

Struktura protonu

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład V

- równania ewolucji QCD
- spin protonu
- struktura fotonu

Funkcja struktury

Różniczkowy **przekrój czynny** na **NC DIS** elektron proton:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) F_2^p(x, Q^2) (1 + \delta_L + \delta_Z + \delta_{rad})$$

Q^2 - wartość kwadratu przekazu czteropędu.

$F_2^p(x, Q^2)$ zdefiniowana jest w oparciu o **gęstości prawdopodobieństwa** $q(x, Q^2)$ znalezienia przez foton o wirtualności $-Q^2$ partonu q niosącego ułamek x pędu protonu:

$$F_2^p(x) = \sum_q e_q^2 xq(x)$$

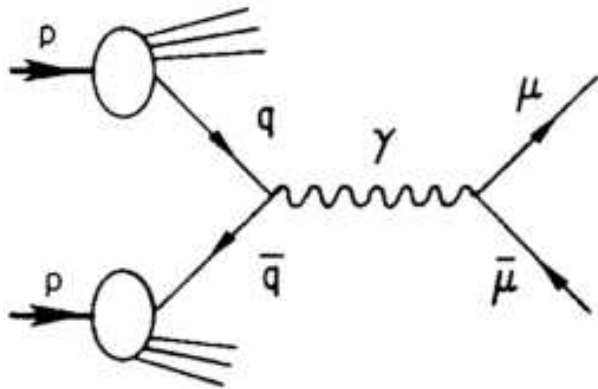
Znaczenie funkcji opisujących rozkłady partonów (**PDF - Parton Density Functions**) wynika z doświadczalnie potwierdzonej własności **faktoryzacji**.

Rozkłady partonów wyznaczone w procesie NC DIS mogą być wykorzystane do opisu wszystkich procesów, w których istotna jest struktura kwarkowa i przekazy czteropędu są odpowiednio duże.

Faktoryzacja

Proces Drela-Yana

Produkcja par leptonów w zderzeniu $p\bar{p}$:



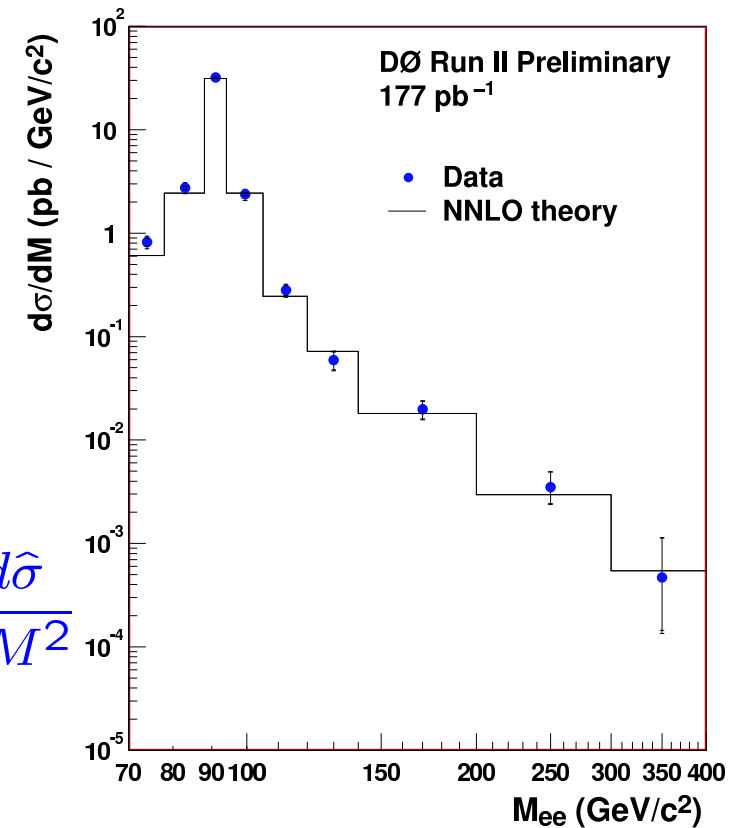
Przekrój czynny - iloczyn prawdopodobieństw:

$$\frac{d\sigma}{dM^2} = \frac{1}{3} \sum_q \int dx_1 \int dx_2 q(x_1, M^2) \cdot q(x_2, M^2) \cdot \frac{d\hat{\sigma}}{dM^2}$$

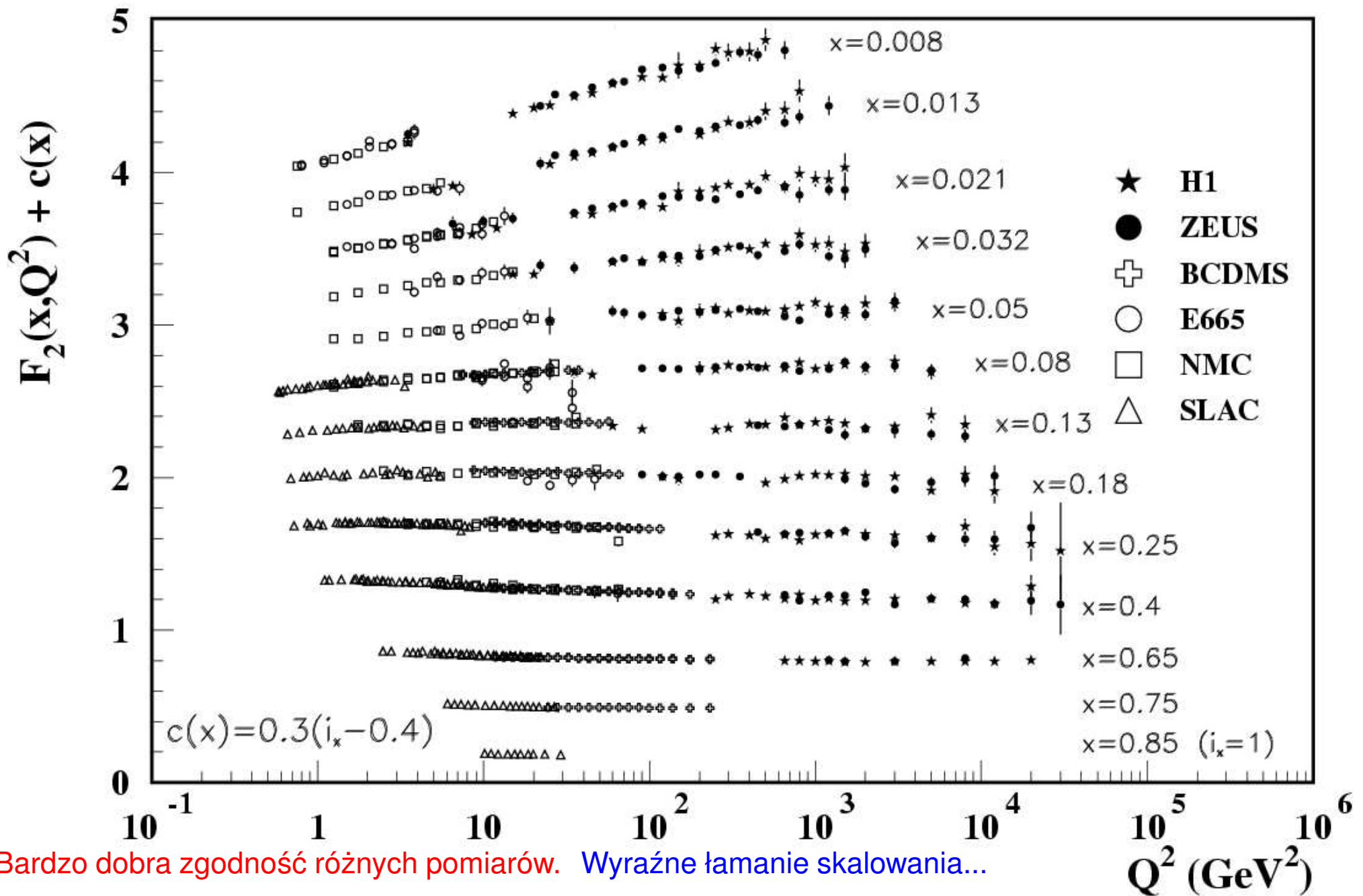
gdzie $\frac{d\hat{\sigma}}{dM}$ - partonowy przekrój czynny $q\bar{q} \rightarrow l^+l^-$

$$\frac{d\hat{\sigma}^{QED}}{dM^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{3M^2} e_q^2 \delta(M^2 - x_1x_2s)$$

Wyniki eksperymentu D0:



Widoczny wkład od produkcji bozonu Z^0



Bardzo dobra zgodność różnych pomiarów. Wyraźne łamanie skalowania...

Ewolucja QCD

Łamanie skalowania

Im **dokładniej** przyglądamy się protonowi (**wyższe Q^2**) tym **więcej partonów** (kwarków i gluonów) widzimy

Klasyczne uzasadnienie – długość **fali de Broglie'a**:

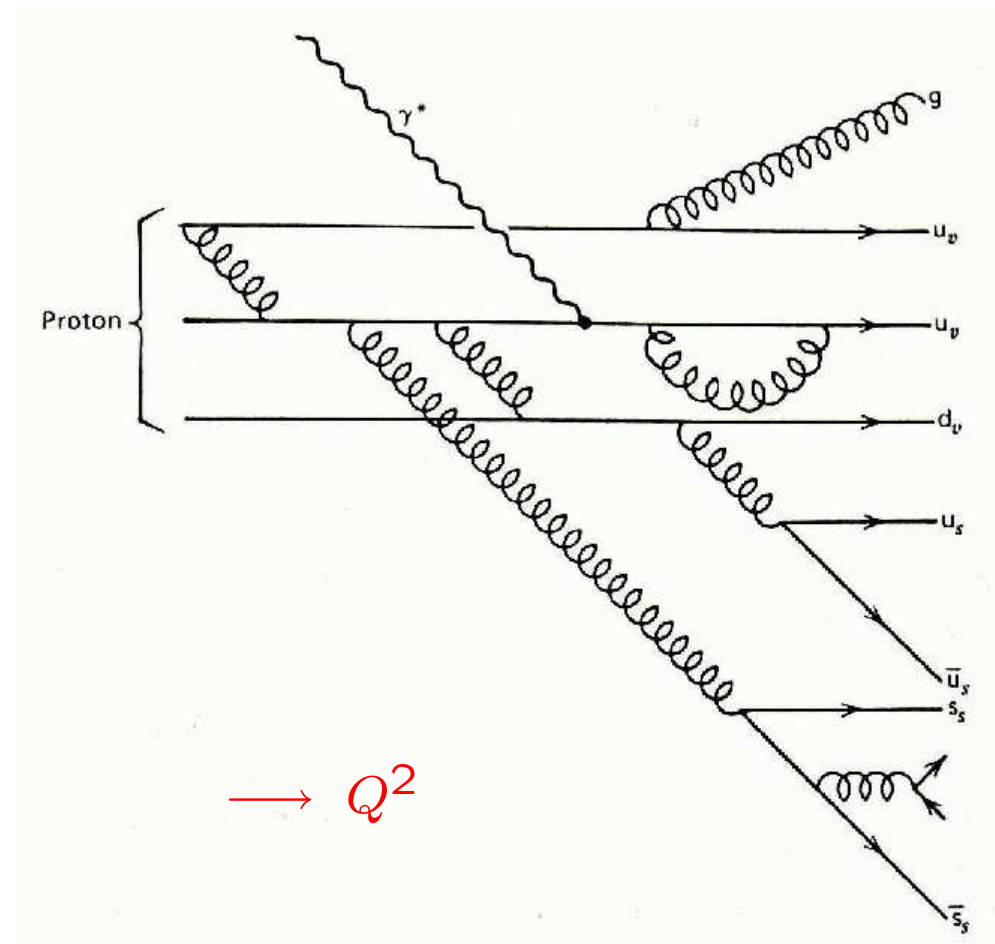
$$\lambda \cdot q = h$$

lub **zasada nieoznaczoności**:

$$\delta r \cdot q \sim \hbar$$

⇒ **wyższe Q^2** to lepsza rozdzielczość

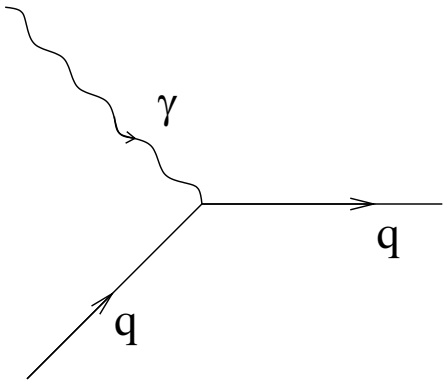
Czy można to opisać bardziej **ilościowo** ?...



Ewolucja QCD

Emisja gluonów

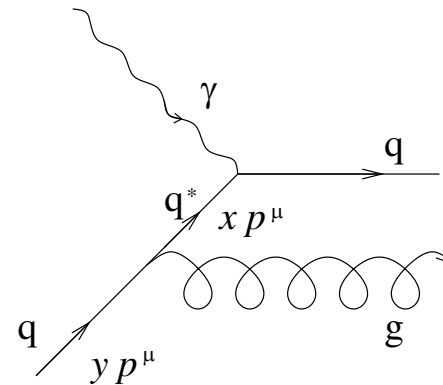
W QPM wirtualny foton oddziałuje z **pojedynczym kwarkiem**:



Funkcja struktury:

$$F_2(x) = \sum_q e_q^2 xq(x)$$

Jednak **kwark** może bezpośrednio przed oddziaływaniem **wyemitować gluon**:



Ułamek pędu x widziany przez foton jest **mniejszy** niż ułamek y niesiony początkowo przez **kwark w protonie**.

Dodatkowy przyczynek do $q(x)$

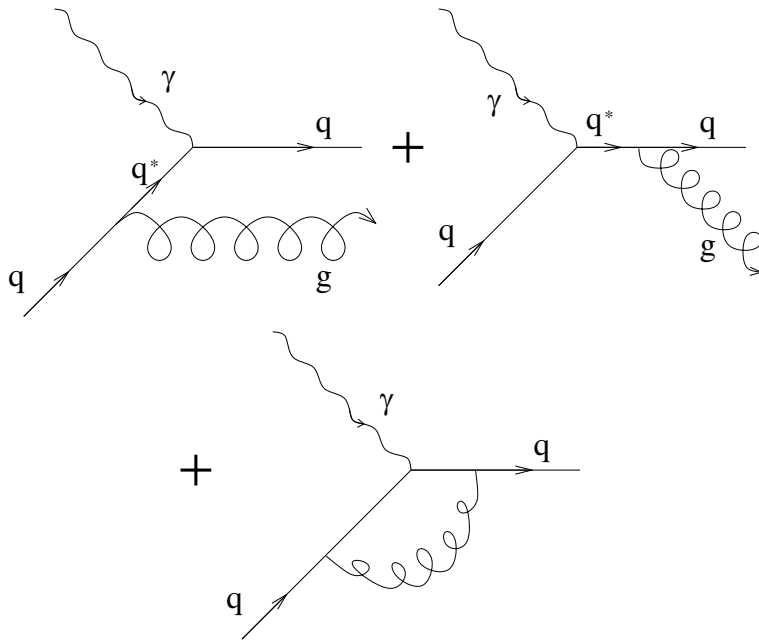
$$\Delta q(x) = \int_x^1 \frac{dy}{y} q(y) \mathcal{P}_{qq} \left(\frac{x}{y} \right)$$

gdzie \mathcal{P}_{qq} określa prawdopodobieństwo **emisji gluonu**.

Ewolucja QCD

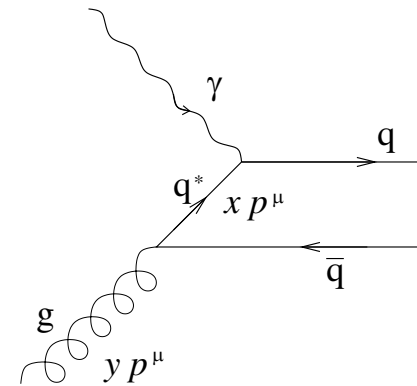
Emisja gluonów

Pełne rachunki muszą też uwzględniać **emisję gluonu** przez rozproszony kwark i **wymianę wirtualnego gluonu**



Kreacja par $q\bar{q}$

Rozpraszanie może też zajść na kwarku powstałym w wyniku **konwersji gluonu** na parę $q\bar{q}$



Daje to kolejny przyczynek do $q(x)$

$$\Delta' q(x) = \int_x^1 \frac{dy}{y} g(y) \mathcal{P}_{qg} \left(\frac{x}{y} \right)$$

gdzie \mathcal{P}_{qg} określa prawdopodobieństwo konwersji gluonu.

Ewolucja QCD

Równania ewolucji

Zależność F_2 od Q^2 (łamanie skalowania) nie wynika z samej obecności dodatkowych wkładów $\Delta q(x)$ i $\Delta' q(x)$.

Łamanie skalowania wynika z zależności \mathcal{P}_{qq} i \mathcal{P}_{qg} od Q^2 :

$$\mathcal{P}_{qq/qg} \sim \log \frac{Q^2}{\mu^2}$$

Im **wyższe** Q^2 tym więcej emitowanych **gluonów i par $q\bar{q}$** .

Chromodynamika kwantowa nie pozwala wyliczyć rozkładów partonów w protonie, ale precyzyjnie przewiduje ich **zależność od Q^2** :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \log Q^2} \begin{pmatrix} q(x, Q^2) \\ g(x, Q^2) \end{pmatrix} &= \\ &= \frac{\alpha_s(Q^2)}{2\pi} \int_x^1 dy \begin{pmatrix} P_{qq} & P_{qg} \\ P_{gq} & P_{gg} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} q(y, Q^2) \\ g(y, Q^2) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Równanie Altarellego–Parisiego (DGLAP)

$P_{ij} \left(\frac{x}{y} \right)$ są tzw. “funkcjami podziału” (**splitting functions**) opisują rozkład partonu i w partonie j

Ewolucja QCD

Parametryzacje

Gęstości partonów przy dowolnym Q^2 mogą być wyznaczone z ich rozkładu przy wybranym $Q^2 = Q_0^2$.

Zakładając określoną postać funkcyjną dla rozkładów partonów przy skali Q_0^2 , np:

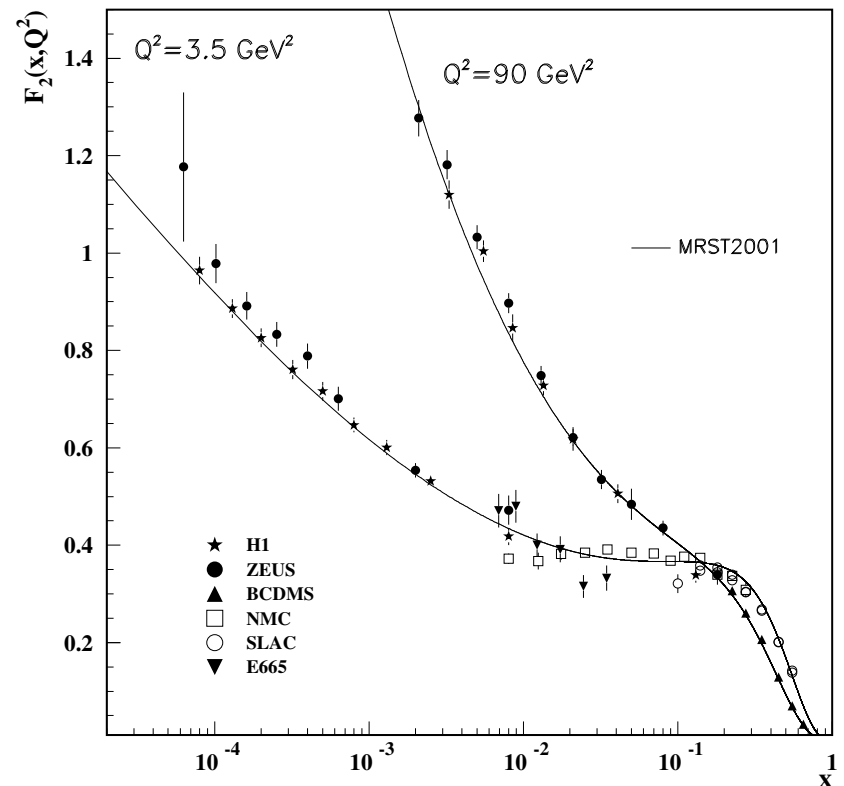
$$xq(x) = \alpha_q x^{\delta_q} (1-x)^{\eta_q} (1-\gamma_q x)$$

możemy dopasować ją do wszystkich danych doświadczalnych, przy wszystkich Q^2 .

Równania DGLAP idealnie opisują ewolucję $F_2(x, Q^2)$!

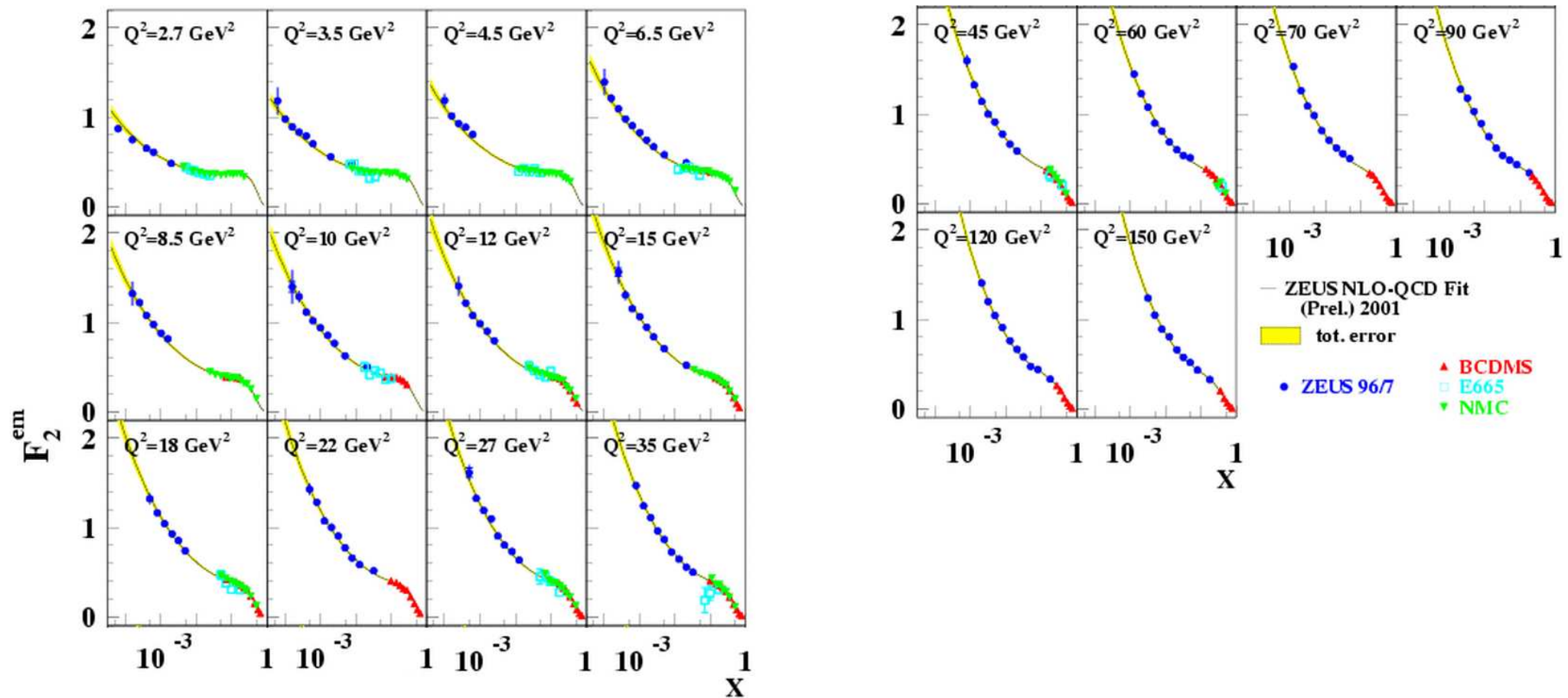
⇒ ogromny sukces QCD

Wynik:



Ewolucja QCD

Parametryzacja danych przeprowadzona przez współpracę ZEUS:



Znakomita zgodność przez wiele rzędów wielkości w x i Q^2 ...

Analiza QCD

Globalna analiza QCD

Informację o rozkładach kwarków i gluonów w protonie możemy także uzyskać z innych procesów, w szczególności z pomiaru zderzeń proton-antypoton $p\bar{p}$:

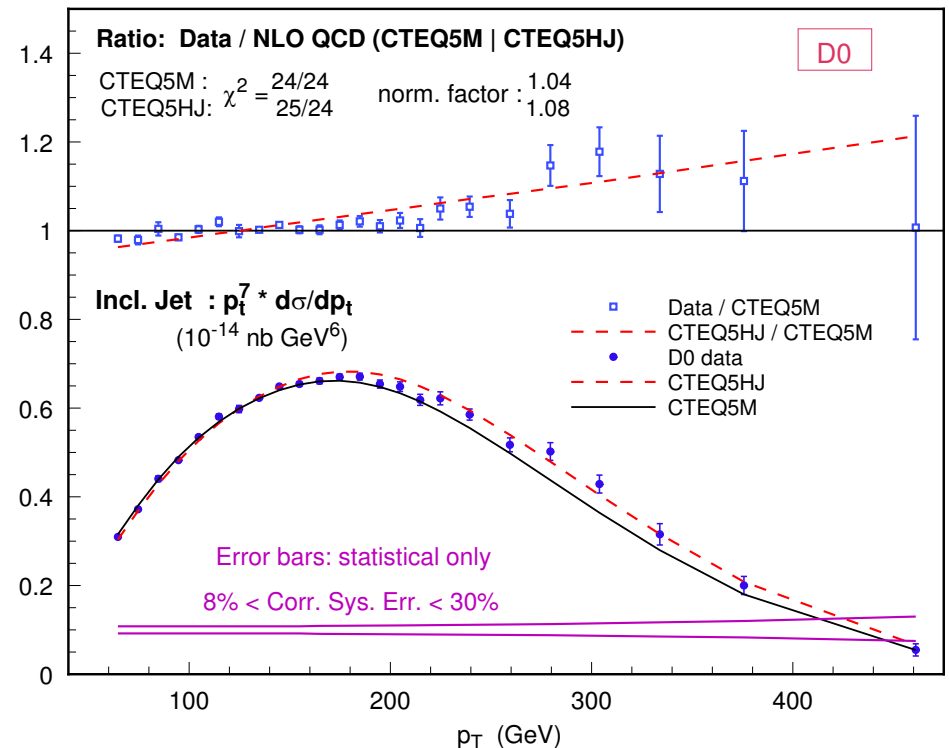
- produkcja jetów o dużym p_T
- produkcja par leptonów (proces Drell-Yana)
- produkcja W^\pm
- produkcja wysokoenergetycznych fotonów

Produkcja wysokoenergetycznych jetów

$$gg \rightarrow gg \quad q\bar{q} \rightarrow q\bar{q} \quad qg \rightarrow qg$$

$$gg \rightarrow q\bar{q} \quad q\bar{q} \rightarrow gg$$

⇒ duży udział gluonów !

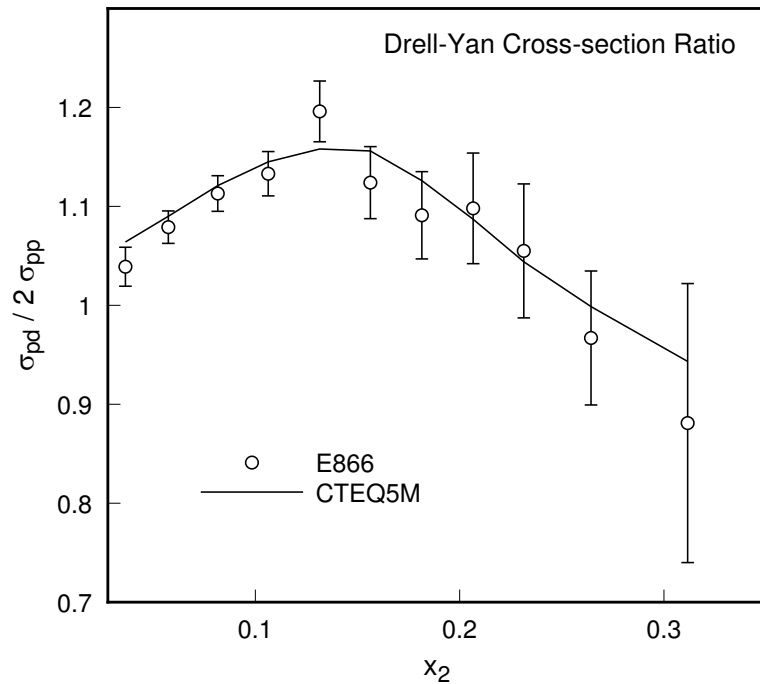


Analiza QCD

Proces Drella-Yana

$$q\bar{q} \rightarrow l^+l^-$$

⇒ rozkłady kwarków dla dużych x

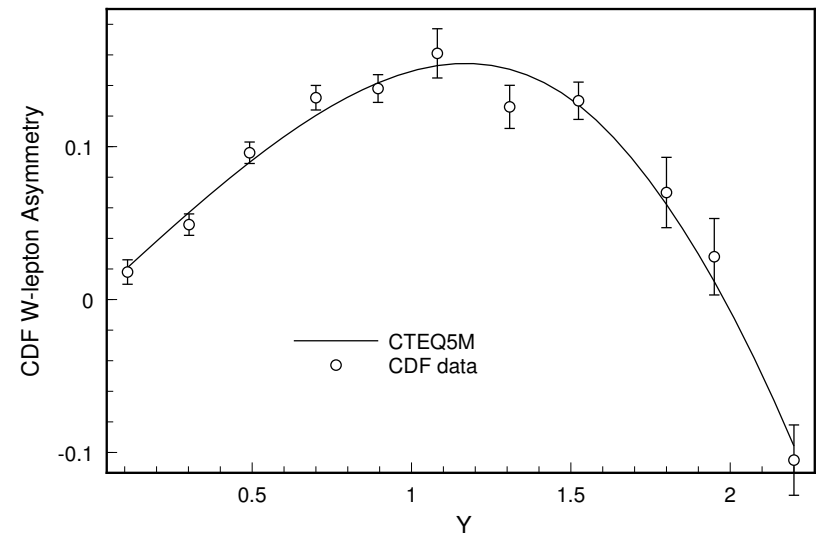


Produkcja bozonów W^\pm

$$u\bar{d} \rightarrow W^+ \rightarrow l^+\nu$$

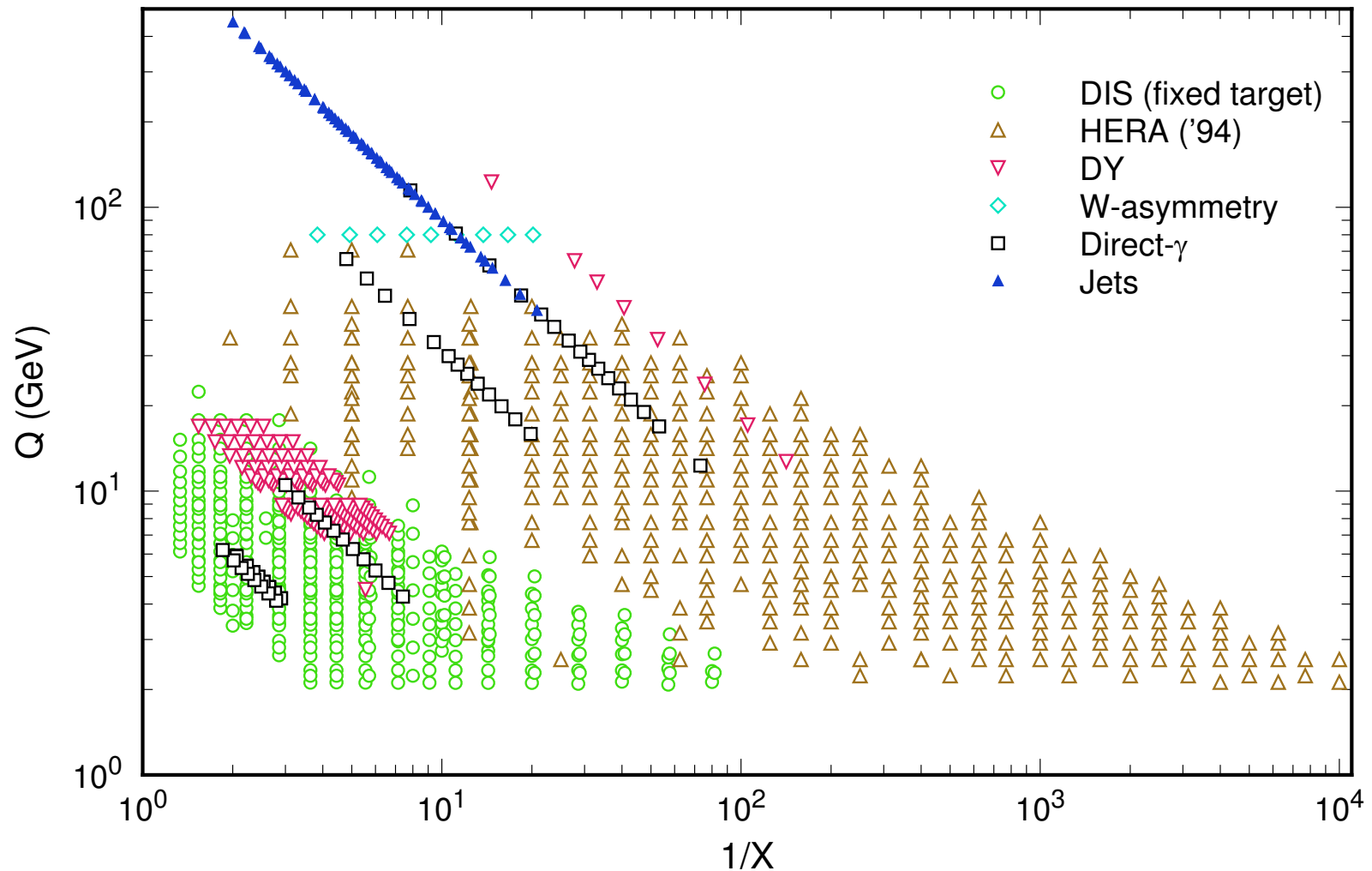
$$d\bar{u} \rightarrow W^- \rightarrow l^-\bar{\nu}$$

⇒ separacja rozkładów u i d



Analiza QCD

Dane użyte do analizy CTEQ



Analiza QCD

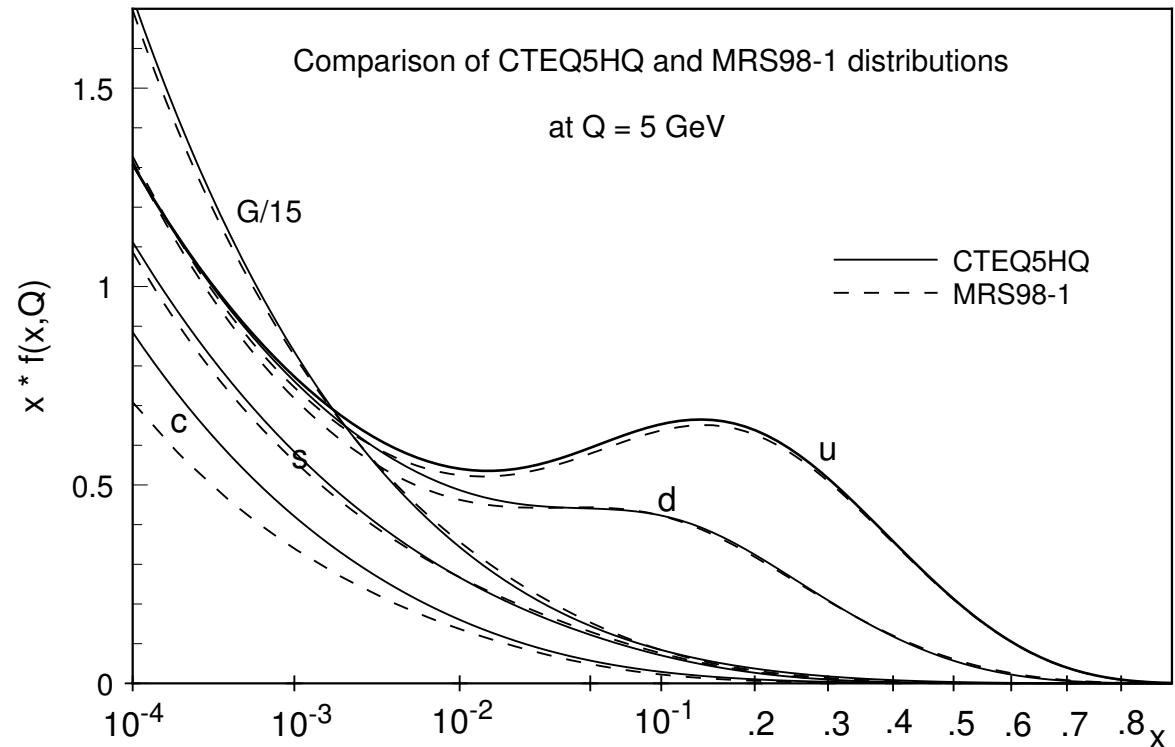
Wyniki dopasowania

Potrafimy **bardzo dokładnie** wyznaczyć gęstości poszczególnych **partonów** w protonie.

Informacje o **gluonach**: z ewolucji funkcji struktury i oddziaływań hadronowych.

Obecnie **rozkłady gluonów** znamy prawie tak **dobrze** jak rozkłady kwarków.

Gluony dominują przy **małych x** !!!

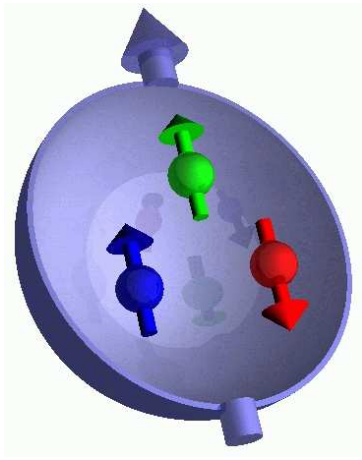


Ale nie mają bezpośredniego wkładu do $F_2(x)$!

Spin protonu

Model Kwarkowy

W modelu Gell-Mann'a i Zweig'a spin protonu był wynikiem złożenia spinów 3 tworzących go kwarków walencyjnych:

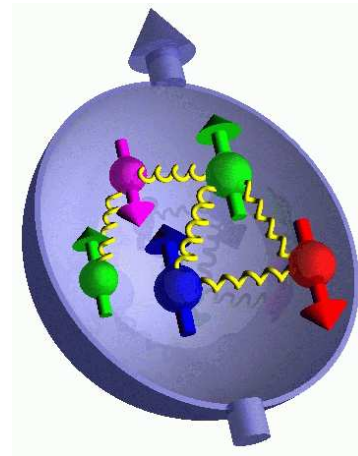


$$s = \frac{1}{2} (\Delta u_v + \Delta d_v)$$

$\Delta u_v, \Delta d_v$ - polaryzacje kwarków

Model Partonowy

Wiemy już jednak, że w opisie protonu trzeba uwzględnić także kwarki morza i gluony:



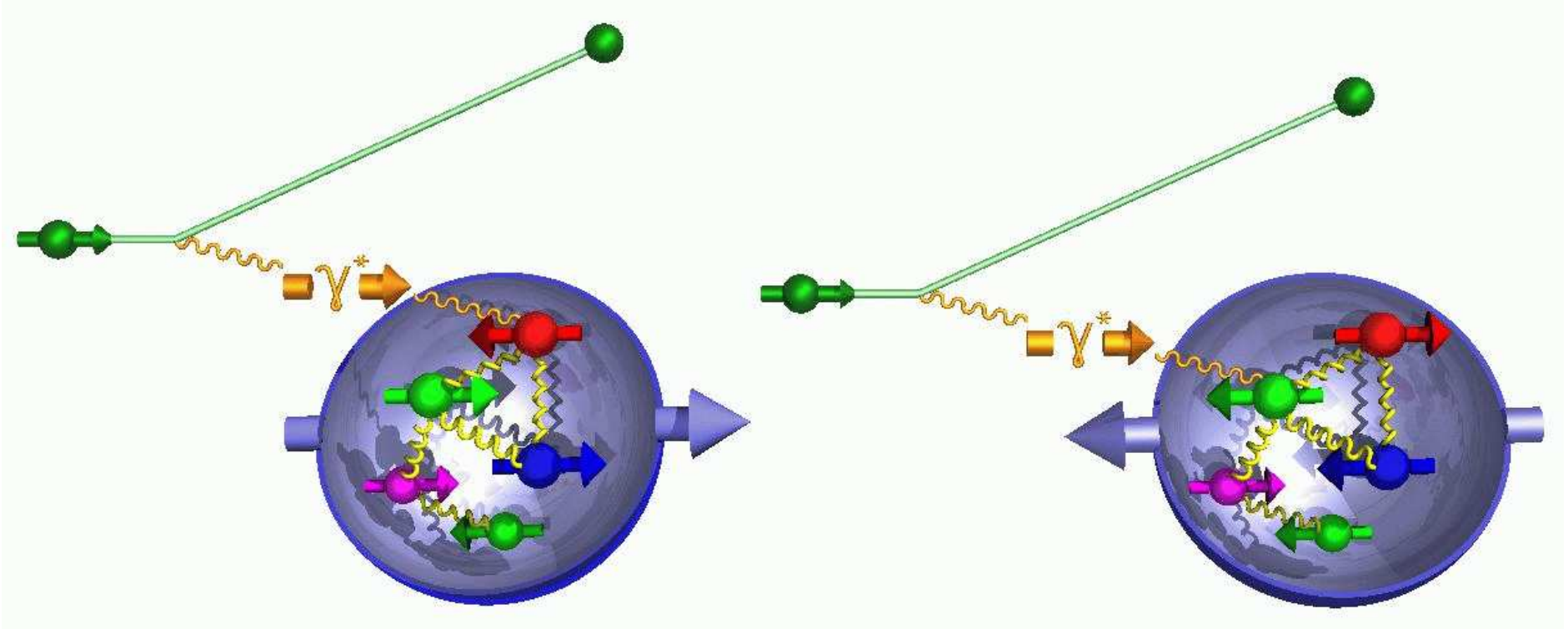
$$s = \frac{1}{2} (\Delta u_v + \Delta d_v + \Delta q_s) + \Delta G + L$$

L - wkład od orbitalnych momentów pędu

Spin protonu

Pomiar

Informacje o spinowej strukturze protonu możemy uzyskać rozpraszając **spolaryzowane leptony** (źródło spolaryzowanych fotonów) na **spolaryzowanej tarczy**.

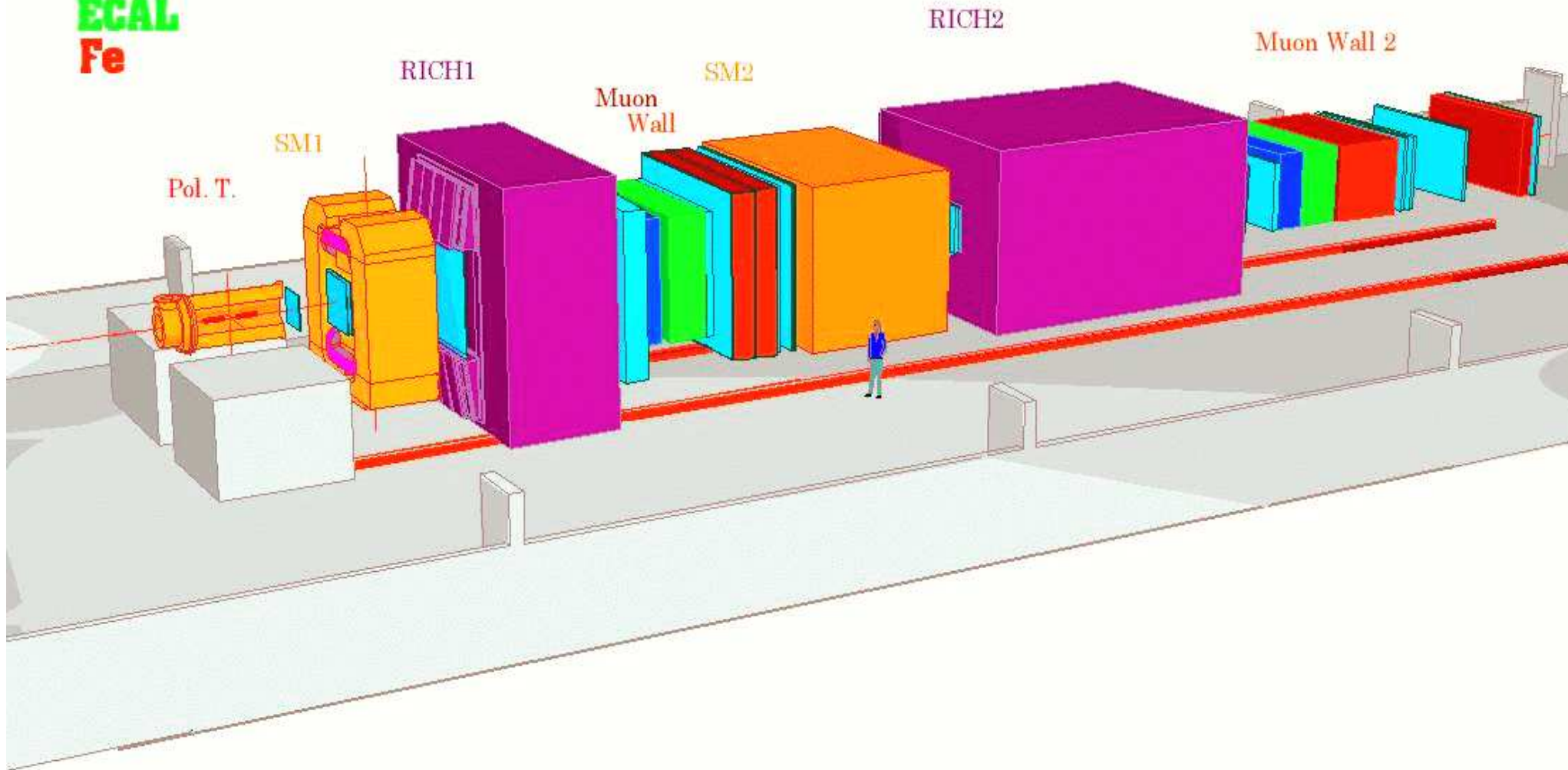


Spolaryzowany foton może być pochłonięty tylko przez kwark o przeciwnej polaryzacji

Eksperyment COMPASS w CERN

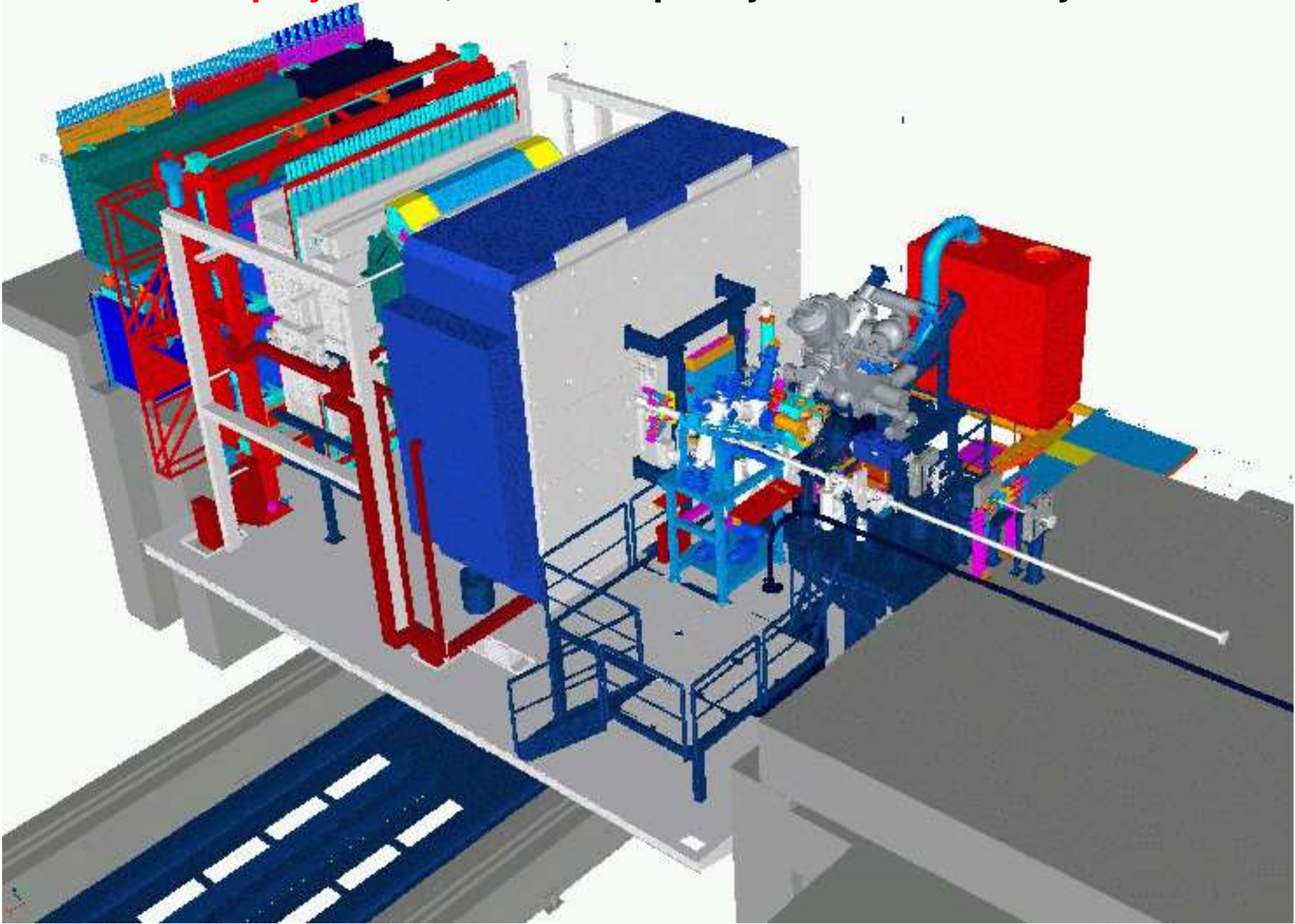
spolaryzowane miony

Magnets
RICH
Tracking
HCAL
ECAL
Fe



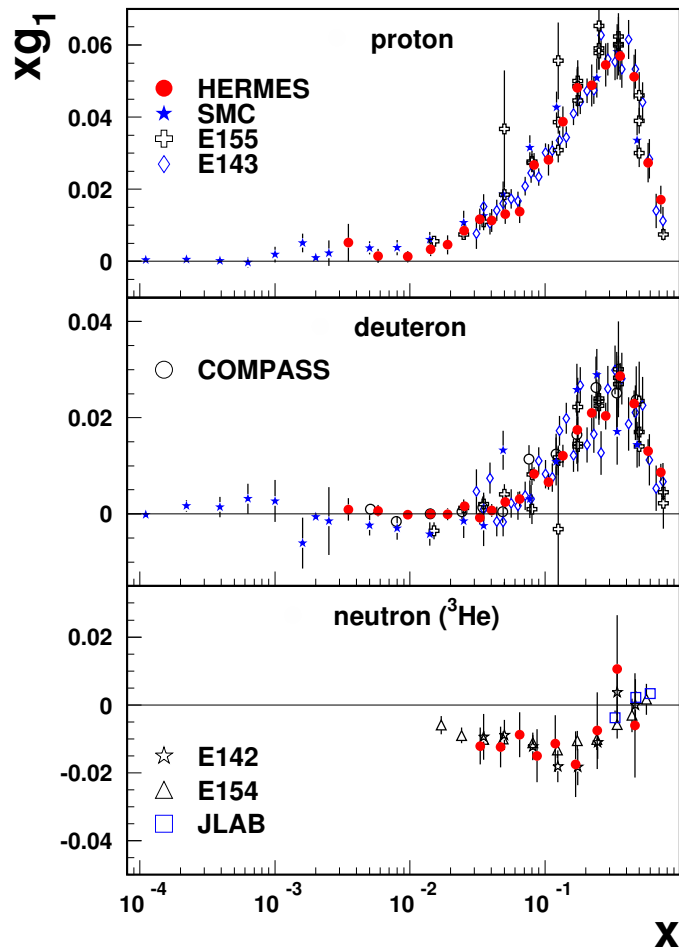
Eksperyment HERMES przy HERA, DESY

spolaryzowane elektrony



Spin protonu

Wyniki pomiarów



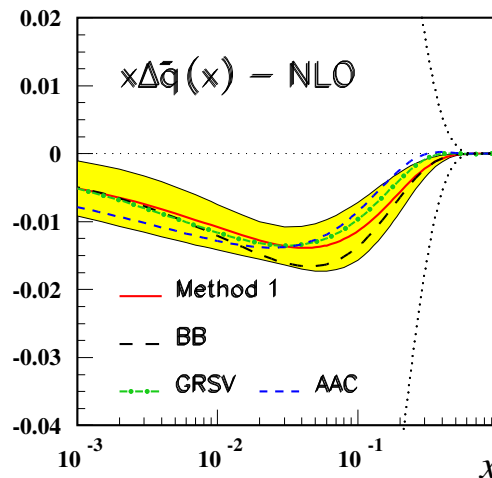
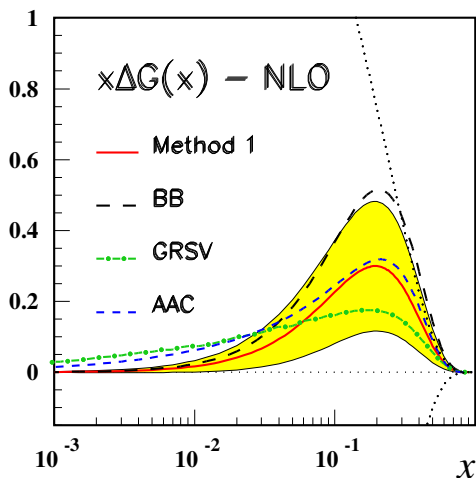
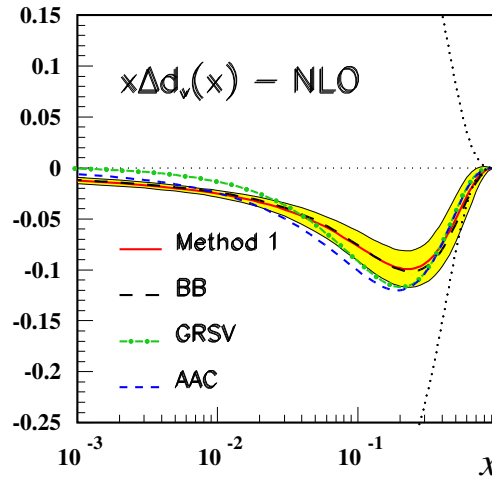
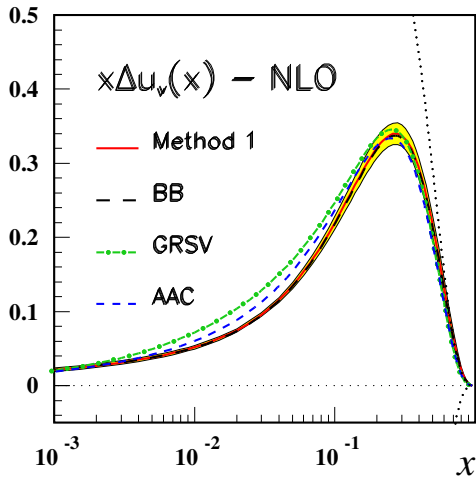
Pomiar spinowej funkcji struktury:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 (q^+(x) - q^-(x)) \\ &= \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 \Delta q(x) \end{aligned}$$

$q^+(x)$ i $q^-(x)$ - rozkłady kwarków o spinie zgodnym i przeciwnym do spinu protonu

Spin protonu

Wyniki analizy QCD



Walcencyjne kwarki u są spolaryzowane zgodnie ze spinem protonu.

Walcencyjne kwarki d - przeciwnie.

Mały wkład kwarków morza.

⇒ Łącznie polaryzacja kwarków daje $\sim \frac{1}{3}$ spinu protonu !

Duża polaryzacja gluonów.

Orbitalny moment pędu ?

Struktura fotonu

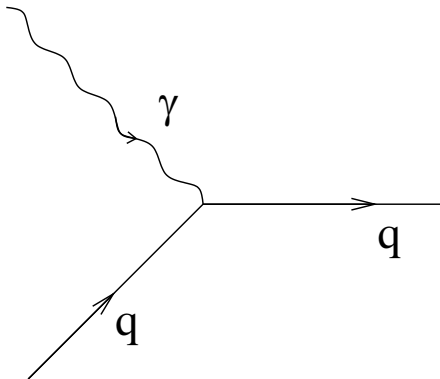
Fotoprodukcja

Fotoprodukcja:

oddziaływanie **rzeczywistych fotonów**

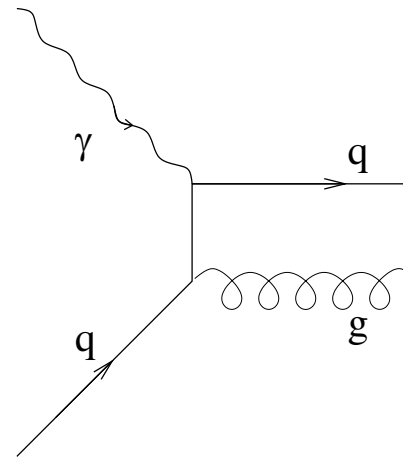
W granicy $Q^2 \rightarrow 0$ elektron emituje prawie **rzeczywiste fotony**.

Foton taki nie może być zaabsorbowany przez **kwark** w procesie typu **NC DIS**:



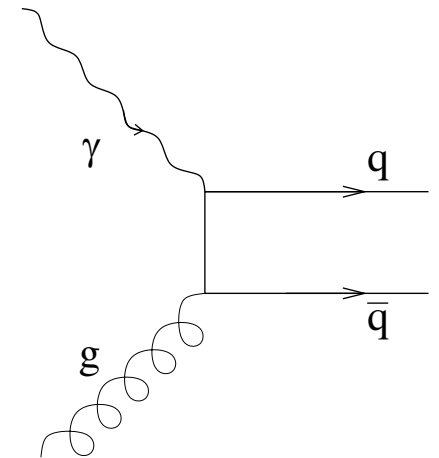
Obserwujemy natomiast procesy z emisją **dwóch partonów** (produkcją **dwóch jetów**):

QCD-Compton



$$\gamma q \rightarrow qg$$

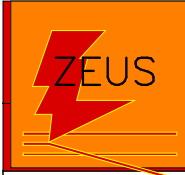
Fuzja foton-gluon (BGF)



$$\gamma g \rightarrow q\bar{q}$$

⇒ “Bezpośrednie” (direct) oddziaływanie fotonu

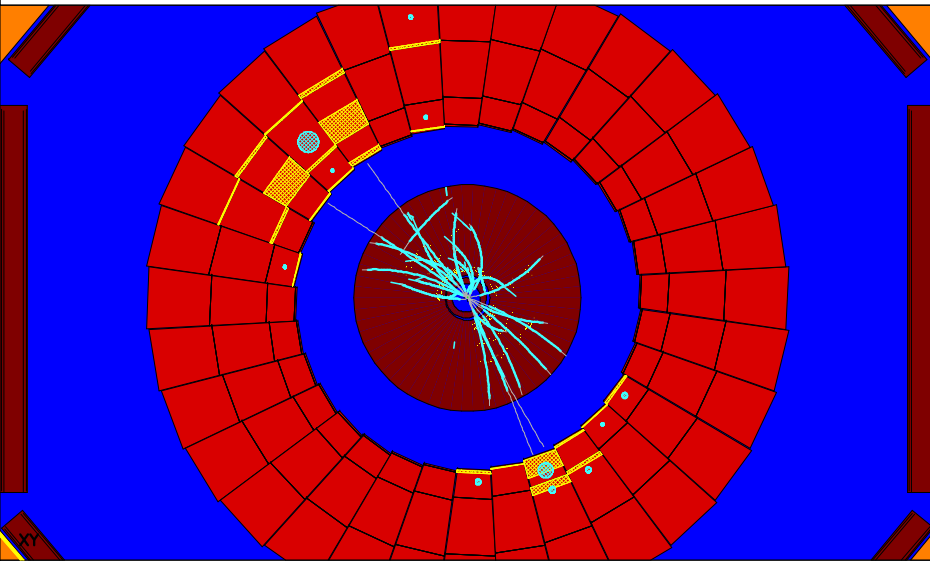
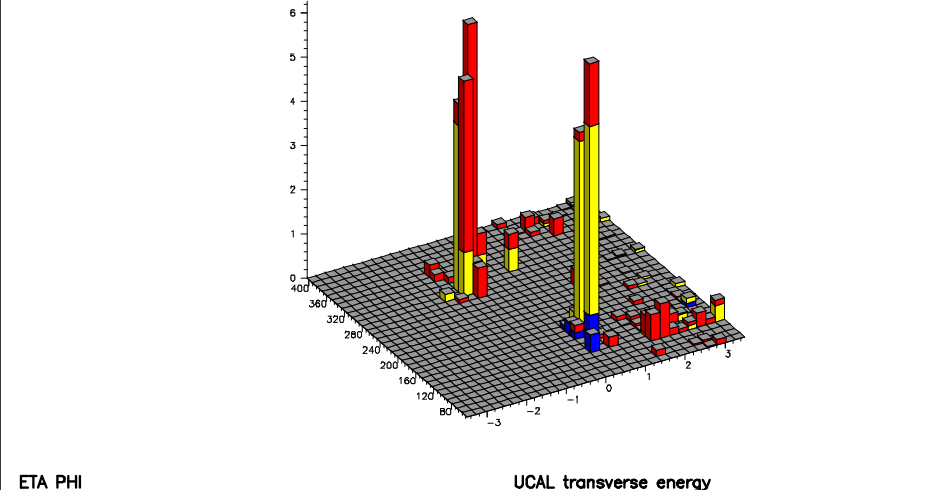
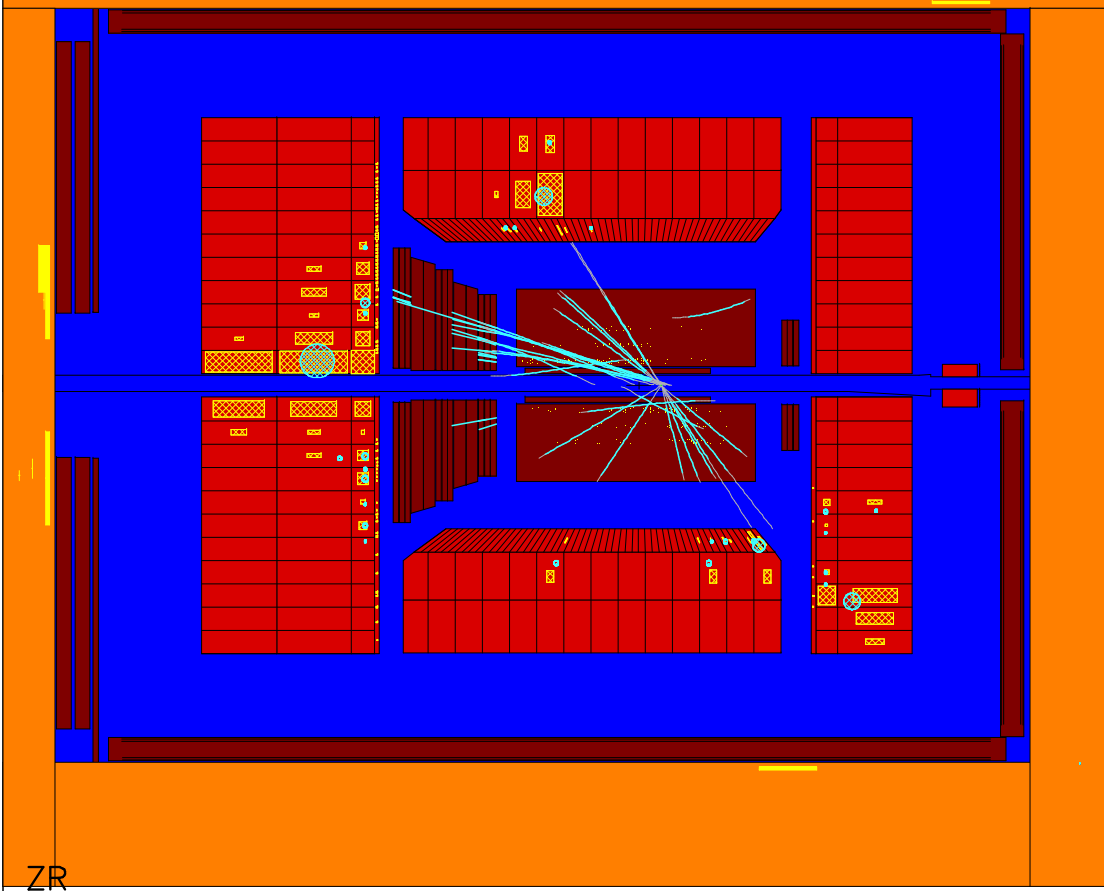
Experiment ZEUS Fotoprodukcja 2 jetów



E= 103.8 Et= 42.6 pt= 4.3 pz= 55.8 E-pz= 48.0 Ef= 62.7 Eb= 26.8 Er= 14.3
 Tf= 0.5 Tr= -0.5 Le= 0.4 Lg= 0.0 FNC= 0 BCN= 55 FLT=08A23D00 00000000
 e- x=.0000 y=.000 Q2= 0 DA x=.0000 Q2= 0 JB y=-.872 phi [45.225]
 UCAL scale 10.0 GeV BAC scale P-S-W (GeV) 5.00-5.00-5.00

Zeus Run 30605 Event 341
 22-Aug-1998 13:57:58.828 File ...us/data/hot98/h030605.z

very high y (~ 0.9) photoproduction dijet



Eksperyment H1

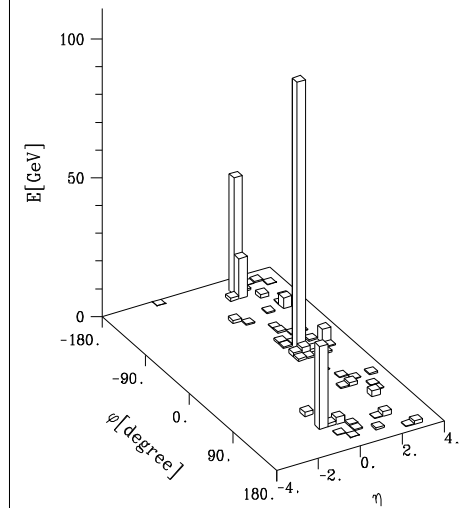
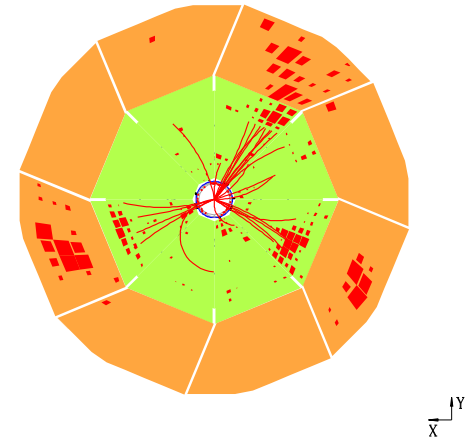
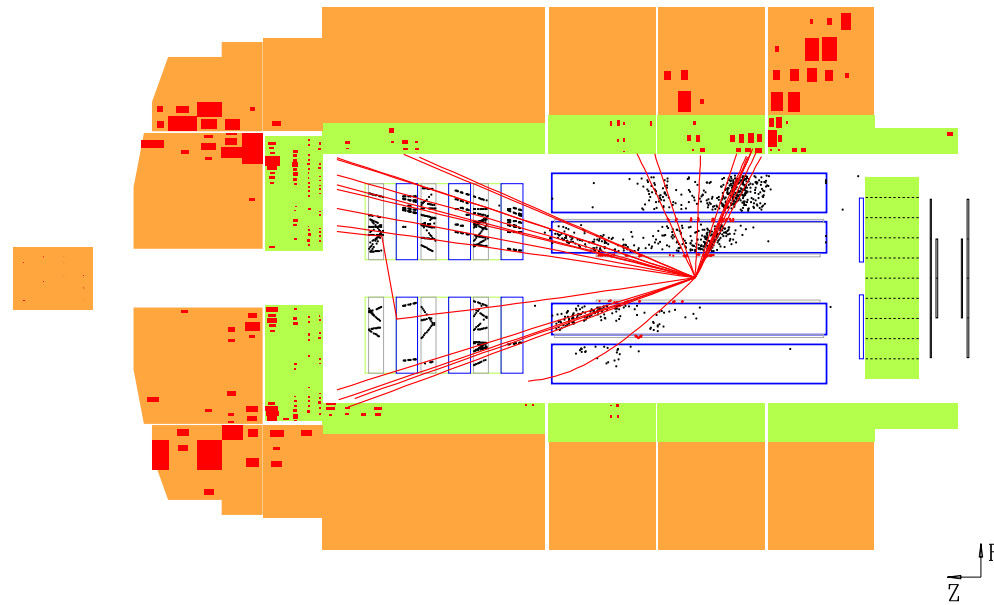
Fotoprodukcja

3 jetów



Run 85650 Event 125975 Class: 2 4 8 9 15 16 20 22 24 28 Run date 28/08/94

Three Jet Photoproduction



Struktura fotonu

Produkcja jetów

Spodziewamy się, że cała energia i pęd podłużny fotonu zostanie przekazany produkowanym partonom.

Rekonstruuując dwa jety hadronowe oczekujemy:

$$\sum_{jet=1,2} (E - p_z)_{jet} = (E - p_z)_\gamma = 2E_\gamma$$

Energię fotonu znamy mierząc rozproszony elektron.

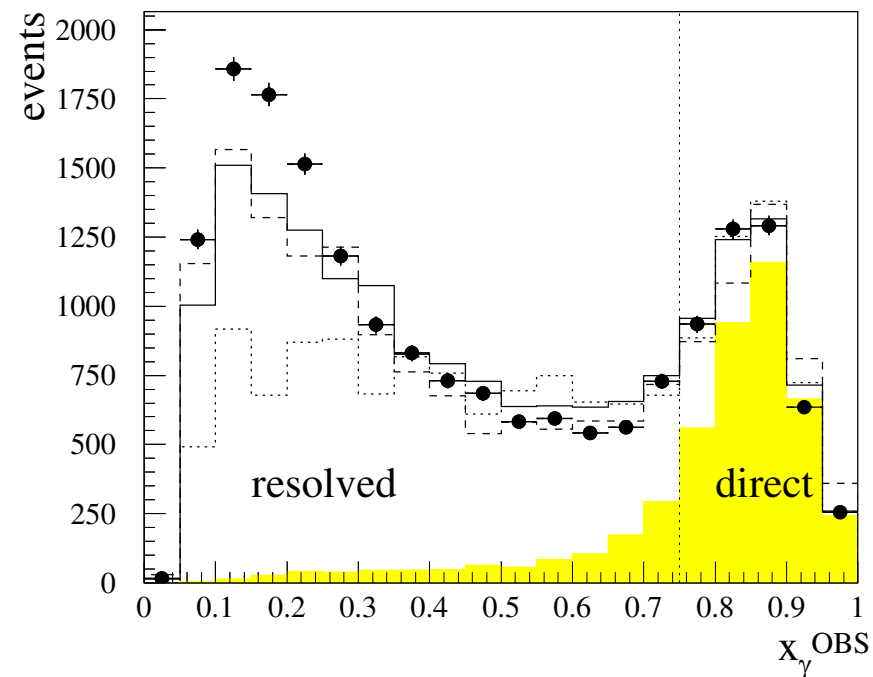
Możemy zdefiniować:

$$x_\gamma = \frac{\sum_{jet=1,2} (E - p_z)_{jet}}{2E_\gamma}$$

Dla “bezpośredniego” oddziaływania fotonów oczekujemy $x_\gamma \approx 1$

Wyniki pomiaru:

ZEUS 1994

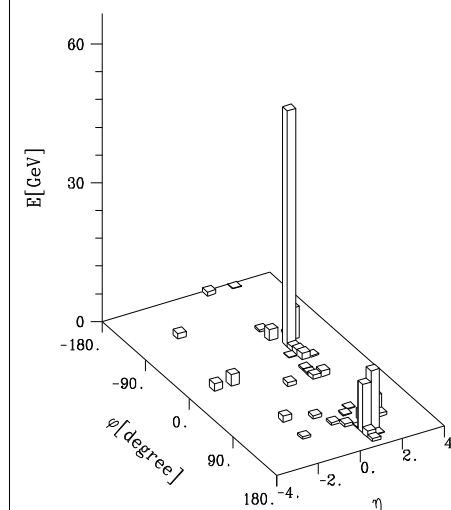
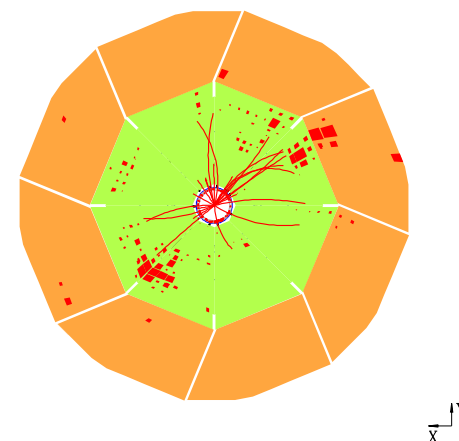
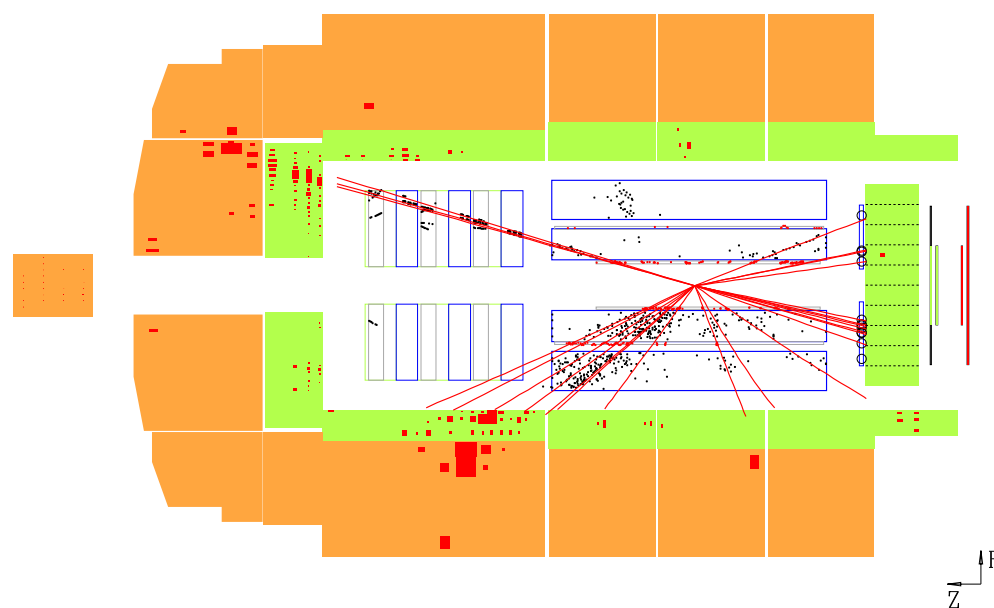




Eksperyment H1

2 jety + "resztki"
(remnant) fotonu

2 - jet photoproduction + gamma remnant



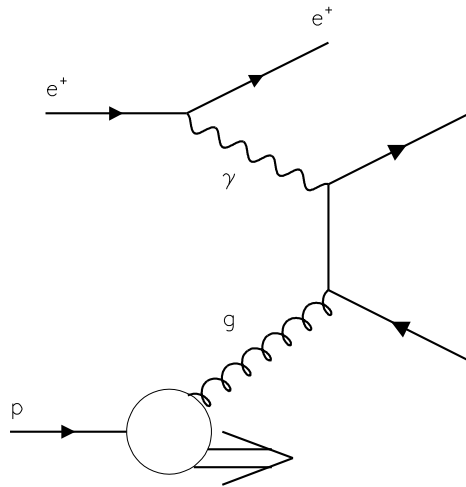
Struktura fotonu

Aby wytłumaczyć przypadki z $x_\gamma \ll 1$ musimy przyjąć, że foton ma wewnętrzną strukturę (partonową) i w oddziaływaniu uczestniczy tylko jeden ze składników fotonu.

⇒ fotoprodukcja “pośrednia” (resolved)

Direct

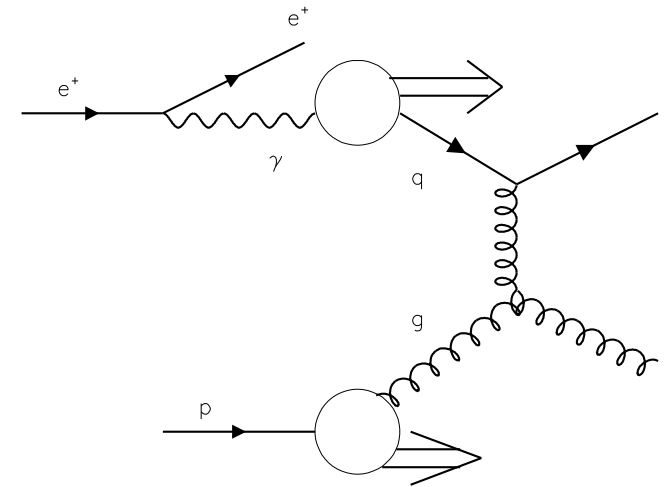
$x_\gamma \sim 1$



(a)

Resolved

$x_\gamma \ll 1$



(b)

Opisując oddziaływania rzeczywistych fotonów możemy wprowadzić funkcję struktury fotonu $F_2^\gamma(x, Q^2)$. Ma ona taką samą interpretację jak F_2 protonu.

$F_2^\gamma(x, Q^2)$ można mierzyć np. w zderzeniach e^+e^- .

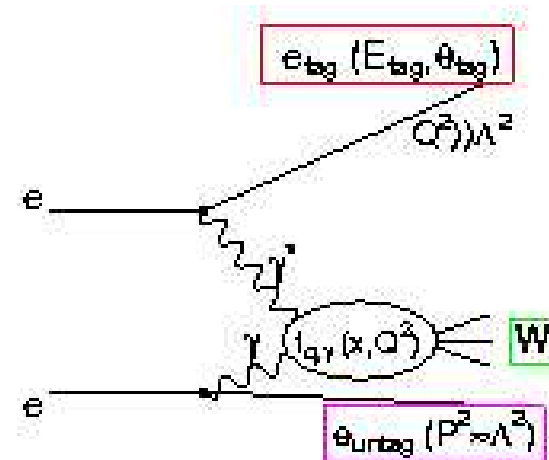
Struktura fotonu

LEP

Strukturę fotonu można było mierzyć także w eksperymentach przy akceleratorze LEP.

Elektron (lub pozyton) rozpraszał się na rzeczywistym fotonie emitowanym przez pozyton (lub elektron) przeciwbieżnej wiązki.

Kinematyke rozpraszania można było ustalić mierząc rozproszony elektron i pozyton.



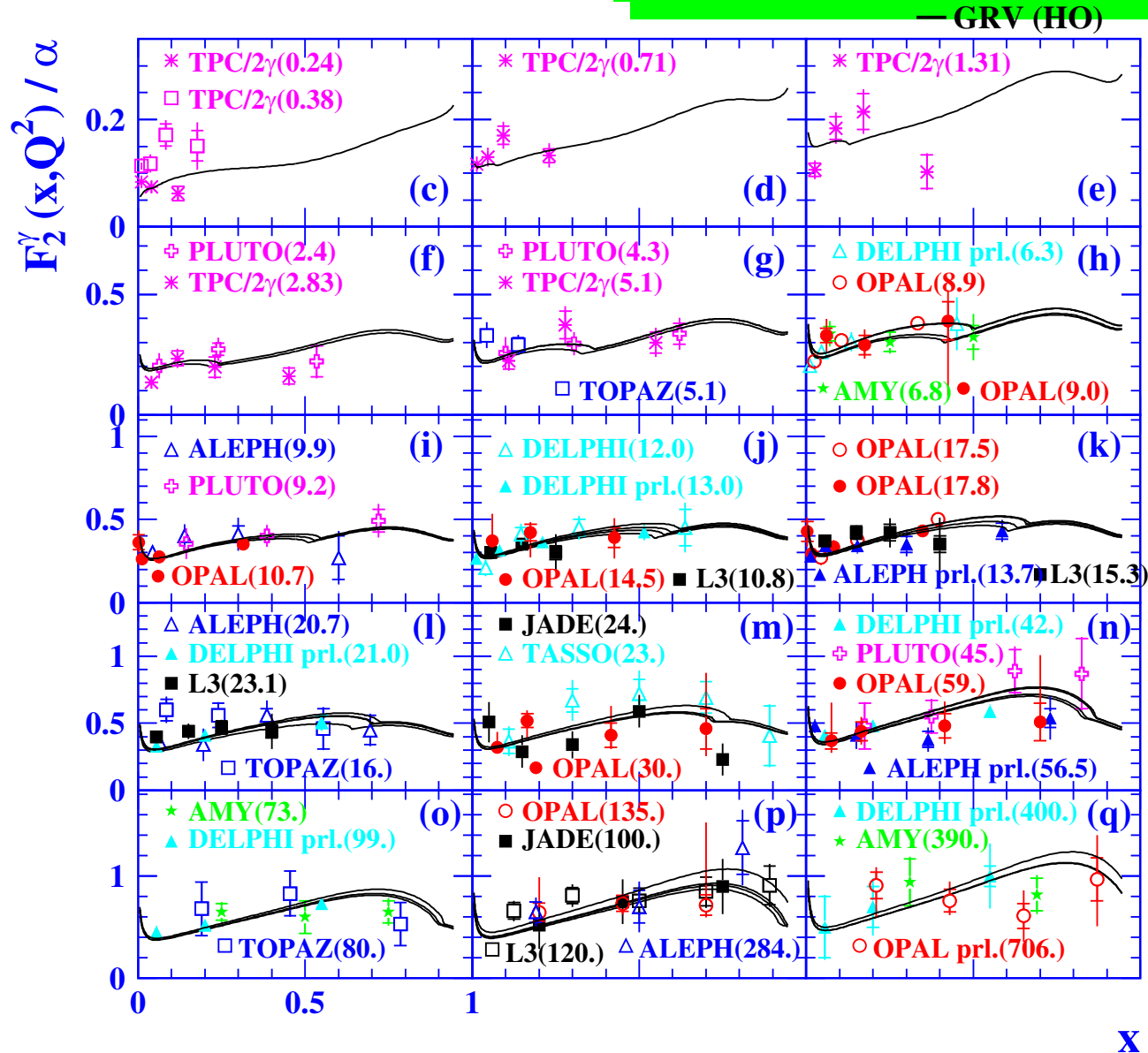
$$\frac{d^2\sigma_{e^+e^- \rightarrow e^+e^-}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{s Q^4} \left[(1 + (1-y)^2) F_2^\gamma(x, Q^2) - \underbrace{y^2 F_L^\gamma(x, Q^2)}_{\rightarrow 0} \right]$$

$$Q^2 = 2 E_0 E_{\text{tag}} (1 - \cos \theta_{\text{tag}}) \gg P^2$$

$$x = \frac{Q^2}{Q^2 + W^2 + P^2}$$

$$y = 1 - \frac{E_{\text{tag}}}{E_0} \cos^2\left(\frac{\theta_{\text{tag}}}{2}\right) \ll 1$$

Struktura fotonu



Zbrane wyniki pomiarów funkcji struktury fotonu $F_2^\gamma(x, Q^2)$ w różnych eksperymentach.

Wyraźna zależność od Q^2 - ewolucja opisywana przez QCD

Struktura fotonu

W oddziaływaniach **wysokiej energii foton** zachowuje się jak **hadron**.

Model dominacji mezonów wektorowych (VMD):

$$|\gamma\rangle \approx |\gamma_0\rangle + \alpha_{em} \cdot \sum_{\rho, \omega, \phi \dots} a_i |V_i\rangle$$

γ_0 - "goły" foton
(bez struktury)

$$\Rightarrow \sigma_{\gamma p} \sim \alpha_{em} \cdot \sigma_{hp}$$

$$\sigma_{\gamma\gamma} \sim \alpha_{em}^2 \cdot \sigma_{hp}$$

Stała sprzężenia:

$$\alpha_{em} \approx 1/137$$

Porównanie przekrojów czynnych hp , γp i $\gamma\gamma$:

