

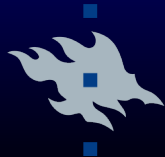
Drell-Yan-processen

FM Ville Jansson

`ville.b.c.jansson@gmail.com`

Helsingfors Universitet

23.2.2009



“För många myoner”

- ▶ Columbia–Brookhaven–gruppen 1969:
 $p + U \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$
- ▶ Energi: 29,5 GeV



Figur: Brookhaven National Laboratory, New York.

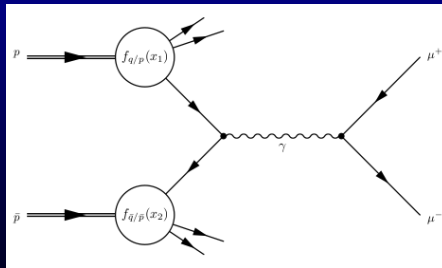


Lösningen

- Sidney D. Drell och Tung-Mow Yan 1970: Drell-Yan-modellen



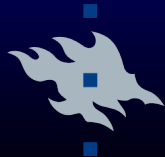
Figur: Sidney D. Drell och Tung-Mow Yan



Figur: Drell-Yan-processen



Kvarkar



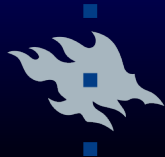
Kvarkar

- ▶ Kvarkmodellen introducerades 1963 av Gell-Mann och Zweig.
- ▶ "Starkt växelverkande partiklar (hadroner) består av mindre partiklar."



Kvarkar

- ▶ Kvarkmodellen introducerades 1963 av Gell-Mann och Zweig.
- ▶ "Starkt växelverkande partiklar (hadroner) består av mindre partiklar."
- ▶ Problem: kvarkar borde satisfiera Bose-statistiken medan de också borde ha spinnet $1/2$.

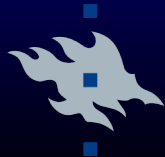


Kvarkar

- ▶ Kvarkmodellen introducerades 1963 av Gell-Mann och Zweig.
- ▶ "Starkt växelverkande partiklar (hadroner) består av mindre partiklar."
- ▶ Problem: kvarkar borde satisfiera Bose-statistiken medan de också borde ha spinnet $1/2$.
- ▶ Lösning: "färg"

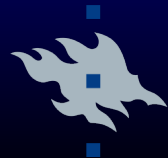


Kvantkromodynamik (QCD)



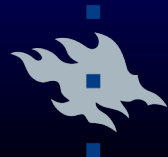
Kvantkromodynamik (QCD)

- ▶ QCD beskriver den starka växelverkan och alla starkt växelverkande partiklar (kvarkar och gluoner).



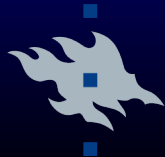
Kvantkromodynamik (QCD)

- ▶ QCD beskriver den starka växelverkan och alla starkt växelverkande partiklar (kvarkar och gluoner).
- ▶ Tillsammans med teorin för den elektrosvaga växelverkan bildar de "Standardmodellen för elementärpartiklarna".

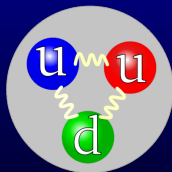


Kvantkromodynamik (QCD)

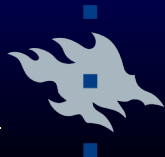
- ▶ QCD beskriver den starka växelverkan och alla starkt växelverkande partiklar (kvarkar och gluoner).
- ▶ Tillsammans med teorin för den elektrosvaga växelverkan bildar de "Standardmodellen för elementärpartiklarna".
- ▶ I praktiken kan hela QCD beskrivas av en Lagrange-ekvation.



"Charm bevaras i stark växelverkan"

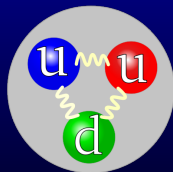


Figur: En proton består av två u-kvarkar och en d-kvark.

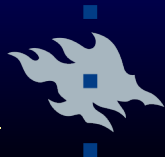


"Charm bevaras i stark växelverkan"

- Qvarkarna finns i sex "smaker":
upp (u), ner (d), särhet (s), charm (c), topp (t), botten (b).

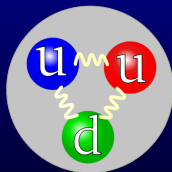


Figur: En proton består av två u-kvarkar och en d-kvark.

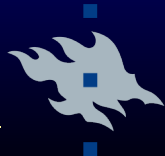


"Charm bevaras i stark växelverkan"

- ▶ Qvarkarna finns i sex "smaker":
upp (u), ner (d), särhet (s), charm (c), topp (t), botten (b).
- ▶ Dessutom har varje kvark en färgladdning:
röd (R), grön (G) eller blå (B).

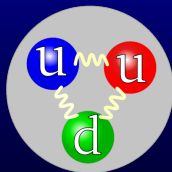


Figur: En proton består av två u-kvarkar och en d-kvark.

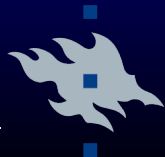


"Charm bevaras i stark växelverkan"

- ▶ Qvarkarna finns i sex "smaker":
upp (u), ner (d), särhet (s), charm (c), topp (t), botten (b).
- ▶ Dessutom har varje kvark en färgladdning:
röd (R), grön (G) eller blå (B).
- ▶ Antikvarkar har antifärgladdningar: antiröd ($\bar{R}$), antigrön ($\bar{G}$) eller antiblå ($\bar{B}$).

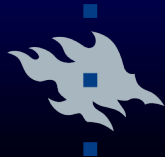


Figur: En proton består av två u-kvarkar och en d-kvark.



Endel partiklar limmar ihop andra

- ▶ Gluoner är partiklar som förmedlar den starka växelverkan.

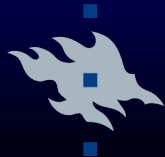


Endel partiklar limmar ihop andra

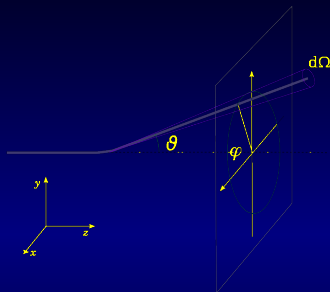
- ▶ Gluoner är partiklar som förmedlar den starka växelverkan.
- ▶ De kommer som åtta kombinationer av färgladdningarna:

$$R\bar{G}, R\bar{B}, G\bar{R}, G\bar{B}, B\bar{R}, B\bar{G}, \sqrt{\frac{1}{2}}(R\bar{R} - G\bar{G})$$

$$\text{och } \sqrt{\frac{1}{6}}(R\bar{R} + G\bar{G} - 2B\bar{B}).$$

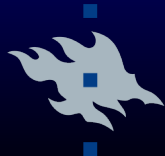


Tvärsnitt och invarianta amplituden

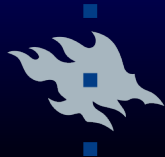


Figur: Tvärsnitt på makronivå.

- Differentiella tvärsnittet $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ beskriver sannolikheten för att observera en spridd partikel i ett givet kvanttilstånd per enhet rymdvinkel.

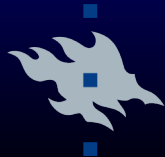


Tvärsnitt och invarianta amplituden



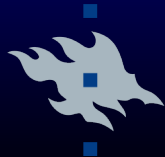
Tvärsnitt och invarianta amplituden

- ▶ Tvärsnittet σ anger sannolikheten för att en växelverkan mellan två partiklar skall ske.



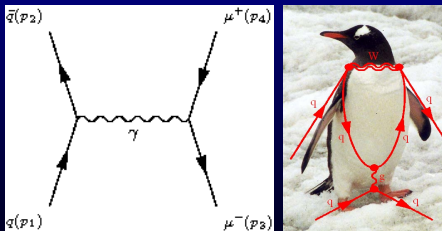
Tvärsnitt och invarianta amplituden

- ▶ Tvärsnittet σ anger sannolikheten för att en växelverkan mellan två partiklar skall ske.
- ▶ I QCD är differentiella tvärsnittet kopplat till den invarianta amplituden $\mathcal{M}$.
- ▶ $\mathcal{M}$ kan inte beräknas exakt utan fås med hjälp av perturbationsteori (störningsteori) från systemets QCD–Lagrange–ekvation.



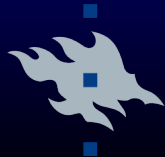
Tvärsnitt och invarianta amplituden

- ▶ Tvärsnittet σ anger sannolikheten för att en växelverkan mellan två partiklar skall ske.
- ▶ I QCD är differentiella tvärsnittet kopplat till den invarianta amplituden $\mathcal{M}$.
- ▶ $\mathcal{M}$ kan inte beräknas exakt utan fås med hjälp av perturbationsteori (störningsteori) från systemets QCD-Lagrange-ekvation.
- ▶ Till hjälp för detta har man Feynman-diagrammen och Feynmans regler för dessa.



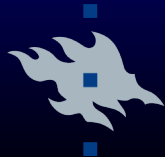
Figur: Feynman diagram

Partonmodellen



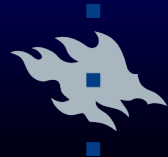
Partonmodellen

- ▶ Introducerades av Feynman 1969.



Partonmodellen

- ▶ Introducerades av Feynman 1969.
- ▶ Den behandlar strukturen hos hadroner ...



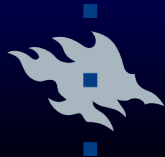
Partonmodellen

- ▶ Introducerades av Feynman 1969.
- ▶ Den behandlar strukturen hos hadroner ...
- ▶ ...som den menar består av partoner



Partonmodellen

- ▶ Introducerades av Feynman 1969.
- ▶ Den behandlar strukturen hos hadroner ...
- ▶ ...som den menar består av partoner
- ▶ partoner är i dag ett samlingsnamn på kvarkar och gluoner

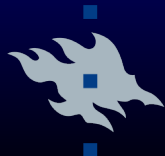
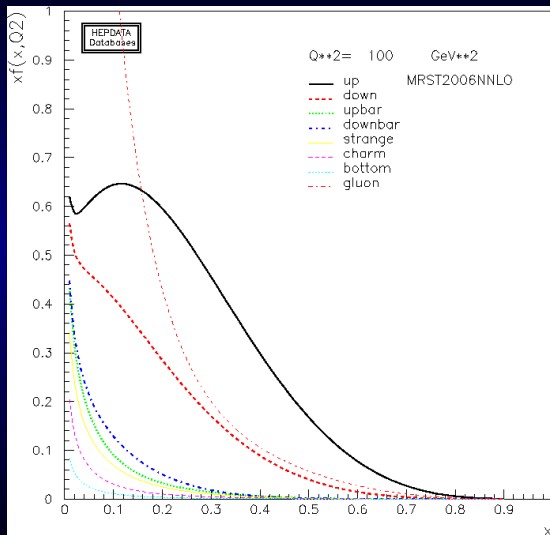


Partonmodellen

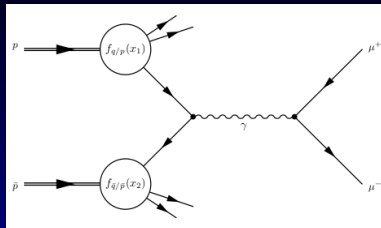
- ▶ Introducerades av Feynman 1969.
- ▶ Den behandlar strukturen hos hadroner ...
- ▶ ...som den menar består av partoner
- ▶ partoner är i dag ett samlingsnamn på kvarkar och gluoner
- ▶ Strukturen hos hadroner beskrivs med hjälp av partonernas rörelsemängdsdistributionsfunktioner.



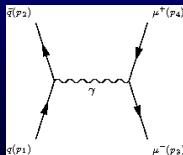
Partonernas rörelsemängdsdistributionsfunktioner



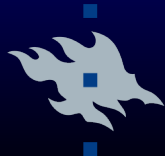
DY-processens tvärsnitt



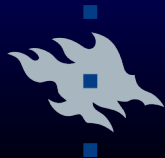
Figur: Drell-Yan-processen



Figur: DY-subprocessen



Subprocessens tvärsnitt

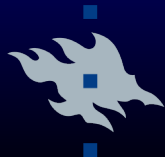


Subprocessens tvärsnitt

- ▶ Invarianta amplituden för subprocessen blir:

$$i\mathcal{M} = [ie e_q \bar{v}_q(p_2) \gamma^\alpha u_q(p_1)] \left(\frac{-ig_{\alpha\beta}}{q^2} \right) [ie \bar{u}_\ell(p_3) \gamma^\beta v_\ell(p_4)]$$

- ▶ ...



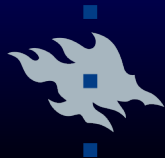
Subprocessens tvärsnitt

- ▶ Invarianta amplituden för subprocessen blir:

$$i\mathcal{M} = [ie e_q \bar{v}_q(p_2) \gamma^\alpha u_q(p_1)] \left(\frac{-ig_{\alpha\beta}}{q^2} \right) [ie \bar{u}_\ell(p_3) \gamma^\beta v_\ell(p_4)]$$

- ▶ ...
- ▶ Och dess tvärsnitt:

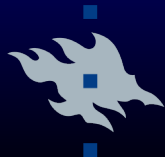
$$\hat{\sigma}(q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{4\alpha^2 \pi e_q^2}{9Q^2}$$



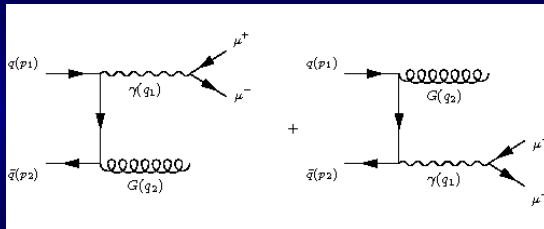
DY-processens totala tvärsnitt

$$d\sigma(h_1 h_2 \rightarrow \mu^+ \mu^- X) = \sum_q [f_{q/h_1}(x_1) f_{\bar{q}/h_2}(x_2) + f_{q/h_2}(x_2) f_{\bar{q}/h_1}(x_1)]$$

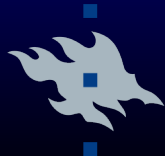
$$\cdot \hat{\sigma}(q \bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^-) dx_1 dx_2,$$



- ▶ Föregående resultat är enbart en första ordningens approximation.
- ▶ För ett bättre resultat måste man sätta till korrektioner i perturbationsberäkningen.



Figur: Gluon-korrektioner till DY-processen.

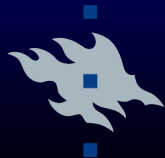


Vinkeldistributionens för DY

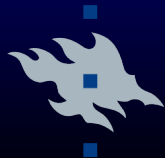
- Ser approximativt ut som:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto 1 + \cos^2 \theta$$

- Många mätningar har gjorts men teoretiskt är mycket oklart ännu.

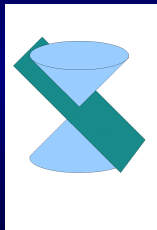


Ljusfrontsdynamiken



Ljusfrontdynamiken

- ▶ Introducerades 1949 av P. Dirac.
- ▶ En ljusfront är en tredimensionell yta i en Minkowski-rymd, där den formas av en planvåg som avancerar med ljusets hastighet.



Figur: Ljusfronten (grön) och ljuskonen (blå).



Ljusfrontdynamiken

► Fyrvektorer:

$$x^\mu = (x^+, x^-, x^1, x^2) = (x^+, x^-, \check{x})$$

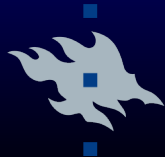
var

$$x^+ \equiv x^0 + x^3, \quad x^- \equiv x^0 - x^3, \quad \check{x} \equiv (x^1, x^2)$$

► Metrik-tensorn:

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Sage



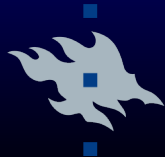
Sage

- ▶ Sage är ett öppet (GPL) alternativ till Maple och Mathematica.
- ▶ <http://www.sagemath.org>
- ▶ Programutvecklingen leds av William Stein vid University of Washington.
- ▶ Sage-projektet har fått finansiering både av Google och Microsoft.
- ▶ År 2007 vann Sage första pris i Les Trophées du Libre, som är en internationell tävling för fri programvara.



"Don't reinvent the wheel"

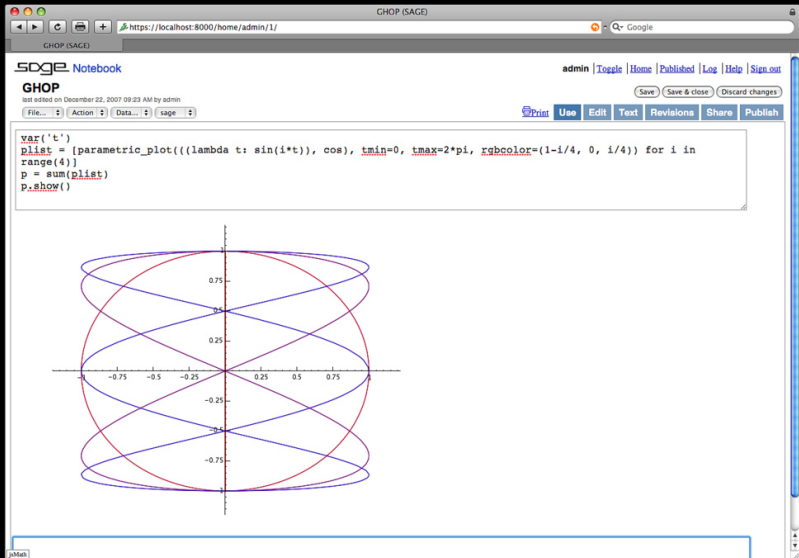
- ▶ Sage implementerar en mängd andra öppna program



"Don't reinvent the wheel"

- ▶ Sage implementerar en mängd andra öppna program
- ▶ ATLAS, BLAS, Bzip2, Cddlib, Common Lisp, CVXOPT, C, mwrnk, F2c, Flint, FpLLL, FreeType, G95, GAP, GD, Genus2reduction, Gfan, Givaro, GMP, GMP-ECM, GNU TLS, GSL, JsMath, IML, IPython, LAPACK, Lcalc, Libgcrypt, Libgpg-error, libpng, Linbox, M4RI, Matplotliblibrary, Maxima, Mercurial, MoinMoin Wiki, MPFI, MPFR, ECLib, NetworkX, NTL, Numpy, OpenCDK, PALP, PARI/GP, Pexpect, PolyBoRi, PyCrypto, Python, Qd, R, Readline, Rpy, Scipy, Singular, Scons, SQLite, Sympow, Symmetrica, Sympy, mpmath, Tachyon, Termcap, Twisted, Weave, Zlib och ZODB.





Summering

