

6. Summary in Swedish – Populärvetenskaplig sammanfattning

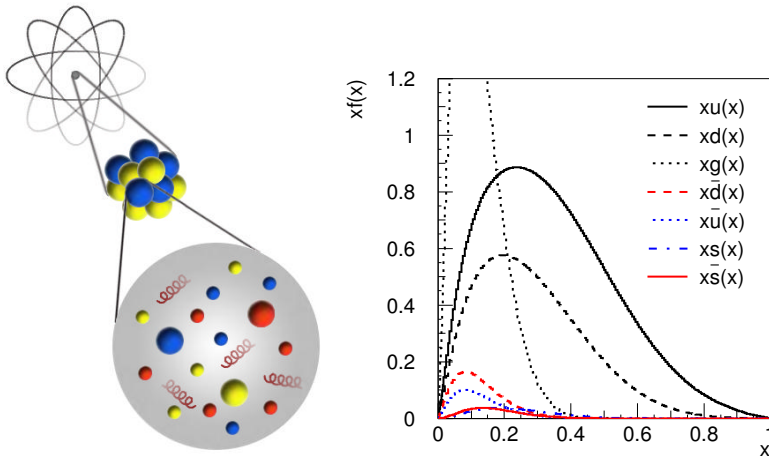
Kvarkfördelningar och produktion av laddade Higgs-bosoner – Studier av protonens struktur och ny fysik

Vetenskapen om materiens grundläggande beståndsdelar har under de senaste hundra åren gjort fantastiska framsteg. Inte nog med att vi nu vet att allt är uppbyggt av atomer med en radie på ungefär 1/10 000 000 millimeter; atomerna består i sin tur av en tung, positivt laddad kärna som är ännu mycket mindre (dess diameter är c:a 1/100 000 av diametern hos en atom) omgiven av lätta, negativt laddade elektroner. Vi har lyckats tränga in även atomkärnan, och funnit att den består av kärnpartiklar: protoner, som är positivt laddade med exakt motsatt laddning mot elektronen, och neutroner, som är oladdade. I epokgörande experiment vid Stanfords linjäraccelerator i slutet av 1960-talet kunde man slutligen visa att även protonerna består av mindre partiklar. I dessa experiment använde man elektroner som accelererats till hastigheter nära ljusets för att försöka sönderdela själva protonen.

Det visade sig att det inte går att dela upp protonen i dess beståndsdelar, men man kunde ändå se att den består av ännu mindre partiklar. Dessa partiklar kom att kallas *kvarkar*, och har en laddning som mäts i tredjedelar av elektronens laddning. Protonen består av två uppkvarkar och en nerkvark, medan neutronen består av en uppkvark och två nerkvarkar. Märkligt nog kan dessa partiklar bara existera "inlåsta" i t.ex. protoner och neutroner. Därför kan man alltså inte i egentlig mening dela en proton och få ut kvarkarna som bygger upp den. Vi vet inte hur små kvarkarna egentligen är, men genom experiment har man kunnat räkna ut att deras diameter i alla fall är mindre än 1/1000 av protonens, och såvitt man vet är såväl kvarkar som elektroner verkligt elementära (alltså odelbara) partiklar.

Kvarkfördelningar inuti protonen

Ett av de två projekt som jag har arbetat med för den här avhandlingen handlar om att försöka förstå hur kvarkarna är fördelade inuti protonen (artiklarna I-IV). Vid DESY-laboratoriet utanför Hamburg kolliderar man protoner och elektroner som accelererats till mycket höga hastigheter. Genom att analysera hur elektronerna sprids efter kollisionen kan man få reda på hur stor del av



Figur 6.1: Till vänster illustreras en proton med dess beståndsdelar: tre *valenskvarkar* som bestämmer protonens laddning, en mängd *gluoner*, som är bärare av den starka kraften och binder samman kvarkarna (visas som spiralfjädrar), och dessutom *sjökvarkar*, kvarkar och antikvarkar som existerar som kvantfluktuationer i protonen. Till höger ett diagram som visar de olika kvarkarnas och gluonernas energifördelningar i protonen, enligt den modell vi utvecklat (från artikel III). Variabeln x står för andel av protonens energi. Figurer av författaren.

protonens rörelseenergi som de olika typerna av kvarkar har. Kunskap om dessa kvarkfördelningar är nödvändig för att man ska kunna förutsäga protoners beteende i framtida kollisionsexperiment. I allmänhet brukar man använda en mer eller mindre godtycklig funktion för kvarkfördelningarna, med vissa parametrar som anpassas till data.

Vi har istället utarbetat en fysikaliskt motiverad modell för dessa kvarkfördelningar, se figur 6.1. Modellen bygger på kvantfluktuationer i protonen, och kan hjälpa oss att förstå hur det kommer sig att vissa kvarkfördelningar uppvisar karakteristiska asymmetrier. Vi har bl.a. använt modellen för att förutsäga en asymmetri i protonen mellan s.k. särkvarkar (som är kusiner till nerkvarkarna) och deras antipartiklar. Den asymmetrin är särskilt intressant för att den kan hjälpa till att förklara en avvikelse från vad som förutsagts inom Standardmodellen, som mättes i neutrinoexperimentet NuTeV vid Fermilab utanför Chicago.

Standardmodellen

Standardmodellen är vår hittills bästa teori för materiens minsta beståndsdelar. Det är en mycket framgångsrik teori, som lyckats beskriva alla elementarpartiklar vi känner till från experiment. Dessa partiklar är dels kvarkar, som är av sex sorter, *upp-*, *ner-*, *sär-*, *charm-*, *botten-* och *toppkvark*, och dels

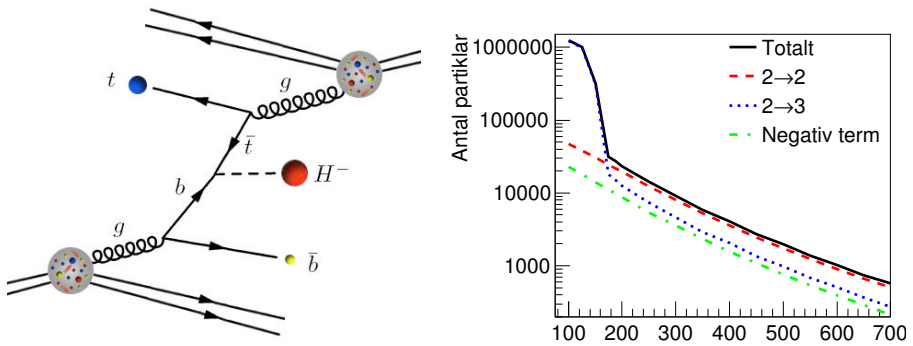
leptoner, som också är av sex olika slag: *elektron*, *myon* och *tauon* samt en *neutrino* för var och en av dessa tre. Standardmodellen beskriver också de krafter, eller *växelverknningar*, som verkar mellan dessa partiklar, och som förmedlas mellan partiklarna med hjälp av s.k. *bosoner*. De krafter vi känner till är den elektromagnetiska kraften, den svaga och den starka kraften samt gravitationen. Gravitationen har ännu inte kunnat beskrivas i samma formalism som de andra krafterna, och är därför egentligen inte en del av Standardmodellen. Detta är emellertid inget problem för partikelfysiken eftersom gravitationen är oerhört mycket svagare än de andra krafterna när det handlar om så små och lätta partiklar.

Higgspartikeln ger massa

En intressant aspekt hos Standardmodellen är att alla fundamentala partiklar enligt denna teori egentligen är masslösa. För att partiklarna ska få massa krävs någon speciell mekanism. Det enklaste sättet att åstadkomma detta, och det sätt som används i Standardmodellen, är att man inför en mycket speciell partikel som kallas för Higgspartikeln. Denna partikel har egenskapen att den förändrar vakuum så att andra partiklar får massa då de passerar genom det. Det finns dock problem med denna bild. Ett ganska uppenbart sådant är att vi ännu inte lyckats hitta Higgspartikeln, trots intensivt letande såväl vid LEP-acceleratorn vid CERN-laboratoriet utanför Genève som vid Fermilabs accelerator Tevatron. Standardmodellen kan inte förutsäga Higgspartikelns massa, bara att den måste vara under en viss övre gräns på ungefär 700 gånger massan hos en proton. Dock kan man göra anpassningar av alla parametrar i Standardmodellen och på så sätt få fram vilken massa Higgspartikeln borde ha för att teorin ska beskriva experimentresultat, och då får man mycket lägre värden för massan. Bäst anpassning till de experimentella data får man om Higgspartikeln har en massa som är så låg att man redan borde ha sett den vid LEP.

Utvidningar av Standardmodellen

Higgspartikelns massa ställer dock till även andra problem. I Standardmodellen finns nämligen mekanismer som gör att denna massa borde vara lika stor som den s.k. Planckmassan, som är helt ofattbart mycket större än en protonmassa (Planckmassan kan skrivas som en etta med 19 nollor efter, gånger protonmassan). Samtidigt kräver alltså teorin att den är mindre än ungefär 700 gånger protonmassan. Denna motsägelse kan bara lösas om det finns någonting, ytterligare krafter och/eller partiklar, som "skyddar" Higgsmassans låga värde. En teori som förutsäger ett sådant skydd är *supersymmetri*. Supersymmetri innebär en utvidgning av själva rumtidens symmetri. Enligt denna teori borde varje materierpartikel (fermion, d.v.s. kvark eller lepton) ha en motsvarighet som påminner mer om en växelverkanspartikel (en boson), och vice versa. Denna andra partikel, som



Figur 6.2: Till vänster visas produktion av en laddad Higgspartikel tillsammans med en topp- och en botten-kvark i en proton-proton-kollision. Två gluoner från protonerna kolliderar och producerar topp- och bottenkvarkar, som i sin tur producerar en laddad Higgspartikel, medan resterna av protonerna fortsätter framåt. Till höger ett diagram (från artikel VI) över antalet laddade Higgspartiklar som kan komma att produceras vid LHC under första året, som funktion av partikelns massa. De olika kurvorna motsvarar olika produktionsbidrag. Observera att bara en liten andel av dessa partiklar kommer att kunna observeras. Figurer av författaren.

kallas superpartner, borde ha i övrigt identiska egenskaper, inklusive samma massa, som den vanliga partikeln. Så kan det dock inte vara, eftersom vi då redan borde ha sett superpartners till t.ex. elektronen och fotonen. Dock kan man tänka sig att supersymmetrin bara är en ungefärlig symmetri, och de supersymmetriska partiklarna kan då ha massor som är mycket högre än de vanliga partiklarnas massor. För att teorin fortfarande ska åstadkomma det den var tänkt för, nämligen skydda Higgsmassan från att bli för stor, krävs då att de supersymmetriska partiklarnas massor inte är alltför stora; de borde vara högst kring tusen protonmassor. Det finns också andra idéer om hur man skulle kunna kringgå problemen med Higgsmassan, men gemensamt för alla sådana teorier är att de uppvisar nya partiklar med massor under tusen protonmassor, partiklar som kommer att kunna upptäckas vid *LHC*.

LHC och nya partiklar

LHC, vilket står för *Large Hadron Collider*, är en 27 km lång proton-accelerator som just nu håller på att byggas i den tunnel där tidigare LEP-acceleratorn fanns på CERN utanför Genève. Detta är ett enormt projekt, som inkluderar tusentals partikelfysiker från hela världen. Vid LHC kommer man att återskapa en miljö som inte existerat sedan en bråkdels sekund efter Big Bang, ursmällen vid universums skapelse. Där kommer man (med största sannolikhet) att kunna se hur man ska utvidga Standardmodellen. De energier man kommer upp till i LHC kommer nämligen att motsvara 14000 protonmassor, vilket innebär att det finns gott

om energi för att skapa partiklar med massor under tusen protonmassor. Det är emellertid oerhört komplicerat att urskilja ny fysik vid LHC, eftersom dessa nya, tunga partiklar är extremt kortlivade och snabbt sönderfaller till vanliga Standardmodellpartiklar. Det kommer också att skapas enorma mängder vanliga partiklar vid kollisionerna, och man måste därför vara mycket noggrann för att kunna urskilja den nya fysiken från denna nästan ogenomträngliga bakgrund.

Det andra projekt som jag har arbetat med (artiklarna V-VII) handlar om att förbättra förutsägelsena för hur man ska kunna hitta en typ av partikel som kallas *laddad Higgspartikel* (eller *Higgsboson*) och är en elektriskt laddad kusin till den vanligen neutrala Higgspartikeln. Denna partikel förutsägs i såväl supersymmetri som andra utvidgningar av Standardmodellen. Eftersom det inte finns någon liknande partikel i den vanliga Standardmodellen, vore det ett tydligt tecken på ny fysik om man skulle hitta en sådan vid LHC. Genom att undersöka hur den förhåller sig till andra partiklar i fråga om massa och växelverkningar kommer man också kunna säga något om vilken typ av ny fysik det är som vi ser.

De viktigaste produktionsprocesserna för laddade Higgspartiklar är då den produceras tillsammans med en topp- och en botten-kvark (se figur 6.2). Vi har utvecklat en metod för att kombinera de två av dessa processer som är dominerande, på ett sådant sätt att vi undviker dubbelräkning av bidrag till produktionen. Därmed har vi åstadkommit en beskrivning av produktionen av laddade Higgspartiklar som fungerar oavsett vilka riktningar och hastigheter partiklarna har.

Båda de projekt jag har jobbat med har alltså handlat om att på olika sätt förbättra vår förståelse av hur världen fungerar på dess mest fundamentala nivåer.