

SUURITIHEYKSINEN PARTONIMATERIA

Sisältö

- Luonnolliset yksiköt
- Kvanttikromodynamiikka
(Quantum Chromo Dynamics, QCD)
- Elektroni-protoni -sirona
(Deep Inelastic Scattering, DIS)
- Väri-lasi-kondensaatti
(Color Glass Condensate, CGC)
- Epälineaariset evoluutioyhtälöt
- Protonin rakennefunktio
- Muuta

Luonnolliset yksiköt

Hiukkasfysiikassa käytetään poikkeavaa yksikköjärjestelmää, ns. luonnollisia yksiköitä. Asettamalla valonnopeus ja Planckin vakio ykköseksi, ts. $c = \hbar = 1$, saadaan kaikki oleelliset suureet ilmaistua energian yksikön (eV) potensseina:

$$[pituus] = [aika] = [energia]^{-1} = [massa]^{-1}$$

Joitakin muuntokertoimia:

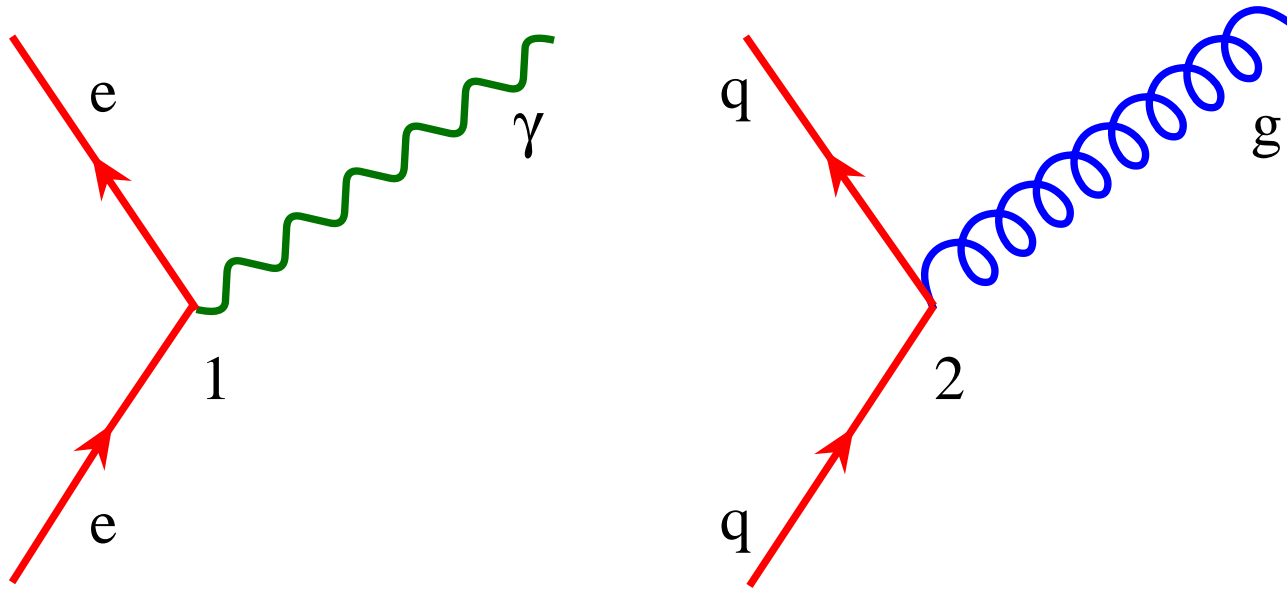
Suure	$\hbar = c = 1$	Todellinen	SI-muunnos
Energia	GeV	GeV	$1 \text{ GeV} = 1.602 \times 10^{-10} \text{ J}$
Massa	GeV	$\text{GeV } c^{-2}$	$1 \text{ GeV} = 0.178 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Liikemäärä	GeV	$\text{GeV } c^{-1}$	$1 \text{ GeV} = 5.344 \times 10^{-19} \text{ kg m s}^{-1}$
Pituus	GeV^{-1}	$(\hbar c) \text{ GeV}^{-1}$	$(1 \text{ GeV})^{-1} = 0.197 \times 10^{-15} \text{ m}$
Aika	GeV^{-1}	$(\hbar) \text{ GeV}^{-1}$	$(1 \text{ GeV})^{-1} = 0.658 \times 10^{-24} \text{ s}$
Vaikutusala	GeV^{-2}	$(\hbar c)^2 \text{ GeV}^{-2}$	$(1 \text{ GeV})^{-2} = 0.0389 \times 10^{-30} \text{ m}^2$

Tyypillisesti hiukkasfysiikassa esiintyviä suureita luonnollisissa yksiköissä sekä niiden muuntokertoimet SI-järjestelmään.

Kvanttikromodynamiikka (Quantum Chromo Dynamics, QCD)

- Yleisesti hyväksytty teoria vahvojen vuorovaikutuksien kuvaamisessa.
- Teorian mukaan hadronit koostuvat kvarkeista, jotka vuorovaikuttavat toistensa kanssa gluoneja vaihtamalla.
- Kvarkkeja on kuutta lajia: ylös, alas, outo, lumo, pohja ja huippu. Lisäksi jokaisella kvarkilla on vastahiukkasensa eli antikvarkki.
- Kvarkit ovat spin- $\frac{1}{2}$ fermioneja, joiden sähkövaraus on murto-osa alkeisvarauksesta.
- Gluonit välittävät värivarausta: vain kvarkeilla ja gluoneilla voi olla värivaraus, ja siten vain nämä hiukkaset tuntevat vahvan vuorovaikutuksen.
- Gluonit ovat spin-1 bosoneja, jotka kantavat kahdesta väristä koostuvaa värivarausta.
- Erivärisien gluonien lukumäärä on kahdeksan.
- Gluonit ovat siis kvanttiväriteorian värikentän kvantteja samaan tapaan kuin fotonit ovat sähkömagneettisen kentän kvantteja sähkömagneettisessa teoriassa.
- Hadroneja on kahta lajia: baryoneja (esim. protoni) ja mesoneja (esim. pioni), joista edelliset koostuvat kolmesta kvarkista ja jälkimmäiset kahdesta.

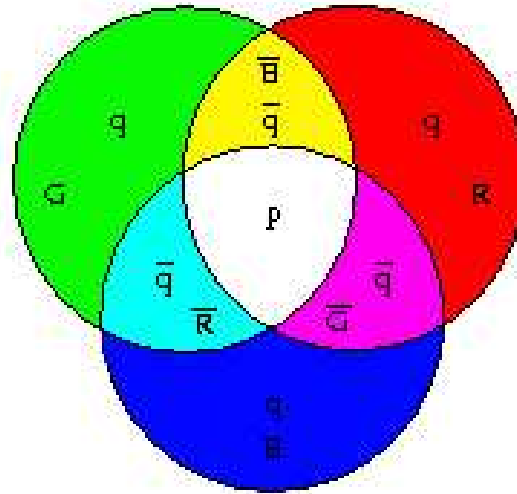
- Hadronien kvarkkikoostumus on aina sellainen, että hadroni on värivaraukseton (valkoinen). Mesonien tapauksessa tämä tarkoittaa, että mesonit koostuvat kvarkista ja antikvarkista tai kvarkki-antikvarkki-parien lineaarikombinaatiosta.
- Värivarauksella ei ole mitään tekemistä 'oikeiden' värien kanssa – kyseessä on vain teoriaan soveltuva käsitteistö.
- Värivoima on asympotoottisesti vapaa ts. lyhyillä etäisyyksillä se on hyvin heikko. Toisaalta, 'suurilla' etäisyyksillä se kasvaa erittäin suureksi – kvarkkeja ei esiinny vapaina hiukkasina vaan ainoastaan sidotuissa tiloissa eli hadroneissa, 'kvarkkien vankeus'.
- Vahvan vuorovaikutuksen kantama on lyhyt – se on vain 1 fermin suuruusluokkaa (1 fermi = 10^{-15} m).
- Teoria on itse asiassa 'kopio' elektromagneettisesta teoriasta QED:stä.



QED:ssä jokaiseen verteksiin liitetään kytkinvakio $\sqrt{\alpha_{em}}$ fotoniemissiolle (vasemmalla) ja QCD:ssä $\sqrt{\alpha_s}$ gluoniemissiolle (oikealla). QCD:ssä siis QED:n vertekseissä korvataan (kuvassa 1 \rightarrow 2) $\sqrt{\alpha_{em}} \rightarrow \sqrt{\alpha_s}$. Esimerkiksi qqg -verteksillä on sama rakenne kuin $ee\gamma$ -verteksillä. QCD-prosessille täytyy lisäksi laskea väritekijä.

Kvarkin nimi	Maku	Sähkövaraus	Massa \approx (GeV)
ylös (up)	u	$2/3$	0.005
alas (down)	d	$-1/3$	0.009
outo (strange)	s	$-1/3$	0.18
lumo (charm)	c	$2/3$	1.5
pohja (bottom)	b	$-1/3$	5.0
huippu (top)	t	$2/3$?

Kvarkkien ominaisuuksia. Pohja-kvarkista käytetään myös nimeä kauneus (beauty) ja huippu-kvarkista nimeä totuus (truth).



$$P = R G B$$

$$\bar{P} = \bar{R} \bar{G} \bar{B}$$

$$\pi = R \bar{R} + B \bar{B} + G \bar{G}$$

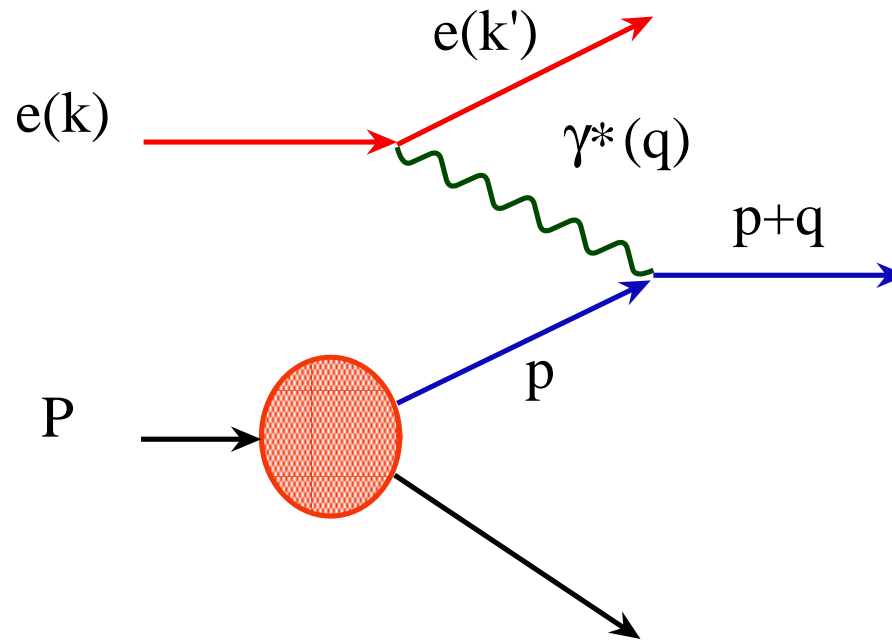
Hadronien väriskaavio sekä muutamia keveiden hadronien esimerkkikombinaatioita.

Hadroni	Kvarkkikoostumus
π^+, ρ^+	$u\bar{d}$
π^-, ρ^-	$d\bar{u}$
π^0, ρ^0, ω^0	$*u\bar{u}, d\bar{d}$
$\eta^0, \omega_1^0, \omega_8^0$	$*s\bar{s}, u\bar{u}, d\bar{d}$
ϕ^0	$s\bar{s}$
K^0, K^+, K^{0*}, K^{+*}	$*u\bar{s}, d\bar{s}$
$\bar{K}^0, K^-, \bar{K}^{0*}, K^{-*}$	$*u\bar{s}, d\bar{s}$
p, Λ^+	uud
n, Λ^0	udd
Λ^{++}	uuu
Λ^-	ddd
Σ^+, Σ^{+*}	uus
Σ^-, Σ^{-*}	dds
$\Sigma^0, \Sigma^{0*}, \Lambda^0$	uds
Ξ^0, Ξ^{0*}	uss
Ξ^-, Ξ^{-*}	dss
Ω^-	sss

Hadronien kvarkkikoostumuksia. Tähdellä merkityt ovat kyseisten kvarkkiparien lineaarikombinaatioita.

Elektroni-protoni -sirona (Deep Inelastic Scattering, DIS)

- Lukuunottamatta e^+e^- -annihilaatiota hadroneiksi, yksinkertaisin vahvasti vuorovaikuttavia hiukkasia sisältävä prosessi on elektronin epäelastinen sirona protonista tai jostakin muusta hadronista.
- ($e^-p \rightarrow e^- + X$)-prosessia, missä X on hadroninen lopputila, voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata elektronin elektromagneettisena sirontana protonin sisältämästä kvarkista.
- Soveltuu erinomaisesti QCD:n tutkimiseen yksinkertaisuutensa vuoksi.
- Voidaan yleistää myös eA -sirontaan, missä A on jokin raskaampi ydin, esim. helium, litium, hiili jne.
- Kokeita on tehty mm. HERA-kiihdyttimellä Saksassa. Suunnitteilla on lisäksi eRHIC-eksperimentti Brookhavenissa Yhdysvalloissa (2015?).
- Nykyisellään alue, jolta kokeellista dataa on, on auttamattomasti liian pieni. eRHIC poistaisi osin tämän puutteen.



Kaavio elektroni-protoni -sironnasta. Kuvassa elektroni vuorovaikuttaa protonin kanssa vaihtamalla virtuaalisen fotonin. Dimensioton suure x_{bj} on kvarkin ja protonin pitkittäisten liikemäärien suhde.

Hieman täsmällisemmin määriteltynä:

$$x_{bj} \equiv \frac{Q^2}{2P \cdot q} = \frac{Q^2}{Q^2 + s_{\gamma^*p}}, \quad 0 \leq x_{bj} \leq 1$$

Suurenergiarajalla $s_{\gamma^*p} \rightarrow \infty$ on voimassa $x_{bj} \rightarrow 0$ sekä $\tau \rightarrow \infty$, missä τ on rapiditeettiero: $\tau \equiv (1/x_{bj}) = y_p - y_{\gamma^*}$. Siten 'pieni x_{bj} ' on ekvivalentti suuren massakeskusenergian kanssa.

k : elektronin liikemäärä ennen sirontaa

k' : elektronin liikemäärä sironnin jälkeen

P : protonin liikemäärä

p : kvarkin liikemäärä

$q = k - k'$: virtuaalisen fotonin hadroniselle systeemille siirtämä liikemäärä. Vektori q on avaruudenkaltainen ja tavan mukaan määritellään $q^2 = (k - k')^2 = -Q^2 < 0$

$s_{ep} = (P + k)^2$: e^-p -systeemin kokonaisenergian neliö

$s_{\gamma^*p} = (P + q)^2$: γ^*p -systeemin kokonaisenergian neliö

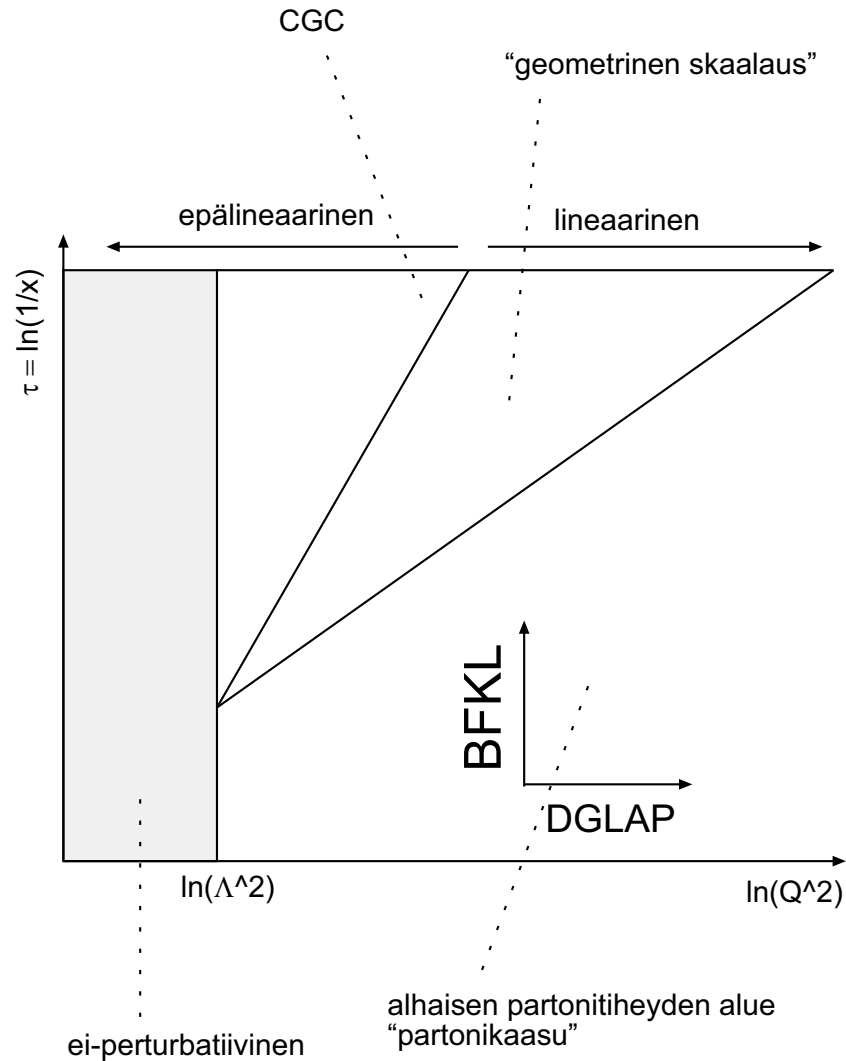
Väri-lasi-kondensaatti (Color Glass Condensate, CGC)

Väri-lasi-kondensaatti (CGC) on kenttäteoria, joka kuvaa QCD:hen liittyvää partonien saturaatioksi kutsuttua ilmiötä suurenergia-rajalla. Teoriaa kutsutaan yleisesti myös muilla nimillä:

1. Yksittäisten partonien kantamaa liikemääräosuutta hadronin kokonaisliikemäärästä kuvataan dimensiottomalla suureella, Bjorkenin x :llä, mikä on suurenergia-rajalla hyvin pieni. Tästä yleisimmin esiintyvä nimitys 'pienen x :n fysiikka'.
2. Teoria kuvaa partoneita, joista hadronit koostuvat. Tästä syystä usein puhutaan partonievoluutiosta tai partonisaturaatiosta.
3. Partonievoluutiota käsitellään teoreettisesti erityyppisillä evoluutioyhtälöillä, jotka kuvaavat hadronin aaltofunktion muuttumista energian funktiona. Tästä syystä usein esiintyy käsitteet DGLAP-, BFKL- tai BK-evoluutio, joissa alkuosa viittaa kyseessä olevaan evoluutioyhtälöön.

Teoria CGC:stä on tuore tutkimussuunta – idea esitettiin 90-luvun alkupuolella. Lyhenne pohjautuu materiaan ominaisuuksiin:

- 'Väri': gluoneilla on värivaraus.
- 'Lasi': materiaalilla on tiettyjä analogioita (ainakin joidenkin mielestä) tavallisen lasin kanssa.
- 'Kondensaatti': suuri gluonitiheys.



Kinemaattiset alueet virtuaalisen fotonin liikemäärän q , $Q^2 := -q^2$ ja rapiditeetin $\tau = \ln(1/x_{bj})$ funktiona. Alue voidaan jakaa (karkeasti) matalan ja korkean gluonitiheyden alueeseen, joita erottavaa x_{bj} :stä riippuvaa rajapintaa kutsutaan saturaatiosäteeksi R_s .

Epälineaariset evoluutioyhtälöt

BK-yhtälö (Balitsky, Kovchegov)

$$\partial_\tau N_{xy} = \frac{N_c}{2\pi^2} \int d^2z \alpha_s K_{xzy} (N_{xz} + N_{zy} - N_{xy} - N_{xz}N_{zy})$$
$$K_{xzy} = \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{y})^2}{(\mathbf{x} - \mathbf{z})^2(\mathbf{z} - \mathbf{y})^2}$$

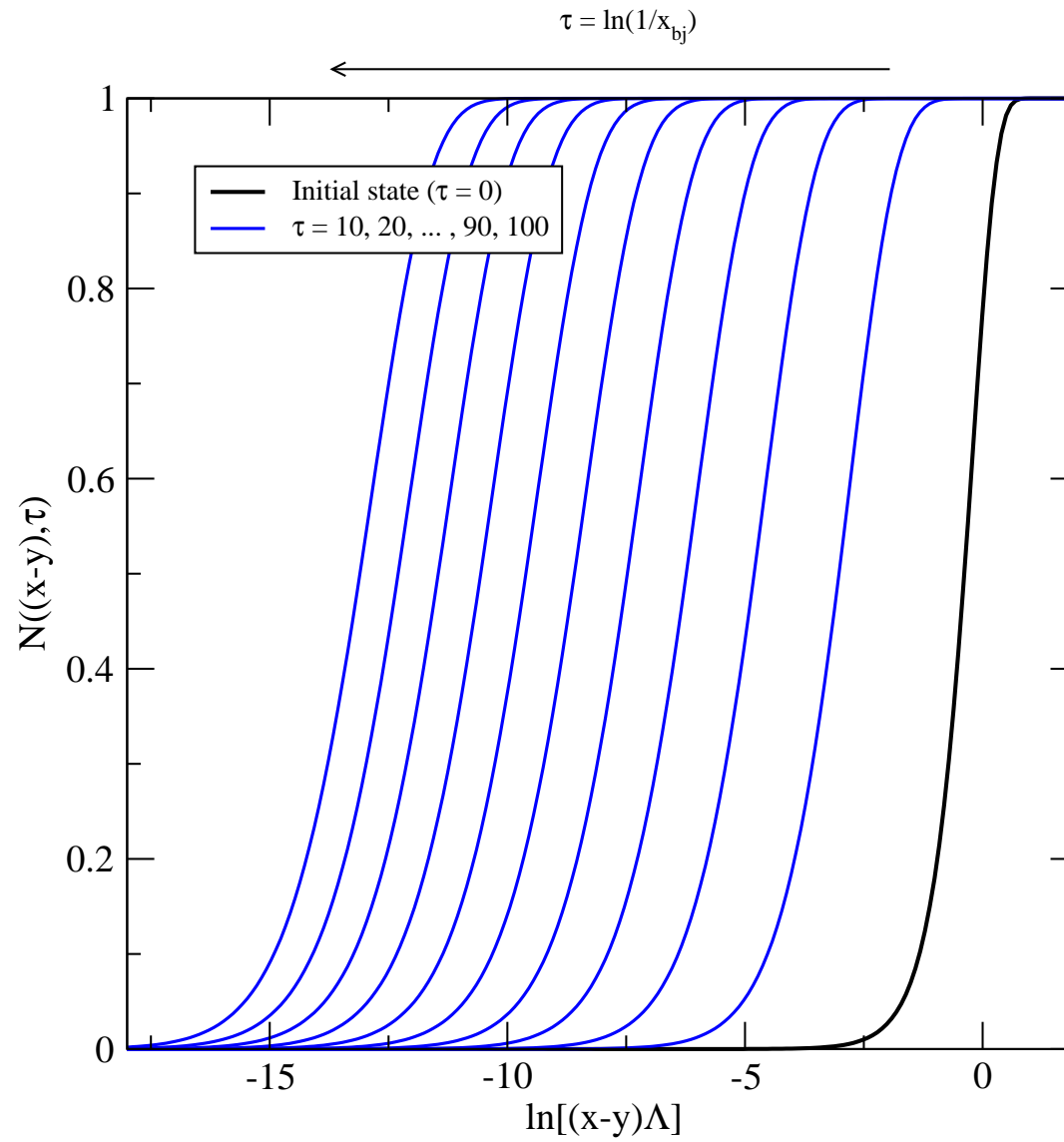
, missä α_s on vahvan vuorovaikutuksen kytkinvakio.

Suosittu työkalu partonievoluution tutkimisessa johtuen sen (tietyn approksimaation) yksinkertaisuudesta.

JIMWLK-yhtälö (Jalilian-Marian, Iancu, McLerran, Weigert, Leonidov, Kovner)

$$\begin{aligned}\partial_\tau \hat{Z}_\tau[U] &= -\frac{1}{2} i \nabla_{\mathbf{x}}^a \chi_{\mathbf{xy}}^{ab} i \nabla_{\mathbf{y}}^a Z_\tau[U] \\ \chi_{\mathbf{xy}}^{ab} &= \frac{1}{\pi^2} \int d^2z \alpha K_{\mathbf{xzy}} [(1 - \tilde{U}_{\mathbf{x}}^\dagger \tilde{U}_{\mathbf{z}})(1 - \tilde{U}_{\mathbf{z}}^\dagger \tilde{U}_{\mathbf{y}})]^{ab} \\ K_{\mathbf{xzy}} &= \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{z}) \cdot (\mathbf{z} - \mathbf{y})}{(\mathbf{x} - \mathbf{z})^2 (\mathbf{z} - \mathbf{y})^2}\end{aligned}$$

Statistinen yhtälö, 'ei-ihan-niin-yksinkertainen' kuin BK-yhtälö.



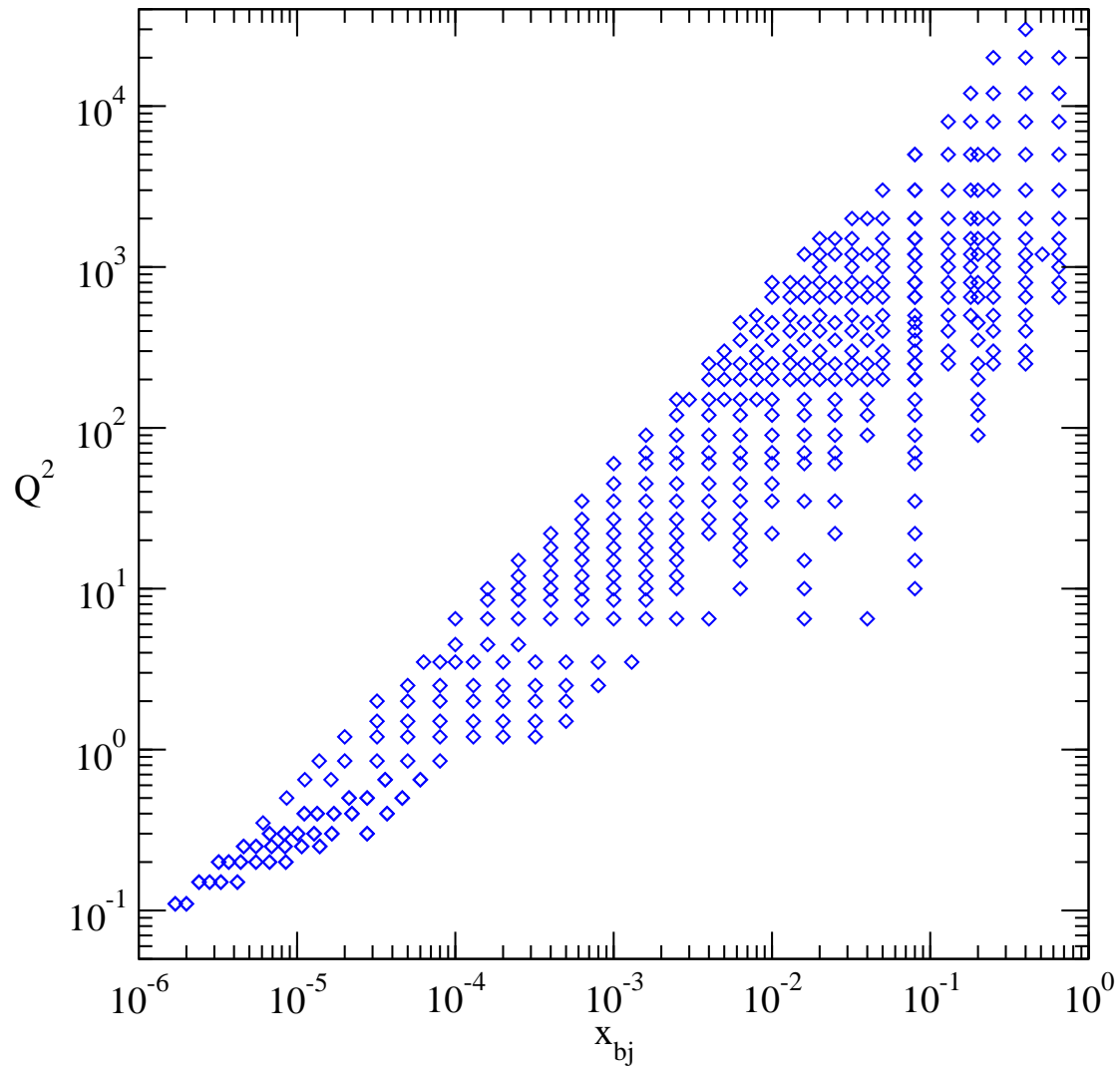
BK-yhtälön ratkaisu: dipolikorrelaatiofunktio $N_{xy,\tau}$ rapiditeetin τ funktiona.

Protonin rakennefunktio

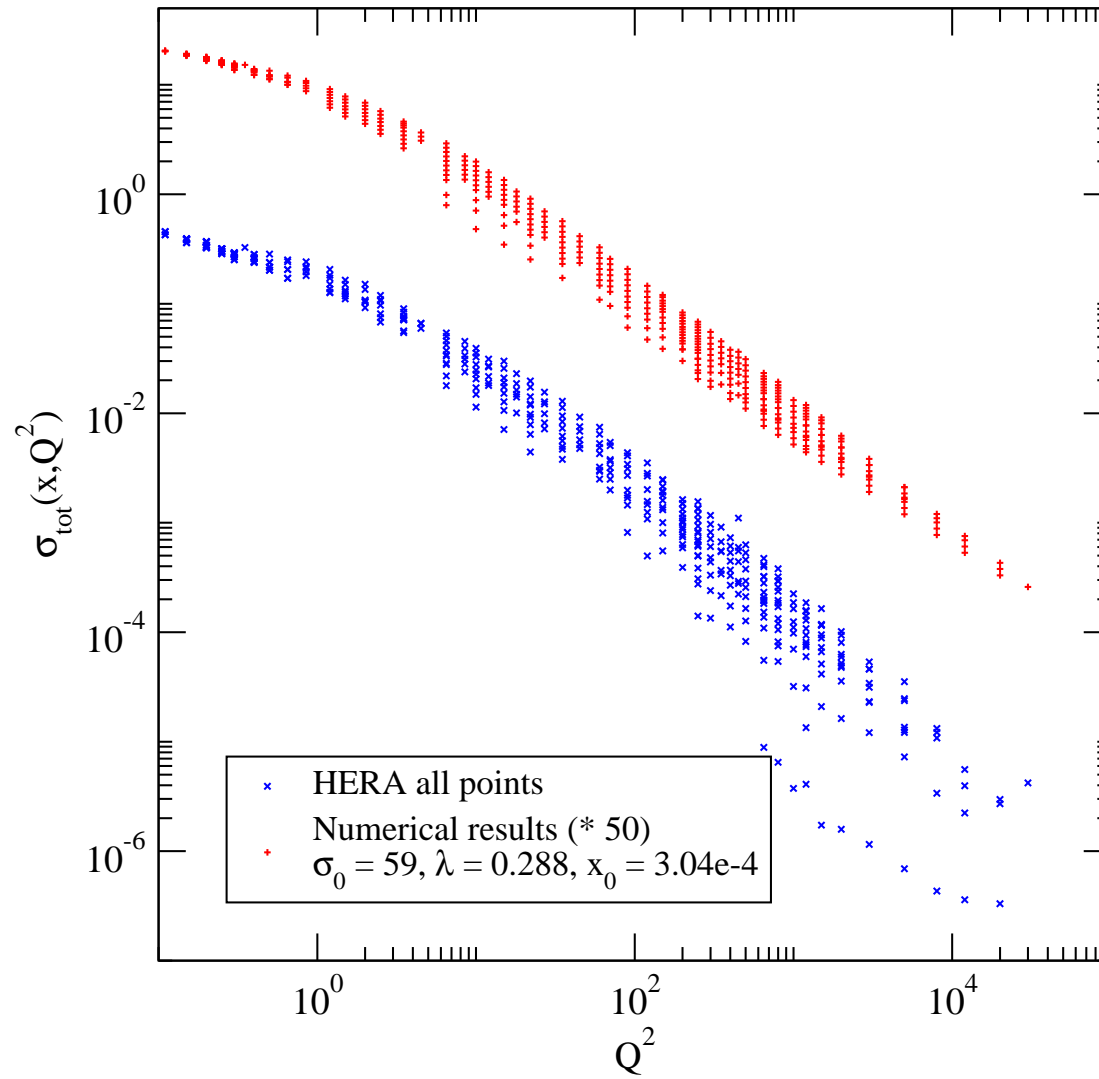
Yksinkertainen malli protonin rakennefunktiolle (ja vaikutusalalle σ):

$$\begin{aligned}F_2(x_{bj}, Q^2) &= \frac{Q^2}{4\pi \alpha_{em}} (\sigma_T + \sigma_L) \\ \sigma_{T,L} &= \int d^2\mathbf{r} dz |\Psi_{T,L}(\mathbf{r}, z, Q^2)|^2 \hat{\sigma}(x_{bj}, r) \\ \hat{\sigma}(x_{bj}, r) &= \sigma_0 N(x_{bj}, r)\end{aligned}$$

Rakennefunktio $F_2(x_{bj}, Q^2)$ on tyypillisimmin kokeissa mitattava suure. $N(x_{bj}, r)$ on puolestaan partonievoluutioyhtälön ratkaisu, joka pitää sisällään kaiken informaation vahvan vuorovaikutuksen fysiikasta eli tässä tapauksessa kvarkki-antikvarkki-parin vuorovaikutuksesta kohdehiukkasen kanssa.



HERAn mittaustuloksien faasiavaruus. Jokainen (x_{bj}, Q^2) -piste vastaa mitattua protonin rakennefunktion $F_2(x_{bj}, Q^2)$:n arvoa.



Kokeelliset mittaustulokset vastaan teoriasta lasketut pisteet. Kyseessä ns. geometrinen skaalaus eli yksinkertainen saturaatiomalli.

Muuta

Avainsanoja:

small x physics, gluon saturation, BFKL equation/evolution, BK-equation/evolution, JIMWLK equation/evolution, color glass condensate, QCD, quantum field theory, deep inelastic scattering jne.

Linkejä:

CERN (Centre Europeen de Recherche Nucleaire): www.cern.ch

BNL (Brookhaven National Laboratory): www.bnl.gov

DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron): www.desy.de