

5 oktober 2004

Nobelpriset i fysik 2004

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela 2004 års Nobelpris i fysik

"för upptäckten av asymptotisk frihet i teorin för den starka växelverkan"

gemensamt till

DAVID J. GROSS

Kavli Institute for Theoretical Physics vid University of California, Santa Barbara, USA,

H. DAVID POLITZER

California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, USA, och

FRANK WILCZEK

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA.

En färgstark upptäckt i kvarkarnas värld

Vad är det minsta som finns? Hur bygger dessa partiklar upp allt vi ser omkring oss? Vilka krafter verkar i naturen och hur fungerar de egentligen?

Årets Nobelpris i fysik berör dessa fundamentala frågor, som sysselsatt fysiker under hela 1900-talet och som fortfarande engagerar och utmanar såväl teoretiker som experimentalister vid de stora partikelacceleratorerna.

David Gross, David Politzer och Frank Wilczek har gjort en viktig teoretisk upptäckt som rör den starka kraften, eller "färgkraften" som den också kallas. Den starka kraften är den kraft som dominerar i atomkärnan, den som verkar mellan kvarkarna inuti protonen och neutronen. Det årets pristagare upptäckte var något som vid första anblicken kan tyckas helt motsägelsefullt. Tolkningen av deras matematiska formel blev nämligen att ju närmare varandra kvarkarna är, desto *svagare* blir "färgladdningen". När kvarkarna är riktigt nära varandra är kraften så svag att de nästan uppträder som fria partiklar. Detta, som beskriver vad som händer partiklarna när avståndet blir allt mindre utan att nå fram till noll, kallas *asymptotisk frihet*. Omvänt gäller när kvarkarna avlägsnar sig från varandra; kraften blir starkare när avståndet ökar. Egenskapen kan liknas vid ett vanligt gummiband. Ju längre man sträcker ut det, desto starkare blir kraften.

Upptäckten sammanfattades 1973 i en elegant matematisk formel som ledde till en helt ny teori, *kvantkromodynamiken*, QCD. Denna teori blev en viktig pusselbit i den s.k. standardmodellen, som beskriver all den fysik som är förknippad med den elektromagnetiska kraften (som verkar mellan laddade

partiklar), den svaga kraften (som har betydelse för solens energiproduktion) och den starka kraften (som alltså verkar mellan kvarkar). Med kvantkromodynamikens hjälp kan fysikerna äntligen förklara varför kvarkarna endast uppträder som fria partiklar vid extremt höga energier. I protonen och neutronen följs de alltid åt tre och tre.

Med denna upptäckt har David Gross, David Politzer och Frank Wilczek tagit fysiken närmare uppfyllelsen av en storslagen dröm, nämligen en samlad teori som även innefattar gravitationen – en teori för allt.

.....
DAVID J. GROSS, född 1941 (63 år) i Washington, DC, USA (amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1966 vid University of California, Berkeley. Professor vid Kavli Institute for Theoretical Physics vid University of California, Santa Barbara, USA. www.kitp.ucsb.edu/community/ITPBios/David.html

DAVID H. POLITZER, (amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1974 vid Harvard University. Professor vid Department of Physics, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, USA. www.theory.caltech.edu/people/politzer

FRANK WILCZEK, född 1951 (53 år) i Queens, NY, USA (amerikansk medborgare). Doktorsgrad i fysik 1974 vid Princeton University. Professor vid Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA. www.web.mit.edu/physics/facultyandstaff/faculty/frank_wilczek.html

Prissumma: 10 miljoner svenska kronor, som delas lika mellan pristagarna.

Mer information: www.kva.se och www.nobelprize.org

Kontaktpersoner: Jonas Förare, vetenskapsredaktör, tel. 08-673 95 44, 0703-27 72 00, jonas@kva.se och Eva Krutmeijer, informationschef, tel. 08-673 95 95, 0709-84 66 38, evak@kva.se



KUNGL.
VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

P.O. Box 50005, SE-104 05 Stockholm, Sweden
Phone: +46 8 673 95 00, Fax: +46 8 15 56 70
E-mail: info@kva.se, Web site: www.kva.se

Lilla Frescativägen 4A
Underground: Universitetet
Bus 40: Universitetet norra

Nobelpriset i fysik 2004

Upptäckten som belönas med årets Nobelpris i fysik är avgörande för teorin om hur en av naturens fundamentala krafter fungerar, den som binder ihop materiens allra minsta kända beståndsdelar, kvarkarna. DAVID GROSS, DAVID POLITZER och FRANK WILCZEK har genom sina teoretiska insatser gjort det möjligt att lägga sista pusselbiten i partikelfysikens standardmodell. Denna modell sammanfattar naturens allra minsta beståndsdelar och hur de samspelar med varandra. Samtidigt är den ett viktigt steg i strävan mot en samlad beskrivning av alla krafter i naturen oavsett vilken skala de verkar på – från de allra minsta avstånden i atomkärnan till de enorma avstånden i universum.

Den starka kraften klarlagd

Den starka kraften, eller som den ofta benämns – *färgkraften* – är en av naturens fyra fundamentala krafter. Den verkar mellan de minsta kända partiklarna, *kvarkarna*, som bygger upp atomkärnans protoner och neutroner. Partikelfysik kan te sig svårbegripligt utanför expertkretsen och man kan fråga sig om det alls har med vårt vardagliga liv att göra. Men om man analyserar något alldagligt fenomen, t.ex. ett mynt som snurrar på en bordsskiva, så bestäms rörelsen faktiskt av de fundamentala krafterna mellan atomens beståndsdelar – protonerna, neutronerna och elektronerna. Och ungefär 80 % av myntets tyngd förklaras av rörelser och processer i protonernas och neutronernas inre – växelverkan mellan kvarkarna. Det är denna växelverkan, den starka kraften eller färgkraften, som årets Nobelpris handlar om.

David Gross, David Politzer och Frank Wilczek upptäckte en egenskap hos den starka kraften som förklarar varför kvarkarna endast uppträder som fria partiklar vid extremt höga energier. Upptäckten ledde till att en helt ny teori växte fram, nämligen den s.k. *kvantkromodynamiken*, QCD (eng. Quantum ChromoDynamics). Denna teori har prövats i stor detalj, särskilt under senare år vid Europas partikelfysiklaboratorium CERN.

Standardmodellen och naturens fyra krafter

Den första kraft människan lär ha reflekterat över är *gravitationen*. Det är den kraft som får föremål att falla till marken, men som också styr planeters och galaxers rörelse. Gravitationskraften kan verka vara mycket stark, att döma av de stora kratrar som har bildats av kometer som fallit in mot jorden, eller de mycket stora raketer som krävs för att lyfta en satellit ut i rymden. Men i mikrokosmos, bland partiklar som elektronen och protonen, är gravitationskraften oerhört svag (fig. 1).

De tre krafter, eller typer av växelverkan som fysiker hellre talar om, som är tillämpliga på mikrokosmos beskrivs av *standardmodellen*. Där sammanfattas den *elektromagnetiska*, den *svaga* och den *starka växelverkan*. Genom många tidigare Nobelpristagares insatser har standardmodellen fått en mycket stark ställning. Det beror på att det är den enda matematiska beskrivning som inbegriper både Einsteins speciella relativitetsteori och kvantmekaniken på ett tillfredsställande sätt.

I standardmodellen ryms kvarkar, leptoner och kraftbärande partiklar. Kvarkarna utgör byggstenar t.ex. i atomkärnans protoner och neutroner. Elektronerna i atomens yttre hölje däremot är leptoner som så vitt är känt idag inte är uppbyggda av mindre beståndsdelar. Atomerna förenar sig till molekyler, molekylerna bildar större strukturer och på så sätt kan slutligen hela universum beskrivas.

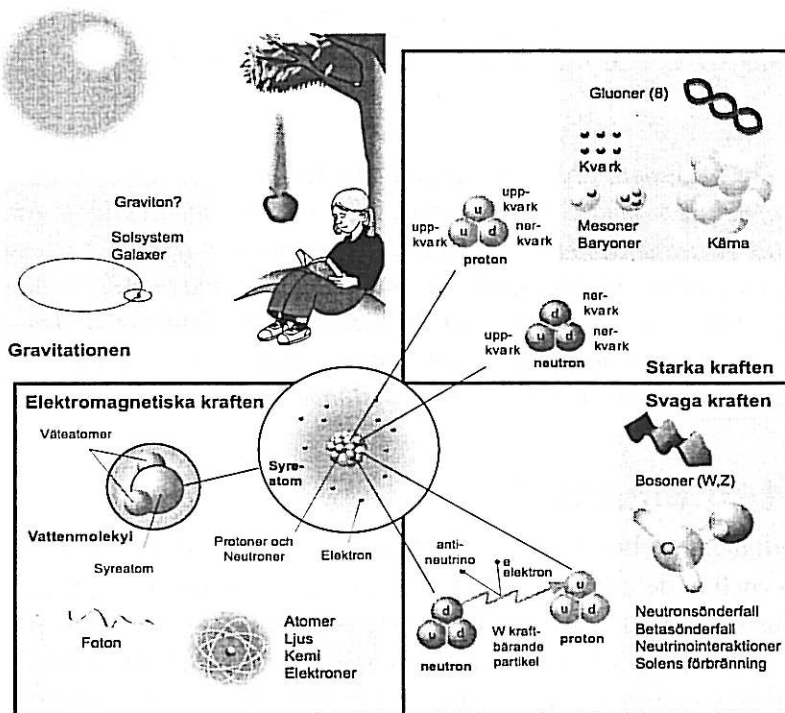


Fig. 1. Naturens fyra krafter eller växelverkningar, deras kraftbärare och de företeelser eller partiklar som påverkas av dem. De tre växelverkningar som styr i mikrokosmos är alla mycket kraftigare än gravitationen och har förenats genom standardmodellen.

Den elektromagnetiska växelverkan ger ljus och sammanhållning

Den elektromagnetiska växelverkan är ansvarig för många företeelser i vår omvärld, t.ex. magnetism, friktion och för att vi själva eller föremål vi lägger ifrån oss inte faller genom golvet.

Den elektromagnetiska kraften, som binder en negativt laddad elektron och en positivt laddad proton i en väteatom är det ofattbart stora talet 10^{41} gånger starkare än gravitationen. Trots den mycket stora skillnaden i styrka mellan de två krafterna, finns flera likheter. Krafternas styrka avtar med kvadraten på avståndet och har lång räckvidd. Både gravitationen och den elektromagnetiska kraften förmedlas av *kraftbärare*, gravitonen respektive fotonen (ljuspartikeln). Gravitonen är dock till skillnad från fotonen inte påvisad experimentellt. Den långa räckvidden kan visas komma från att kraftbärarna är masslösa. Fotoner från solen är nödvändiga för livet på jorden. Men när energin alstras med fusionsreaktioner i solens inre är också andra krafter i standardmodellen med i spelet. En viktig egenskap hos fotonen är att den är oladdad, neutral, men kopplar till en elektrisk laddning. Därför reagerar fotoner inte med varandra.

Den elektromagnetiska kraften beskrivs av en teori, kvantelektrodynamiken (Quantum Electrodynamics, QED), som är en av fysikens mest framgångsrika teorier. Den stämmer med resultat från experiment med en noggrannhet om tio miljontedelar och belönades med ett Nobelpris till Sin-itiro Tomonaga, Julian Schwinger och Richard Feynman 1965. En av anledningarna till att den så framgångsrikt går att räkna med är att ekvationerna innehåller ett litet tal, den s.k. finstrukturkonstanten eller *kopplingskonstanten* α_{em} , som har värdet $1/137$ – och alltså är betydligt mindre än talet ett. Det innebär att det går att beräkna många effekter i elektromagnetism som en serieutveckling i det lilla talet, en elegant matematisk metod som benämns störningsräkning och som utvecklades av Feynman med flera.

En viktig egenskap hos kvantmekaniken i QED-teorin är dock att kopplingskonstanten kunde visas vara energiberoende – den blir större med ökande energi. Vid dagens accelerato-

rer, t.ex. LEP vid CERN, har man mätt upp kopplingskonstanten till $1/128$ snarare än $1/137$ vid energier som motsvarar ungefär 100 miljarder elektronvolt. Om energiberoendet hos kopplingskonstanten ritas upp som funktion av energin pekar kurvan lite uppåt. De teoretiska fysikerna säger att derivatan, i det här fallet kallad *betafunktionen*, är positiv.

Den svaga växelverkan- radioaktivt sönderfall

Den svaga kraften eller svaga växelverkan förmedlas av de s.k. bosonerna, $W^\pm$ och Z^0 , partiklar som till skillnad från fotonen och gravitonen har mycket stora massor (ungefär 100 protonmassor!). Kraften får därmed kort räckvidd. Den verkar både på kvarkar och leptoner och är ansvarig för vissa radioaktiva sönderfall. Den svaga växelverkan är nära besläktad med den elektromagnetiska och de båda förenas i den *elektrosvaga växelverkan*, som utreddes på 1970-talet. Gerardus 't Hooft och Martinus Veltman fick Nobelpriset 1999 för den slutliga formuleringen av den teorin.

Den starka växelverkan – laddning och färg

Att protoner och neutroner är uppbyggda av mindre partiklar, kvarkar, upptäcktes redan på 1960-talet. Men konstigt nog kunde man inte producera fria kvarkar. De är *inneslutna*, en fundamental egenskap hos dessa byggstenar. Bara aggregat av kvarkar, två eller tre, kan existera fritt som t.ex. protonen. Kvarkarna har elektrisk laddning som är bråkdelar av en protonladdning, $-1/3$ eller $2/3$, en märklig egenskap som man ännu inte kunnat förklara.

Varje kvark har förutom elektrisk laddning också en särskild egenskap som liksom elektrisk laddning är kvantiserad, dvs. bara kan anta vissa värden. Den kallas för *färgladdning*. Namnet kom till därför att färgbegreppet är ett åskådligt sätt att beskriva denna egenskap, men det har inte med färg i vanlig mening att göra.

Kvarken kan bära färgladdningen röd, blå eller grön. För varje kvark finns en antikvark på samma sätt som elektronen har en antipartikel, positronen. Antikvarkarna har färgladdning antiröd, antiblå eller antigrön. Kvarkaggregat som existerar fritt, som t.ex. protonen, är *färgneutrala*. De tre kvarkarna i protonen (u, u och d) har olika färg så att den totala färgladdningen blir vit. På samma sätt som elektriskt neutrala molekyler kan bindas till varandra genom den elektromagnetiska kraften (deras positiva och negativa delar attraherar varandra) sker kraftutbytet mellan protoner och neutroner i atomkärnan genom de färgkrafter som "läcker" ut från deras kvarkar och kraftbärande partiklar.

Kraften mellan kvarkar förmedlas av *gluoner* (från engelskans glue, lim) som liksom fotonerna saknar massa. Men till skillnad från fotonen bär gluonen en särskild egenskap i form av färgladdning, bestående av en färg och en antifärg. Det är denna egenskap som gör färgkraften så komplicerad och olik den elektromagnetiska.

Svagare koppling ger partiklarna frihet

Länge trodde fysikerna att det skulle vara omöjligt att hitta en teori där man kunde beräkna den starka växelverkans effekter mellan kvarkarna på liknande sätt som för den elektromagnetiska och den svaga växelverkan. Om man till exempel tittar på hur två protoner växelverkar med varandra i en atomkärna så går det i och för sig att få godtagbara resultat genom att beskriva det som utbyte av pi-mesoner – en idé som gav japanen Hideki Yukawa Nobelpriset 1949. Den kopplingskonstant som behövs blir dock större än 1, vilket betyder att Feynmans störningsräkning (se ovan) inte fungerar. Tyvärr finns det än idag ingen bra metod att göra beräkningar för sådana teorier som beskriver stark växelverkan.

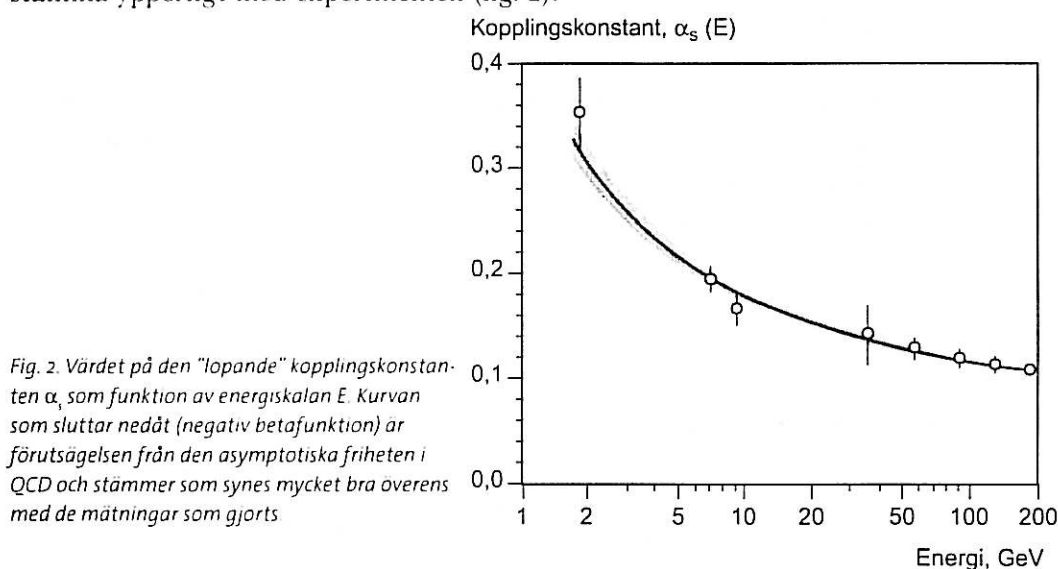
Ännu värre verkade det bli vid högre energier. Om betafunktionen – som beskriver hur kopplingskonstanten förändras med energin – är positiv blir ju växelverkan allt starkare och beräkningarna mer och mer absurda.

Den numera avlidne tyske teoretiske fysikern Kurt Symanzik förstod att det enda sättet att få en rimlig förklaring vore om det gick att hitta en teori med negativ betafunktion. Det skulle också förklara att kvarkarna ibland kunde framstå som fria partiklar, "gryn", inne i protonen – något man hade sett i spridningsexperiment mellan elektroner och protoner.

Tyvärr hittade Symanzik själv ingen sådan teori, och trots att Gerardus 't Hooft var mycket nära upptäckten sommaren 1972 började fysikerna misströsta och det förekom t.o.m. "bevis" för att alla realistiska teorier hade positiv betafunktion – vi vet nu att de var felaktiga. I juni 1973 trädde nämligen årets pristagare in på arenan. I två arbeten sida vid sida i tidskriften *Physical Review Letters*, ett av David Gross och Frank Wilczek och ett av David Politzer basunerade de ut den häpnadsväckande upptäckten: betafunktionen kan vara negativ! När upptäckten gjordes var de mycket unga – Wilczek och Politzer var fortfarande doktorander.

I de teorier som studerades kunde de visa att gluonerna, som förmedlar kraften, har en unik och helt oväntad egenskap: genom att växelverka inte bara med kvarkarna utan också med varandra, blir "laddningen" svagare och svagare ju närmare kvarkarna kommer varandra, som de gör vid högre och högre energier. Den egenskapen betyder ju att betafunktionen är negativ och beskrivs på fysikernas språk som asymptotisk frihet. Omvänt ökar kraften med avståndet och medför att det inte går att avlägsna en kvark från en atomkärna. Teorin bekräftade experimenten: kvarkarna är instängda, fängslade, i grupper om tre inne i protonen och neutronen, men kan ge sig tillkänna som "gryn" vid lämpliga experiment.

Den asymptotiska friheten gör att det för små avstånd går att beräkna växelverkan för kvarkar och gluoner som om de vore fria partiklar. Genom att kollidera partiklar med mycket höga energier går det att få dem att komma så nära varandra som behövs. När den asymptotiska friheten hade upptäckts och en teori som var asymptotiskt fri, kvantkromodynamiken (QCD), snart hade formulerats, kunde för första gången beräkningar göras som visade sig stämma ypperligt med experimenten (fig. 2).



Skurar av partiklar avslöjar sanningen

Ett viktigt exempel på bevis för QCD-teorin är när elektroner och deras antipartiklar positroner med hög rörelseenergi förintar varandra. Enligt Einsteins ekvation, $E=mc^2$, kan den

höga rörelseenergin omvandlas till nya partiklar, t.ex. kvarkar med massa och rörelseenergi. De skapade kvarkarna bildas djupt inne i processen, mycket nära varandra men med oerhört hög separationshastighet. Det är just en sådan situation som kan beräknas på grund av den asymptotiska friheten i QCD.

När de bildade kvarkarna kommit längre från varandra kommer de visserligen att påverkas av allt starkare krafter, som till slut gör att nya kvark-antikvarkpar bildas och en skur av partiklar uppstår i den ursprungliga kvarkens respektive antikvarkens riktning. Men processen innehåller ett "minne" av den första asymptotiskt fria delen, som kan beräknas och ger ett värde för sannolikheten för uppkomsten av dessa två-skurshändelser som stämmer med observationerna.

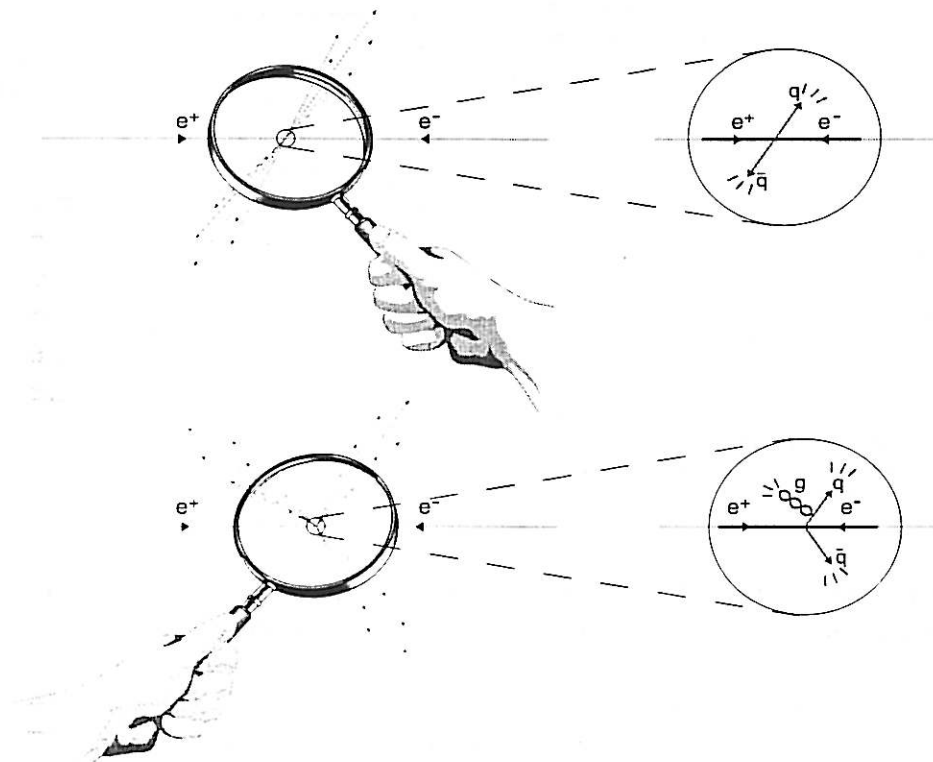


Fig. 3. Händelser med två eller tre skurar av partiklar som observerats vid kollisioner mellan elektroner och positroner. I förstoringen syns tolkningen i den asymptotiskt fria teorin QCD, som också tillåter noggranna beräkningar av sannolikheten för respektive händelse. De sannolikheterna stämmer mycket bra med uppmätta data (e^+ = elektron, e^- = positron, q = kvark, $\bar{q}$ = antikvark, g = gluon)

Kanske ännu mer övertygande är de händelser med tre skurar, som upptäcktes vid acceleratoren DESY i Hamburg i slutet av 1970-talet och som framgångsrikt kan tolkas som att en gluon strålar iväg från kvarken eller antikvarken (fig. 3).

Den asymptotiska frihet hos QCD som årets pristagare upptäckte gjorde att fysikerna fick en förklaring till ett fenomen som man hade observerat flera år tidigare vid acceleratoren i Stanford och som gav Friedman, Kendall och Taylor Nobelpriset 1990: de laddade beståndsdelarna i protonen beter sig som fria partiklar när man stöter till dem så att de får hög energi. Genom att summera hur stor del av protonens rörelsemängd som utgjordes av de laddade beståndsdelarna, kvarkarna, såg man dessutom att ungefär hälften var något annat – gluoner.

Kan naturkrafterna förenas?

Det kanske mest fantasieggande med den asymptotiska friheten i QCD är att den öppnar ett fönster mot en framtida möjlig förenig av naturkrafterna. Genom att undersöka hur den elektromagnetiska, den svaga och den starka kopplingskonstanten varierar med energin ser man att de nästan – men inte riktigt – går ihop och får samma värde vid en hög energi. Om de går ihop kan man anta att de tre växelverkningskrafterna förenas till en enda – en gammal dröm bland fysiker som vill skriva naturens lagar på enklast möjliga språk (fig. 4).

Men det behövs en modifikation av standardmodellen för att drömmen om förenig av naturkrafterna ska kunna besannas. En möjlighet är att införa antagandet om att det finns

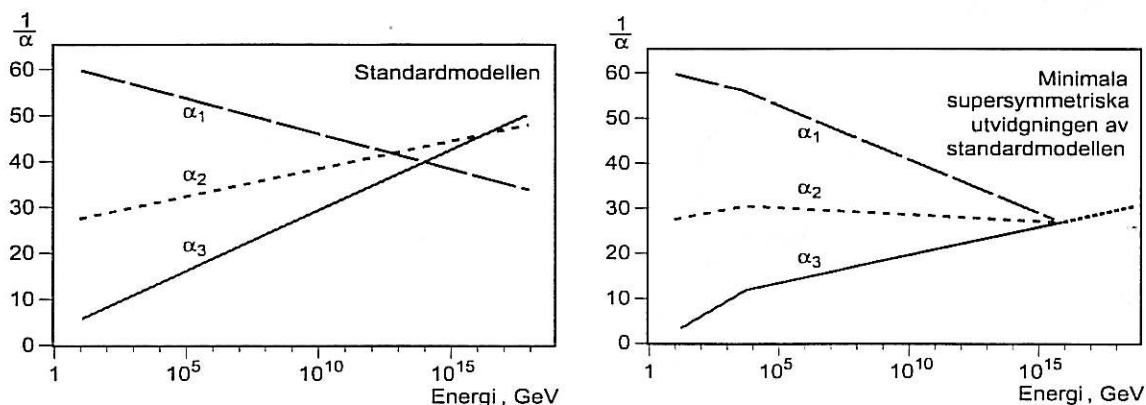


Fig. 4. Löpande kopplingskonstanter i standardmodellen (t.v.) och med supersymmetri (t.h.). De tre kurvorna, som visar det inverterade värdet av kopplingskonstanten för de tre fundamentala krafterna skär inte varandra i samma punkt i standardmodellen, men gör det i den supersymmetriska utvidgningen, om de supersymmetriska partiklarna inte är mycket tyngre än ungefär 1 TeV/c². Är detta en föraning om att supersymmetri kommer att hittas vid nästa accelerator, LHC vid CERN, eller är det bara en slump?

nya partiklar, supersymmetriska partiklar, som inte har högre massa än att deras existens kan undersökas vid partikelacceleratorn LHC (Large Hadron Collider) som just nu byggs vid CERN i Genève.

Om supersymmetri skulle upptäckas innebär det samtidigt ett starkt stöd för strängteorierna som även kan förena gravitationen med de andra tre krafterna. Standardmodellen måste också utvidgas för att ta hand om de nyligen funna egenskaperna hos neutriner – som har visat sig ha en massa skild från noll. Dessutom kanske hittills svårförståeliga mysterier i kosmologin kan få sin förklaring, t.ex. den mörka materia som tycks dominera ute i rymden. Oavsett hur det går med detta står det klart att den fantastiska och oväntade upptäckten av asymptotisk frihet i QCD (fig. 5) på ett bestående sätt förändrat vår bild av hur naturkrafterna fungerar.

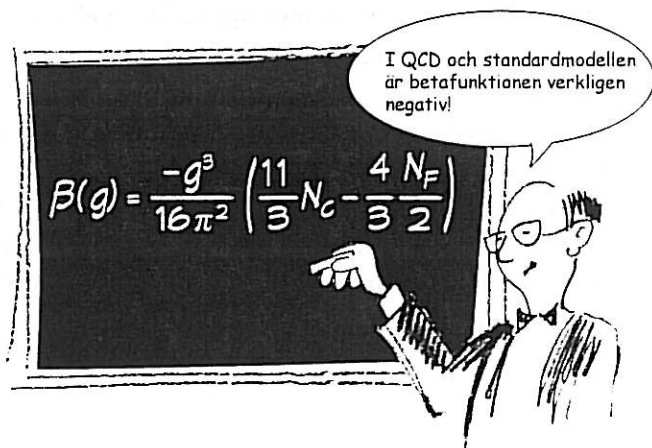


Fig. 5. Formeln som beskriver pristagarnas upptäckt. Här är:
 g : kopplingskonstanten
 N_c : antalet färger (= 3 i QCD)
 N_F : antalet kvarkar (= 6 i standardmodellen)

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

På Nobelprisens hemsida, www.nobelprize.org finns mer information om årets priser. Där kan man bland annat se presskonferensen och en intervju med en ämnesexpert som webb-TV. Där finns också en mer avancerad text som mest vänder sig till forskare.

Litteratur:

Advanced information on the Nobel Prizes in Physics 2004, The Royal Swedish Academy of Sciences:
www.nobelprize.org/physics/laureates/2004/phyadvo4.pdf

QCD Made Simple, Physics Today August 2000, p. 22

F. Wilczek: C. Davies: Joining up the dots with the strong force, CERN Courier June 2004, p. 23

The W and Z at LEP, CERN Courier May 2004, p. 21

C. Sutton and P. Zerwas

Lattice Quantum Chromodynamics Comes of Age, Physics Today February 2004, p. 45

C De Tar and S. Gottlieb

In search of the ultimate building blocks, Cambridge University Press 1997

G. 't Hooft

Länkar

www.kva.se/KVA_Root/swe/awards/nobel/nobelprizes/press/phyreado4.asp

www.superstringtheory.com

www.all-science-fair-projects.com/science_fair_projects_encyclopedia/strong_nuclear_force

www.particleadventure.org/particleadventure

<http://hands-on-cern.physto.se>

<http://nobelprize.org/physics/articles/brink/index.html>

PRISTAGARNA

DAVID J. GROSS

Institute for Theoretical Physics
Kohn Hall, 1219
University of California
Santa Barbara, CA 93106
USA

www.kitp.ucsb.edu/community/itpbios/david.html

Amerikansk medborgare. Född 1941 (63 år) i Washington, DC, USA. Doktorsgrad i fysik 1966 vid University of California, Berkley. Professor vid Kavli Institute for Theoretical Physics vid University of California, Santa Barbara, USA.

H. DAVID POLITZER

California Institute of Technology,
High Energy Physics
452-48
Pasadena, CA 91106-3368
USA

www.theory.caltech.edu/people/politzer

Amerikansk medborgare. Doktorsgrad i fysik 1974 vid Harvard University. Professor vid Department of Physics, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena CA, USA.

FRANK A. WILCZEK

Massachusetts Institute of Technology,
Center for Theoretical Physics
77 Massachusetts Ave. 6-305
Cambridge, MA 02139
USA

web.mit.edu/physics/facultyandstaff/faculty/frank_wilczek.html

Amerikansk medborgare. Född 1951 (53 år) i Queens, NY, USA. Doktorsgrad i fysik 1974 vid Princeton University. Professor vid Department of Physics vid Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge MA, USA.

