

---

# Chromodynamika kwantowa w warunkach ekstremalnych

Krzysztof Golec-Biernat

Oddział Fizyki Teoretycznej NZ41

IFJ PAN, 23 maja 2013 r.

# Plan

---

- Chromodynamika kwantowa (QCD)
- Struktura chromodynamiczna nukleonu
- QCD dla dużych gęstości partonowych w eksperymentach na LHC

# Wstęp

---

- Elektrodynamika kwantowa - 1949
- Model Weinberga-Salama - 1967
- Chromodynamika kwantowa - 1973

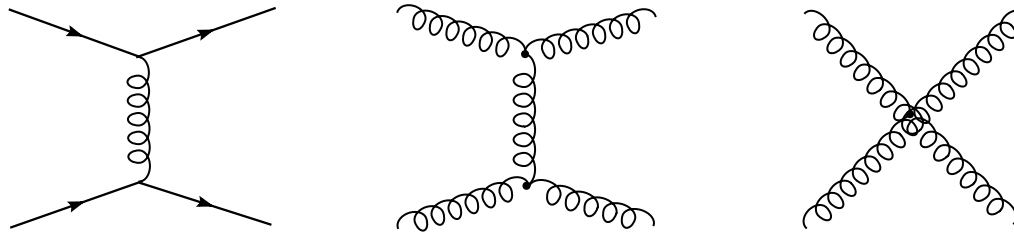
Kwantowe teorie pola z lokalną symetrią cechowania:

$$U_Y(1) \otimes SU_L(2) \otimes SU_c(3)$$

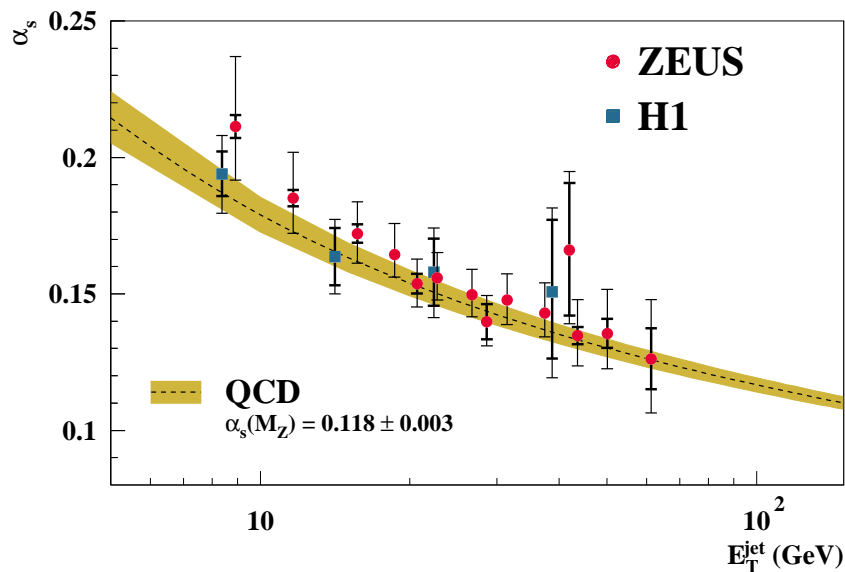
- Supersymetria (model Wessa-Zumino) - 1973     ???
- Teoria strun - 1984     ???

# Chromodynamika kwantowa

- Kwanty to **kolorowe kwarki** o spinie  $1/2$  i **gluony** o spinie  $1$ .



- **Asymptotyczna swoboda** (*Gross, Wilczek, Politzer, 73*)



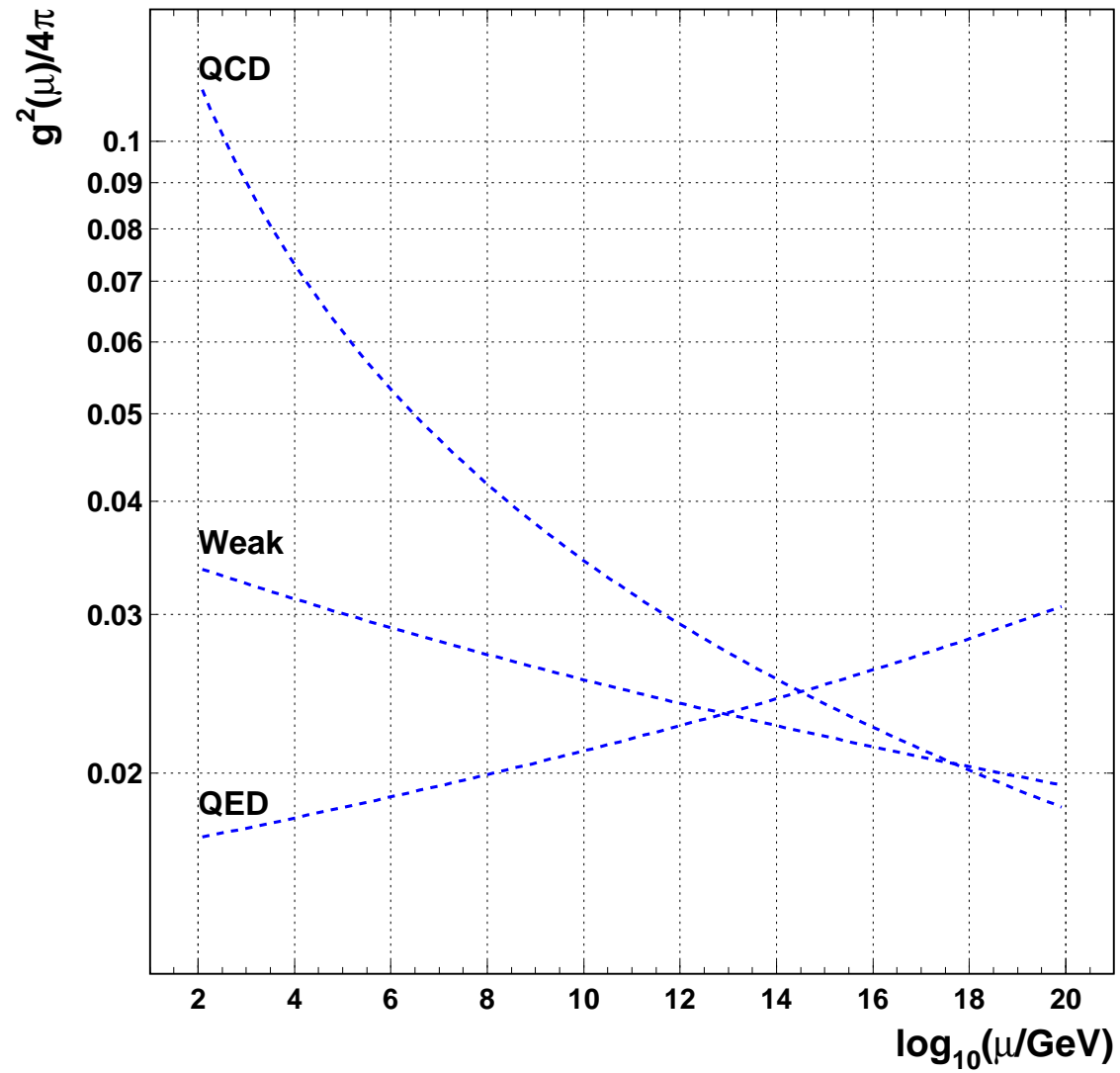
"Stała" sprzężenia silnego:

$$\alpha_s(\mu) = \frac{b}{\ln(\mu^2/\Lambda_{QCD}^2)}$$

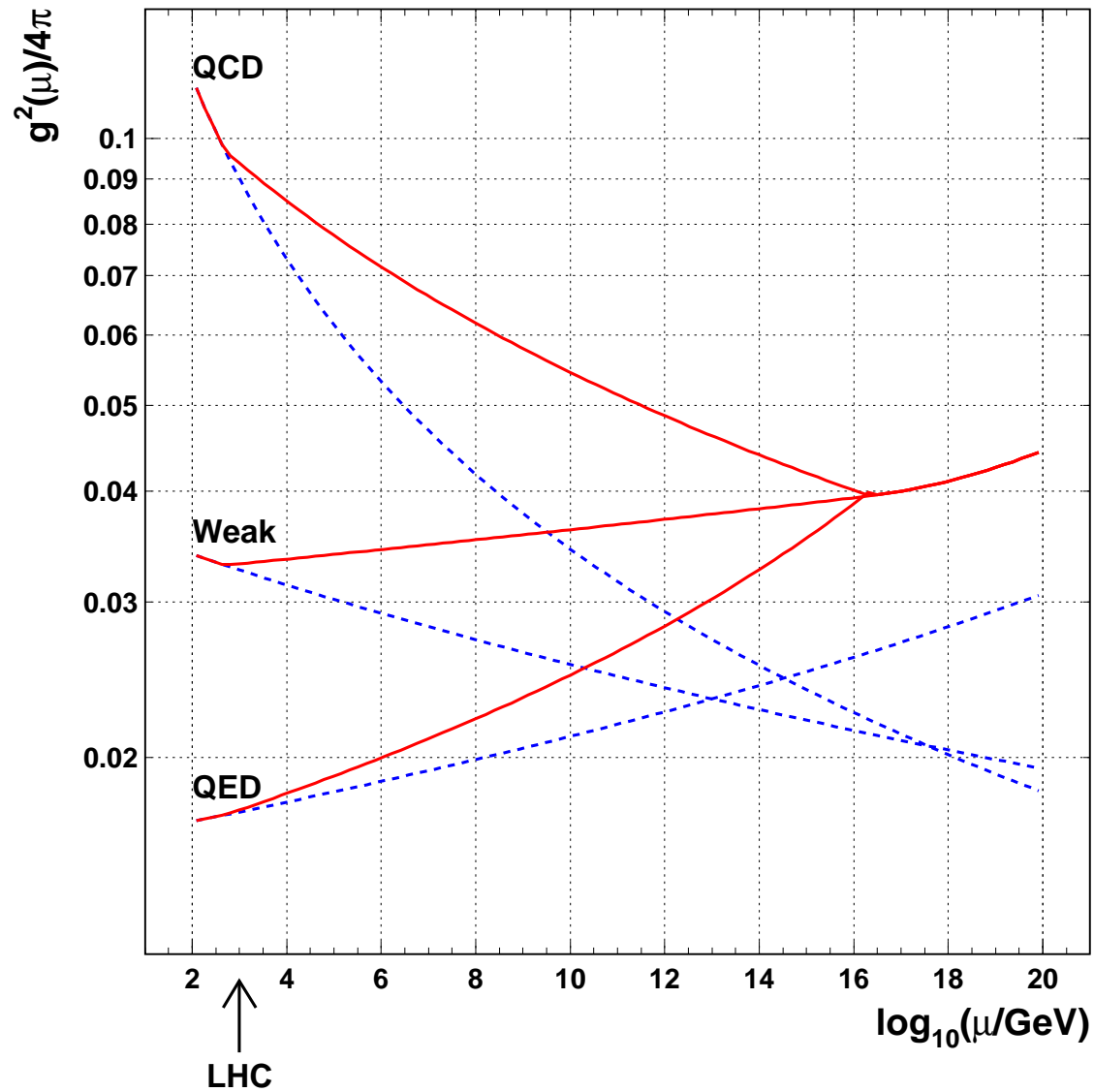
Skala:  $\Lambda_{QCD} \simeq 200 \text{ MeV}$

- **Uwięzienie** na dużych odległościach ( $\sim 1 \text{ fm}$ )

# Unifikacja oddziaływań



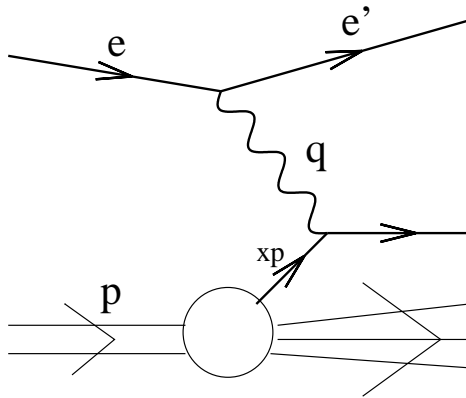
# Unifikacja oddziaływań



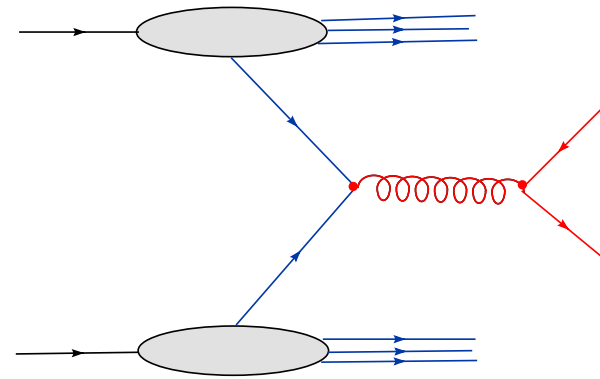
● **Supersymetria** ratuje unifikację.

# Procesy z twardą skalą

- Kwarki i gluony "widziane" poprzez procesy z twardą:  $Q \gg \Lambda_{QCD}$



DIS:  $Q = \sqrt{-q^2}$



pp:  $Q = E_T$

- Przekrój czynny:

$$\sigma_{AB} = \sum_{a,b} \int dx_a dx_b f_a(x_a, Q) \{ \hat{\sigma}_0 + \alpha_s(Q) \hat{\sigma}_1 + \dots \} f_b(x_b, Q)$$

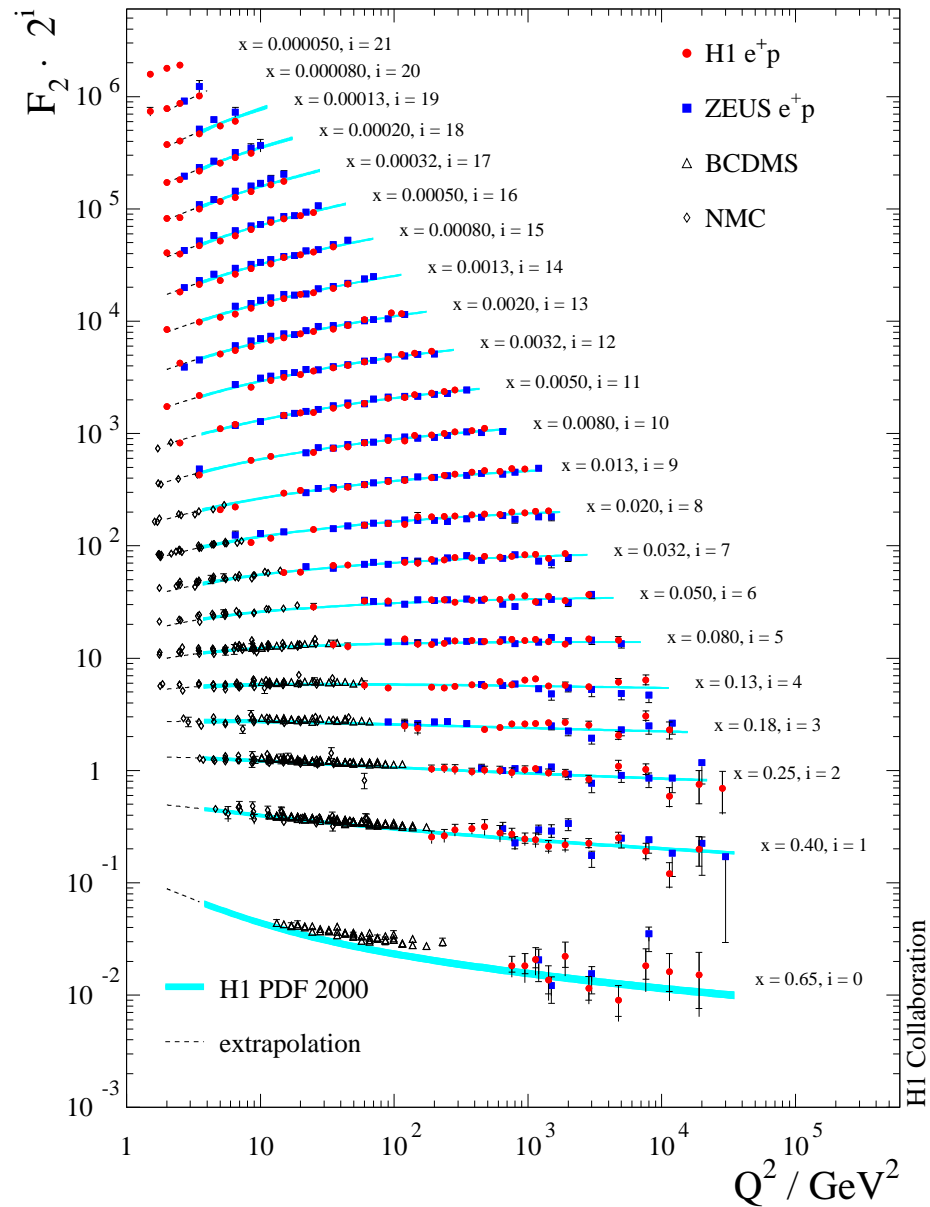
- Gęstości partonowe - kwarkowe i gluonowe:  $f_a = (q_f, G)$

## Twarde procesy

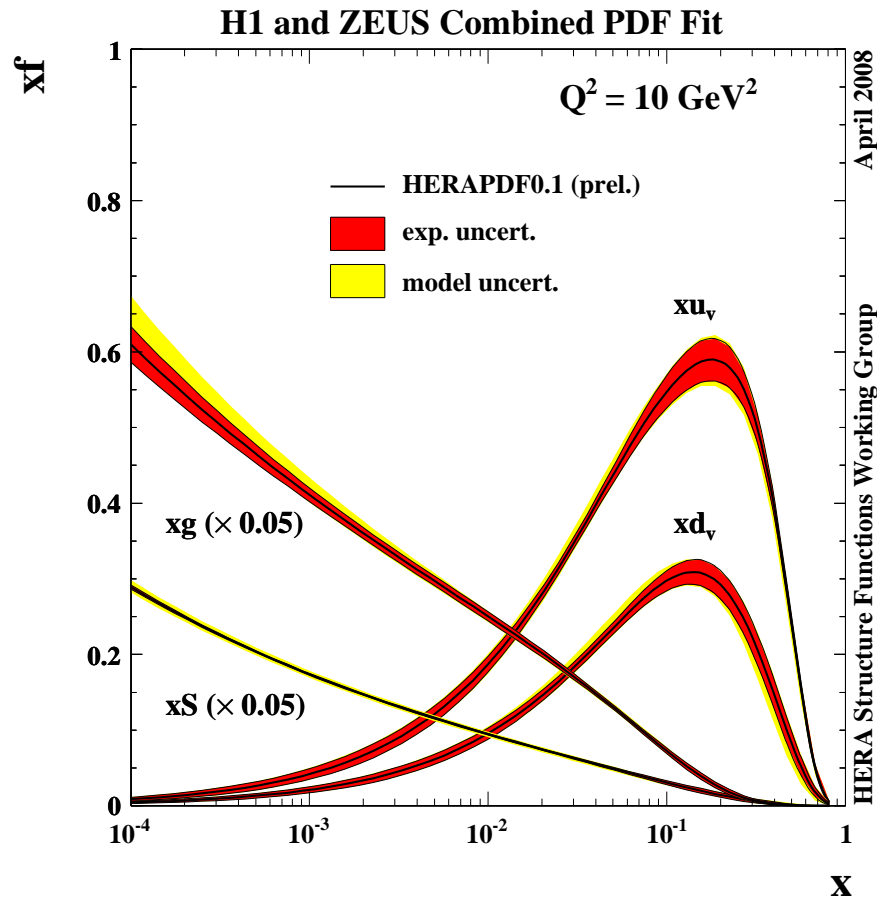
H1, ZEUS	$F_2^{e^+p}(x, Q^2), F_2^{e^-p}(x, Q^2)$ NC + CC
BCDMS	$F_2^{\mu p}(x, Q^2), F_2^{\mu d}(x, Q^2)$
NMC	$F_2^{\mu p}(x, Q^2), F_2^{\mu d}(x, Q^2), F_2^{\mu n}(x, Q^2)/F_2^{\mu p}(x, Q^2)$
SLAC	$F_2^{e^-p}(x, Q^2), F_2^{e^-d}(x, Q^2)$
E665	$F_2^{\mu p}(x, Q^2), F_2^{\mu d}(x, Q^2)$
CCFR, NuTeV, CHORUS	$F_2^{\nu(\bar{\nu})N}(x, Q^2), F_3^{\nu(\bar{\nu})N}(x, Q^2)$ $\rightarrow q, \bar{q}$ at all $x$ and $g$ at medium, small $x$
H1, ZEUS	$F_{2,c}^{e^\pm p}(x, Q^2), F_{2,b}^{e^\pm p}(x, Q^2) \rightarrow c, b$
E605, E772, E866	Drell-Yan $pN \rightarrow \mu\bar{\mu} + X \rightarrow \bar{q}(g)$
E866	Drell-Yan $p, n$ asymmetry $\rightarrow \bar{u}, \bar{d}$
CDF, D0	$W^\pm$ rapidity asymmetry $\rightarrow u/d$ ratio at high $x$
CDF, D0	$Z^0$ rapidity distribution $\rightarrow u, d$
CDF, D0	inclusive jet data $\rightarrow g$ at high $x$
H1, ZEUS	DIS + jet data $\rightarrow g$ at medium $x$
CCFR, NuTeV	dimuon data $\rightarrow$ strange sea $s, \bar{s}$



# Łamanie skalowania $F_2(x, Q^2)$

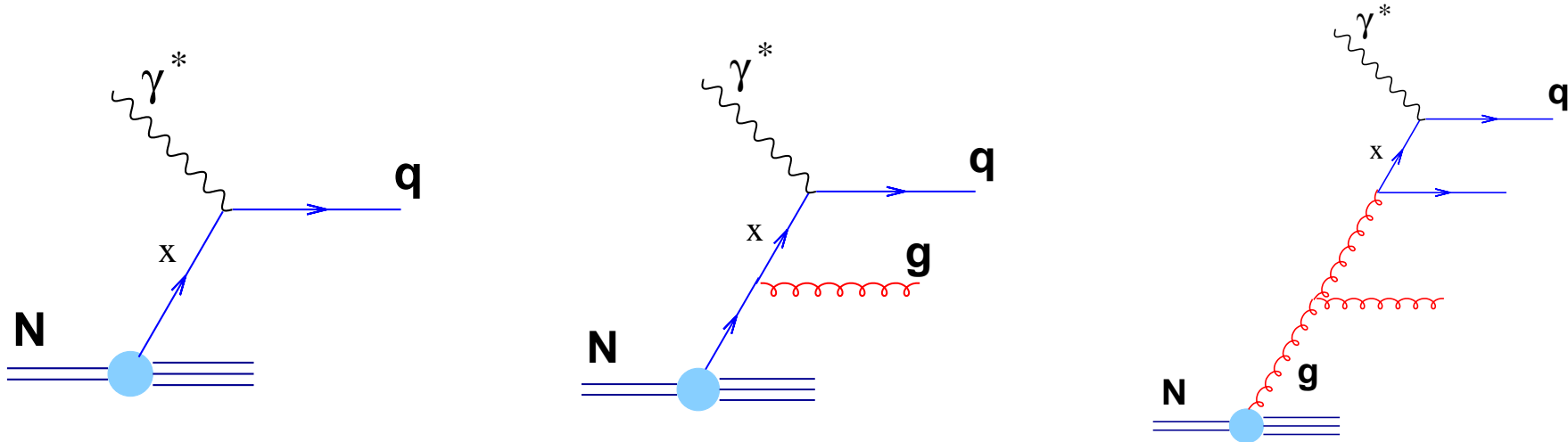


# Rozkłady partonowe



- Gluony niosą połowę pędu nukleonu.
- Powolne gluony  $x \approx 0$  dominują strukturę nukleonu.

# Równania ewolucji Altarelliego-Parisiego (DGLAP)



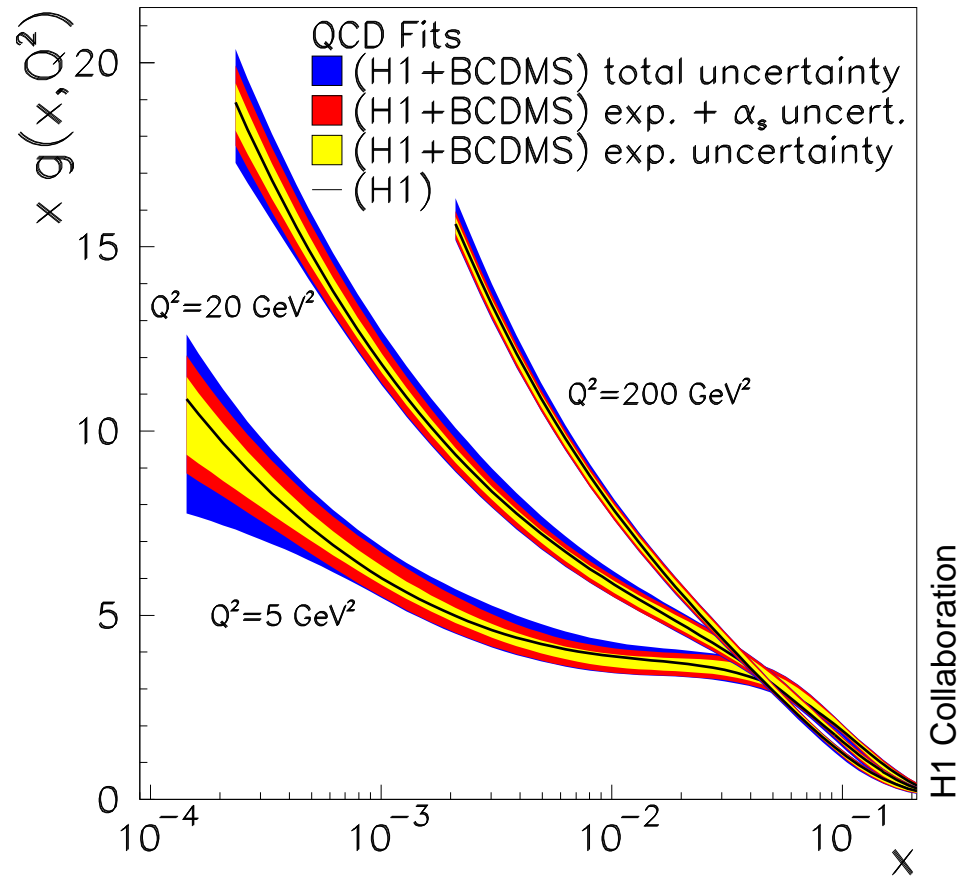
- QCD przewiduje zmianę gęstości partonowych z skalą  $Q$

$$\frac{\partial q_f}{\partial \ln Q^2} = P_{qq} \otimes q_f + P_{qG} \otimes G$$

$$\frac{\partial G}{\partial \ln Q^2} = P_{GG} \otimes G + P_{Gq} \otimes \sum_f q_f$$

- Fit rozkładów początkowych  $q_f(x, Q_0)$ ,  $G(x, Q_0)$  do danych.

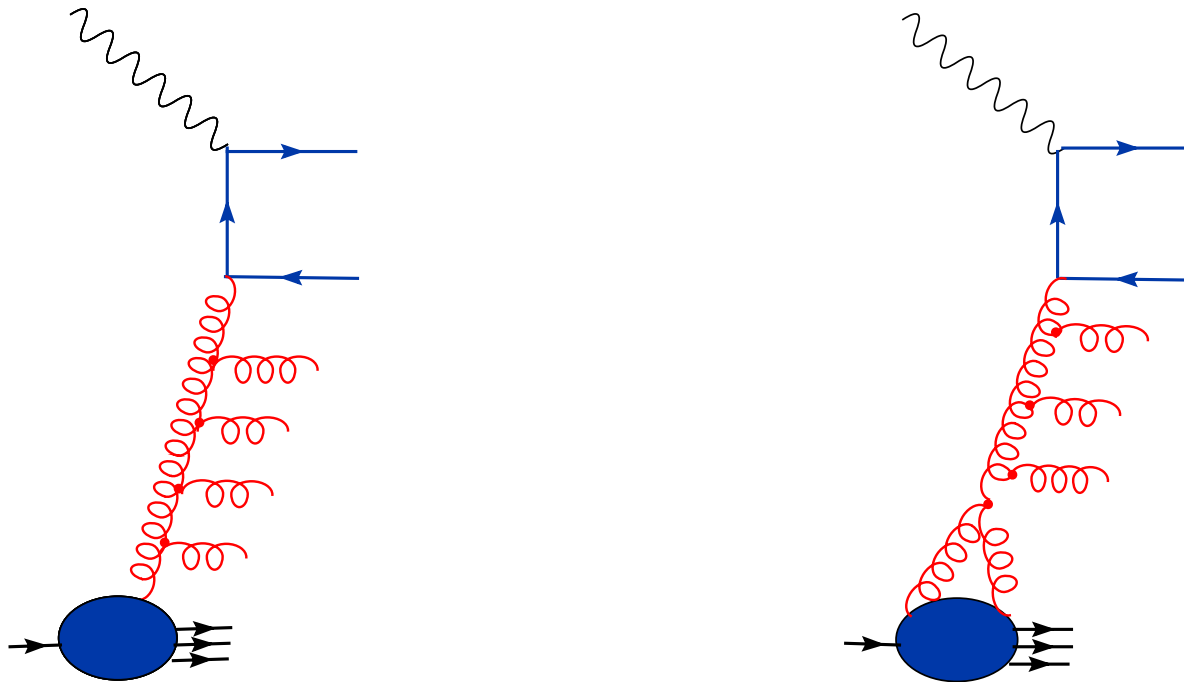
# Rozkłady gluonów



- Silny wzrost gęstości gluonów dla  $x \rightarrow 0$ .

# Chromodynamika dla dużych gęstości partonowych

- Gluony **rekombinują** hamując wzrost gęstości gluonów dla  $x \rightarrow 0$

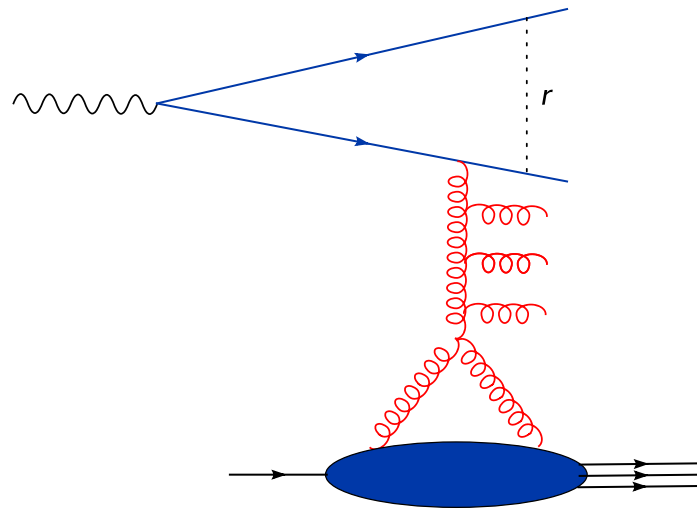


- Nieliniowe równania ewolucji (*Gribov, Levin, Ryskin, 83*)

$$\frac{\partial G}{\partial \ln Q^2} = P_{GG} \otimes G - V_{GGG} \otimes G^2$$

# Obraz dipolowy

- Dipol kwarkowy sonduje gęsty układ gluonowy w nukleonie

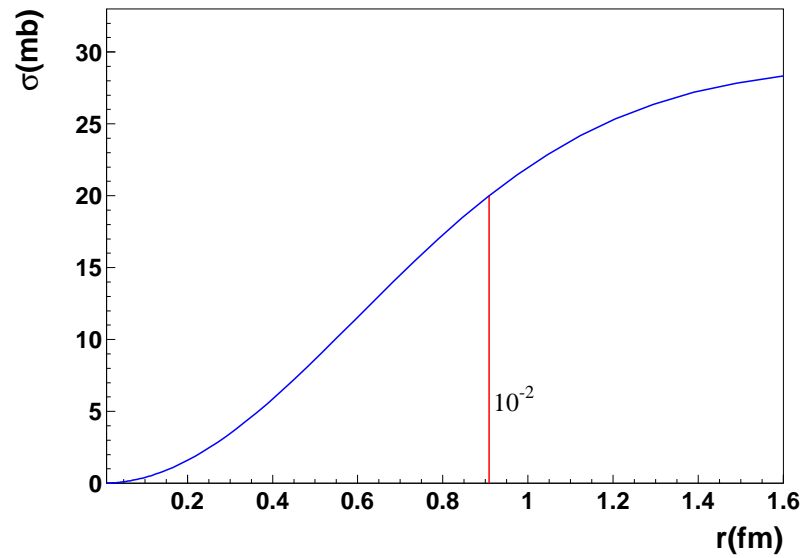


- To co widzi zależy od energii  $s$ :  $x = Q^2 / s$

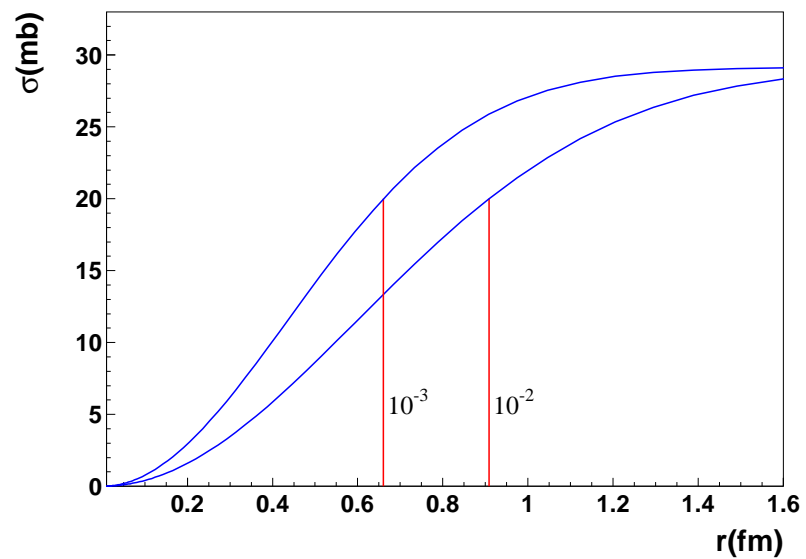


# Amplituda oddziaływania dipola $N(x, r)$

---

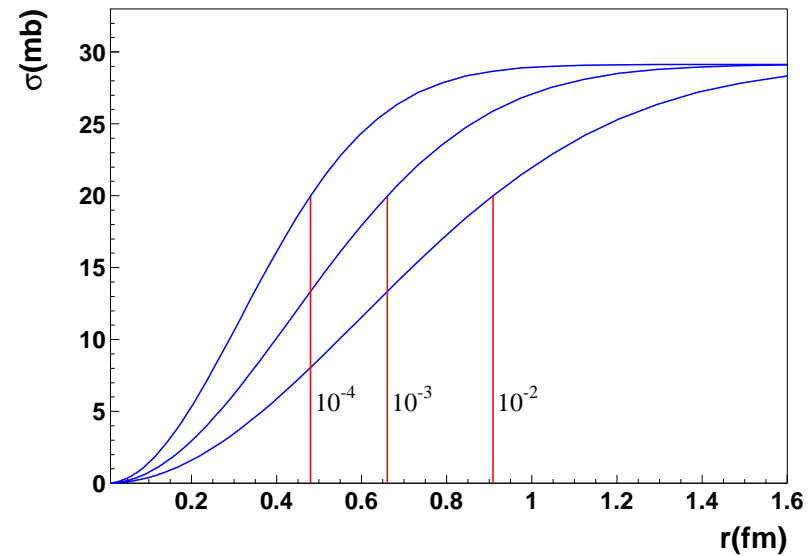


# Amplituda oddziaływania dipola $N(x, r)$

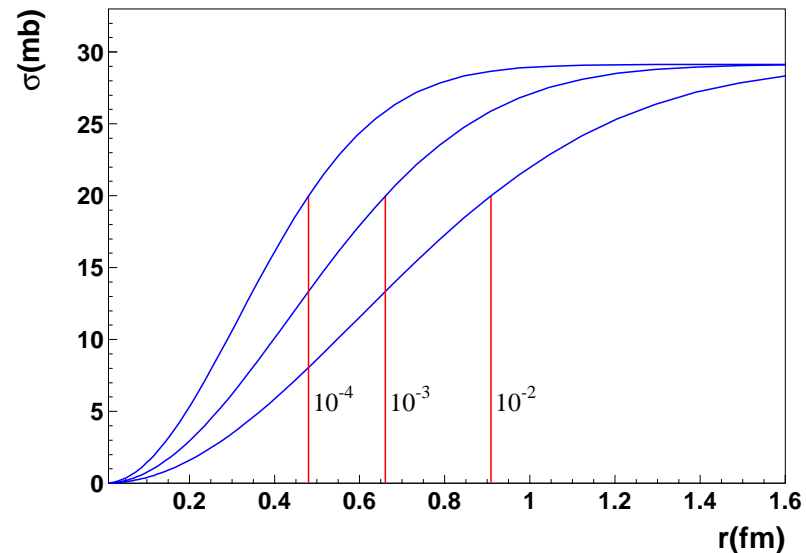




# Amplituda oddziaływania dipola $N(x, r)$



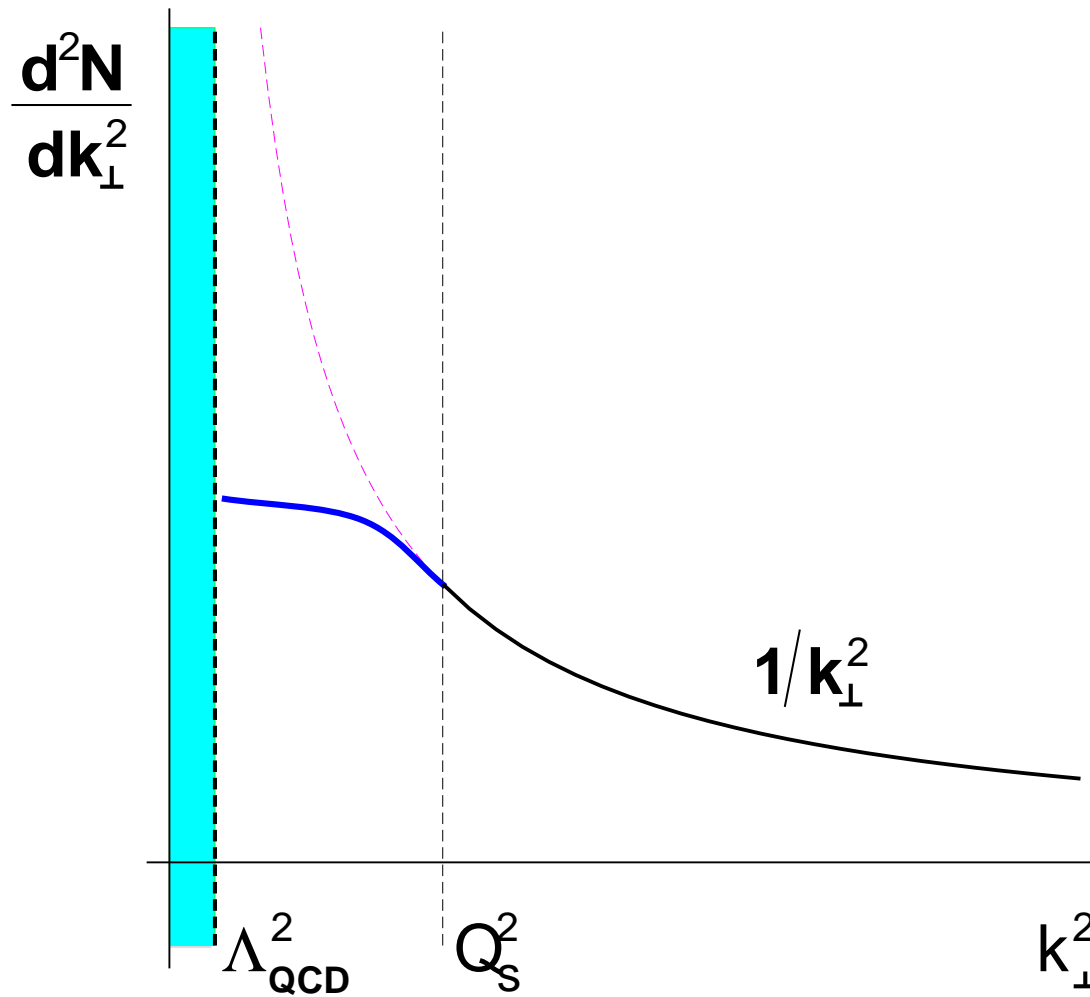
# Amplituda oddziaływania dipola $N(x, r)$



- Skala saturacji:  $R_s(x) \sim x^{0.15}$
- Skalowanie geometryczne:  $N = N(r/R_s(x))$
- Nieliniowe równanie Balitskiego-Kovchegova:

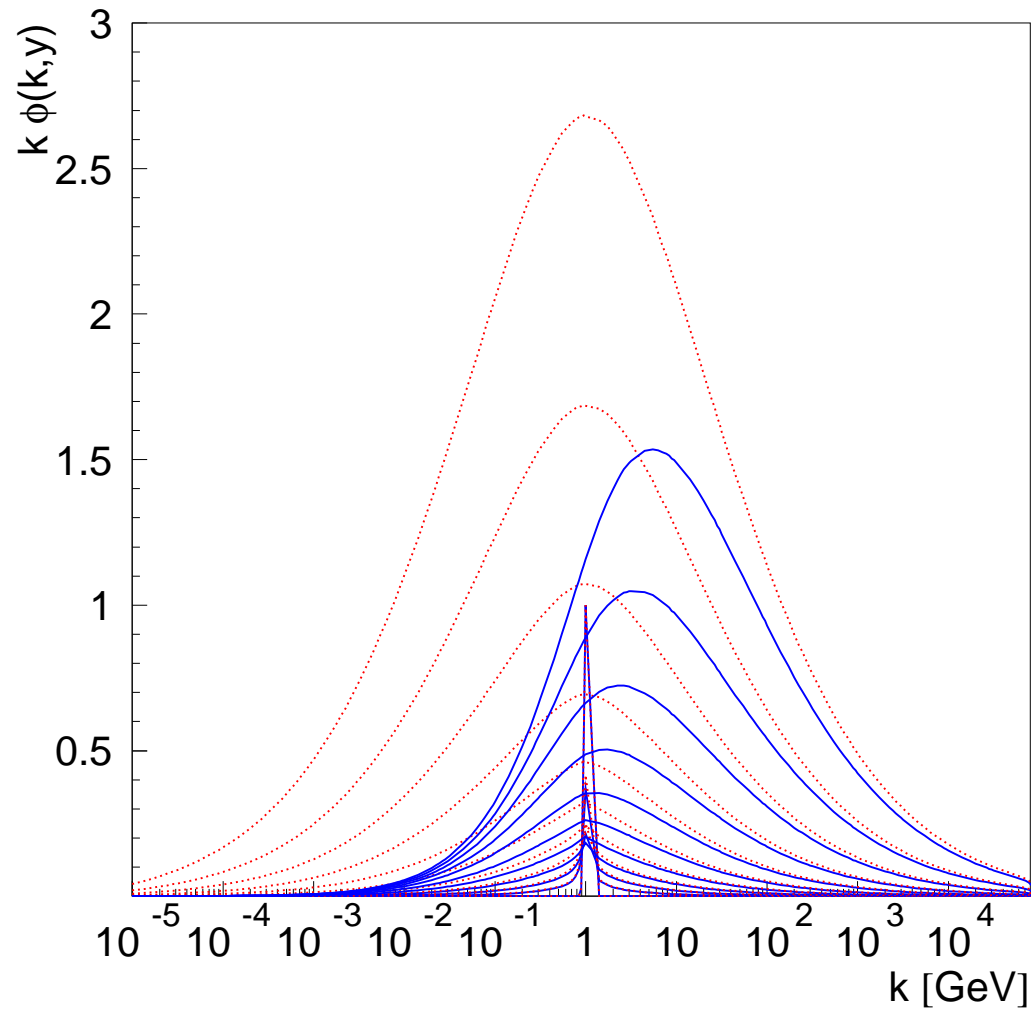
$$-\frac{\partial N}{\partial \ln x} = K \otimes N - N \otimes N$$

## Saturacja rozkładu gluonów



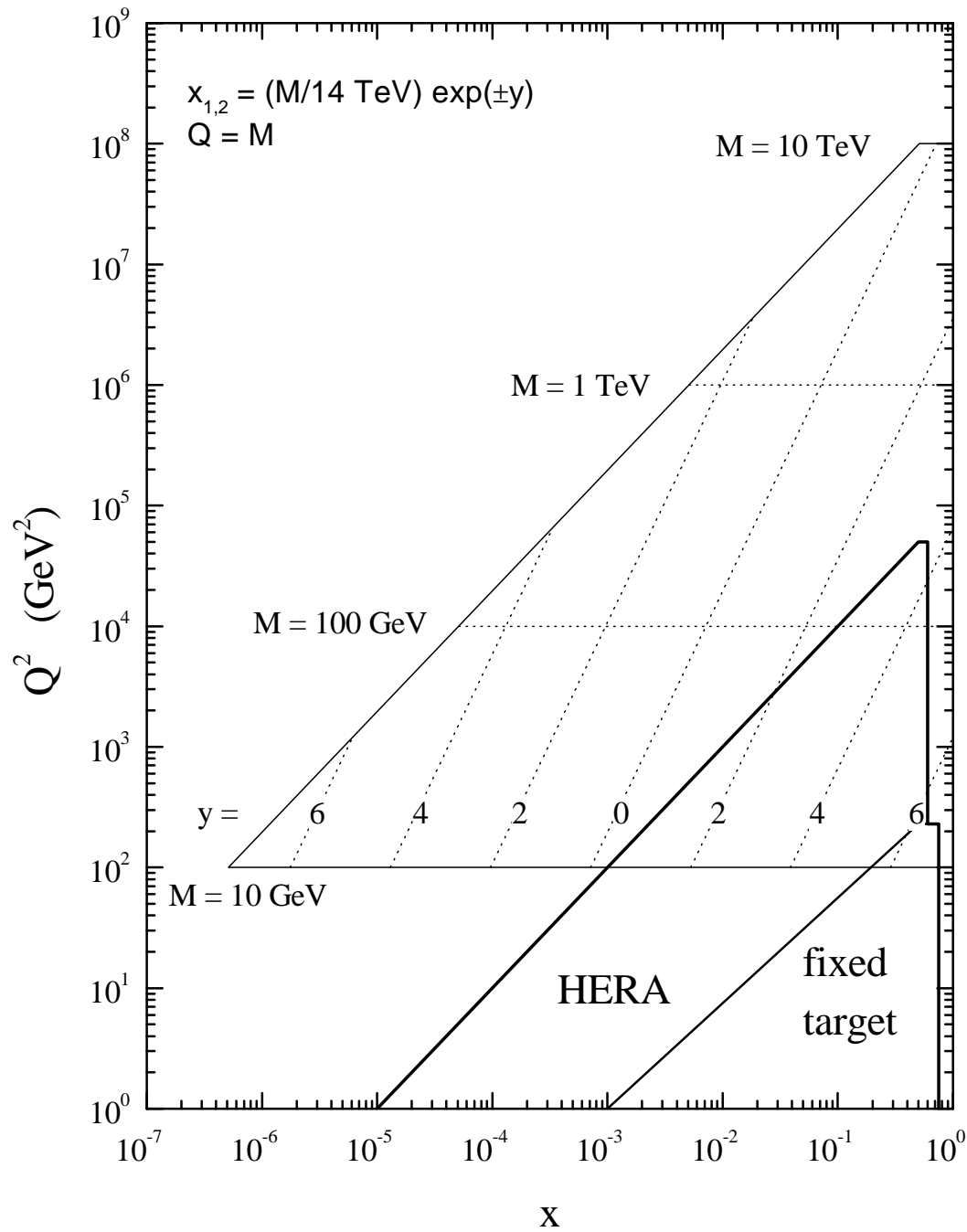
- Gęstość gluonów nasyca się dla  $k_T < Q_s = 1/R_s$ .

# Saturacja rozkładu gluonów



- Gęstość gluonów nasyca się dla  $k_T < Q_s = 1/R_s$ .

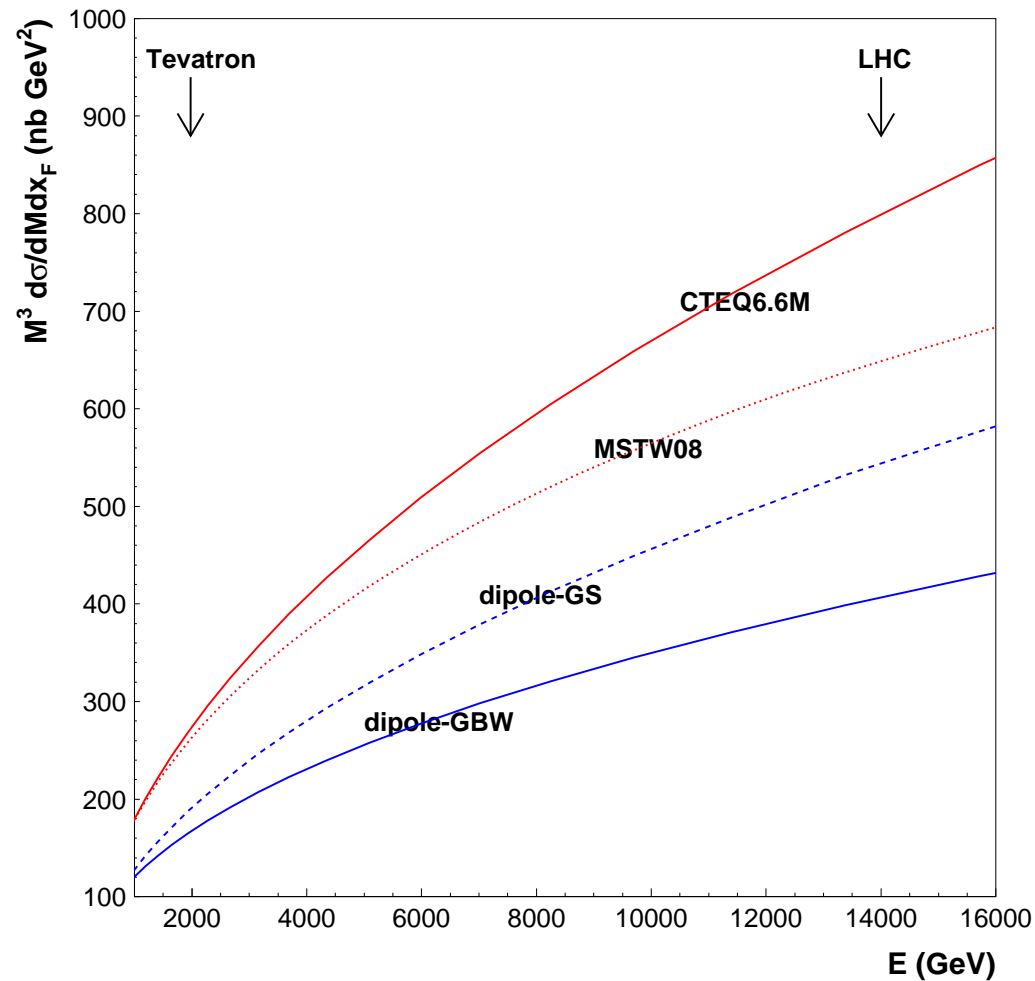
# LHC parton kinematics



# Dense QCD at LHC

- Produkcja par Drell-Yana dla małych  $M$  (*G-B, Lewandowska, Staśto, 2010*)

DY cross section for  $x_F = 0.15$  and  $M=10$  GeV



## Zderzenia pp, pA i AA

- Gęstości gluonowe wzmacnione przez liczbę nukleonów  $A$



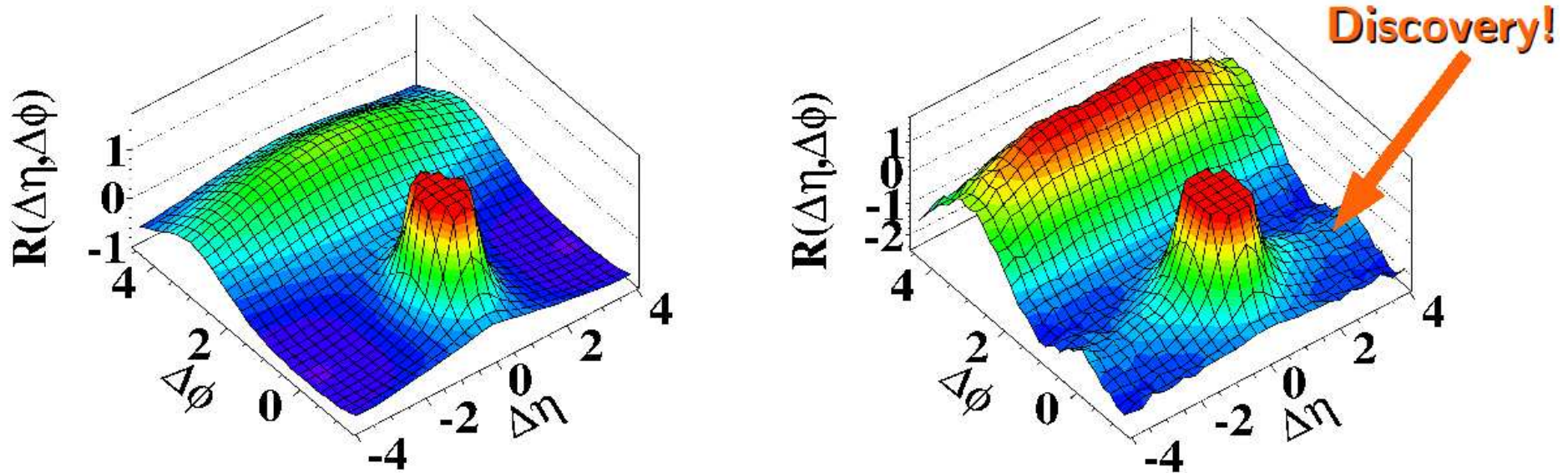
- Zderzenie dwóch **gęstych** kondensatów gluonowych.

Glazma  $\rightarrow$  plazma kwarkowo – gluonowa  $\rightarrow$  hadrony

- Efektywny opis QCD gęstych układów gluonowych - **glazmy**

*(Venugopalan, McLerran, Lappi)*

## Grzbiet (ridge) w zderzeniach pp i pA



- Minimum bias versus high multiplicity events in pp from CMS:

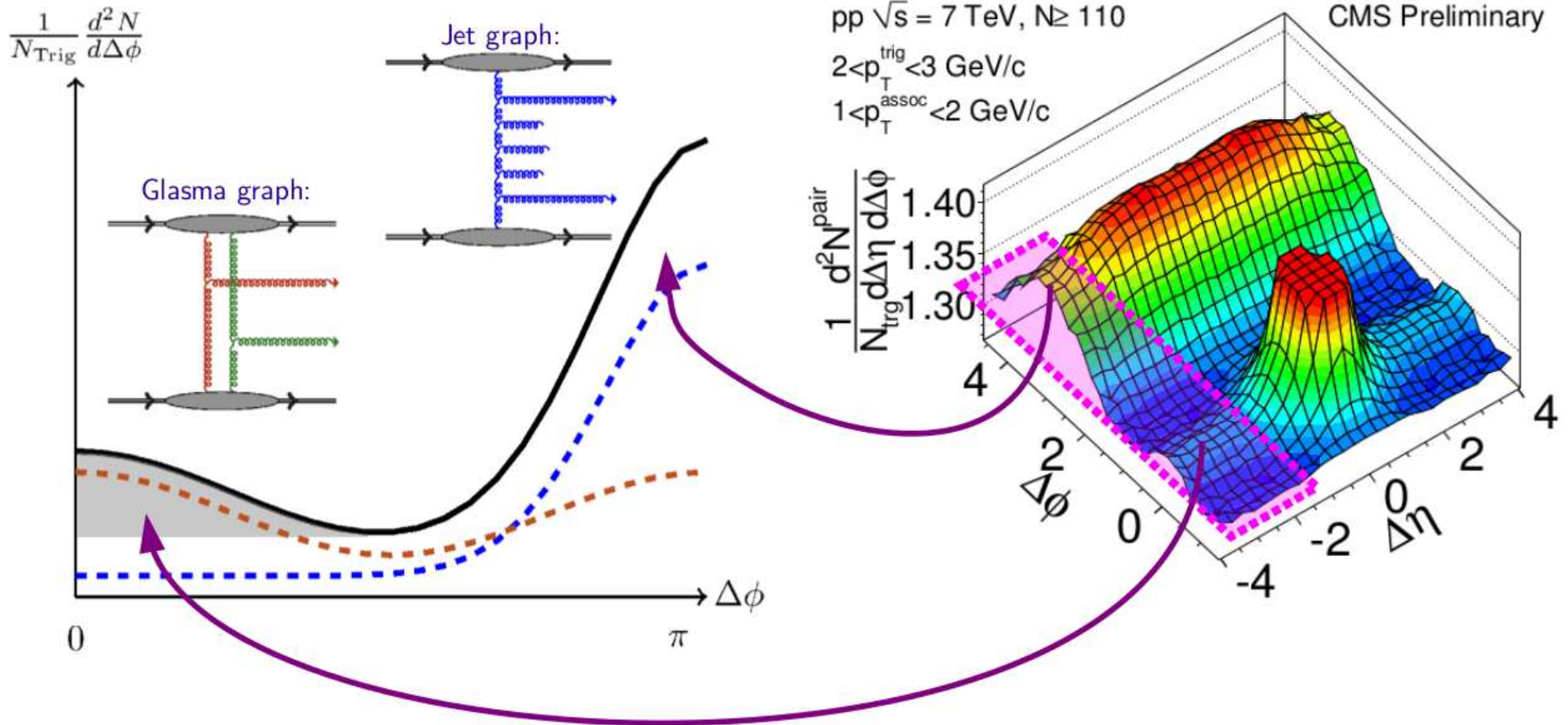
$$N > 110, \quad 1 \text{ GeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$$

- W zderzeniach pA grzbiet znacznie większy.



# Grzbiet (ridge) w zderzeniach pp i pA

(Dusling, Venugopalan)



- Grzbiet dla pA tłumaczony też przez model hydrodynamiczny (P. Bożek)

# Podsumowanie

---

- QCD dla dużych gęstości partonowych istotna dla procesów DIS w zderzeniach ep:
  - funkcje struktury protonu w obszarze przejścia do małych  $Q^2$
  - geometryczne skalowanie
  - procesy dyfrakcyjne
- Na LHC wciąż do potwierdzenia.