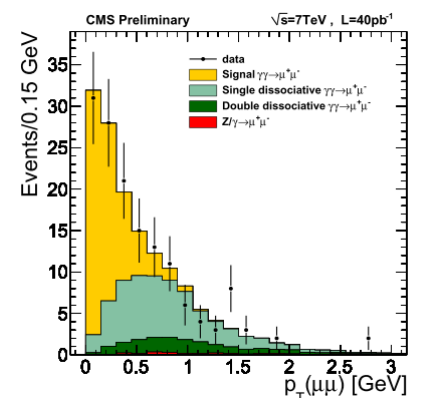
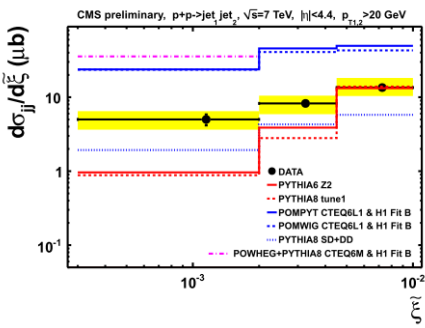
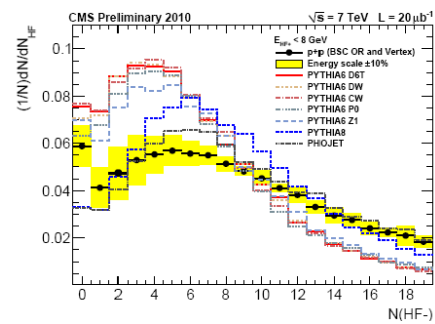
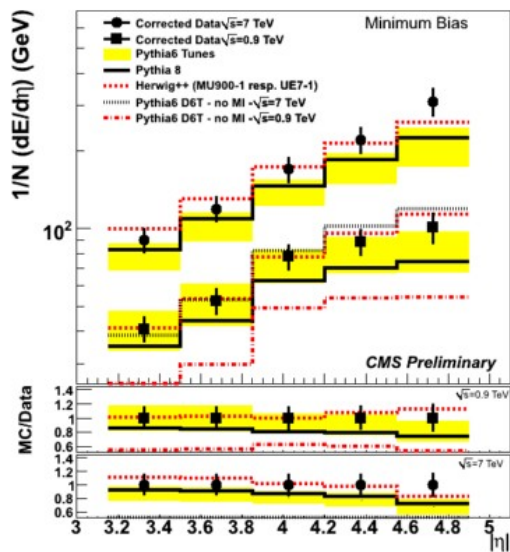
- Przy dużych separacjach spodziewane pojawienie się efektów BFKL
- Dane eksperymentalne doskonale opisywane przez PYTHIE (DGLAP)!



Podsumowanie



Totem T1



Tunes

- MPI model included in PYTHIA. The parameters of the model can be tuned - different sets of parameter values define different tunes.
- Avoid differences in hard scattering and MPI: $\frac{1}{p_T^4} \rightarrow \frac{1}{(p_T^2 + p_{T0}^2)^2}$
- Where p_{T0} is parametrized: $p_{T0}(\sqrt{s}) = p_{T0}(\sqrt{s_0}) \left(\frac{\sqrt{s}}{\sqrt{s_0}} \right)^\epsilon$
- Different pdfs, cuts for ISR and FSR, fragmentation model

		D6T (108)	DW (103)	Pro-Q20 (129)	P0 (320)
pdfs		CTEQ6L	CTEQ5L	CTEQ5L	CTEQ5L
p_{T0}	PARP(82)	1.84 GeV	1.9 GeV	1.9 GeV	2.0 GeV
E_0	PARP(89)	1.96 TeV	1.8 TeV	1.8 TeV	1.8 TeV
ϵ	PARP(90)	0.16	0.25	0.22	0.26
fragmentation	standard	standard	standard	professor LEP tune	professor LEP tune
Q_{\max}^2 factor (ISR)	PARP(67)	2.5	2.5	2.65	1.0
Q_{\max}^2 factor (FSR)	PARP(71)	4.0	4.0	4.0	2.0

Tunes

- Tunes of the PYTHIA generator (version 6.420): **D6T**, **DW**, **Perugia-0 (P0)**, **CW**
- **Pythia 8** (different model! only one tune along the lines of **P0**): version 8.135

PYTHIA **regularization** of the formal divergence of the leading order partonic scattering amplitude as the final state parton transverse momentum p_T approaches 0:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1/\hat{p}_T^4 \rightarrow 1/(\hat{p}_T^2 + \hat{p}_{T_0}^2)^2 \\ \hat{p}_T(\sqrt{s}) = \hat{p}_{T_0}(\sqrt{s_0}) \cdot (\sqrt{s}/\sqrt{s_0})^\epsilon \end{array} \right.$$

Regularization: can be interpreted as inverse of effective color screening length

energy dependence

Reference value: e.g. at CDF $\sqrt{s_0} = 1.8\text{TeV}$, $\hat{p}_{T_0} = 2.0\text{GeV}/c$

- Same parameter regularize **both MPI and hard scattering**: more MPI activity is predicted for smaller values of p_T^0

Tune	$p_T^0(1.8\text{TeV})$	ϵ	details
D6T	1.8 GeV/c	0.16	Consider ATLAS and LHCb studies on multiplicity at SPS; CTEQ6LL Parton distributions
DW	1.9 GeV/c	0.25	Consider 630GeV & 1.8TeV CDF results CTEQ5L parton distributions
P0	2 GeV/c	0.26	As above + New PYTHIA MPI model; PT ordered showers;
CW	1.8 GeV/c	0.3	Ad hoc for 900GeV CMS data, maximizing MPI but still compatible with Tevatron; default PYTHIA color reconnection; Parton distributions CTEQ5L