

# Produkcja hadronów w głęboko nieelastycznym rozpraszaniu

Beata Brzozowska

25 maja 2007

## 1 Krótko o historii akceleratora HERA

- Kilka faktów historycznych
- Trzy etapy akceleratora

## 1 Krótko o historii akceleratora HERA

- Kilka faktów historycznych
- Trzy etapy akceleratora

## 2 Motywacja

- Słów kilka o procesie DIS
- Dlaczego to robimy?

## 1 Krótko o historii akceleratora HERA

- Kilka faktów historycznych
- Trzy etapy akceleratora

## 2 Motywacja

- Słów kilka o procesie DIS
- Dlaczego to robimy?

## 3 Przegląd literatury

- Eksperyment OPAL
- Eksperyment H1

- 1 Krótko o historii akceleratora HERA
  - Kilka faktów historycznych
  - Trzy etapy akceleratora
- 2 Motywacja
  - Słów kilka o procesie DIS
  - Dlaczego to robimy?
- 3 Przegląd literatury
  - Eksperyment OPAL
  - Eksperyment H1
- 4 Analiza czyli rozkłady hadronów i funkcja fragmentacji
  - Przygotowanie próbki danych
  - Porównanie z modelami teoretycznymi

- 1 Krótko o historii akceleratora HERA
  - Kilka faktów historycznych
  - Trzy etapy akceleratora
- 2 Motywacja
  - Słów kilka o procesie DIS
  - Dlaczego to robimy?
- 3 Przegląd literatury
  - Eksperyment OPAL
  - Eksperyment H1
- 4 Analiza czyli rozkłady hadronów i funkcja fragmentacji
  - Przygotowanie próbki danych
  - Porównanie z modelami teoretycznymi
- 5 Podsumowanie

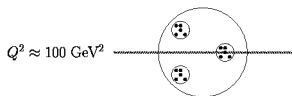
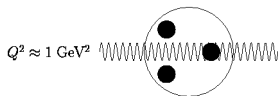
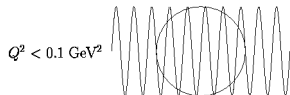
# Historia



Założenie fundacji DESY

- 1976 pierwszy pomysł
- 1981 przedłożenie propozycji
- 1984 rozpoczęcie budowy
- 1988 zakończenie budowy układu e
- 1991 układ protonowy gotowy
- 1992 start H1 i ZEUSa
- 1995 HERMES zbiera dane
- 1999 HERA-B dołącza do pracy
- 2000 przerwa w pracy akceleratora
- 2007 protony o niższej energii

# Rozpraszanie elektronów na protonach



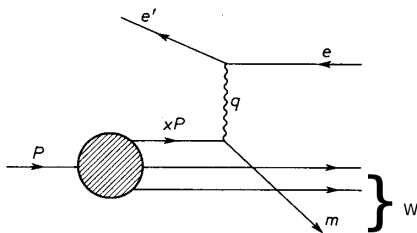
- Fotoprodukcja czyli oddziaływanie rzeczywistych fotonów
- Procesy dyfrakcyjne
- **Głęboko nieelastyczne rozpraszanie**



# Deep Inelastic Scattering

## Rozpraszanie głęboko nieelastyczne $ep$

- $Q^2 = -q^2$ , gdzie  $q$  jest czteropędem fotonu
- $P$  to czteropęd protonu
- $xP$  jest czteropędem partonu w protonie i wyraża się wzorem:  $x = \frac{Q^2}{2Pq}$
- $y$  jest miarą nieelastyczności procesu  $y = \frac{E_e - E_{e'}}{E_e}$
- $W$  - energia hadronowych stanów końcowych

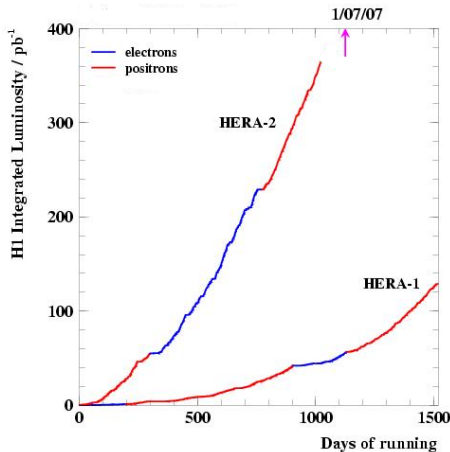


Model partonowy zderzenia DIS

# High Energy Run

- HERA I:  $E_p = 820$  GeV
- HERA II:  $E_p = 920$  GeV
- Światłość całkowita:  
ZEUS + H1  $\sim 1$  fb $^{-1}$

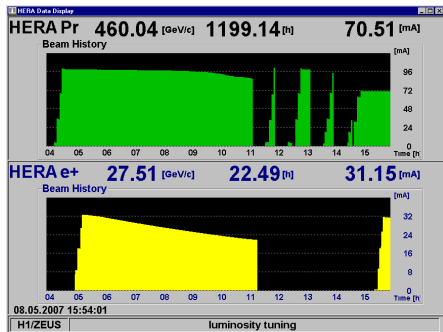
ZEUS	$e^+p$	$e^-p$
HERA I	120 pb $^{-1}$	16 pb $^{-1}$
HERA II	190 pb $^{-1}$	170 pb $^{-1}$



## Low Energy Run

Etap	$E_p = 460 \text{ GeV}$	$E_p = 575 \text{ GeV}$
Pierwszy	$13 \text{ pb}^{-1}$	$0 \text{ pb}^{-1}$
Drugi	$0 \text{ pb}^{-1}$	$\sim 7 \text{ pb}^{-1}$

100 dni zbierania danych –  
 obszar kinematyczny pokryty  
 dla  $y < 0.85$



## Niższa energia wiązki protonowej

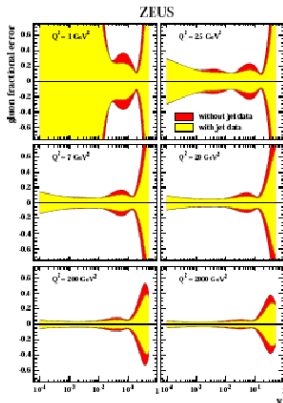
### Korzyści

- zależność od  $W$  przekrojów czynnych na fotoprodukcję i produkcję wektorów mezonowych;
- pomiar funkcji struktury dla dużych  $x$ ;
- **pomiar przekroju czynnego dla podłużnie spolaryzowanych wirtualnych fotonów – podłużna funkcja struktury**

$$\frac{d^2\sigma^{e^\pm p}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} [Y_+ F_2(x, Q^2) - y^2 F_L(x, Q^2) \mp Y_- x F_3(x, Q^2)]$$

$$Y_\pm = 1 \pm (1 - y)^2$$

# Funkcja struktury $F_2$



Rozpraszanie komptonowskie QCD

$$\gamma q \rightarrow qg$$



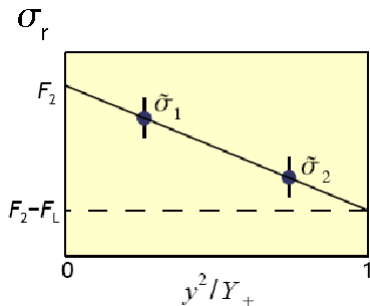
Fuzja bozonowo-gluonowa  $\gamma q \rightarrow q\bar{q}$

$F_2$  wyznaczona z informacji o rozproszonym elektronie oraz z przekrojów czynnych na produkcję wielodżetową

# Podłużna funkcja struktury

- zredukowany przekrój czynny:

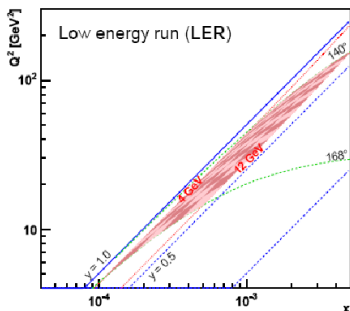
$$\sigma_r = \left( \frac{xQ^4}{2\pi\alpha^2 Y_+} \right) \frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = [F_2(x, Q^2) - \frac{y^2}{Y_+} F_L(x, Q^2)]$$



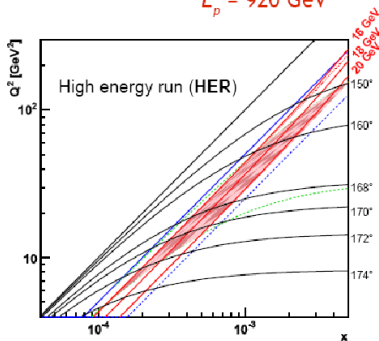
- dane dla różnych wartości  $y$ , ale dla takich samych  $(x, Q^2)$
- $Q^2 = sxy$ , gdzie  $s$  to kwadrat energii w układzie środka masy

# Obszar kinematyczny

$E_p = 460 \text{ GeV}$



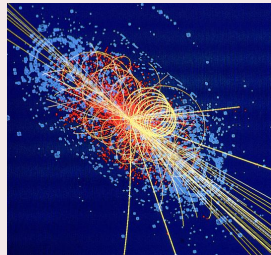
$E_p = 920 \text{ GeV}$



- rozproszony elektron o energii 4-12 GeV dla LER
- rozproszony elektron o energii 16-20 GeV dla HER

# Chromodynamika kwantowa

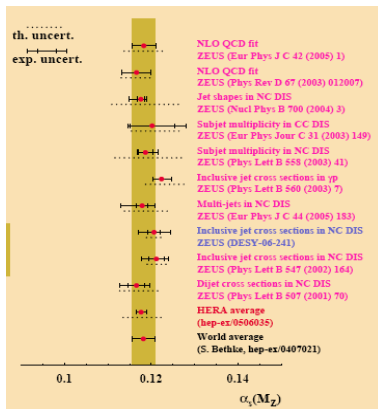
- QCD jest teorią silnych oddziaływań.
- QCD z uniwersalnymi parametrami musi opisywać wszystkie procesy (anihilacja  $e^+e^-$ , rozpraszanie  $ep$ , zderzenie  $p\bar{p}$ ).
- Badanie hadronowych stanów końcowych wnosi dużo informacji o QCD.





## Testowanie QCD

- Precyzyjne pomiary  $F_2$  i  $\alpha_s$
- Możliwość wyznaczenia podłużnej funkcji struktury  $F_L$
- Badanie funkcji fragmentacji



## Co to jest układ Breita?

Układ Breita jest zdefiniowany przez dwa warunki:

- proton i wirtualny foton poruszają się współliniowo;
- wirtualny foton przenosi tylko pęd (energia fotonu = 0).

### Brick wall

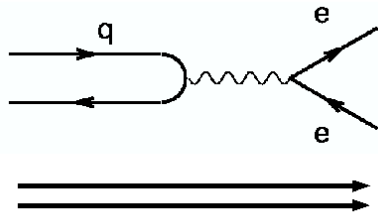
- przed rozproszeniem:

$$xP = \left(\frac{Q}{2}, 0, 0, \frac{Q}{2}\right)$$

- po rozproszeniu:

$$xP = \left(\frac{Q}{2}, 0, 0, -\frac{Q}{2}\right)$$

current region



target region

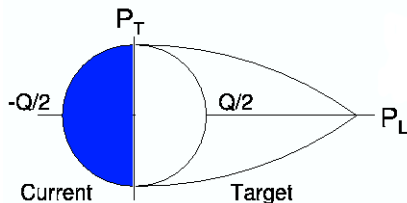
Proces  $ep$  w układzie Breita

# Czym jest $x_p$ ?

## Definicje

$$x_p = \frac{2P^{Breit}}{Q}$$

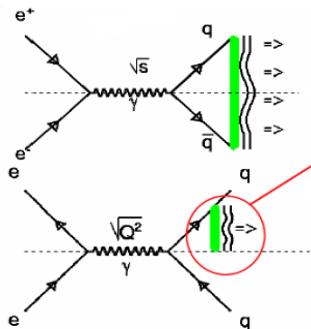
$$\xi = \ln\left(\frac{1}{x_p}\right)$$



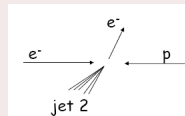
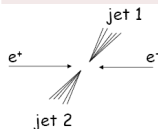
Przestrzeń pędowa w układzie Breita

- $x_p$  to pęd hadronu zmierzony w układzie Breita przeskalowany przez  $\frac{Q}{2}$  czyli maksymalny dostępny pęd (ignorujemy efekty związane z wewnętrznym  $k_T$  kwarka w protonie)

## Porównanie procesów $ep$ i $e^+e^-$



Obszar prądowy w układzie Breita w procesie  $ep$  jest podobny do jednej z hemisfer w procesie  $e^+e^-$ .



# Pomiar $x_p$ jako test cech QCD

## Chromodynamika kwantowa

- Przewidywania QCD dla rozkładów  $x_p$  są oparte na konwolucji trzech funkcji:

$$f(x, Q^2) \otimes \sigma_{NLO} \otimes D(x_p, Q^2)$$

# Pomiar $x_p$ jako test cech QCD

## Chromodynamika kwantowa

- Przewidywania QCD dla rozkładów  $x_p$  są oparte na konwolucji trzech funkcji:

$$f(x, Q^2) \otimes \sigma_{NLO} \otimes D(x_p, Q^2)$$

- $f(x, Q^2)$  – funkcja gęstości partonów w protonie

## Pomiar $x_p$ jako test cech QCD

### Chromodynamika kwantowa

- Przewidywania QCD dla rozkładów  $x_p$  są oparte na konwolucji trzech funkcji:

$$f(x, Q^2) \otimes \sigma_{NLO} \otimes D(x_p, Q^2)$$

- $f(x, Q^2)$  – funkcja gęstości partonów w protonie
- $\sigma_{NLO}$  – przekrój czynny na rozpraszanie partonu na partonie

## Pomiar $x_p$ jako test cech QCD

### Chromodynamika kwantowa

- Przewidywania QCD dla rozkładów  $x_p$  są oparte na konwolucji trzech funkcji:

$$f(x, Q^2) \otimes \sigma_{NLO} \otimes D(x_p, Q^2)$$

- $f(x, Q^2)$  – funkcja gęstości partonów w protonie
- $\sigma_{NLO}$  – przekrój czynny na rozpraszanie partonu na partonie
- $D(x_p, Q^2)$  – funkcja fragmentacji czyli prawdopodobieństwo z jakim parton fragmentuje w hadron o energii będącej ułamkiem energii partonu



## Testowanie cech QCD

- Faktoryzacja gwarantuje niezależność funkcji fragmentacji od rodzaju procesu.
- Stała  $\alpha_s$  może być zrekonstruowana z łamania skalowania w rozkładach  $x_p$  jako funkcji  $Q^2$  (zrobione dotychczas dla  $e^+e^-$ ).
- W przeciwieństwie do innych metod wyznaczenie  $\alpha_s$  nie jest obciążone niepewnościami związanymi z algorytmami dżetowymi czy funkcją gęstości partonów PDF.
- Czy NLO+FF dobrze opisuje nasze dane doświadczalne?

# O modelach

## Opis produkcji cząstek

- **model Fermiego**: stan przejściowy “fireball”
- **modyfikacja Landaua i Pomaranczuka**: ekspansja gorącej materii wzdłuż osi zderzenia
- **model multifireballowy Hagedorna**: zamiast jednego – wiele fireballi
- **model relatywistycznych dżetów Feynmana**: proces hadronizacji na poziomie partonowym

# Fragmentacja kwarku

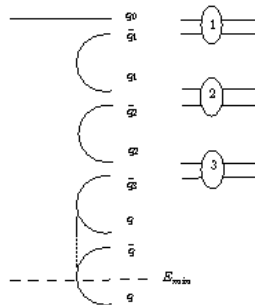
## Modele fragmentacji

- **Fragmentacja niezależna:** (Feynman i Field, 1978) kwark fragmentuje za pośrednictwem produkcji par. ▶ F
- **Model struny:** (grupa Lund Anderssona) para kwark-antykwarik połączona struną, której rozerwanie towarzyszy produkcja kolejnej  $q\bar{q}$ . ▶ S
- **Model Klastrów Webbera** ▶ C

# Fragmentacja kwarku

## Fragmentacja niezależna

- opiera się na założeniu, że każdy parton fragmentuje niezależnie
- wybity kwark  $q_0$  łączy się z antykwarkiem  $\bar{q}_1$  z pary  $q_1\bar{q}_1$ , która jest tworzona z próżni, tworząc hadron
- rząd hadronu jest określany przez kolejność w czasie produkcji

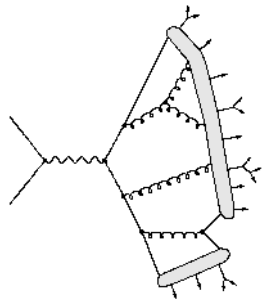


Back

# Fragmentacja kwarku

## Model LUND

- model fenomenologiczny opisujący proces hadronizacji w wysokoenergetycznych zderzeniach, koncentruje się na fragmentacji gluonu
- bazuje na przewidywaniach zjawiska uwięzienia w QCD
- para  $q_0\bar{q}_0$  jest połączona polem kolorowym, w pewnej odległości energia potencjalna jest wystarczająca do wyprodukowania innej pary kwark-antykwar

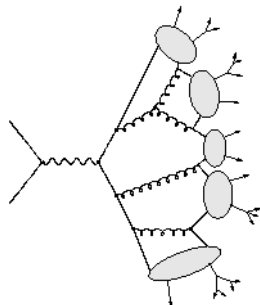


# Fragmentacja kwarku

## Model klastrów

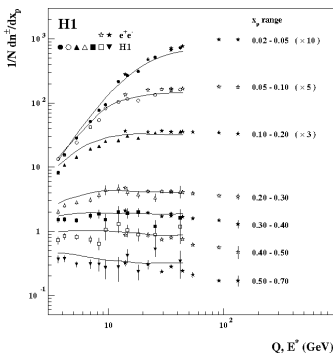
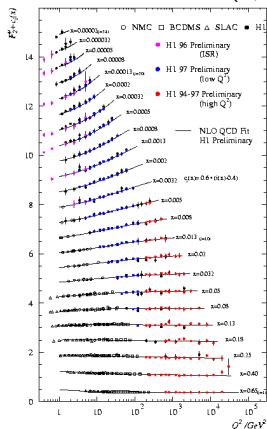
- dwa etapy: formacja klastrów i rozpad obojętnych kolorowo stanów w hadrony lub następne klastry
- ograniczony do fragmentacji lekkich kwarków (uds) i produkcji gluonów w anihilacji  $e^+e^-$

Next



# Łamanie skalowania

$$f(x, Q^2) \otimes \sigma_{NLO} \otimes D(x_p, Q^2)$$



Funkcja struktury protonu

Funkcja fragmentacji

# *Charged Particle Momentum Spectra in $e^+e^-$ annihilation at $\sqrt{s} = 192 - 209$ GeV, OPAL Collaboration*

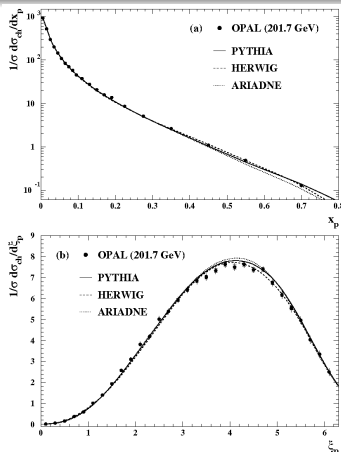
## Dane doświadczalne

- zebrane w latach 1999 – 2000 (światłość  $433 \text{ pb}^{-1}$ )
- pomiar pędu i kierunku w komorach śladowych oraz informacja o energii zdeponowanej w kalorymetrze elektro-magnetycznym
- średnia energia  $\sqrt{s} = 201.7 \text{ GeV}$





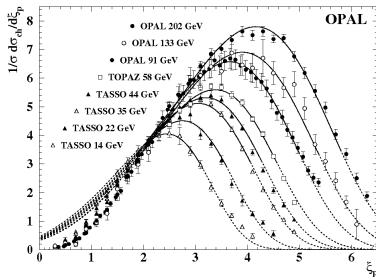
## Eksperyment OPAL



Rozkłady  $x_p$  i  $\xi_p = \ln\left(\frac{1}{x_p}\right)$

- Dane doświadczalne zostały porównane z różnymi modelami teoretycznymi.
- Z dopasowania krzywej wyznaczono  $\alpha_s(M_Z) = 0.113 \pm 0.005$ , podczas gdy PDG podaje:  $\alpha_s(M_Z) = 0.1176 \pm 0.0020$ .

# Eksperyment OPAL



Rozkłady  $\xi_p = \ln\left(\frac{1}{x_p}\right)$

- Rozkłady dla cząstek naładowanych mogą być analizowane w dużym zakresie  $Q^2$ .
- $14 \text{ GeV} < E^* < 202 \text{ GeV}$  obejmuje dane z trzech eksperymentów

$5 \text{ GeV} < E^* = Q < 170 \text{ GeV}$   
nowe dane eksperymentu ZEUS  
(czyli tylko z jednego eksperymentu)

# *Evolution of ep Fragmentation and Multiplicity Distributions in the Breit Frame, H1 Collaboration*

## Dane doświadczalne

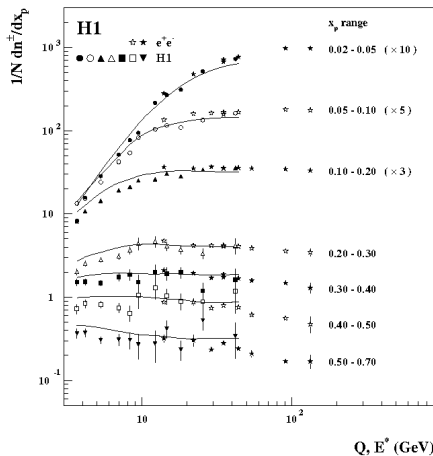
- zebrane w 1994
- informacja z detektora śladowego i kalorymetru (LAR)
- dostępna energia  $\sqrt{s} \simeq 300$  GeV
- funkcja fragmentacji wyrażona jako

$$D(x_p, Q^2) = \frac{1}{N_{ev}} \times \frac{dn_{tracks}^{\pm}}{dx_p}$$

gładka dla dużych  $x_p$ , zaś szybko rosnąca dla  $x_p \rightarrow 0$

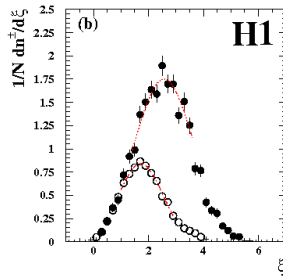
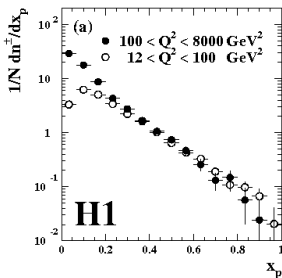


# Eksperyment H1



- Funkcja  $D(Q, E)$  niezależna od rodzaju procesu
- Dane konsyistentne dla rozpraszania  $ep$  oraz anihilacji  $e^+e^-$
- Uniwersalność fragmentacji kwarka

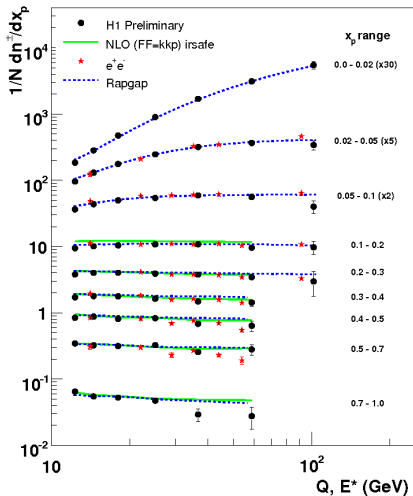
# Eksperyment H1



Funkcja fragmentacji w funkcji  $x_p$  oraz  $\xi$

Zgodnie z przewidywaniami MLLA (z ang. *Modified Leading Logarithmic Approximation*) funkcja  $D(\xi(x_p))$  powinna być opisana rozkładem Gaussa.

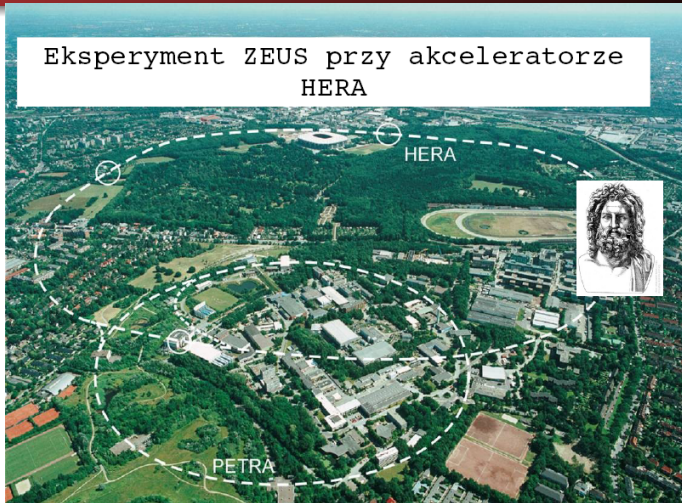
# Preliminary H1 pokazane podczas DIS2006



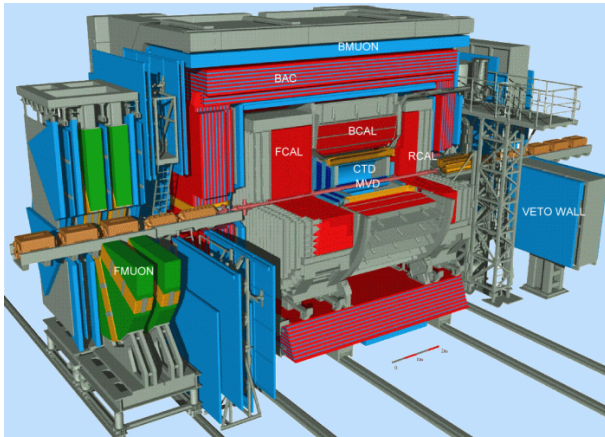
- Widoczny obszar skalowania i łamania skalowania funkcji fragmentacji
- Szerszy zakres  $x_p$  i  $Q^2$
- Zgodność danych  $ep$  z  $e^+e^-$

# ZEUS Collaboration

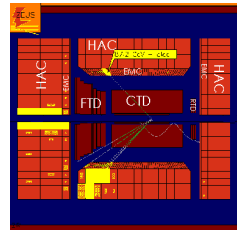
## Eksperyment ZEUS przy akceleratorze HERA



# Detektor ZEUS



## Centralny Detektor Śladowy





## Sposób na dane

### Dane doświadczalne

- dane z okresu HERA I – HERA II  
( $\sim 0.5 \text{ fb}^{-1}$ )
- wykorzystanie informacji z CTD czyli  
Centralnego Detektora Śladowego
- $p_T > 0.15 \text{ GeV}$ ,  $|\eta_{lab}| < 1.75$



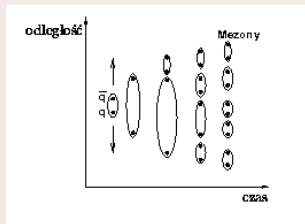
### Monte Carlo

- dwa modele MC - ARIADNE 4.12 i LEPTO 6.5
- cząstki z czasem życia większym od 0.01 ns
- cząstki stałe:  $\Lambda$ ,  $\Sigma_u^+$ ,  $\Sigma_d^+$ ,  $\Omega$ ,  $K_S$

# Modele Monte Carlo

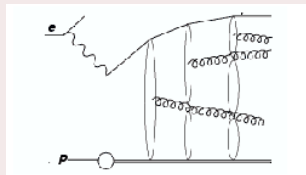
## LEPTO

- oparty na rachunku perturbacyjnym z użyciem elementu macierzowego;
- hadronizacja opisana za pomocą modelu struny;



## ARIADNE

- oparty na modelu dipola kolorowego;
- hadronizacja zgodne z modelem struny;



# Kryteria wyboru danych

$E_{e'} \geq 10 \text{ GeV}$  aby wyeliminować przypadki z fotonami z promieniowania hamowania lub źle zidentyfikowane hadrony,

$y_e \leq 0.95$  aby zredukować tło pochodzące od fotoprodukcji,

$y_{JB} \geq 0.04$  aby otrzymać dobrą rekonstrukcję zmiennych  $Q^2$  i  $x$  oraz aby wyeliminować obszar dużych poprawek radiacyjnych,

$35 \leq \Sigma(E - p_z) \leq 60 \text{ GeV}$  aby usunąć przypadki fotoprodukcji i przypadki z dużymi poprawkami radiacyjnymi,

$-40 < Z_{vertex} < 50 \text{ cm}$  aby zredukować tło pochodzące z innych procesów.

# Poprawki

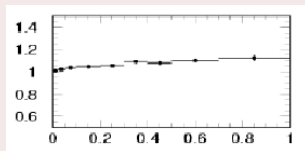
- **Poprawki detektorowe**

- zmiana elementów przestrzeni fazowej
- użycie dwóch różnych modeli MC

- **Poprawki radiacyjne**

- użycie specjalnego kodu

wielkość poprawki



$$x_p = \frac{2P^{Breit}}{Q}$$

# Jaki obszar wybieramy do analizy?

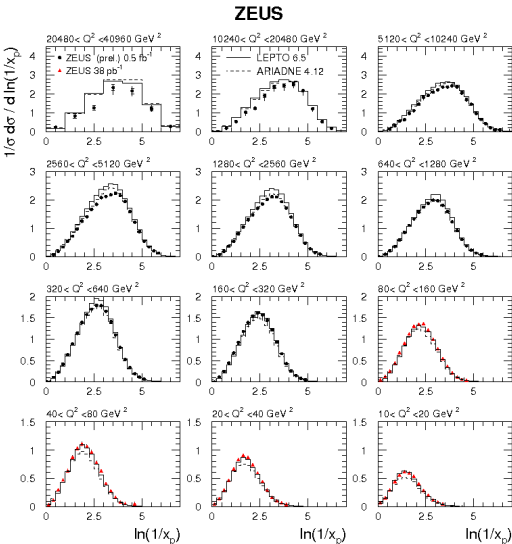
## Dane opublikowane (94-97)

Bin	Q2 min	Q2 max	X min	X max
1	10	20	0.0006	0.0024
2	20	40	0.0012	0.0100
3	40	80	0.0012	0.0100
4	80	160	0.0024	0.0100
5	160	320	0.0024	0.0500
6	320	640	0.0100	0.0500
7	640	1280	0.0100	0.0500
8	1280	2560	0.0250	0.1500
9	2560	5120	0.0500	0.2500
10	5120	10240	0.0500	0.5000
11	10240	20480	0.0500	0.5000
12	20480	40960	0.0500	0.7500

Prezentowana analiza

Dane zostały podzielone według formuły:

$$10 \times 2^n < Q^2 < 10 \times 2^{n+1}, \text{ gdzie } n = 0, 1, 2, \dots$$



- Dane zgodne z danymi z publikacji
- Opis danych przez ARIADNE i LEPTO musi zostać poprawiony, szczególnie dla dużych  $Q^2$

## Podjęcie teoretyczne

### Local Parton Hadron Duality

- połączenie zaobserwowanych rozkładów hadronowych z obliczonymi rozkładami partonowymi
- stała proporcjonalności  $K_h$

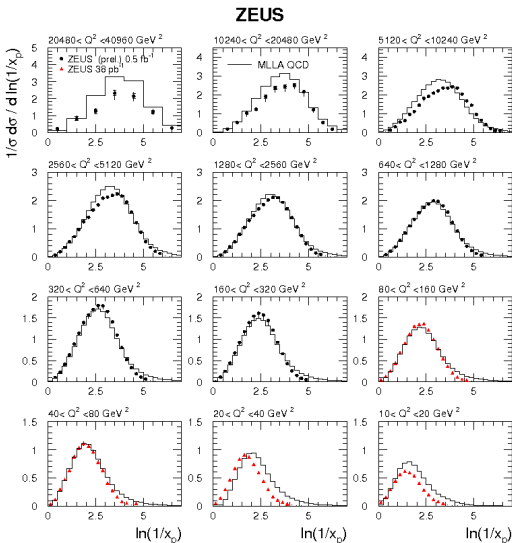
### Modified Leading Log Approximation

- liczy charakterystyki rzędu  $\alpha_s^{1/2}$
- zawiera wolne parametry:  $\Lambda_{eff}$  i  $Q_0$
- $\Lambda_{eff} = Q_0$  – ograniczone widmo

# MLLA QCD

- Zgodnie z przewidywaniami MLLA rozkłady  $D(\xi(x_p))$  powinny mieć charakter rozkładów Gaussa.
  - Dane z LEPu zostały przeanalizowane i dwa parametry zostały wyznaczone:  $\Lambda_{eff} = Q_0$  i  $K_h$ .
  - **Z LEP I – LEP II:**
    - $\Lambda_{eff} = 270$  MeV
    - $K_h = 1.31$
- V.Khoze, S.Lupia, W.Ochs (Phys.Lett. B386 (1996) 451 – 457)



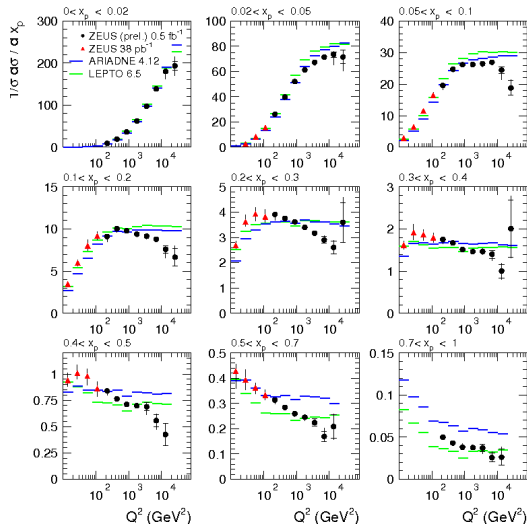


## MLLA + LPHD

Obliczenia tzw. ograniczonego widma nie opisują danych  $ep$  w całym zakresie energii.

- 1) Niska energia: migracje cząstek z obszaru tarczy do obszaru prądowego układu Breita.
- 2) Wysoka energia: parametry dopasowania zależą od energii.

## ZEUS



Funkcja fragmentacji  
w różnych przedziałach

$$x_p = \frac{2p_{Breit}}{Q}$$

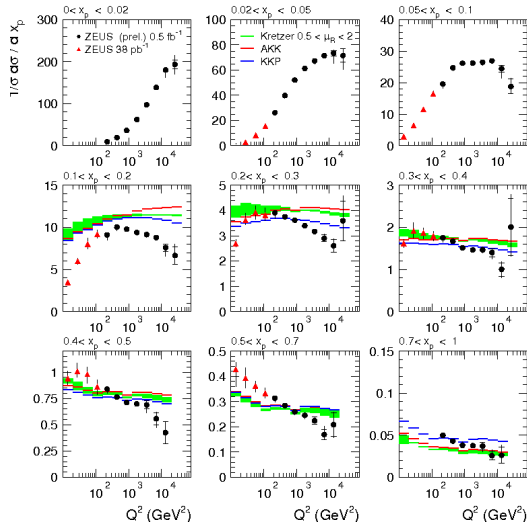
Modele MC źle opisują dane.

# Przewidywania następnego rzędu rachunku zaburzeń (NLO)

## Funkcje fragmentacji

- "Kretzer FF" (2000)
  - dane z rozpadu  $Z^0$ : ALEPH, SLD i niskoenergetyczne TPC
- "KKP FF" (Kniehl, Kramer, Pötter) (2000)
  - dane z eksperymentów  $Z^0$ : ALEPH, SLD, TPC + DELPHI, OPAL
- "AKK FF" (Albino, Kniehl, Kramer) (2005)
  - uaktualnienie wyników KKP FF + dane z eksperymentu OPAL

## ZEUS



- NLO+FF nie opisują poprawnie danych z rozpraszania  $ep$
- Łamanie skalowania jest większe niż przewidywane

## Konkluzje dotyczące analizy

- HERA dostarcza danych z dużą precyzją do wyznaczenia funkcji fragmentacji w ogromnym zakresie energii
- Hadronowe rozkłady pędu zostały zmierzone.
- Łamanie skalowania funkcji fragmentacji zostało zaobserwowane.
- MC i MLLA+LPHD QCD obliczenia nie opisują danych w całym zakresie  $x_p$  i  $Q^2$ .
- Przewidywania NLO+FF nie są zgodne z rozkładami  $x_p$  w funkcji  $Q^2$ .

## Plany na przyszłość

- Porównanie danych z prezentowanej analizy z danymi z procesu anihilacji  $e^+e^-$
- Wyznaczenie funkcji fragmentacji i stałej  $\alpha_s$
- Obliczenie wyższych momentów rozkładu Gaussa dla rozkładów  $\xi_p$

## Podsumowanie seminarium

- HERA kończy pracę za 38 dni po 15. latach eksploatacji
- Zmiana energii wiązki protonowej sposobem na wyznaczenie  $F_L$
- Bogactwo danych zebranych przez eksperyment ZEUS
- Bogactwo tematów do analizowania

Dziękuję za uwagę